

У Віснику розглянуто питання взаємодії суспільства і природи, раціонального використання та охорони природного середовища. Відображено результати досліджень у галузі геології, геохімії, гідрогеології, географії, екології та соціально-економічної географії.

Для науковців, фахівців і викладачів вищих закладів освіти.

В Вестнике рассмотрены вопросы взаимодействия общества и природы, рационального использования и охраны природной среды. Отражены результаты исследований в области геологии, геохимии, гидрогеологии, географии, экологии и социально-экономической географии. Для научных работников, специалистов и преподавателей ВУЗов.

Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology" is devoted to the modern studies in the field of geology, geochemistry, hydrogeology, ecology and social and economic geography.

"Visnyk" is intended for scientists, specialists and high school lecturers.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 12 від 25.11.2019 р.).

Редакційна колегія: д. геогр. н., проф. *К. А. Немець* (голова редколегії); *О. В. Чуєнко* (відповідальний секретар); д. геол.-мін. н., проф. *І. В. Височанський*; д. геогр. н., проф. *С. В. Костриков*; д. геогр. н., проф. *О. М. Крайнюков*; д. геол.-мін. н., проф. *А. І. Лур'є*; д. геогр. н., проф. *А. Н. Некос*; д. геогр. н., проф. *Л. М. Немець*; д. геогр. н., проф. *В. А. Пересадько*; д. геол.-мін. н., проф. *В. Г. Суярко*; д. техн. н., проф. *І. М. Фик*; д. техн. н., проф. *І. Г. Черваньов* (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна); д. техн. н., проф. *В. С. Білецький* (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); д. геол.-мін. н., проф., член-кор. НАНУ *Е. Я. Жовинський* (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка); д. геол.-мін. н., проф. *В. М. Загітко* (Інститут геології Київського національного університету імені Тараса Шевченка); д. фіз.-мат. н., проф. *Г. Д. Коваленко* (директор Інституту фізики високих енергій і ядерної фізики ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України).

Іноземні члени редколегії: д. географії, проф. *О. С. Володченко* (Інститут картографії Дрезденського технічного університету, Німеччина); д. геогр. н., проф., зав. каф. географії, геоєкології та безпеки життєдіяльності *А. Г. Корнілов* (Белгородський державний національний дослідницький університет «БелГУ», РФ); д. геології, проф., декан факультету геології *Ахмет Сасмаз* (Фіратський університет, Туреччина); д. географії, проф., завідувач кафедри географії і туризму *С. А. Станайтіс* (Литовський університет освітніх наук, Литва); проф. кафедри геології факультету природничих наук *Адель Хегаб* (Асьютський Університет, Єгипет); декан факультету гірничої справи, екології, керування процесами та геотехнології, проф. *Мичал Челар* (Кошицький Технічний університет, Словаччина).

«Вісник» є фаховим виданням у галузі геології і географії (наказ МОН України № 1328 від 21.12.2015 р.) та входить до наступних міжнародних баз даних: *WorldCat*, *BASE* (Bielefeld Academic Search Engine), *ResearchBible*, *TIB/UB* (German National Library of Science and Technology, University Library Hannover), *SBB* (Staatsbibliothek zu Berlin), *Ulrich's Periodicals Directory*, *EBSCO*, *Index Copernicus*, *Web of Science* (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Адреса редакційної колегії: Україна, 61022, Харків, майдан Свободи, 4, ХНУ імені В. Н. Каразіна, факультет геології, географії, рекреації і туризму, тел. (057) 707-53-56;

e-mail: geoeco-series@karazin.ua;

сайт: <http://periodicals.karazin.ua/geoeco>, <http://journals.uran.ua/geoeco>

Тексти статей представлені у авторській редакції. Автори несуть повну відповідальність за зміст статей, а також добір, точність наведених фактів, цитат, власних імен та інших відомостей.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21574-11474 Р від 20.08.2015.

EDITORIAL BOARD

of "Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University,
series "Geology. Geography. Ecology"

Niemets Kostiantyn – Chairman of the Editorial Board, Doctor of Sciences (Geography), Professor of the Department of Human Geography and Regional Studies, School of Geology, Geography, Recreation and Tourism (SGGRT), V. N. Karazin Kharkiv National University (V. N. Karazin KhNU).

Chuenko Alexander – Executive Secretary, Head of interdepartmental laboratory for the study of rocks, minerals and fossil organisms, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Vysochansky Ilarion – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Geology, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Kostrikov Sergiy – Deputy Chairman of the Editorial Board, Doctor of Sciences (Geography), Professor of the Human Geography and Regional Studies, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Kraynyukov Oleksiy – Doctor of Sciences (Geography), Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Education, School of Ecology, V. N. Karazin KhNU.

Lurye Anatoliy – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy) Professor of the Department of Hydrogeology, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Nekos Alla – Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Ecological Safety and Ecological Education, School of Ecology, V. N. Karazin KhNU.

Niemets Liudmyla – Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of Department of the Human Geography and Regional Studies, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Peresadko Vilina – Doctor Sciences (Geography), Professor of the Department of Physical Geography and Cartography, Dean of SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Suyarko Vasil' – Deputy Chairman of the Editorial Board, Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Mineralogy, Petrography and Minerals, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Fyk Ilyia – Doctor of Sciences (Technics), Professor, Head of the Department of Mineralogy, Petrography and Minerals, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Chervanyov Igor – Doctor of Sciences (Technics), Professor, Professor of the Department of Physical Geography and Cartography, SGGRT, V. N. Karazin KhNU.

Biletsky Volodymyr – Doctor of Sciences (Technics), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv.

Zhovinsky Eduard – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor, Corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv.

Zagnitko Vasil' – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor, Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv.

Kovalenko Grygory – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Director Institute of high-energy physics and nuclear physics NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" National Academy of Sciences Ukraine, Kharkiv.

INTERNATIONAL COUNCIL

Wolodtschenko Alexander – Doctor of Sciences (Geography), Professor, Institute of Cartography, Dresden University of Technology (Germany).

Kornilov Andriy – Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geography, Geo-ecology and Life safety, Belgorod State National Research University (Russia).

Ahmet Sasmaz – Doctor of Sciences (Geology), Professor, Head of Geology Department, Firat University (Turkey).

Stanaitis Saulius – Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geography and Tourism, Faculty of Science and Technology, Lithuanian University of Educational Sciences (Lithuania).

Adel Ali Abd Allah Awadien Hegab – Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Assiut University (Egypt).

Michal Cehlár – Professor, Dean of Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnology, Technical University of Košice (Slovakia).

З М І С Т

ГЕОЛОГІЯ

Anikeyev S. G., Bagriy S. M., Hablovskiy V. B.

IMITATION MODELLING TECHNOLOGY FOR GRAVITY INVERSION CASES 8

Бартацук О. В.

ГОРИЗОНТАЛЬНІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ГЕОМАС У КОНТИНЕНТАЛЬНИХ
РИФТОГЕННИХ ГЕОСТРУКТУРАХ (НА ПРИКЛАДІ ДНІПРОВСЬКО-
ДОНЕЦЬКОГО ПАЛЕОРИФТУ). ЧАСТИНА 3. СИСТЕМНА ОРГАНІЗАЦІЯ
ПОСТРИФТОВИХ РЕЇДНИХ ДЕФОРМАЦІЙ 26

Безродна І. М., Антонюк В. В., Олійник О. В.

АНАЛІЗ АНІЗОТРОПІЇ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ
(НА ПРИКЛАДІ РОДОВИЩ ПРИОСЬОВОЇ ЗОНИ ДДЗ) 41

Генералова Л. В., Степанов В. Б., Білик Н. Т., Сливко Є. М.

СЕРПЕНТИНИ – ІНДИКАТОРИ МЕТАМОРФІЧНИХ І ГЕОДИНАМІЧНИХ
ПЕРЕТВОРЕНЬ МЕЗОЗОЙСЬКИХ ПЕРИДОТИТІВ
ВНУТРІШНІХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ 52

Дернов В. С., Удовиченко Н. І.

К ПАЛЕОБОТАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ
МОСПИНСКОЙ СВИТЫ (СРЕДНИЙ КАРБОН, ДОНБАСС) 67

Рудаков Д. В., Тимошук В. І., Глущенко Н. О.

ВПЛИВ ФІЛЬТРАЦІЇ ЛУЖНИХ РОЗЧИНІВ НА ДЕФОРМАЦІЙНІ
ПРОЯВИ В ҐРУНТОВІЙ ОСНОВІ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД 83

Тунік О. В., Огар В. В.

ВТОРИННІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД НИЖНЬОГО
КАРБОНУ НА ВЕЛИКИХ ГЛИБИНАХ (НА ПРИКЛАДІ ДЕЯКИХ
РАЙОНІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ) 95

Chushkina I. V., Pikarenia D. S., Orlinska O. V., Maksymova N. M.

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE NPEMFE GEOPHYSICAL
METHOD TO SOLVE ENGINEERING AND GEOLOGICAL PROBLEMS 109

ГЕОГРАФІЯ

Kovalchuk I. P., Mykytchyn O. I., Kovalchuk A. I.

GEOINFORMATION MODELING OF ANTROPOGENIC
TRANSFORMATION OF THE BASIN GEOSYSTEMS
(CASE STUDY OF DNISTER'S RIGHT-HAND TRIBUTARIES)..... 124

Niemets L. M., Husieva N. V., Pohrebskyi T. H., Bartosh O. V., Lohvynova M. O.

INTEGRATION OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS
OF UKRAINE: REALITIES, PROBLEMS, PERSPECTIVES 140

Ободовський О. Г., Лук'янець О. І., Москаленко С. О., Корнієнко В. О.

УЗАГАЛЬНЕННЯ СЕРЕДНЬОГО РІЧНОГО СТОКУ ВОДИ РІЧОК
ВІДПОВІДНО ДО ГІДРОГРАФІЧНОГО РАЙОНУВАННЯ УКРАЇНИ 158

Syvyj M. Ya., Lisova N. O., Havryshok B. B.

THE REGIONALIZATION OF TERRITORIAL COMBINATIONS
OF MINERAL DEPOSITS AND MINING TERRITORIES OF UKRAINE 171

Shevchenko O. G., Snizhko S. I., Matviienko M. O.

SIMULATION OF THE THERMAL COMFORT CONDITIONS
OF URBAN AREAS: A CASE STUDY IN KYIV 186

ЕКОЛОГІЯ

Крайнюков О. М., Якушева А. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ CERIODAPHNIA
AFFINIS LILLJEBORG У КОРОТКОСТРОКОВОМУ ВИПРОБУВАННІ ПРИ
ВСТАНОВЛЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ СТАНДАРТІВ ЯКОСТІ ВОДИ В УКРАЇНІ 199

Levoniuk S. M., Samoilov V. V., Udalov I. V., Petik V. O.

ECOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTORS
OF QUALITATIVE COMPOSITION DESTABILIZATION
OF DRINKING GROUNDWATER WITHIN THE CENTRAL PART OF DDAB 207

Савенець М. В., Дворецька І. В., Надточій Л. М.

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО
ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКА SENTINEL-5P 221

Splodytel A. O.

LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL
CONDITION OF ENVIRONMENTAL PROTECTION TERRITORIES 234

Khobotova E. B., Larin V. I., Hraivoronska I. V.

EVALUATION OF SOIL CONTAMINATION BY
HEAVY METALS IN THE ZONE OF TPP INFLUENCE 243

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ,

ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ» 254

C O N T E N T

GEOLOGY

<i>Anikeyev Sergiy, Bagriy Sergiy, Hablovskiy Bohdan</i>	
IMITATION MODELLING TECHNOLOGY FOR GRAVITY INVERSION CASES	8
<i>Bartashchuk Oleksii</i>	
HORIZONTAL MOVEMENTS OF GEOMASS IN CONTINENTAL RIFTOGENIC GEOSTRUCTURES (ON THE EXAMPLE OF THE DNIEPER-DONETS PALEORIFT). PART 3. SYSTEMIC ORGANIZATION OF POST-RIFT REID DEFORMATIONS	26
<i>Bezrodna Iryna, Antoniuk Vitalii, Oliinyk Oleh</i>	
ANALYSIS OF FILTRATION AND ELECTRICAL PROPERTIES ANISOTROPY OF TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS (FOR DDB AXIAL ZONE RESERVOIRS)	41
<i>Heneralova Larysa, Stepanov Volodymyr, Bilyk Nataliia, Slyvko Yevheniia</i>	
SERPENTINES AS THE INDICATORS OF MESOZOIC PERIDOTITES METAMORPHIC AND GEODYNAMIC TRANSFORMATIONS IN THE INTERNAL UKRAINIAN CARPATHIANS	52
<i>Dernov Vitalii, Udovichenko Nikolai</i>	
ON THE PALEOBOTANICAL CHARACTERISTIC OF THE MOSPINO FORMATION (MIDDLE CARBONIFEROUS, DONETS BASIN)	67
<i>Rudakov Dmytro, Tymoschuk Vasyl, Hlushchenko Nataliia</i>	
THE EFFECT OF ALKALINE SOLUTION SEEPAGE ON DEFORMATION APPEARANCES IN THE SOIL FOUNDATION OF ENGINEERING STRUCTURES	83
<i>Tunik Olena, Ohar Viktor</i>	
SECONDARY ALTERATIONS OF DEEP BURIED LOWER CARBONIFEROUS TERRIGENOUS ROCKS IN SOME AREAS OF THE DNIEPER-DONETS BASIN	95
<i>Chushkina Iryna, Pikarenia Dmytro, Orlinska Olha, Maksymova Nataliia</i>	
EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE NPEMFE GEOPHYSICAL METHOD TO SOLVE ENGINEERING AND GEOLOGICAL PROBLEMS	109

GEOGRAPHY

<i>Kovalchuk Ivan, Mykytchyn Oksana, Kovalchuk Andrii</i>	
GEOINFORMATION MODELING OF ANTROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE BASIN GEOSYSTEMS (CASE STUDY OF DNISTER RIGHT TRIBUTARIES)	124
<i>Niemets Liudmyla, Husieva Nataliia, Pohrebskyi Taras, Bartosh Oksana, Lohvynova Maryna</i>	
INTEGRATION OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS OF UKRAINE: REALITIES, PROBLEMS, PERSPECTIVES	140
<i>Obodovsky Alexander, Lukyanets Olga, Moskalenko Stanislav, Kornienko Victoria</i>	
GENERALIZATION OF THE AVERAGE ANNUAL WATER RUNOFF OF THE RIVERS ACCORDING TO THE HYDROGRAPHIC ZONING OF UKRAINE	158
<i>Syvyj Myroslav, Lisova Nataliia, Havryshok Bohdan</i>	
THE REGIONALIZATION OF TERRITORIAL COMBINATIONS OF MINERAL DEPOSITS AND MINING TERRITORIES OF UKRAINE	171

Shevchenko Olga, Snizhko Sergiy, Matviienko Mariia

SIMULATION OF THE THERMAL COMFORT CONDITIONS OF URBAN AREAS: A CASE STUDY IN KYIV	186
--	-----

ECOLOGY

Krainiukov Oleksii, Yakusheva Anastasiia

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING CERIODAPHNIA AFFINIS LILLJEBORG (CRUSTACEA) IN A SHORT-TERM TEST WHILE SETTING ECOLOGICAL QUALITY STANDARDS IN UKRAINE	199
---	-----

Levoniuk Serhii, Samoilov Vitaliy, Udalov Igor, Petik Viacheslav

THE ECOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTORS OF QUALITATIVE COMPOSITION DESTABILIZATION OF DRINKING GROUNDWATER WITHIN THE CENTRAL PART OF DDAB	207
---	-----

Savenets Mykhailo, Dvoretzka Iryna, Nadtochii Liudmyla

CURRENT STATE OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE BASED ON SENTINEL-5P SATELLITE DATA	221
--	-----

Splodytel Anastasiia

LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL CONDITION OF PROTECTED TERRITORIES	234
--	-----

Khobotova Elina, Larin Vasyl, Hraivoronska Inna

EVALUATION OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN THE ZONE OF TPP INFLUENCE	243
--	-----

REQUIREMENTS TO THE MATERIALS SUBMITTED TO THE “VISNYK OF V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY”	254
---	------------

ГЕОЛОГІЯ

UDC 553.661.071.550.812.14(477.83)

Sergiy Grygorovych Anikeyev,

PhD (Geology), Associate Professor, Department of Petroleum Geophysics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine,
e-mail: anikeyevsergiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7377-7326>;

Sergiy Mykhailovych Bagriy,

PhD (Geology), Department of Geotechnogenic Safety and Geoinformatics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
e-mail: gbg2020@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1190-6222>;

Bohdan Bohdanovych Hablovskiy,

PhD (Geology), Department of Petroleum Geophysics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
e-mail: bohdanhablovskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3502-5550>

IMITATION MODELLING TECHNOLOGY FOR GRAVITY INVERSION CASES

С. Г. Анікеєв, С. М. Багрій, Б. Б. Габльовський. ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ГРАВІРОЗВІДКИ. Гравіроздавду спрямовано на пошуки і розвідку корисних копалин на тлі досліджень будови геологічного розрізу. Завданням кількісної інтерпретації гравіметричних матеріалів, у якій використовуються методи рішення прямих та обернених задач, є моделювання гравітаційного поля (пряма задача) та моделювання густинної будови геологічних середовищ (обвернена задача). Важливими ознаками методів моделювання густинної будови складних геологічних середовищ є геологічна змістовність, узгодженість з апіорними матеріалами та підпорядкованість моделювання геологічним гіпотезам. Для аналізу методів моделювання за цими ознаками пропонується імітаційне моделювання. У статті викладено методуку імітаційного гравіметричного моделювання, яку засновано на побудові неформальної послідовності еквівалентних рішень. Призначенням імітаційного моделювання є дослідження властивостей обернених задач гравіроздавду у загальній постановці, а також оцінювання ступені детальності і достовірності методуку та технологій гравітаційного моделювання, що претендують на ефективне вирішення геологічних завдань. На прикладах густинного і структурного імітаційного випробування методуку неформальної послідовності еквівалентних рішень та її комп'ютерних технологій показано, що комплексна інтерпретація даних буріння, сейсмороздавду та гравіроздавду надає можливість детального відтворення будови геологічних середовищ у геогустинних моделях. Досліджено шляхи підвищення достовірності гравітаційного моделювання. Зокрема визначено, що кращим наближенням регіонального фону є нахилена площина, яка апроксимує спостережене поле сили тяжіння на ділянках площі досліджень, які більш детально вивчено. Підвищення достовірності результатів моделювання можна досягти за рахунок перебудови ближніх бокових зон у моделях структурного типу в інтерактивному процесі рішення структурних обернених задач гравіроздавду. Змістовність моделювання залежить від досвіду інтерпретатора, оскільки комп'ютерні технології рішення прямих та обернених задач гравіроздавду є лише інструментом інтерпретації.

Ключові слова: геологічний розріз, гравіроздавду, методука інтерпретації, обернена задача гравіроздавду, гравітаційне поле, моделювання, апіорна модель, еквівалентна модель, сейсмогеологічна модель, геогустинна модель.

С. Г. Анікеєв, С. М. Багрій, Б. Б. Габльовський. ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ГРАВІРОЗВІДКИ. Гравіроздавду призначена для пошуків і розвідки корисних копалин на основі досліджень будови геологічного розрізу. Завданням кількісної інтерпретації гравіметричних матеріалів, у якій використовуються методи рішення прямих та обернених задач гравіроздавду, є моделювання гравітаційного поля (пряма задача) та моделювання густинної будови геологічних середовищ (обвернена задача). Важливими ознаками методів моделювання густинної будови складних геологічних середовищ є геологічна змістовність, узгодженість з апіорними матеріалами та підпорядкованість моделювання геологічним гіпотезам. Для аналізу методів моделювання за цими ознаками пропонується імітаційне моделювання. В статті викладено методуку імітаційного гравіметричного моделювання, яку засновано на побудові неформальної послідовності еквівалентних рішень. Призначенням імітаційного моделювання є дослідження властивостей обернених задач гравіроздавду у загальній постановці, а також оцінювання ступені детальності і достовірності методуку та технологій гравітаційного моделювання, що претендують на ефективне вирішення геологічних завдань. На прикладах густинного і структурного імітаційного випробування методуку неформальної послідовності еквівалентних рішень та її комп'ютерних технологій показано, що комплексна інтерпретація даних буріння, сейсмороздавду та гравіроздавду надає можливість детального відтворення будови геологічних середовищ у геогустинних моделях. Досліджено шляхи підвищення достовірності гравітаційного моделювання. Зокрема визначено, що кращим наближенням регіонального фону є нахилена площина, яка апроксимує спостережене поле сили тяжіння на ділянках площі досліджень, які більш детально вивчено. Підвищення достовірності результатів моделювання можна досягти за рахунок перебудови ближніх бокових зон у моделях структурного типу в інтерактивному процесі рішення структурних обернених задач гравіроздавду. Змістовність моделювання залежить від досвіду інтерпретатора, оскільки комп'ютерні технології рішення прямих та обернених задач гравіроздавду є лише інструментом інтерпретації.

поскольку компьютерные технологии решения прямых и обратных задач гравиразведки являются лишь инструментом интерпретации.

Ключевые слова: геологический разрез, гравиразведка, методика интерпретации, обратная задача гравиразведки, гравитационное поле, моделирование, априорная модель, эквивалентная модель, сейсмологическая модель, плотностная модель.

Problem statement. The geophysical interpretation methodology effectiveness should be evaluated on test cases that are as close as possible to the real conditions of specific geological tasks solutions. Testing of the computer interpretation technologies on physical and geological models was called an imitation modelling by V. M. Strakhov. These models are close to real rocks properties distribution in the geological environment and physical fields. The meaningfulness and evaluation reliability degree of the geophysical method interpretation capabilities by imitation modeling depends on models proximity to the real geological situations and complexity of test tasks.

The maximum using of imitation modeling is the *methodological principle* of the theory and practice of geological interpretation of potential fields according to V.M. Strakhov. The imitation modeling must provide the correct work organization and the required volume of observations at the design stage; the evaluation of the interpretation result reliability and accuracy at the final stage.

Recent researches and publications analysis. Nowadays, the imitation modeling is used in insufficient scope in gravity prospecting, especially in substantiating of efficiency of gravity field interpretation technologies and modeling techniques, which are usually represented by straight sequence of steps or procedures (for example [1]). In the vast majority of cases, the technologies feasibility is confirmed by tests on simplified models [2 - 5 and others], or by demonstration of practical modelling results. Tests can be complicated by inputting of errors into the output data (potential fields) to confirm the solution stability of gravity inversion. But stability is an obvious consequence of the correct use of regularization. Experience shows that regularization has another, more significant purpose – achievement of geological meaningfulness solutions. A positive description example of the modeling method (in the frame of selection methods) is the work of Ye. H. Bulakh. It depends on the completeness of the initial data and geological tasks character [6].

Density modeling is an important tool for research the deep structure of geological environments [7-15 and others]. Modeling technologies are based on methods of solving direct and inverse gravity problems and are aimed at constructing geodensity models by optimal coordination of drilling, seismic data and other geological and geophysical materials with the Bouguer anomalies.

Principle differences in test modelling from imitation modeling are:

1. Models inadequacy (simplicity) to the geological situation.
2. Absence of correction on effect of regional fields and lateral zones.
3. Limitation on the complexity of geological tasks.

An important difference of imitation modeling is the adaptation and testing of approaching methods to the best results that is methods of managing of solving inverse problems process.

The research tasks and formulation of the purpose. The purpose of this work is to test gravimetric modelling technology, which aims to create the most reliable models of subsurface and density structure of geological environments or their changes in time. Testing is based on imitation modelling. Thus the following tasks are solved:

1. Analysis of the imitation gravimetric modelling method.
2. Evaluation of the reliability degree of gravimetric prediction method of the underground sulfur smelting dynamics.
3. Substantiation of high-precision gravity monitoring (detection and monitoring) of dangerous post-technogenic karst formations.
4. Possibility of gravimetric control of gas-water contact level on the hydrocarbons field.
5. Modelling of salt dome type structural section and subsalt reef formation study.

Purpose and Method of Imitation Gravity Modelling.

1. General Study of the Gravity Inversion (GI) Properties (on the Class of Continuous Functions). Due to the computer technologies development of GI solutions, pertaining to modeling of difficult-built geological environments, testing their capabilities should be implemented on a broad class - a class of densities or density borders geometry as coordinate functions.

2. Testing of Gravimetric Materials Interpretation Methods and Technologies as Tools for Building of Density Models of Geological Environments. The following questions are relevant: the conformity degree of their approximation constructions to the universality requirements and sufficient detailed of real geological environments description; limitation on dimension and speed; geological content and the reliability degree of GI solutions. Computer technologies of geophysical materials complex (integrated) interpretation should be different by approx-

imitation constructions universality and possibility to process detailed (large dimension) models of geological environments, especially small sizes, which is relevant for the study of dynamics of the near-surface post-technogenic phenomena.

3. Gaining of the experience in modeling and studying of a link between geological section parameters and local field anomalies, also between objects parameters variation and spatial-temporal anomalies.

4. Substantiation of the method of gravity data interpretation and evaluation of its reliability degree in the specific geological problems solving.

5. Substantiation of the field gravimetric observation method.

Imitation modelling gives us the possibility to analyze the dependences between GI properties and geological content of its solutions. So, the traditional definition of the regularization parameters of the inverse tasks instability was putted into question, as well as the small number of iterations to achieve the necessary solution, as the “a priori positive” characteristic of the technologies. An interesting example of the formal imitation modelling is studies results of the linear operator core content influence of O. I. Kobrunov criterion approach on GI solution.

The imitation modelling methodology of geological environments density structure or changes in its structure over time reflect the experience of long-term geological tasks solutions [16 - 20]. The modelling is as follows (fig. 1).

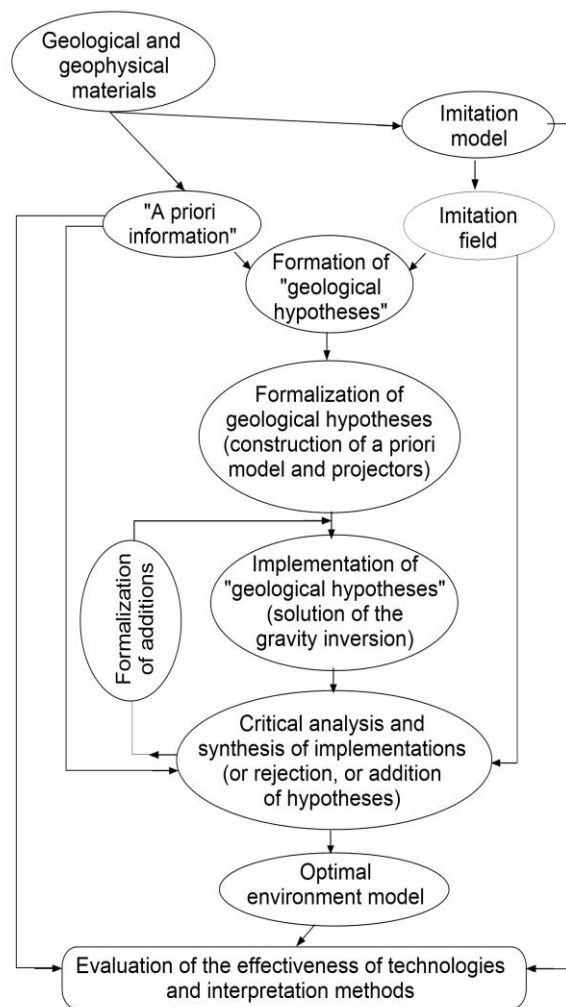


Fig. 1. Imitation modelling scheme

1. Creating the imitation («real») environment model (IEM).

2. Solving the gravity direct problem for the IEM and selecting the calculated theoretical field as «observed field» (imitation).

3. Forming «a priori» data, namely the definition of changes in the IEM which are conditional

information about the IEM structure, and the formalization of these a priori data in the form of the primary a priori environment model (AEM).

4. The «geological task» formulation about the IEM structure reconstruction.

5. The «geological hypotheses» formation about the probable IEM structure.

6. The hypotheses formalization in the form of probable additions AEM.

7. The hypotheses realization by constructing equivalent environment models (EEM) using the technologies of gravity inversion (GI) solution being tested.

8. Comparative analysis of the AEM and an EEMs in order to choose the optimal environment model (OEM), or the new hypotheses formation.

9. Comparison of OEM and IEM; evaluation of probability and accuracy of IEM elements reconstruction into the OEM.

10. Conclusions about the interpretation possibilities of the modelling method.

Geological hypotheses are formed on the basis of geological problems analysis, a priori data and gravity anomalous field. Hypotheses are formalized in the form of AEM and projectors, which are constraints on the properties of the GI future solution and formed on the data on the AEM elements probability and accuracy.

The geological hypothesis realization is an interactive process of approximation to EMM when the initial (zero) approximation is the AEM. The imitation modelling technologies should be as close as possible to the conditions of a real interpretation process. They should be complicated by the influence of lateral zones, regional background, a detailed description of the geological situation. Also they should be fast to build a number of EEM technologies.

The authors perform the gravimetric data interpretation according to the informal sequence method of equivalent solutions, [20] using the computer technology "Complex.Gravity" of solving 2D / 3D direct and inverse problems. The imitation modelling was performed in order to evaluation the content and reliability of the modelling method, as well as the computer technologies testing.

Imitation modelling of underground sulfur smelting consequences on Nemyriv field example.

In the gravity prospecting the prediction of dynamics is the task of spatial-temporal changes detecting in density structure of the local part of geological section.

During the native sulfur deposits exploitation by the underground sulfur smelting (USS) method the area is covered with a dense wells network (for example, 20 × 20 m), that is, the boundaries geometry in the geological section above sulfur is known with high accuracy. The efficiency of sulfur deposit re-exploitation can be controlled by geological and geophysical monitoring [17, 21 - 22].

The imitation model (IEM-1, fig. 2a) reproduces the real longitudinal section of Grushiv area on Nemyriv native sulfur deposit. The zone of intensive sulfur smelting is highlighted by the contour of a significant reduction in density. The layer that lies above and below the productive horizon is practically homogeneous.

A-priority model (AEM) is shown on the Fig.2b. Suppose that a high-precision gravity survey was

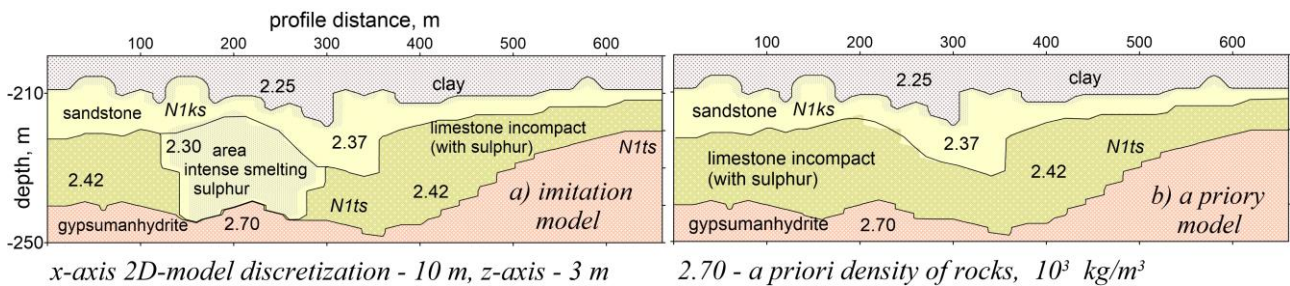


Fig. 2. Imitation and a priory model of a section native sulfur deposits

performed after the USS, so, the «observed» field was taken as the theoretically calculated field of IEM. Data on the sulfur smelting character are «absent». That is why the productive horizon in a priori model, based on drilling data before sulfur smelting, is homogeneous.

The imitation geological task is to identify and outline zones of intensive sulfur smelting. It is assumed that during sulfur smelting, there are no significant changes in the section, except within the productive horizon. Therefore, the search for GI solution is limited only by the productive layer contour.

Model-1 is performed on assumption that as a result of the USS, either density reduction or density

increasing zones were appeared into the layer of the sulfured limestone. Limits on the probable variations in the limestone density are given in the maximum interval $2.20 \div 2.60 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. The model, which is the result of GI solution and formally ϵ -equivalent model, is shown in Fig. 3a. The biggest density reduction was obtained in the profile interval of 100÷300 m. It was contoured by isodense $2.35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. It practically coincides with the imitation zone of intensive sulfur smelting. In addition to the USS consequences confirmation in the profile interval of 420÷500 m, the insignificant pseudo-anomaly of density increasing is noted (up to $+0.02 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Modelling-2 was performed on the geological

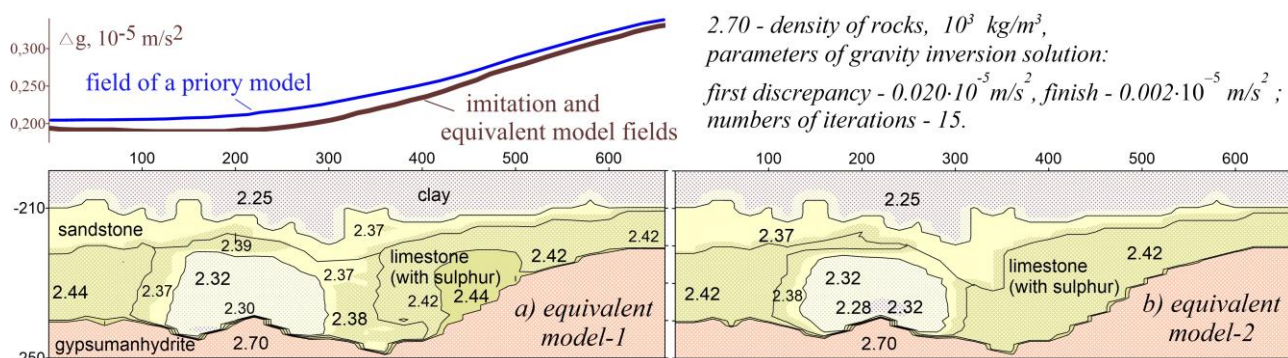


Fig. 3. Equivalent models of a section native sulfur deposits

hypothesis that only zones of density reduction can be the USS result within sulfured limestone layer. That is why limits on the probable densities were taken in the interval $2.20 \div 2.42 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. As a result of GI solution, zone of density reduction is extracted in the ε -equivalent model (fig. 3b). This zone is close on shape and intensity to the imitation one.

Modelling-3. The study task of density structure changes in a section by the gravity *spatial-temporal anomalies* distribution deserves special attention. In this case, it may be possible to narrow the search area of the GI and, consequently, a significant increase in the gravitational modelling accuracy degree.

Modelling is performed under the conditions that the gravimetric survey was carried out before and after the USS. Imitation modelling of changes in the section structure is based on two imitation "real" models. The first one is the model of the section before the USS (fig. 2b), the second one – after the USS (fig. 2a). Spatial-temporal variations of gravity field, which are the difference between the field after the USS and field before the USS, were used as «observed» field. Spatial-temporal variations are mainly due to changes in the productive layer under the USS influence. Therefore, it is possible to ignore the influence of lateral zones, regional background and structure of the section above and under the productive layer. It is also possible to ignore the data inaccuracy on the density of the intermediate layer (Bouguer density), but take into account the changes in the heights of observation points.

A priori data on the state of the productive formation after the USS is formalized as a model of spatial-temporal changes in the densities distribution. The USS influence is expected only within the productive layer, that is why only non-zero value of excess density is given to this layer with small variation of $0.001 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Density is equal zero for other parts of the section and for lateral zones. Limits on all possible spatial-temporal variations of excess density in the productive layers are taken in all possible intervals - $\pm 0.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. The result of GI

solution (EEM-3) is shown on fig. 4. All imitation EEM-1÷3 (fig. 3, 4) contain practically the same by sizes and intensity the local zones of density reduction corresponding to the imitation «real» zone of sulfur smelting. The disadvantage of the first and the third EEMs is the small size and intensity of pseudoanomaly.

Modelling-4 was performed according to the predictions that it is possible to appear of both zones of density reduction and rocks of density increasing in the contour of the productive layer during the underground sulfur smelting.

So, there is repositioning of more consolidated limestone of sulfur contents. Imitation of "real" model, where the USS effects are reflected in the form of density reduction and consolidation zones, is represented on Fig. 5a. The geological hypothesis is similar to the previous one, therefore, the a priori model and the limits on the densities variations are the same.

Equivalent model-4 (fig. 5b), like the previous one, is constructed according to a difference imitation fields. It contains density anomalies, which by contour, size and intensity are practically identical to the imitation "real" zones of density reduction and increasing; pseudoanomalies are absent.

Given imitation model confirms the possibility of reliable gravimetric mapping of intensive sulfur smelting zones.

Imitation modeling of karsted rock on the example of Kalush-Golin deposit of potassium salts. Modelling was performed on the profile through the Central kainite slope mine of "Kalush" pit, based on the assumptions that mine openings (cavities) are filled with the dangerous brines deconsolidation, or that in the layer between the cavities and the salt mirror there is a zone of deconsolidation. So, there is a zone of deconsolidation too. For detailed description of models, the step of discretization is selected in one meter (approximation of the section is made by small prisms $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$).

Model anomalous gravitational fields are obtained in variants (fig. 6).

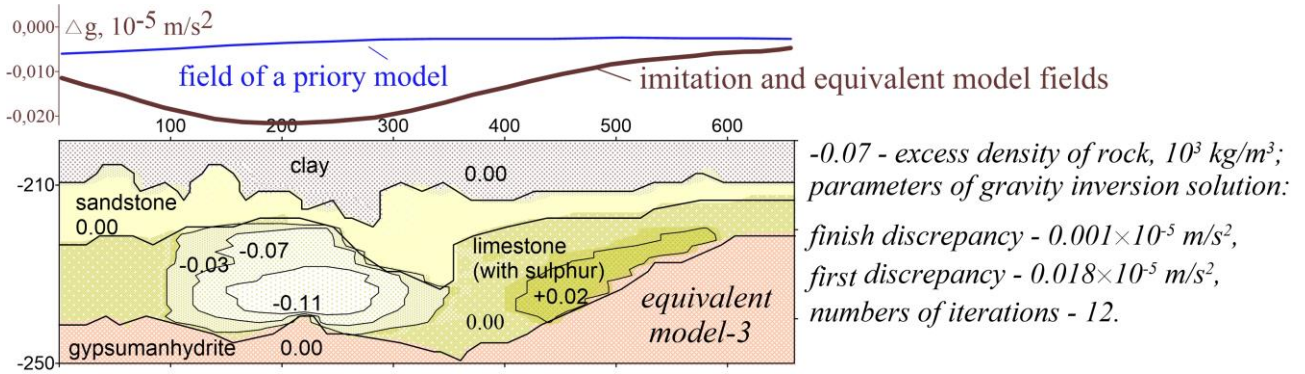


Fig. 4. An equivalent model of changes in the excess dense distribution in the native sulfur deposit section after underground sulfur smelting

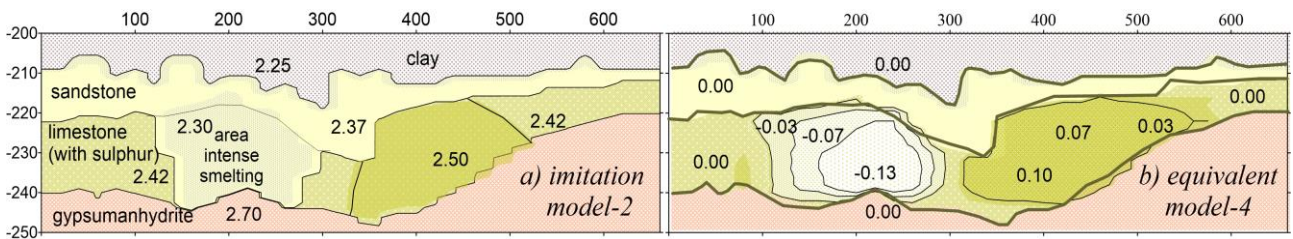


Fig. 5. Imitation and equivalent models of changes in the densities distribution in a native sulfur deposit after underground smelting of sulfur

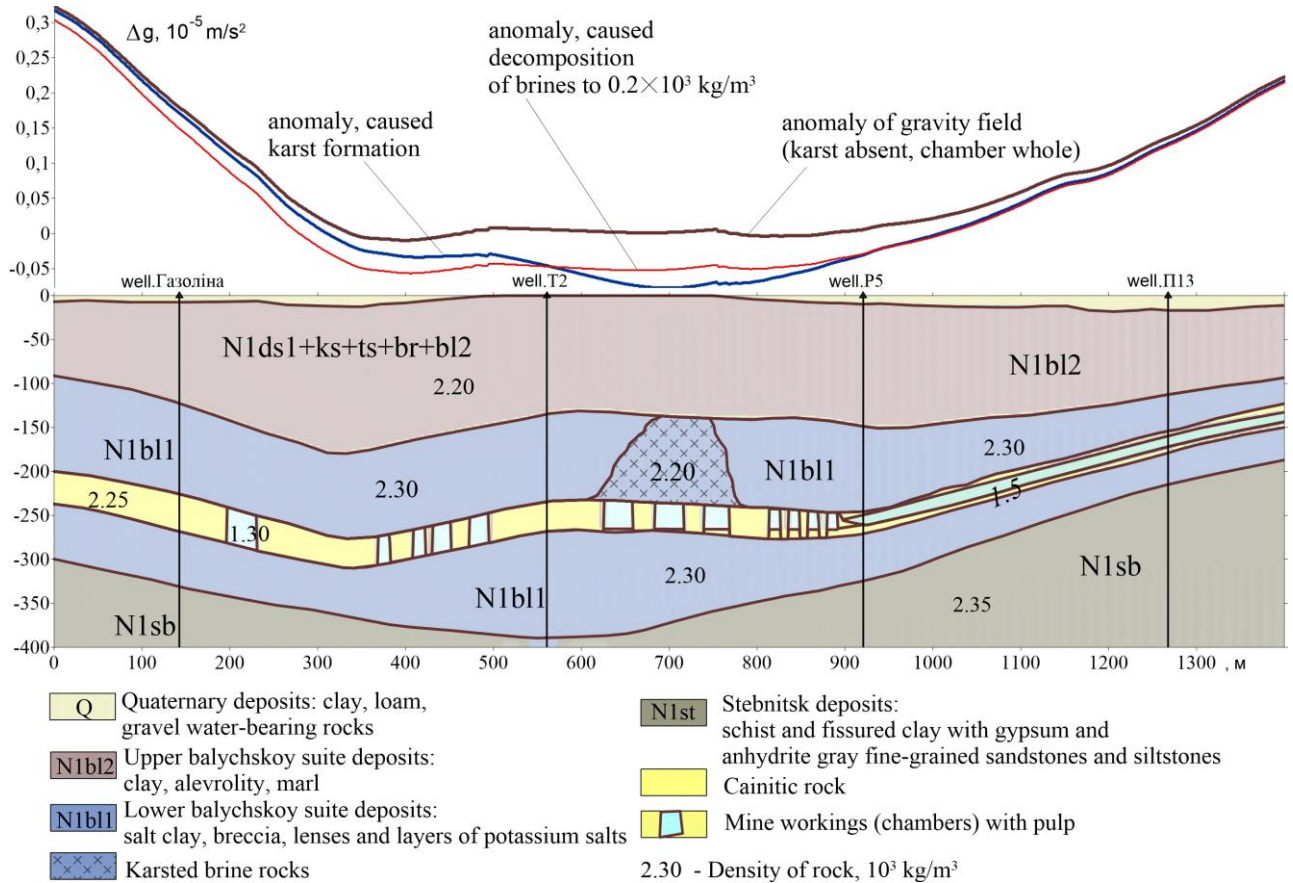


Fig. 6. Imitation models of a potassium salt deposit section

1) the section without karst formations, cavities are saturated by brines with density of $1.30 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;

2) the section with the local zone of karst development over salt; rocks of the zone are deconsolidation on $-0.10 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; the difference anomalous gravitational effect was up to $0.075 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$;

3) the section with reduced brine density (breakthrough of ground waters) on $-0.2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; the difference anomalous effect was up to $0.05 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

Post-technological anomalies of a gravitational field (of low intensity, but higher than the possible accuracy of observations) are putted on local anomalies due to the lithofacial features of the geological section, that makes it possible to detect them only with anomalous changes in the field over time. Thus, the modeling proves the requirement of high-precision monitoring observations and the interpretation of spatial-temporal anomalies using a similar methodology, which is considered on the example of changes imitation in sulfur deposits structure.

Imitation modelling of the gas-water contact (GWC) level at the hydrocarbon field. In order to detect changes in the geometry of the geological section, the interpretation of gravimetric monitoring data based on the structural GI solution can be performed only by the methodology of the sequential modelling. It is performed in the modellings 1 and 2 for sulfur deposit section, rather than the spatial-temporal anomalies. Models which are obtained as a result of GI solution with the application of limits on the depth intervals of GWC level possible changes are represented on fig. 7.

Modelling of the salt dome type structural section. In the paper [15] a synthetic (imitation)

structural model was used to demonstrate the geological efficiency of layer migration of time sections (fig. 8a). The seismic geological model (fig. 8b), generated by the migration of the synthetic time section, differs from the imitation model by the vertical displacement of the borders geometry, which increases with depth up to 500-800 m, and the horizontal displacement of the over salt mound up to 1000 m.

Seismic modeling results were used to test gravity modelling in the complex interpretation of seismic and gravimetric data. The "geological task" is the geometry refinement of seismic and geological model by the "observed" gravity field. An imitation structural model is accepted as the IEM (fig. 8a). The "observed" field is the calculated field of the IEM.

Priory data (AEM) is a seismic geological model (fig. 8b) and known rock densities through the section "according to drilling", error estimation of the structural constructions for limitation of the geometry variations of the AEM boundaries. According to the "geological hypothesis", the possible AEM deviations from the "real model" of the section (IEM) do not exceed before mentioned limitations. The error of the geometry constructing of seismic boundaries in AEM is given in Table 1. Also, the geological hypothesis is supplemented with restrictions on variations in the layer thickness (table 2).

By definition, the imitation modelling is as close as possible to the practical conditions, therefore, the influence of lateral zones and the regional background is taken into account in the model fields. Lateral zones are approximated by the horizontal extension of the boundaries beyond the AEM;

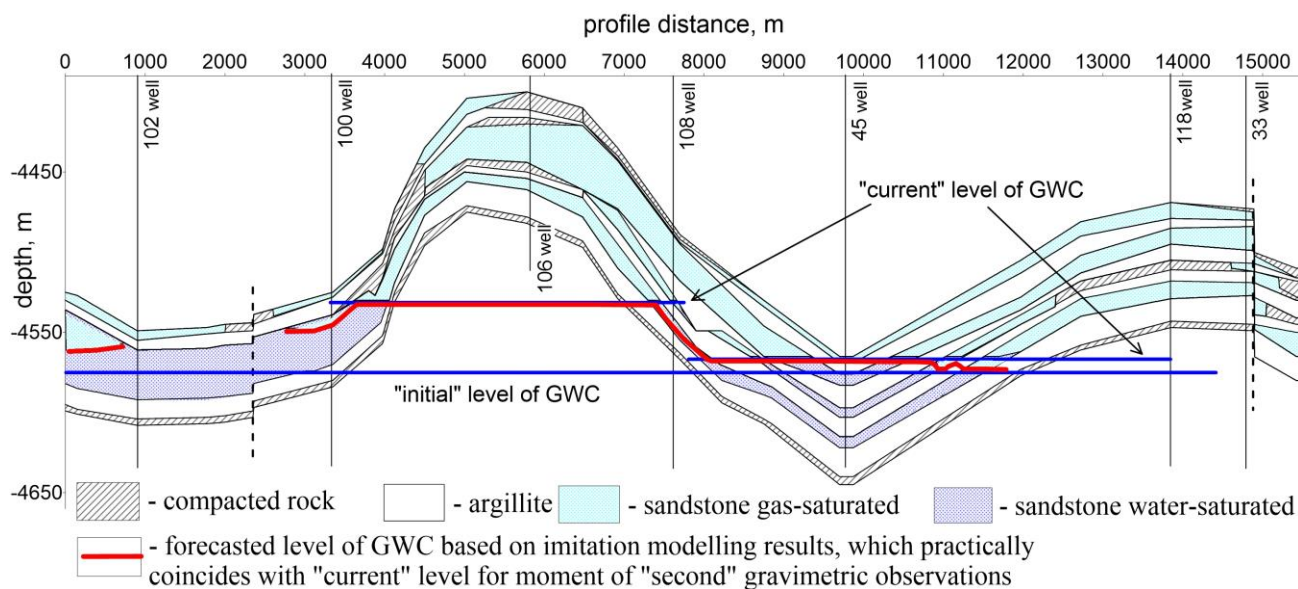


Fig. 7. Detection of the GWC "current" level in a productive horizon of the Berezhivsky gas condensate field in the Dnipro-Donetsk depression according to imitation of gravimetric monitoring

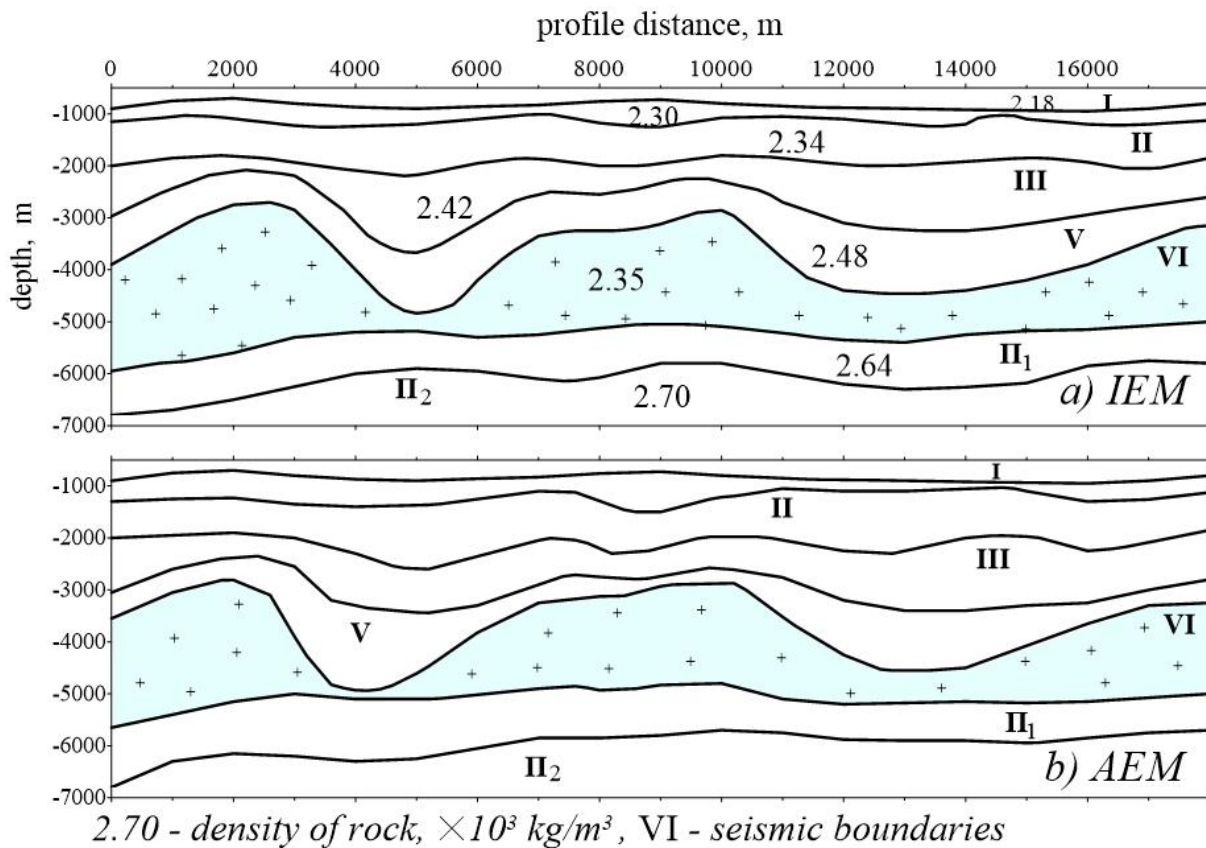


Fig. 8. Imitation (a) and seismic (b) models of structural section

Table 1

Accuracy of the construction of seismic-geological boundaries

II - ±350 M	V - ±700 M	II ₁ - ±800 M
III - ±600 M	VI - ±1200 M	II ₂ - ±800 M

Table 2

Permissible thickness of the layers (above the corresponding boundary)

	H _{min}	H _{max}		H _{min}	H _{max}		H _{min}	H _{max}
II	50M	1000	V	50	1600	II ₁	300	2250
III	50M	1500	VI	500	2000	II ₂	500	2000

the regional background, that is, the influence of the crust part below the research area is approximated by a linear component.

Modelling-1 (structural GI solution) was performed without using of the strict limits on the possible changes of the boundary geometry in the model. «Regional background» was defined by the plane during modelling. The result is represented on the fig. 9a. The layer's thickness above the salt dome has been increased, and the mould has been displaced towards the "real" position in the central part of the EEM-1a. However, the boundaries geometry in the border zone of the model, especially the gravitational surface of the salt, is significantly different from the IEM. When applying the limits on the thickness of the layers (one of the AEM additions, which are instruments of the equivalent mass-

es redistribution), the EEM-1б is obtained that is closer to the IEM (fig. 9b).

Modelling-2 was performed by the variant of the regional background determining of the inclined plane, but which is brought to the right side of the IEM field (according to the given pickets), assuming that the section boundaries are flat in this part of the profile. Therefore, they are the most reliable based on the reliable principle of seismic constructions. The edge zones suffered the slightest distortion compared to the previous modeling in the EEM-2 (fig. 10).

According to O. K. Malovichko, it is preferably to approximate the regional background only with an inclined plane, which is the reasonable compromise. Imitation modeling allows us to study the effect of the method of the linear background deter-

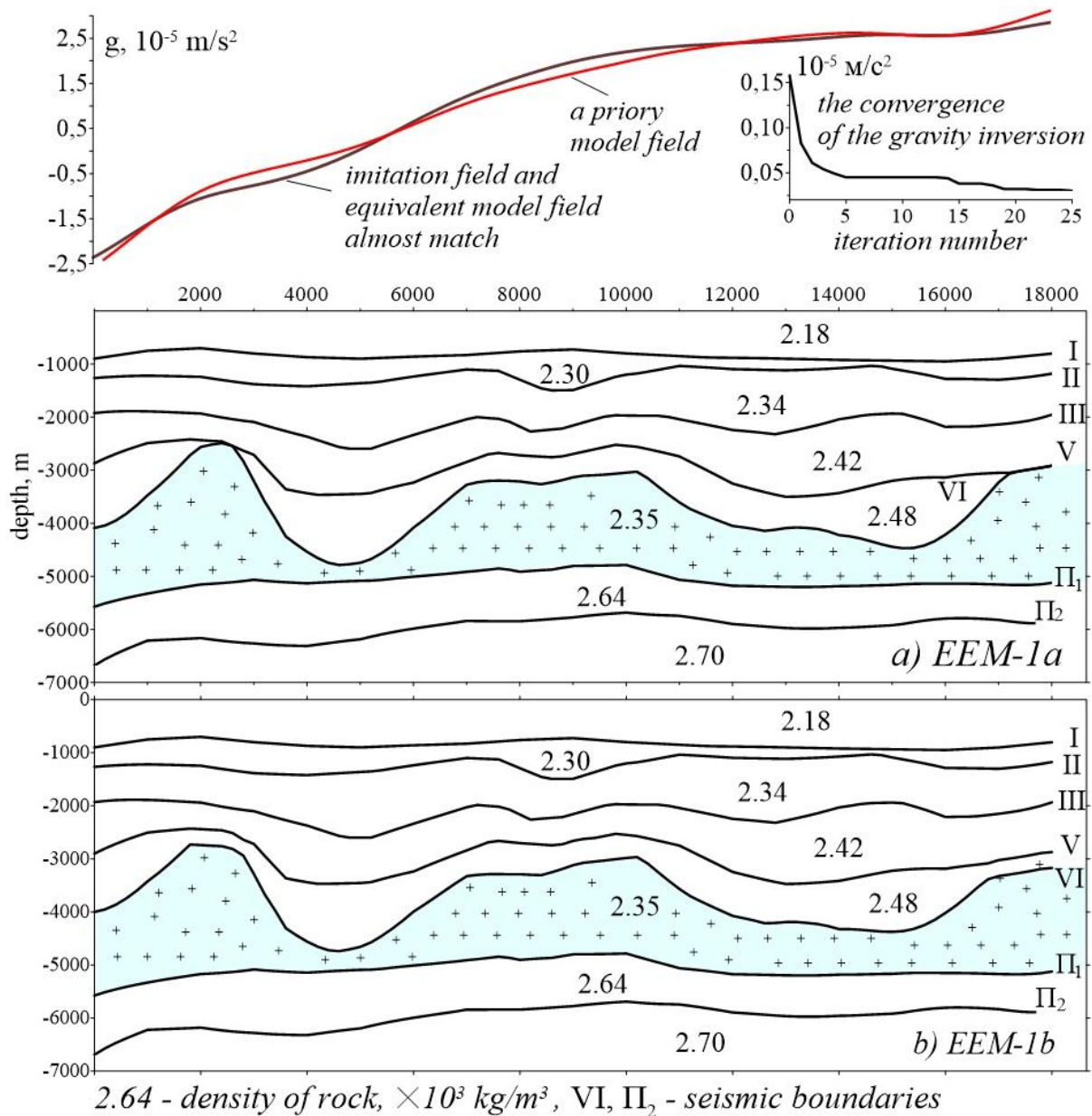


Fig. 9. Equivalent models of structural section

mining on the GI solution. The IEM field that is the "observed" field may not contain a background, but it is calculated during the imitation GI solution. So, it approximates the modeling conditions to practice. The inevitable loss of the linear component part of the observed field and the distorted anomalous field due to the inaccurate consideration of the lateral zones influence reduces the reliability of the GI solutions, especially in the boundary zones, which are approximately estimated of ± 2000 m in this modeling.

The middle section part of the EEM-1a,1b, EEM-2 (fig. 9, 10) independently to the linear background variant are compared with AEM closer to IEM. First of all, it concerns the horizons V and VI. The geometry of more damp horizons (and therefore less gravity active) has practically not changed. This is due both to the method of the regional back-

ground determination and to the degree of the horizons gravitational activity.

Modelling-3 is performed on the assumption that the salt surface is traced very roughly (horizon VI) by seismic survey but it is known that the geometry of other horizons is presented accurately in the AEM. «A prior data» limits on the boundaries behavior is not taken rigidly (in the regularization parameters of the GI solution): as the degree of probable variations in the boundaries geometry (table 3). The background is defined by the characteristic pickets (selected profile points). The constructed EEM-3 (fig. 11) correlates well with IEM.

Modeling-4 differs by absence of the geometry information about the horizon VI, except for example for three or four wells (fig. 12). Constructed EEM-4

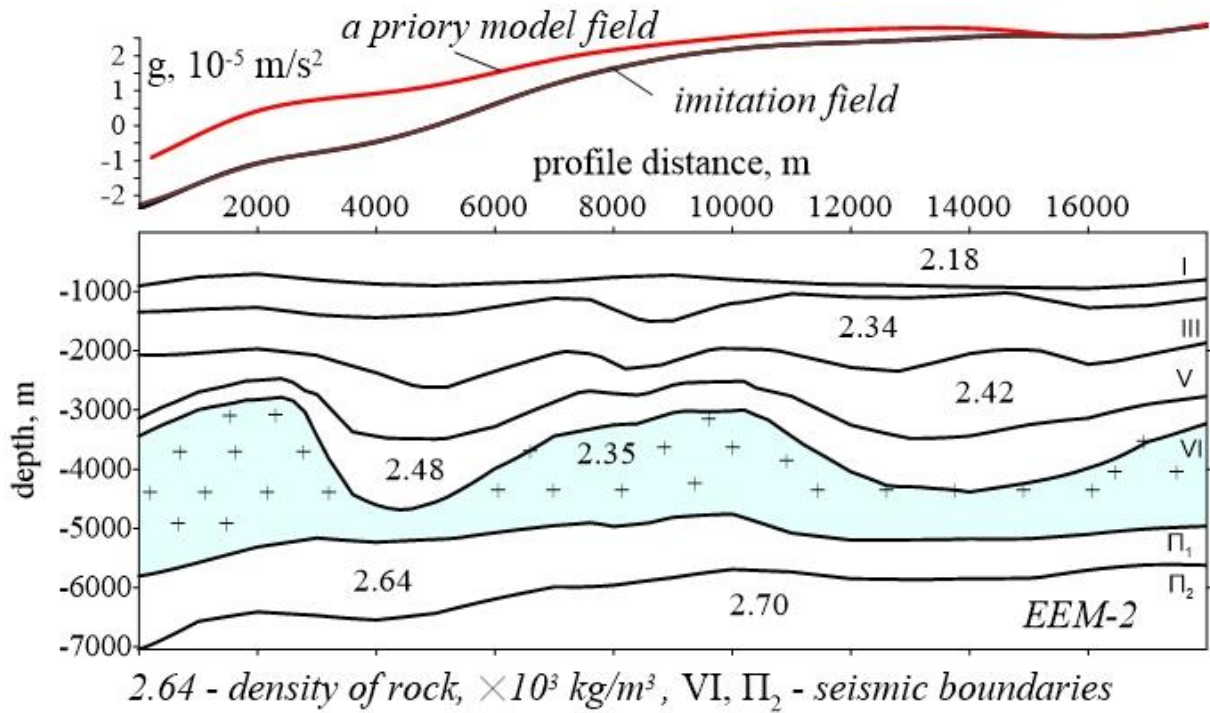


Fig. 10. An equivalent model of structural section

Table 3

Accuracy of seismic boundaries

II - $\pm 5\text{M}$	V - $\pm 5\text{M}$	Π_1 - $\pm 5\text{M}$
III - $\pm 5\text{M}$	VI - $\pm 60\text{M}$	Π_2 - $\pm 5\text{M}$

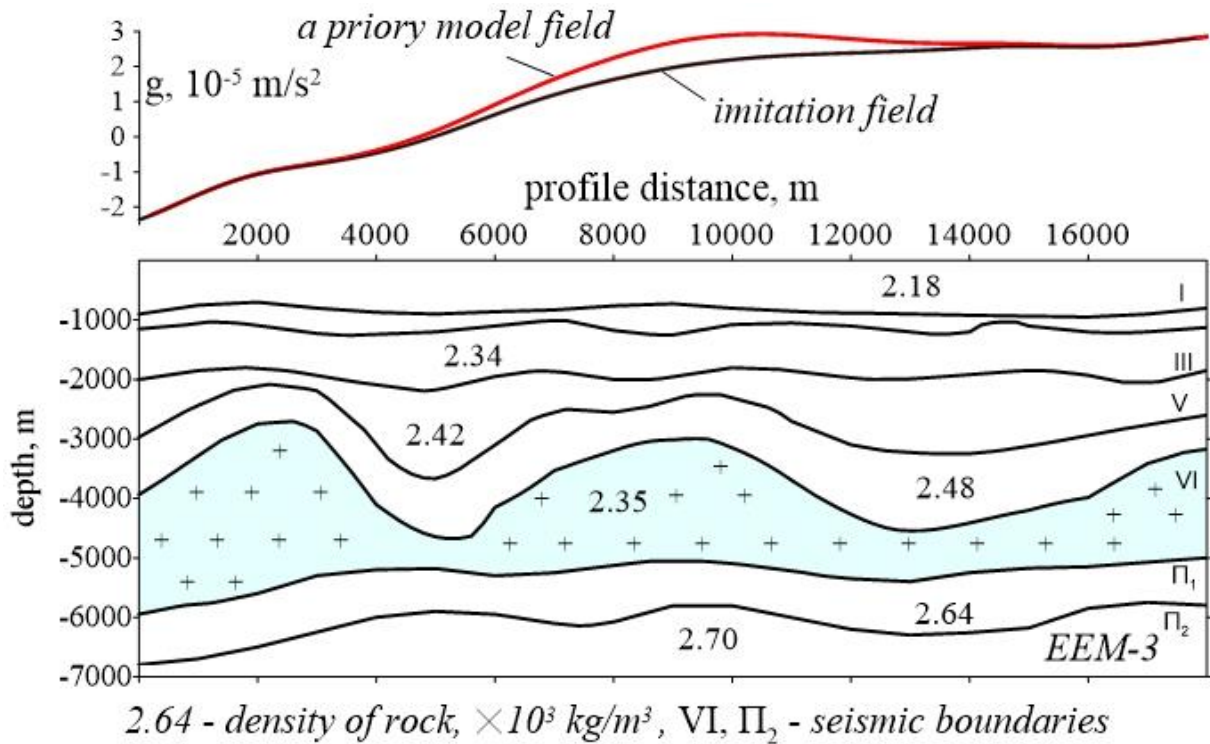


Fig. 11. An equivalent model of structural section

(fig. 13) with the application of the strict limits on the layer's thickness (see table 2) and on the geometry variations of the boundaries (table 4), as in the previous modellings, is less reliable in the edge zones.

A small deviation between the imitation field and the EEM-4 field ($<0.01 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$) indicates on the high formal accuracy of the GI solution. But the

comparison of the geometry of the salt domes of the IEM and the EEM-4 is not in favor of the last one and this despite the fact that the task of geometry finding of one boundary was actually solved. One from the reasons that causes the negative properties of the EEM-4 is the distortion in the field, which is due to the way of the background removing.

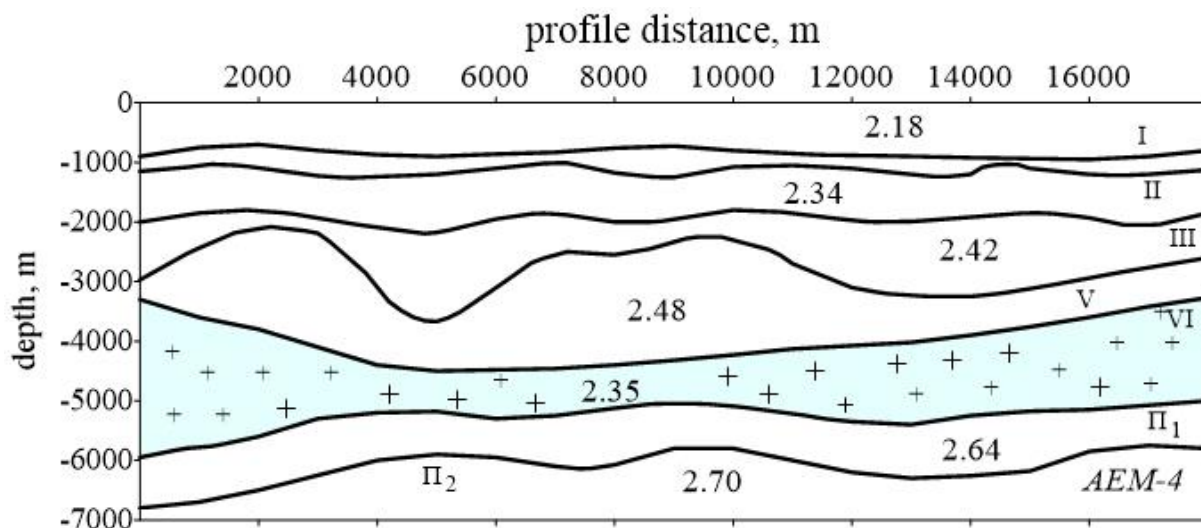


Fig. 12. A priori model of structural section for modelling-4

Table 4

Accuracy of seismic boundaries

II - $\pm 1M$	V - $\pm 1M$	Π ₁ - $\pm 1M$
III - $\pm 1M$	VI - $\pm 1200M$	Π ₂ - $\pm 1M$

Modelling-5 is connected with trying to find ways to increase the reliability of the EEM construction due to lateral zones and regional background reconstructions.

From the predictions that the EEM is more reliable than the AEM, it follows that the background allocation based on the confidence principle of the EEM will be even more reliable too. In this case, the lateral zones should be rebuilt, so the EEM edge zones have changed relatively the AEM. Consequently, after replacing the EEM → AEM, the lateral zones reconstruction and the updated field separation, it is possible to update the iterative process of the GI solution. The criterion for stopping the solutions search by registered complicated iterations is satisfactory fields' deviation of the "updated" AEM in the final cycle and the IEM ("observed" field). The EEM-5 (fig. 14) was built as a result of this GI method (the initial conditions are the same as in the previous modelling). EEM-5 is essentially close to the IEM within the entire section.

The EEM → AEM replacement was carried out in the first steps of the interactive cycle when reaching $1/4 \div 1/5$ of the fields misfit relatively to the

initial one which is compared with the final misfit of the previous cycle, as a rule, grows up on $10 \div 20\%$. But termination of a cycle at reaching $\sim 1/2$ of the misfit from the initial one leads to a sharp drop of the initial misfit in the next cycle and even below the level of the final misfit of the previous cycle. This regularity is saved during GI solution in different regimes. The EEM, which was constructed on the last cycles, did not defer one for another (final misfits level is $\leq 0.01 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$). So, the method of more reliable EEM finding which is stable to the background and lateral zones reconstruction is created by the way of interactive cycles.

In attempts to refine the structure of seismic geological sections, it was detected that reliability increasing of the modeling results can be achieved by the regional background approaching to an inclined plane. It is approximates the fields by characteristic pickets over the areas with the most reliable seismic constructions, as well as by the near-lateral zones rebuilding in the interactive process of the structural GI solving.

Study of Tengiz structure. A large structure was detected by seismic and gravity survey within

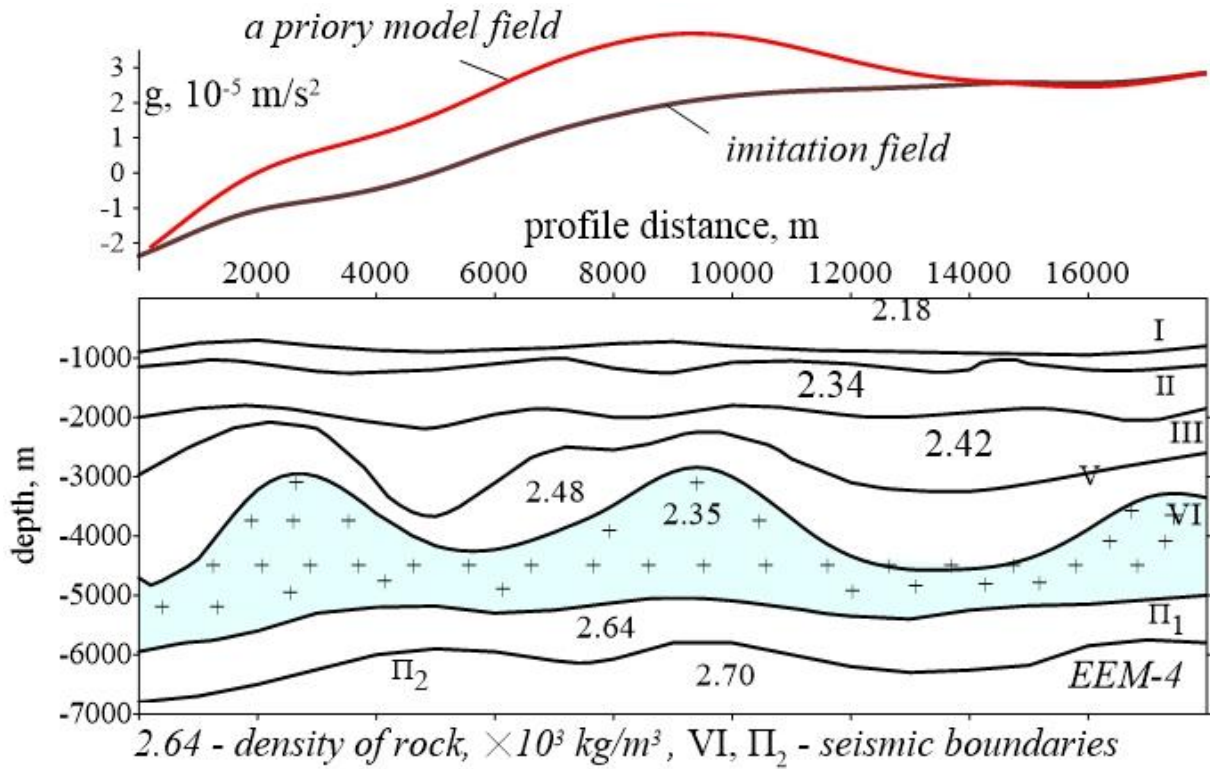


Fig. 13. An equivalent model of structural section

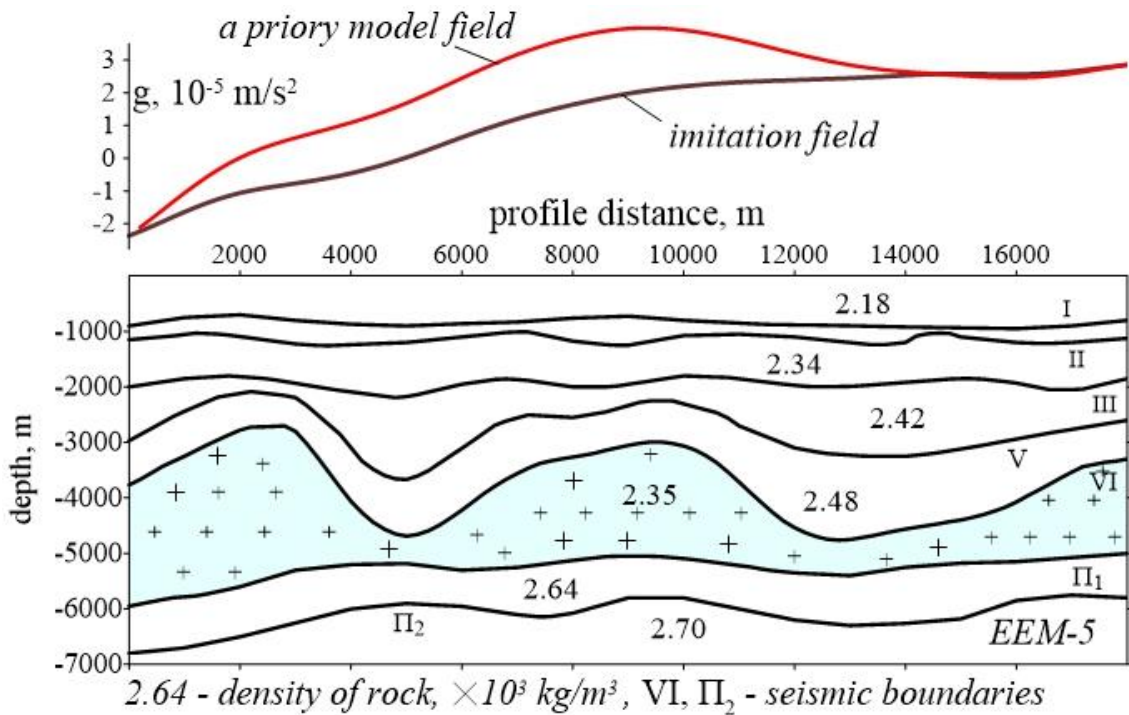


Fig. 14. An equivalent model of structural section

the Southern Emba (Pre-Caspian Foredeep, Kazakhstan). Under salt rocks deposits, including the salt surface, have been studied in detail by drilling and seismic survey.

Imitation model reflects the main horizons of geological section, age and rock densities. There is a large oil reservoir in the central part of the IEM in

the depth range of 3500-7000m. This reef structure has an atoll form in plan and significant density reduction in the lateral zones (fig. 15).

Prior information contains data on the structure of the upper section part, the geometry of the salt bottom of the kungur formation and the boundary between the terrigenous rocks of the Devonian and

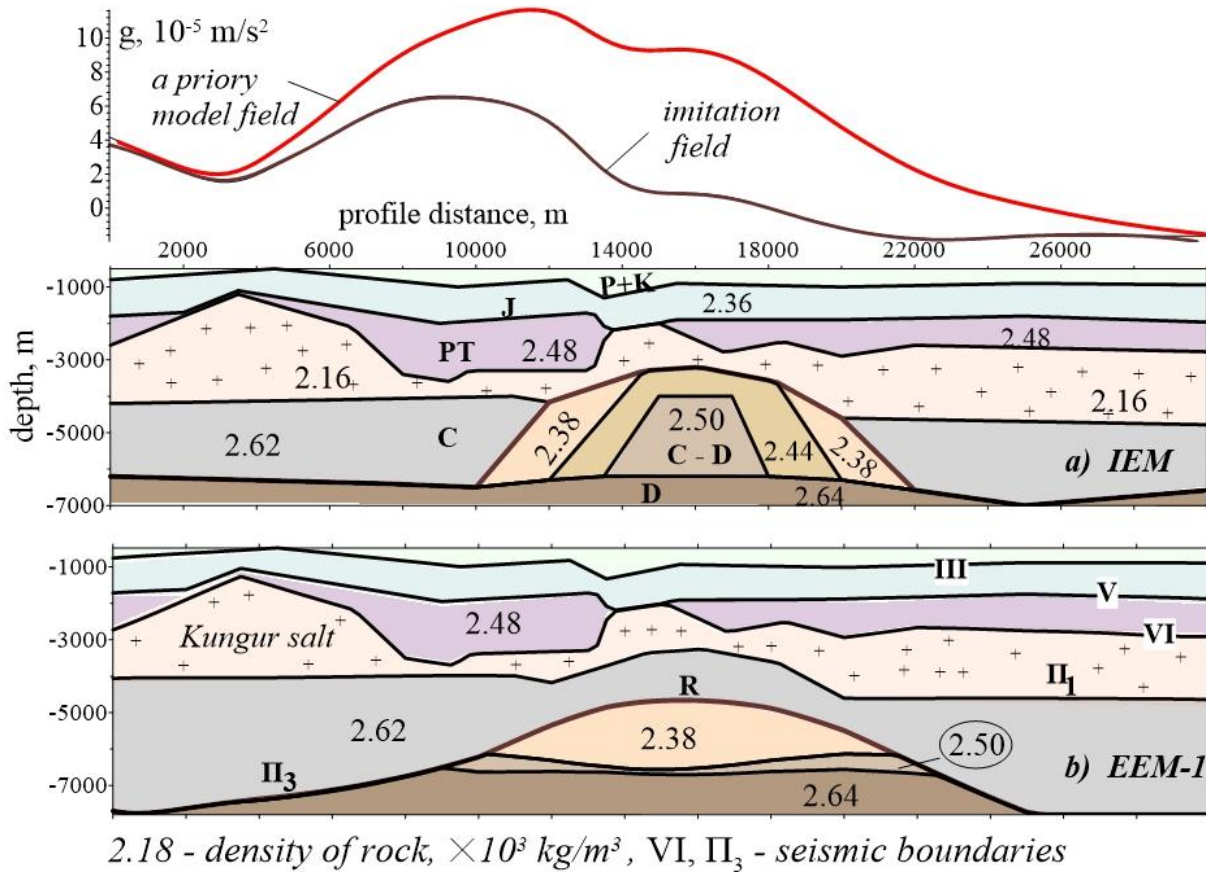


Fig. 15. Imitation (a) and equivalent (b) structural models of the Tengiz section

Carboniferous. Density of rocks is confidently known for the upper part of the section. According to seismic survey and drilling, a large oil deposit is predicted. It is associated with probable subsalt biogermic carbonates. The lateral zones of this possible reef structure are traced uncertain by seismic survey, therefore the a priori model (AEM) contains the upper part of the section including to the salt layer and the lower boundary between the Devonian and Carboniferous rocks (Π_3); reef object is missing.

Geological task: to confirm the existence of a reef structure.

Modelling-1 was performed with using the structural GI by the next conditions. There is no reef structure in AEM (compared to IEM, fig. 15a), but the top of the expected reef formations (boundary R) and possible internal density boundaries are conventionally assigned (coinciding with the surface of the reflection horizon Π_3). As a result of the structural GI solution (the initial error is $-4.64 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$, the final one is $0.10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$, the non-strict limits are applied - table 5), a structural EEM-1 of the Tengiz structure section was obtained (fig. 15b). At the base of the subsalt section, the layer of about 1500 ÷ 2000 m and with rock density of $2.38 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ is plotted by the boundary R. The fact that this density value is close to the limitations for the minimum

values for subsalt rocks, and also that the boundary Π_3 within the whole model was below the permissible level, gives us grounds to confidently predict the existence of a reef structure of greater thickness.

Modelling-2 is excellent using of the strict restrictions (table 5), that is, they are used in the regularization of the GI solution process and as limitations on the possible boundaries variations. As a result of the structural GI solution, EEM-2 (fig. 16) was constructed, in which the density reduction zone with a density of $2.38 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ was expanded; the boundary of Π_3 within the structure "deepened", which released the place for a new zone with a density of $2.50 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. However, the density reduction zone although is much larger, but by form is different from the imitation model.

An appropriate question about the correct using of the structural GI for the simultaneous solution of two problems: the detection of anomalous zones and the study of their geometry? The imitation modelling results of density distribution convince that there should be a consistent modelling: the fundamental existence questions, sizes and depths of geological formations occurrence are solved at the beginning. The incorrectness of the EEM-1 and EEM-2 fragments can be explained by the properties of the structural gravimetric tasks, when the field ano-

Accuracy of seismic boundaries		
III - ± 30 м	VI - ± 50 м	R - ± 3000 м
V - ± 30 м	II ₁ - ± 30 м	II ₃ - ± 60 м

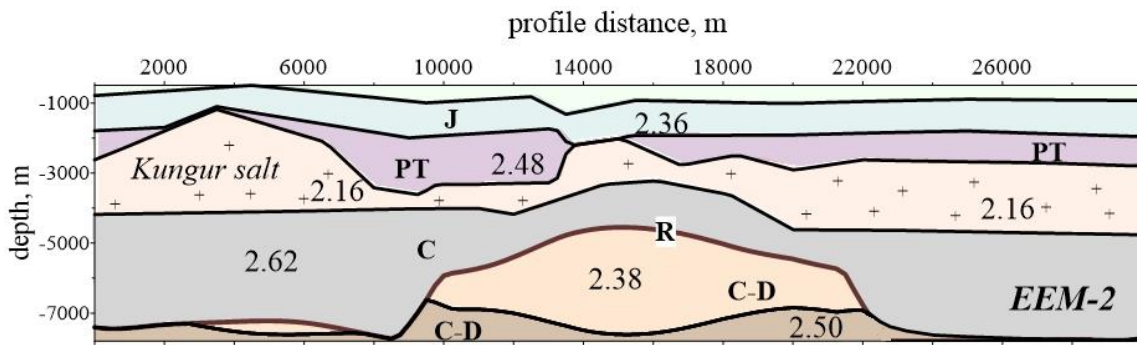


Fig. 16. An equivalent structural model of the Tengiz section

malies are caused by the geometry, the boundaries depth, the sign and the magnitude of the densities changing at the boundary, as well as the direction of the boundaries correction depends on density changing sign and the anomaly sign on the structural GI solving. That is why the internal reef zone with density of $2.44 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (fig. 15a), which is given in AEM by borders that repeat Π_3 , will not appear in EEM on no condition. But zone with density of $2.50 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ will appear (fig. 16) due to the "deepening" of the boundary Π_3 , but not as a result of the boundary that contoured the top of this zone.

The last one, as a top of a zone with density of $2.44 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, by the statement of this problem, can "deepen" in reversely proportional intensity of the densities changing on these boundaries, because the sign of this densities changing is positive.

Modelling-3 was conducted to identify the most probable contours of the reef structure. In the AEM, the reef is also absent, but for the predicted uniform structure the average weighted density is $2.44 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, which is close to the imitation. The EEM was built with using the limitations (table 5). The modelling results (EEM-3) are given on fig. 17.

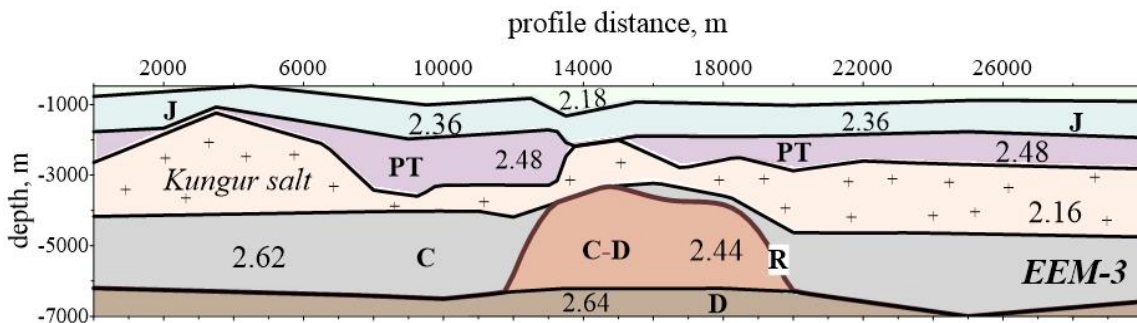


Fig. 17. An equivalent structural model of the Tengiz section

The reef structure contours of the IEM are satisfactorily represented in the EEM-3, however, the reef zone is less than the imitation one. The modelling results show that the shape and size of the object should be predicted after the reliable estimation of the average weighted densities onto the section.

The following modellings are a test of computer technology for the linear GI solving. The imitation model (fig. 18 a) and a priori data are identical to the previous modellings. The geological task is complicated by confirming of a reef body existence and predicting of high porosity zones in subsalt deposits.

The hypothesis that there is no reef structure and intensive density decrease zone under the salt in the carbonate-terrigenous sediments, and the density of deposits is in the range of $2.62 \div 2.64 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, is realized in the EEM form (not shown here), which contains a zone of significant density decreasing under the salt, but which is substantially different from the imitation model; its presence confirms the existence of a reef body.

The next hypothesis: the depth interval of the reef development is $3500 \div 7000 \text{ m}$, the average reef density is significantly low - up to $2.30 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; the hypothesis is implemented by the EEM-4 (fig. 18 b).

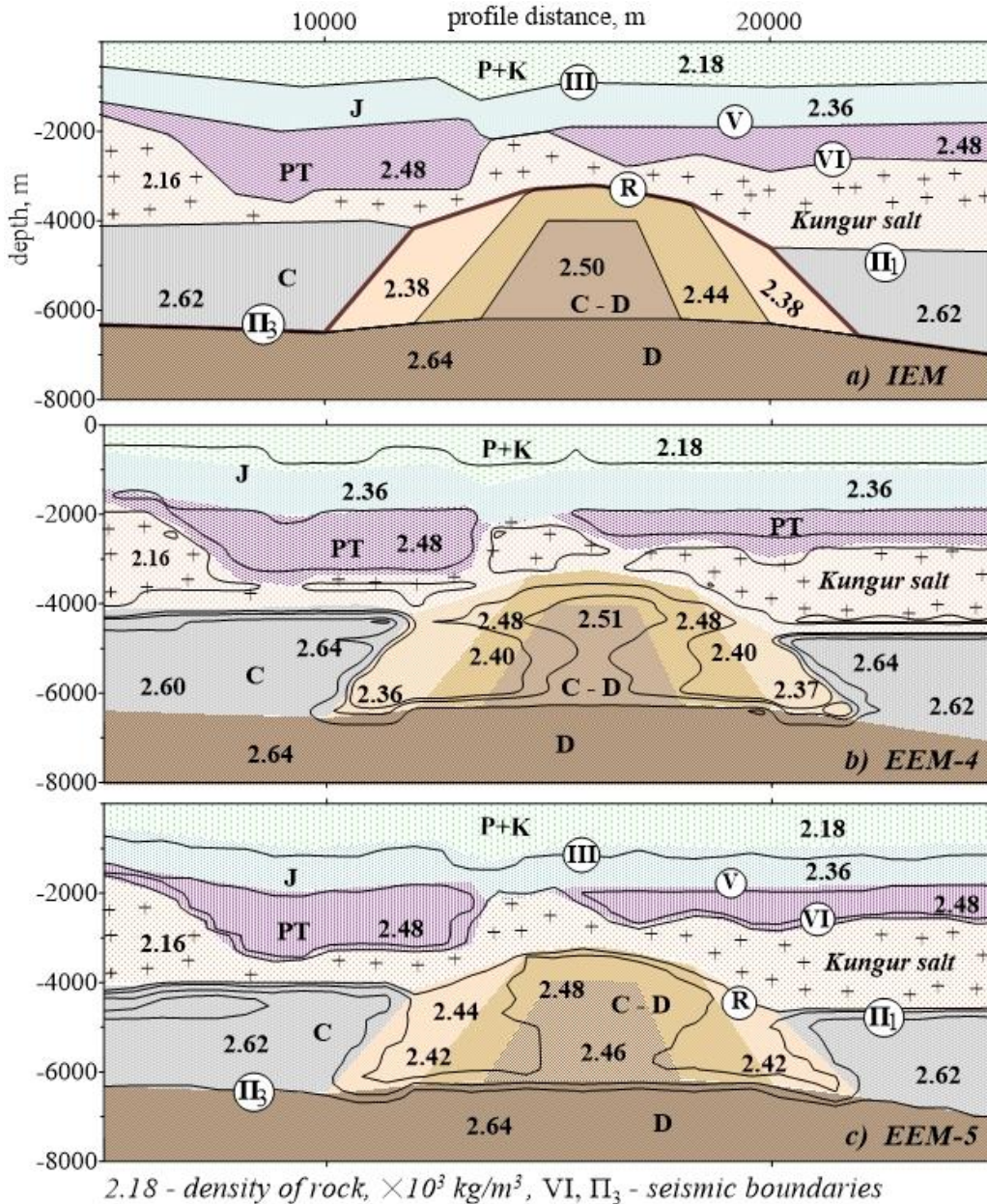


Fig. 18. Density models of the Tengiz structure

Comparison of the EEM and the AEM allows to constrict the predicted estimation of the carbonate rocks average density to the limit of $2.42 \div 2.48 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (a very wide range of possible densities of $2.34 \div 2.62 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ is given according to a priori data), which approximates the densities of the imitation model.

Thus, the most probable hypothesis is that under the salt there is a large reef body like the atoll. The density decreased zones frame the central part (lagoon?) of dense rocks within the reef. Check it on the opposite hypothesis: the reef body is homogeneous; the average weighted density of carbonate rocks that form the body is close to $2.44 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Figure 18b shows EEM-5. This implementation contradicts the last hypothesis. Thus, the result of imitation modelling is the confirmation of the reef exist-

ence and its heterogeneous atoll structure.

Conclusions. Comparison analyses of the imitation models (IEM) and the most reliable equivalent models (EEM) lead to the following conclusions:

1. In the structural GI solutions, the direction of geometry changes in the density boundaries is determined not only by the sign of the anomalies, but also by the sign of the dangling of the rocks densities on these boundaries.

2. Absolute values of rock density in density EEMs or boundaries geometry in the structural EEMs will not accurately match the imitation one.

3. EEM are qualitatively probable models of density distribution or boundaries geometry, which reflect the general, fundamental nature of the section structure. The achievement of a small final field

misfit and the rapid convergence of the iterative process of the GI convergence solution are not critical: they have a tangible relation for the evaluation of the EEM proximity degree to real environments.

4. The imitation modelling is based on the methodology geological efficiency of the informal sequence of equivalent solutions, which bases on the formation of hypotheses, their formalization in the AEM form and the EEM construction, further in the comparative analysis of the EEM with the subsequent definition of the most reliable hypothesis and corresponding optimal model of the section (OMS).

5. The degree of modeling reliability depends

on the completeness of the use of a priori data, the possibility of the near-lateral zones including in the AEM structure. The GI solution reliability also depends on mastering of the GI methodology and techniques and on the properties understanding degree by the interpreter of the wide equivalence of GI solutions in its general formulation.

6. The thoroughness of the EEM series analysis, which is aimed at choosing one model or series generalizing in the form of OEM, first of all depends on the interpreter's experience, because computer technology of 2D/3D direct and inverse problems solving is just an interpretative tool.

References

1. Петровський О. П., Слободянюк С. О., Ганженко Н. С., Федченко Н. С., Застосування інтегрального просторового геолого–геофізичного моделювання для уточнення особливостей геологічної будови Магдалинівської западини. *Геоінформатика*, – № 4 (48). – 2013. – С. 33–42.
2. Barbosa C. F., Silva B. C. *Generalized compact gravity inversion // Geophysics – January 1994. – Vol. 59 (1). – P. 57–68.*
3. Silva B. C., Barbosa C. F. *Interactive gravity inversion // Geophysics – January–February 2006. – Vol. 71 (1). – P. J1–J9.*
4. Condi F. J., Zelt C. A., Sawyer D. S., and Hirasaki G. J. *Gravity inversion for rifted margin deep structure using extension and isostatic constraints // Geophys. J. Int. (1999) 138, P. 435–446.*
5. Hongzhu Cai, Bin Xiong and Yue Zhu *3D Modeling and Inversion of Gravity Data in Exploration Scale. Gravity–Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect // <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70961>, 2018. – 20 pp.*
6. Булах Е. Г., Маркова М. Н., Тимошенко В. И., Бойко П. Д. *Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. – Киев: Наукова думка, 1984. – 112 с.*
7. Анікеєв, С. Г. Густинна модель Коломийської палеодолини за геотраверсом СГ–I (67) Надвірна–Отинія–Івано–Франківськ / С. Г. Анікеєв, В. Ю. Максимчук, М. М. Мельник // *Геодинаміка. – 2017. – № 1(22). – С. 74–84.*
8. Булах, Е. Г. *Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Математические методы геологической интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных / Е. Г. Булах. – К.: Наук. думка, 2010. – 463 с.*
9. Гінтов, О. Б. Структура західної і центральної частин Українського щита. Спірні питання. / О. Б. Гінтов, М. І. Орлюк, В. А. Єнтін, І. К. Пашкевич, С. В. Мичак, М. І. Бакаржієва, А. М. Шимків, А. В. Марченко // *Геофізический журн. – 2018. – Т. 40. № 6. – С. 3–29. <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>*
10. Кобрунов, А. И. Эволюционно–динамические принципы при реконструкции структурных плотностных моделей седиментационных бассейнов / А. И. Кобрунов, А. П. Петровский, С. А. Кобрунов // *Геофізический журн. – 2005. – № 3. – С. 375–380.*
11. Старостенко, В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии / В. И. Старостенко. – К.: Наук. Думка, – 1978. – 226 с.
12. Bocin, A. *Gravity and magnetic modelling in the Vrancea Zone, south–eastern Carpathians: Redefinition of the edge of the East European Craton beneath the south–eastern Carpathians / A. Bocin, R. Stephenson, L. Matenco, V. Mocanu // Journal of Geodynamics. – 2013. – (71). – P. 52–64.*
13. Grabowska, T. *The border of the East–European Craton in South–Eastern Poland based on gravity and magnetic data / T. Grabowska, G. Wojdys // Terra Nova. – 2001. – 13 (2). – P. 92–98.*
14. Yegorova, T. P. *Preliminary 3–D density model for the lithosphere of the Dnieper–Donets Basin on the basis of gravity and seismic data / T. P. Yegorova, V. G. Kozlenko, R. A. Stephenson, V. I. Starostenko, O. V. Legostaeva // Geofizicheskij zhurnal. – 1997. – 19(1). – P. 124–125.*
15. Šefara, J. *3D density modelling of Gemeric granites of the Western Carpathians / J. Šefara, M. Bielik, J. Vozár, M. Katona, V. Szalaiová, A. Vozárová, B. Šimonová, J. Pánisová, S. Schmidt, H.–J. Götze // Geologica Carpathica. – 2017. – 68 (3). – P. 177–192.*
16. Бойко Г. Е., Анікеєв С. Г. *Структура Карпатського поднадвига (по данным решения обратной гравиметрической задачи) // Тектоника и нефтегазоносность поднадвиговых зон. – М.: Наука, – 1990. – С. 53–61.*
17. Анікеєв С. Г., Кузьменко Е. Д., Станкін О. В. *Особенности гравитационного мониторингу на прикладі вирішення задач контролю експлуатації сірчаных родовищ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано–Франківськ. – 1995. – Вип.32. – С. 39–49.*

18. Кузьменко Е. Д., Анікеєв С. Г., Штогрин М. В. Особливості інтерпретації гравіметричних даних методом деталізації при картуванні карстових утворень// Геологія і геохімія горючих копалин. – № 3–4. – 1996. – С. 178–183.
19. Бойко Г. Ю., Лозиняк П. Ю., Заяць Х. Б., Анікеєв С. Г., Петрашкевич М. Й., Колодій В.В., Гайванович О.П. Глибинна геологічна будова Карпатського регіону// Геологія і геохімія горючих копалин. – Львів. – 2003. – №2. – С. 52–62.
20. Анікеєв С. Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при произвольном строении геологических сред: Дисс....канд. геол. наук: 04.00.22/ Киев. – 2000. – 242 с.
21. Анікеєв С. Г. Про методику гравіметричного моніторингу змін в будові геологічного середовища // Геодинаміка, № 1 (7). – Львів, – 2008. – С. 141–146.
22. Анікеєв С. Г. Моделювання густинної будови родовищ самородної сірки за матеріалами гравітаційної дорозвідки // Геодинаміка. – Львів, 2013. № 1(14). – С. 188–198.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work.

UDC 553.661.071.550.812.14(477.83)

Sergiy Anikejev,

PhD (Geology), Associate Professor, Department of Petroleum Geophysics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine,

e-mail: anikejevsergiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7377-7326>;

Sergiy Bagriy,

PhD (Geology), Department of Geotechnogenic Safety and Geoinformatics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

e-mail: gbg2020@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1190-6222>;

Bohdan Hablovskiy,

PhD (Geology), Department of Petroleum Geophysics,

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

e-mail: bohdanhablovskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3502-5550>

IMITATION MODELLING TECHNOLOGY FOR GRAVITY INVERSION CASES

Formulation of the problem. A gravity method is aimed at prospecting and exploration of mineral resources which are based on the study of the geological section structure. The task of quantitative interpretation of the gravimetric materials, which uses methods for solving direct and inverse gravity problems, is the modelling of a gravity field (direct problem) and geological media's density structure (inverse problem). The important features of methods for density structure modelling of complex geological media are geological content, consistency with a priori data and its subordination to geological hypotheses. It is proposed to analyze these properties by a imitation technique.

The purpose of the article is to describe the imitation gravimetric modelling method, based on the construction of an informal sequence of equivalent solutions. The purpose of imitation modelling is to study the properties of gravity inversion in general formulation as well as to assess the degree of detail and reliability of the methodology and technologies of gravity modelling, which is claimed to be an effective solution to geological problems.

Methods. Imitation modelling technology and methods of solving gravity direct and inverse problems for geodensity model of complex geological environment.

Results. The examples of density and structural simulation testing of the informal sequence of equivalent solutions and its computer technologies show that complex interpretation of wells, seismic and gravity data enables to create detailed density models of geological medium. Studies have also been conducted of ways to increase the reliability of gravitational modelling.

Scientific novelty and practical significance. It is revealed that the best approximation of the regional background is an inclined plane, which approximates the observed gravity field along characteristic pickets over the research areas that are better studied. Also, an increase in the reliability of modelling can be achieved by rebuilding near side zones in structural type models in an interactive process of solving structural inverse gravity problems. Substantive modelling depends primarily on the experience of the interpreter, since computer technologies for solving direct and inverse gravity problems are only an interpretation tool.

Keywords: geological section, gravity prospecting, interpretation method, gravity inversion, gravity field, modelling, a priori model, equivalent model, seismic model, density model.

References

1. Petrovskiy O. P., Slobodyanyuk S. O., Ganzhenko N. S., Fedchenko N. S. (2013). Zastosuvannya integral'nogo prostorovogo geologo-geofizychnogo modelyuvannya dlya utochnennya osoblyvostey geologichnoyi budovy` Magdaly`nivs`koyi zapady`ny` [Application of integral spatial geological and geophysical modeling for specification of the features of the Magdalinovska depression geological structure], *Heodynamika (Ukraine)*, 4(48), 33-42.
2. Barbosa C. F., Silva B. C. (1994). Generalized compact gravity inversion. *Geophysics – January*, 59 (1), 57–68.
3. Silva B. C., Barbosa C. F. (2006). Interactive gravity inversion. *Geophysics – January-February*, 71 (1), J1–J9.
4. Condi F. J., Zelt C. A., Sawyer D. S., and Hirasaki G. J. (1999). Gravity inversion for rifted margin deep structure using extension and isostatic constraints. *Geophys. J. Int.* 138, 435–446.
5. Hongzhu Cai, Bin Xiong and Yue Zhu 3D (2018). Modeling and Inversion of Gravity Data in Exploration Scale. Gravity-Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70961>, 20.
6. Bulakh E. G., Markova M. N., Timoshenko V. I., Boyko P. D. (1984). Matematicheskoe obespechenie avtomatizirovannoy sistemy interpretatsii gravitatsionnykh anomalii [Mathematical software for an automated system for interpreting gravitational anomalies], Kyiv, Nauk. dumka, 112.
7. Anikeyev, S. G., Maksymchuk, V. Yu., Melnyk, M. M. (2017). Gustinna model Kolomijskoyi paleodolini za geotraversom SG-I (67) Nadvirna-Otyniya-Ivano-Frankivsk [Density model of the Kolomiya paleovalley along geotravers SG-I(67) Nadvirna-Otyniya- Ivano-Frankivsk]. *Geodynamics*, 1(22), 74-84.
8. Bulakh, E. G. (2010). Pryamye i obratnye zadachi gravimetrii i magnetometrii. Matematicheskie metody geologicheskoy interpretatsii gravimetricheskikh i magnetometricheskikh dannykh [Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. Mathematical methods of geological interpretation of gravimetric and magnetometric data]. *Naukova Dumka*, 463.
9. Gintov, O. B., Orlyuk, M. I., Entin, V. A., Pashkevich, I. K., Mychak, S. V., Bakarzhieva, M. I., Shimkiv, L. M., Marchenko, A. V. (2018). Struktura zahidnoyi i centralnoyi chastin Ukrayinskogo shita. Spirni pitannya [The structure of the western and central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues]. *Geofizicheskij zhurnal* 6(40), 3-29. <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>.
10. Kobrunov, A. I., Petrovskiy, A. P., Kobrunov, S. A. (2005). Evolyucionno-dinamicheskie principy pri rekonstrukcii strukturnykh plotnostnykh modelej sedimentacionnykh bassejnov [Evolutionary-dynamic principles in the reconstruction of structural density models of sedimentary basins]. *Geofizicheskij zhurnal*, (3), 375-380.
11. Starostenko, V. I. (1978). Ustojchivye chislennyye metody v zadachah gravimetrii [Sustainable numerical methods in gravimetric problems]. *Naukova dumka*, 226.
12. Bocin, A., Stephenson, R., Matenco, L., Mocanu, V. (2013). Gravity and magnetic modelling in the Vrancea Zone, south-eastern Carpathians: Redefinition of the edge of the East European Craton beneath the south-eastern Carpathians. *Journal of Geodynamics* (71), 52–64.
13. Grabowska, T., Bojdyś, G. (2001). The border of the East-European Craton in South-Eastern Poland based on gravity and magnetic data. *Terra Nova*, 13 (2), 92-98.
14. Yegorova, T. P., Kozlenko, V. G., Stephenson, R. A., Starostenko, V. I., Legostaeva, O. V. (1997). Preliminary 3-D density model for the lithosphere of the Dniper-Donets Basin on the basis of gravity and seismic data. *Geofizicheskij zhurnal*, 19(1), 124-125.
15. Ján Šefara, Miroslav Bielik, Jozef Vozár, Martin Katona, Viktória Szaláiová, Anna Vozárová, Barbora Šimonová, Jaroslava Pánisová, Sabine Schmidt, Hans-Jürgen Götze (2017). 3D density modelling of Gemeric granites of the Western Carpathians. *Geologica Carpathica*, 68 (3), 177-192.
16. Boyko G. E., Anikeev C. G. (1990). Struktura Karpatskogo podnadviga (po dannykh resheniya obratnoy gravimetricheskoy zadachi) [The Carpathian sub-thrust structure (according to the inverse gravimetric problem solution)] *Tektonika i neftegazonocnoct podnadvigovykh zon*, Moscow, Nauka, 53-61.
17. Anikeyev S. G., Kuzmenko E. D., Stankin O. V. (1995). Osoblyvosti gravitacijnogo monitoryngu na prykladi vyrishennya zadach kontrolyu ekspluatatsiyi sirchanyx rodovyshh [Features of gravitational monitoring on the example of solving the tasks of controlling the sulfur deposits operation], *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 32, 39-49.
18. Kuzmenko E. D., Anikeyev S. G., Shtogryn M. V. (1996). Osoblyvosti interpretatsiyi gravimetrychnyx danyx metodom detalizatsiyi pry kartuvanni karstovykh utvoren [Features of the gravimetric data interpretation by the method of detail for mapping karst formations], *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn*, 3-4, 178-183.
19. Bojko G. Yu., Lozynyak P. Yu., Zayacz X. B., Anikeyev S. G., Petrashkevych M. J., Kolodij V.V., Gajvanovych O. P. (2003). Glybynna geologichna budova Karpatskogo regionu [The deep geological structure of the Carpathian region], *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn*, 2, 52-62.
20. Anikeyev S. G. (1999). Methods of the interpretation of gravimetric materials for complex geological environments. The diss. of the candidate of geol. sci. 04.00.22], S. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 242.
21. Anikeyev S. G. (2008). Pro metodyku gravimetrychnogo monitoryngu zmin v budovi geologichnogo seredovyshha [On the gravimetric monitoring method of changes in the geological environment structure], *Heodynamika (Ukraine)*, 1(7), 141-146.
22. Anikeyev S. G. (2013). Modelyuvannya gustynnoyi budovy rodovyshh samorodnoyi sirky za materialamy gravitacijnoyi dorozvidky [Modelling of the native sulfur deposits density structure on gravitational supplementary exploration materials], *Heodynamika (Ukraine)*, 1(14), 188-198.

УДК 551.24.548:242.7:248(477)

Олексій Вацлавович Бартацук,

к. геол. н., пров. наук. співроб., Український науково-дослідний інститут природних газів,
Гімназійна наб., 20, м. Харків, 61010, Україна,
e-mail: alekseybart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7831-6134>

ГОРИЗОНТАЛЬНІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ГЕОМАС У КОНТИНЕНТАЛЬНИХ РИФТОГЕННИХ ГЕОСТРУКТУРАХ (НА ПРИКЛАДІ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОГО ПАЛЕОРИФТУ). ЧАСТИНА 3. СИСТЕМНА ОРГАНІЗАЦІЯ ПОСТРИФТОВИХ РЕЙДНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

На етапах платформної активізації гірські породи у рифтогенних геоструктурах набувають об'ємної тектонічної рухомості за рахунок внутрішніх структурно-речовинних перетворень і деформації у зонах стрес-метаморфізму під впливом реїдної тектоніки. Структурним проявом реїдної тектоніки у геологічній будові фундаменту і осадових комплексів чохла Дніпровсько-Донецького палеорифту є горизонтальні переміщення його первинних рифтогенних тектонічних елементів- сегментів, лінеаментів, геоблоків, тектонічних структур та вторинне деформаційне структуроформування.

У регулярному та однорідному за субмеридіональним напрямком осі стискання регіональному полі тектонічних напруг, під впливом процесів реїдної тектоніки в осадовому чохлі палеорифту формувалися поздовжні структурні хвилі об'ємної тектонічної течії геомас. Природними механізмами реїдної деформації зумовлено горизонтально-площинні переміщення структурних елементів, кулісних ансамблів розривів та динамічно спряжених з ними локальних структур реїдної деформації. Звичайним тектонічним процесом реїдної динамічної тектоніки є колізійне короблення горизонтів осадової товщі, яким визначаються головні риси системної організації новітньої архітектури палеорифту та його сучасну поздовжню тектонічну сегментацію.

Стаття висвітлює результати тектонофізичних досліджень структурних проявів колізійного етапу еволюції континентальної земної кори, які ускладнюють рифтогенну архітектуру Дніпровсько-Донецького палеорифту. З використанням оригінальної методики реконструкції полів тектонічних напруг і деформацій та тектонофізичного аналізу геоструктур, на підставі аналізу аномалій потенційних геофізичних полів, вертикальних амплітуд неотектонічних рухів встановлено, що під впливом механізмів реїдної тектоніки у палеорифті були сформовані структурні хвилі вторинних деформацій горизонтально-площинної тектонічної течії. Показано, що вони визначають поздовжню тектонічну сегментацію сучасної структури палеорифту. Вивчено територіальне поширення, тектонічну позицію і природні кінематичні механізми формування локальних структур тектонічної течії, лінійних і плащових зон концентрації реїдної деформації субрегіонального і зонального масштабів, розмірами від сотень метрів до десятків кілометрів.

Ключові слова: об'ємна тектонічна рухомість, реїдна тектоніка, зона реїдної деформації.

А. В. Бартацук. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГЕОМАС В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РИФТОГЕННЫХ ГЕОСТРУКТУРАХ (НА ПРИМЕРЕ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОГО ПАЛЕОРИФТА). ЧАСТЬ 3. СИСТЕМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОСТРИФТОВИХ РЕЙДНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ. На этапах платформенной активизации горные породы в рифтогенных геоструктурах приобретают объемную тектоническую подвижность за счет внутренних структурно-вещественных преобразований и деформаций в зонах стресс-метаморфизма под влиянием реидной тектоники. Структурным проявлением реидной тектоники в геологическом строении фундамента и осадочных комплексов чехла Днепровско-Донецкого палеорифта являются горизонтальные перемещения его первичных рифтогенных тектонических элементов-сегментов, линеаментов, геоблоков, тектонических структур и вторичное деформационное структуроформирование.

В регулярном и однородном по субмеридиональному направлению оси сжатия региональном поле тектонических напряжений, под влиянием процессов реидной тектоники в осадочном чехле палеорифта формировались продольные структурные волны объемного тектонического течения геомас. Природными механизмами реидной деформации обусловлено горизонтально-плоскостные перемещения структурных элементов, кулисных ансамблей разрывов и динамично сопряженных с ними локальных структур реидной деформации. Обычным тектоническим процессом реидной динамической тектоники является коллизионное коробление горизонтов осадочной толщи, которым определяются основные черты системной организации новейшей архитектуры палеорифта и его современная продольная тектоническая сегментация.

Статья освещает результаты тектонофизических исследований структурных проявлений коллизионного этапа эволюции континентальной земной кори, которые осложняют рифтогенную архитектуру палеорифта. С использованием оригинальной методики реконструкции полей тектонических деформаций и тектонофизического анализа геоструктур, на основании анализа аномалий потенциальных геофизических полей, вертикальных амплитуд неотектонических движений установлено, что под влиянием механизмов реидной тектоники были сформированы структурные волны вторичных деформаций горизонтально-плоскостного тектонического течения. Показано, что они определяют продольную тектоническую сегментацию современной структуры палеорифта. Изучено территориальное распространение, тектоническую позицию и природные кинематические механизмы формирования локальных структур тектонической течения, линейных и плащевых зон концентрации реидной деформации субрегионального и зонального масштабов, размерами от сотен метров до десятков километров.

Ключевые слова: объемная тектоническая подвижность, реидная тектоника, зона реидной деформации.

Вступ. Завдяки дослідженням зсувної тектоніки осадових басейнів встановлено, що у природних умовах горизонтальні зсуви зазвичай є криволінійними через здатність до вигину та розгалуженню на декілька гілок, які можуть знову зливатися одне з одним [1, 2]. Часто вони перериваються, зміщуються один щодо одного, за-

вдяки узгоджених односпрямованих рухів, формуючи ешелоновані кулісні системи розривів (СР) [3]. Така структурна картина притаманна зонам комбінованих тектонічних режимів транспресії або транстенсії, тобто горизонтального зсування за одночасної дії напруг стискання або розтягу [4]. У випадку зсуву при розсуванні ут-

ворюються осадові басейни типу "Pull-Apart basin"[5].

Морфологія зсувних осадових басейнів визначається первинним структурним рисунком розривів. Вигнуті СР утворюють басейни клинота еліпсоподібної форми [6]. Розсування з горизонтальними зміщеннями окремих сегментів призводить до формування прямокутних або ромбовидних геоструктур, прикладом яких є басейн Мертвого моря.

Відомо, що структурні рисунки реїдної деформаційної складчастості у решітці розривів в межах зсувних басейнів можна ідентифікувати за допомогою простих моделей горизонтального зсуву [7]. Це дозволяє за визначеного напрямку переміщення вздовж зсуву відновлювати просторову орієнтацію вторинної деформаційної складчастості, а також азимутальне простягання і генетичні типи розломів. У свою чергу, за даними ідентифікації структурного рисунку розломів можна встановити напрямок горизонтального переміщення геомас у зоні зсувної деформації.

Аналіз попередніх досліджень.

Встановлено, що на протязі усіх етапів платформної тектонічної активізації у Дніпровсько-Донецькому палеорифті (ДДП) переважали тектонічні рухи за реверсним типом розривів з тангенційною та ротаційною складовими переміщень геомас гірських порід [8, 9, 10].

Особливості вторинного структуроформування на постріфтових етапах геологічного розвитку визначалися, головним чином, загальноплитними колізійними геодинамічними обставинами тангенціального стискання в умовах регіонального горизонтально-зсувного поля тектонічних напруг [11]. Кожен із етапів супроводжувався формуванням окремого структурного рисунку тектонічних деформацій, що був зумовлений чинним розподілом головних осей поля тектонічних напруг, тому сучасна тектонічна будова палеорифту є підсумком усіх постріфтових ускладнень рифтогенної структури [12].

З використанням оригінальної методики реконструкції полів тектонічних напруг і деформацій та тектонофізичного аналізу геоструктур діагностовано кінематичні механізми об'ємної тектонічної течії кристалічних порід докембрійського фундаменту [13, 14] та платформного осадового чохла [15]. Головним результатом реїдної тектоніки у геологічній будові осадових комплексів визначено горизонтальні переміщення його складових тектонічних елементів – мегаблоків, сегментів, геоблоків, локальних структур за ешелонуваними кулісними системами зсувів. Горизонтальними рухами зумовлено формування вторинних деформаційних структур різного масштабу, морфології і генезису, якими складено поз-

довжні структурні хвилі – смуги постріфтових деформацій у структурі платформного осадового чохла палеорифту.

Встановлено поздовжню просторову неоднорідність геодинамічного режиму деформацій на інверсійних етапах тектонічного розвитку палеорифту. Вона була зумовлена зовнішнім зустрічним стресовим тиском усталених субмеридіональних напрямків [17, 18]. Ним викликано утворення регулярного та однорідного за напрямками головних осей поля напруг зі сталою субмеридіональною орієнтацією у горизонтальній площині осі головних нормальних напруг стискання.

Джерелом помірного ларамійського стискання геоструктури була внутрішньоплитна активізація території Західної і частково Східної Європи у результаті колізії плит в Альпах, Динаридах та Понті із одночасним спредінгом у Північній Атлантиці та Арктиці. Ним було створено зустрічний горизонтальний стресовий тиск із півночі. Ларамійська фаза ранньоальпійської епохи тектогенезу максимально проявлена у південно-східній частині ДДП та на Західному Донбасі. Тангенціальним колізійним стисканням зумовлено фрагментацію солянокупольних структурних валів за кулісними системами горизонтальних зсувів та плікативні деформації соляних штоків [18].

Джерелом новітньої, аттичної фази пізньоальпійської епохи деформацій є альпійський орогенез у гірсько-складчастій системі Кавказу. Аттична фаза тектогенезу максимально проявлена у Донецькій складчастій споруді та на південному сході ДДП, де вона викликала формування новітніх складчастих структур, таких як Донецький кряж, Донецько-Приазовський мегавал, а також призвела до горизонтальних правосторонніх зсувних переміщень геомасивів осадових порід вздовж крайових розломів – Персіанівському та Північно-Донецькому [17].

Через це постріфтовому етапу структурно-кінематичної еволюції кори притаманне тектонічне поле із субширотно розташованими максимальними напругами розтягання та максимальними напругами горизонтального стискання усталених субмеридіональних напрямків: південно-західної (кіммерійська епоха), північної (ларамійська фаза ранньоальпійської епохи) і північно-східної (аттична фаза пізньоальпійської епохи) вергентності, спрямованими ортогонально до вісі палеорифту. Такі закономірності просторового розподілу головних параметрів напружено-деформованого стану континентальної земної кори на інверсійному етапі зумовили формування у структурі платформного осадового чохла палеорифту поздовжніх до його простя-

гання різновікових хвиль постріфтових структурних ускладнень [15].

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є створення моделі постріфтових структурних ускладнень платформного осадового чохла неотектонічного етапу еволюції земної кори Дніпровсько-Донецького палеорифту. Для цього вирішувались наступні завдання:

1. визначення тектонічної позиції зон концентрованої реїдної деформації у структурі осадового чохла;
2. аналіз відображення зон реїдної деформації осадового чохла в аномаліях геофізичних полів та полі новітніх тектонічних рухів.
3. складання структурно-кінематичної схеми реїдних деформацій осадового чохла колізійного етапу розвитку геоструктури.

Матеріали та методи досліджень. Тектонофізичними дослідженнями охоплено СР пізньогерцинського, кіммерійського і альпійського етапів тектонічної активізації. Виконувався порівняльний аналіз просторового співвідношення різновікових регіональних систем розривів. Кінематика горизонтальних переміщень вивчалась у динамічно сполученій тектонічній системі магістрального зсуву у поверхні фундаменту і вторинних розломів оперення у платформному осадовому чохлі. Такий аналітичний підхід дозволив встановити динамічну компоненту зміни просторового розподілу головних параметрів напружено-деформованого стану земної кори.

При дослідженнях регіональної геотектоніки використовувалася оригінальна методика реконструкції полів тектонічних напруг і деформацій та тектонофізичного аналізу геоструктур. Новітню структуру осадового чохла розглянуто з позицій динамічної реїдної тектоніки і тектоніки зсувних осадових басейнів на підставі аналізу аномалій потенційних геофізичних полів, вертикальних амплітуд неотектонічних рухів.

Аналітичні картографічні матеріали масштабів 1:500 000, 1:1 000 000 склали схеми тектоніки верхньовізейського та верхньосерпуховського комплексів осадового чохла, карти: вертикальних амплітуд неотектонічних (голоценових) рухів [18], регіональних аномалій магнітного поля $\Delta T\alpha$ [19], розривних порушень і основних зон лінементів південного заходу СРСР (з використанням матеріалів космічної зйомки) масштабів 1:1 000 000 [20].

Результати досліджень. Концепцію інверсійного ускладнення рифтогенного структурно-тектонічного каркасу ДДП внаслідок регіонального прояву реїдної деформації геомас осадового чохла доведено шляхом детального кінематичного аналізу ансамблів вторинних структур та зон реїдної деформації, які мають певну тектонічну позицію у Дніпровському грабені.

Практично в усіх глибинних СР палеорифту ідентифіковано розриви "реверсного" типу (рис. 1), що характеризується, згідно [21]:

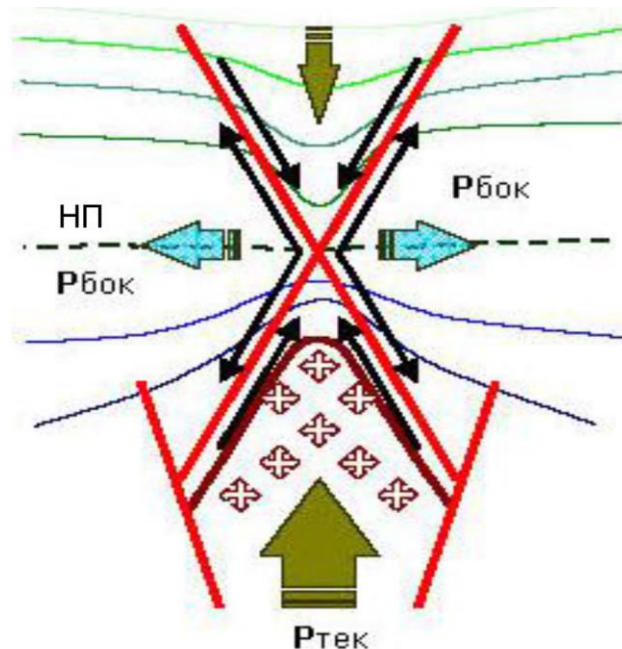


Рис. 1. Принципова кінематична модель формування "квіткової структури" у розрізі осадового чохла, згідно [18]. На першому етапі за системою "реверсних" розривів утворюється антиклінальна структура над горстоподібним виступом кристалічного фундаменту. Згодом, над нею формується пізньоінверсійний грабен просідання. Спостерігаються тектонічні рухи зустрічної кінематики всередині грабена за системою скидів і всередині горсту за системою підкидів до нейтральної поверхні (НП) – геодинамічного компенсатора зустрічних тектонічних рухів

- невитриманістю та істотним згасанням амплітуд тектонічних порушень по простяганню і падінню;
- зміною генетичного типу і кінематики розломів у вертикальному розрізі з глибиною;
- перемінною кінематикою рухів вздовж крил розломів у плані;
- значним переважанням горизонтальних амплітуд переміщень в крилах розломів над вертикальними;
- утворенням ешелонованих кулісних систем горизонтальних зсувів завдяки узгоджених односпрямованих рухів по розривах.

Реверсні розриви складають тектонічний каркас так званих "квіткових структур" у розрізі осадового чохла, що утворюються у зонах динамічного впливу горизонтальних зсувів та ускладнюють структуру палеорифту. Вони є типовими природними дуплексами стискання, з кулісним структурним рисунком розривів у плані, що є структурною ознакою реїдної деформації.

Принципову тектонічну будову «квіткових структур» розглянуто на прикладі Солохівсько-Диканського структурного валу. З використанням палеотектонічних побудов реконструйовано природний кінематичний механізм їх формування під впливом процесу колізійного короблення горизонтів осадової товщі (рис. 2, 3). За результатами тектонофізичного аналізу СР у Південно-Східному мегасегменті встановлено кінематичні ознаки горизонтальних переміщень геомас осадового чохла в напрямку ортогональному до простягання субширотних рифтогенних структур (рис. 4).

За кулісними системами реверсних розривів утворюються тектонічні зриви активізованих геомасивів у формі пластин-лусок, що насуваються на південний та північний борти з боку структурних улоговин осьової зони Дніпровського грабену. Такі типові риси реїдної динамічної деформації досить впевнено простежуються на регіональних профілях та звичайній тектонічній карті (рис. 5, 6, 7).

З врахуванням отриманих даних, на заключному етапі тектонофізичних досліджень проводився структурно-кінематичний аналіз виявлених вторинних деформаційних структур різного масштабу. Вивчались особливості їх просторових співвідношень для уточнення тектонічної позиції у системній організації архітектури осадового чохла. Для цього використовувались допоміжні аналітичні матеріали - карти регіональних аномалій магнітного поля (рис. 8) та вертикальних амплітуд новітніх (голоценових) тектонічних рухів (рис. 9). На їх основі уточнювались кінематичні схеми горизонтальних переміщень та пострифтових реїдних деформацій геомас

платформного осадового чохла.

На цих картах в структурних рисунках магнітних аномалій та аномаліях неотектонічних рухів знаходить чітке відображення структурно-тектонічний каркас вторинних структурних ускладнень палеорифту, який складається з п'яти лінеаментних зон концентрації реїдних деформацій.

Встановлено, що геодинамічний режим та інтенсивність структурних перебудов змінюється у перетині ортогональному до простягання палеорифту. У напрямку від південного до північного борту простежено зміни типу реїдних деформацій, що відображають поступову зміну геодинамічного режиму від переважного стискання до відносного розтягання. Через це у південній прибортовій зоні переважають кулісні ансамблі природних дуплексів стискання дугоподібної морфології із горизонтальною і ротаційною складовими рухів геоблоків і складових елементів їх внутрішньої структури у плані. Проте, в осьовій і північній прибортовій зонах, у режимі транстенсії сформовано переважно структурні парагенези розтягу лінзовидної та овальної морфології (рис. 9).

У перехідній зоні між ДДП та ДСС утворено динамічно спряжені кулісні ансамблі антиклінальних та синклінальних структур реїдної деформації північно-східного простягання, які із різким кутовим неузгодженням накладаються на рифтогенні субширотні структури Західного Донбасу (рис. 7).

Отже, виявлені неоднорідності регіонального поля тектонічних напруг на колізійному етапі структурно-кінематичної еволюції земної кори зумовили формування сучасної поздовжньої тектонічної сегментації структури осадового чохла палеорифту.

Результати регіональних геотектонічних досліджень демонструють актуальність, велике наукове та практичне значення використання оригінальної методики реконструкції полів тектонічних напруг і деформацій та тектонофізичного аналізу геоструктур для реконструкції напружено-деформованого стану земної кори, діагностики типу і кінематики тектонічних рухів та ідентифікації кінематичних механізмів вторинного деформаційного структуроутворення.

Висновки. На етапах платформної тектонічної активізації у регулярному та однорідному за субмеридіональним напрямком головної осі стискання регіональному полі тектонічних напруг, під впливом процесів реїдної тектоніки в осадовому чохлі палеорифту формувалися поздовжні структурні хвилі об'ємної тектонічної течії геомас. Природними механізмами реїдної деформації зумовлено горизонтально-площинні перемі-

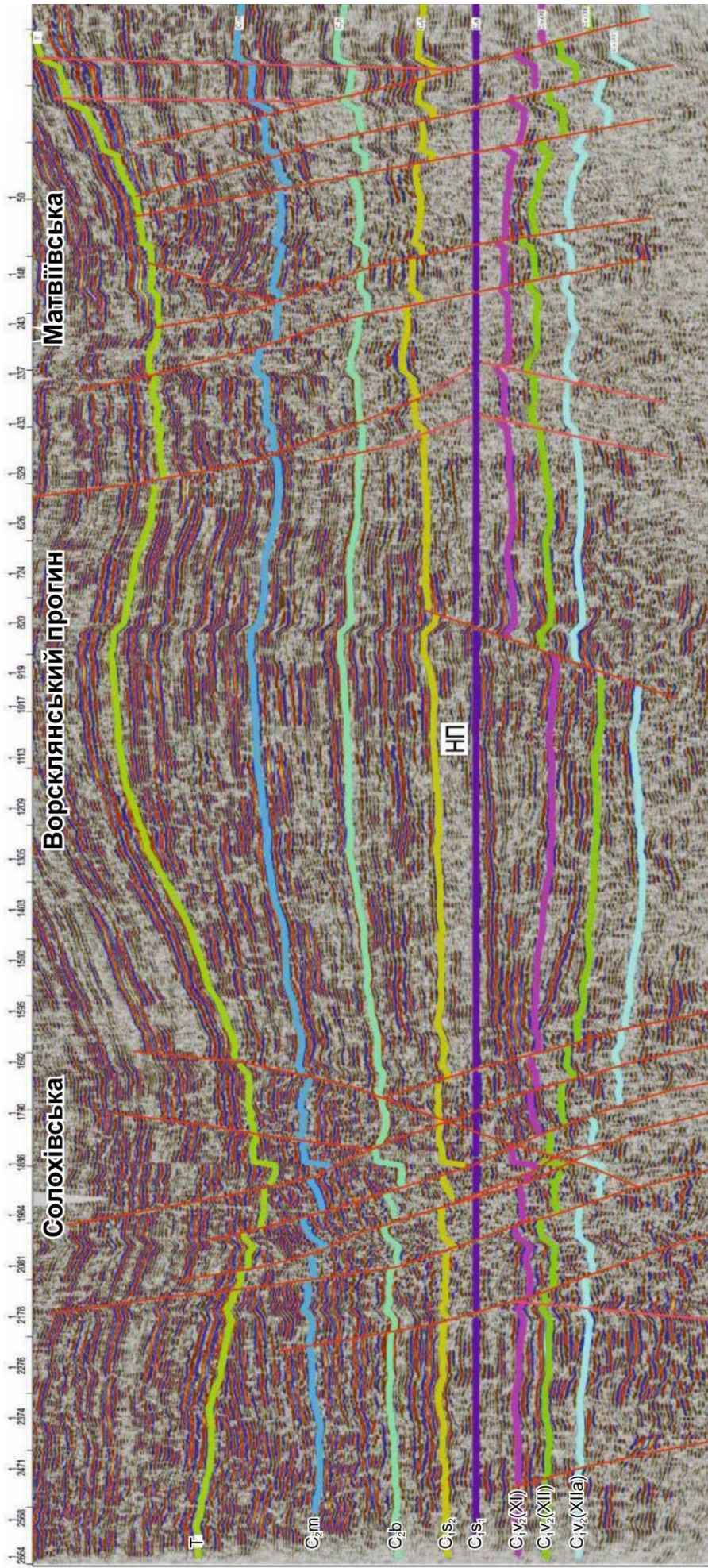


Рис. 2. Реконструкція формування Солохівської та Матвіївської структур рейдної деформації у розрізі осадового чохла осьової зони Дніпровсько-Донецького палеорифту. Для цих "квіткових структур" притаманно утворення грабнів просідання по серпуховських, башкирських і московських відкладах карбону над антиклинальними складками у візе-гурнейських та девонських відкладах. На пізньоінверсійну природу грабнів вказує істотно менші товщини осадових комплексів, що їх заповнюють, у порівнянні з їх товщинами поза межами цих структур. Вторинні деформаційні структури сформовано кулісними системами скидо-зсувів всередині грабнів просідання та підкидо-зсувів всередині горстових піднять. Розриви належать до "реверсного" типу, їх площини спрямовані зверху та знизу назустріч до поверхні «нейтральної поверхні» (НП) – геодинамічного компенсатора зустрічних тектонічних рухів. Палеосейсморозріз за матеріалами сейсморозвідки 3D (інтерпретація О. М. Тяпкіної)

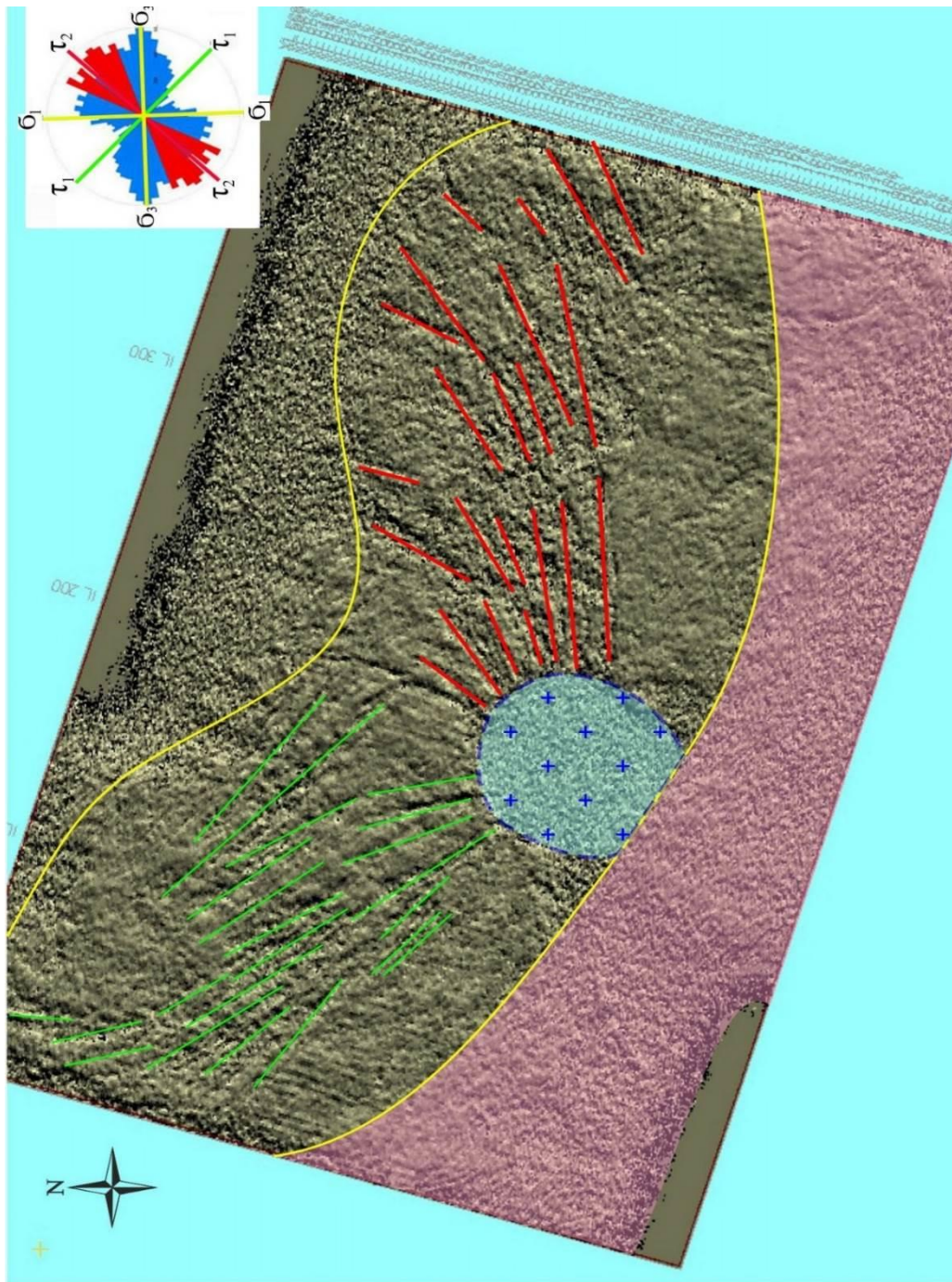


Рис. 3. Структурний прояв реїдної тектоніки колізійного етапу на Солохівській структурі в осьовій зоні Дніпровсько-Донецького палеорифту. Формуванням кулісних рядів скидо-зсувів зумовлено зміщення у плані первинно лінійної осі складки. У східній частині переважає система розривів північно-східних азимутів з лівою кінематикою рухів, а в західній – північно-західного напрямку з правою кінематикою, за якими віялоподібно зміщується у плані поздовжня вісь складки від району Бакейського соляного штоку. На врізці: роза-діаграма азимутального розподілу осей поля тектонічних напруг колізійного етапу орогенезу. Карта кутів нахилу розривів у підшві башкирського ярусу середнього карбону за матеріалами сейсморозвідки 3D (інтерпретація Л. О. Баргашука)

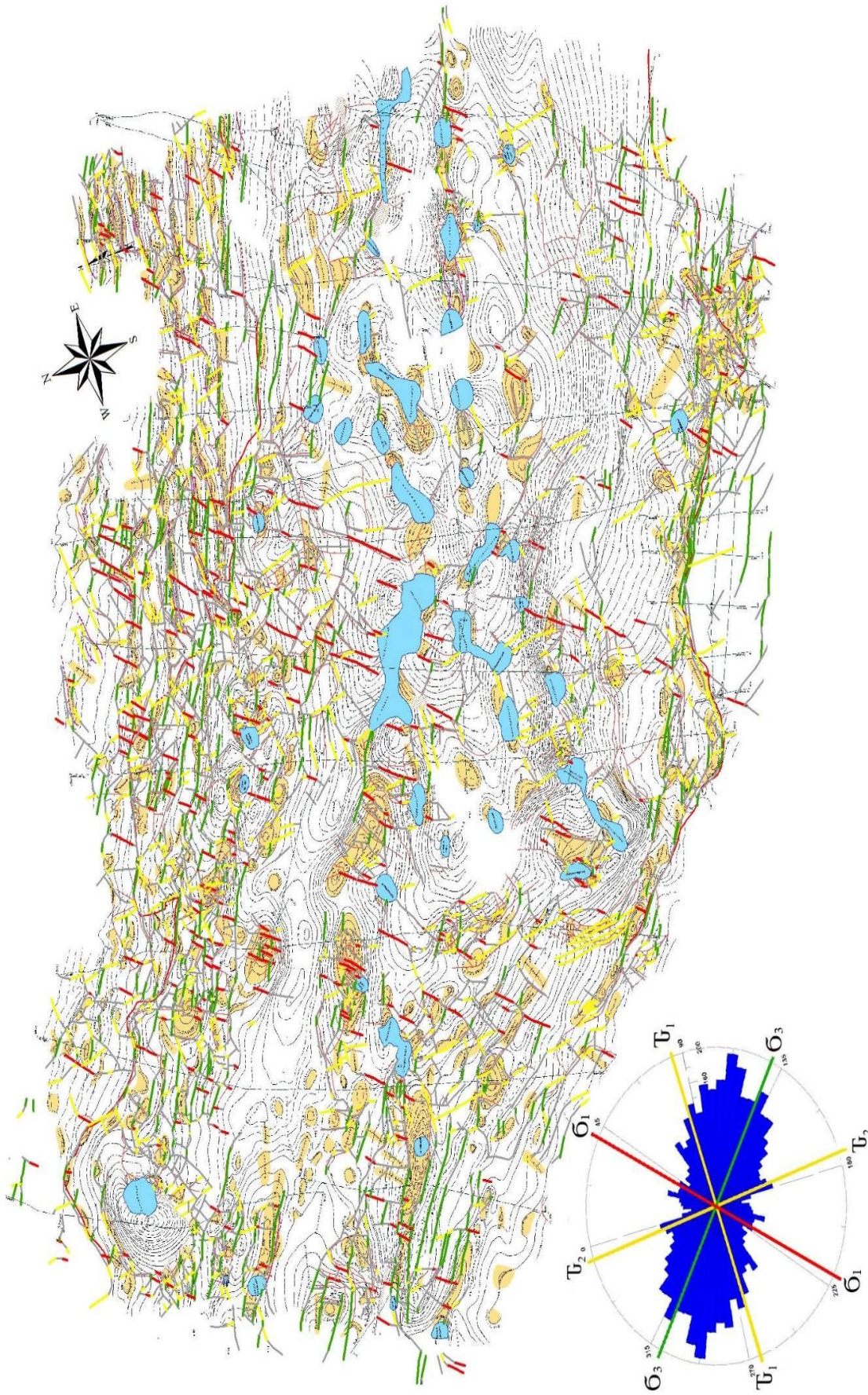


Рис. 4. Реконструкція головних осей поля тектонічних напруг етапу пізньогерцинської платформної активізації у системах розривів осадового чохла Південно-Східного мега сегменту Дніпровсько-Донецького палеорифту на структурній карті верхньосерпуховського комплексу нижнього карбону. На вірзці: кругова роза-діаграма азимутального розподілу розривів. Рифтогенна решітка розривів (зелені і червоні) зміщується у плані накладеною на інверсійному етапі парними діагональними системами горизонтальних зсувів (жовті), що мають типовий кулісний структурний рисунок. Червоні лінеamenti (тріщини відриву) розташовані уздовж вісі головних нормальних напруг стискання, зелені (тріщини сколювання) – уздовж вісі напруг розтягу, жовті (тріщини сколювання) – уздовж парних осей максимальних дотичних напруг

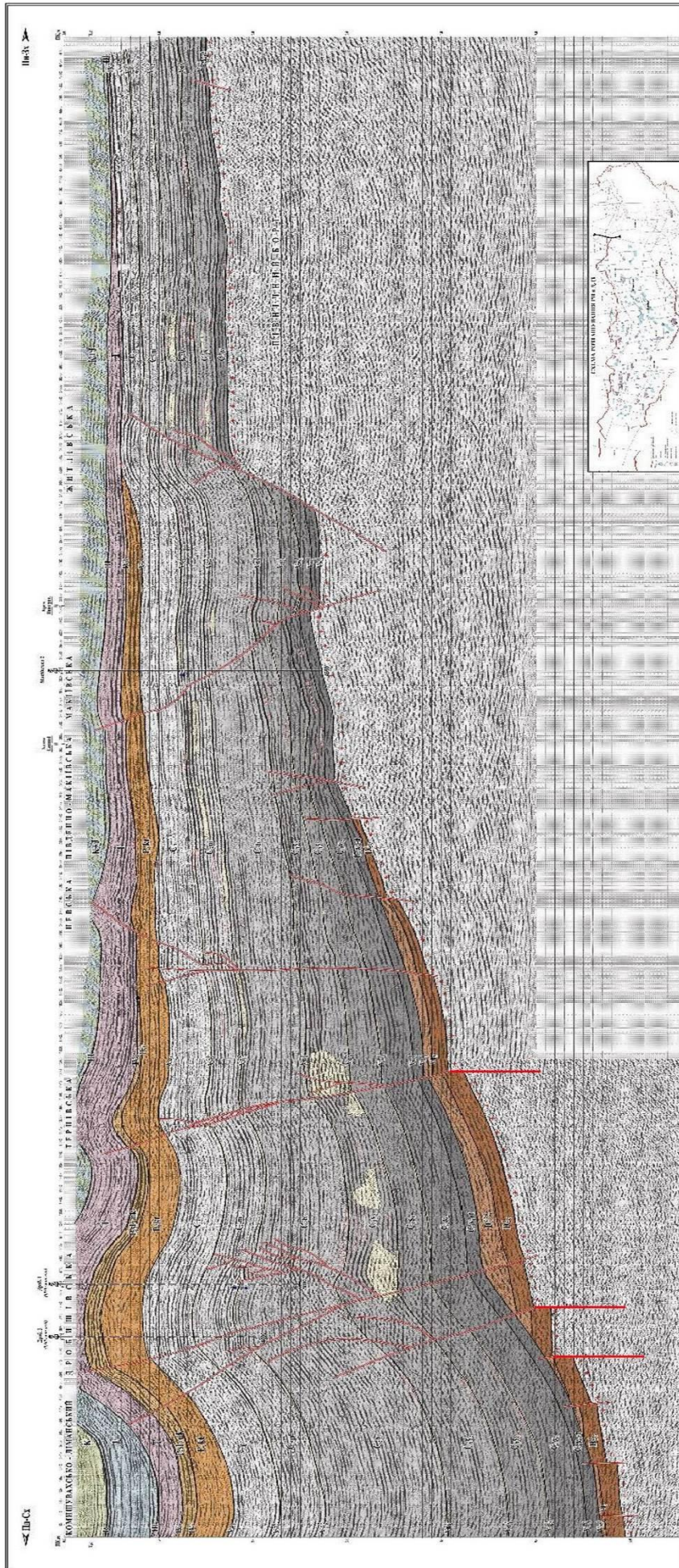


Рис. 5. Структурні ускладнення колізійного етапу у північній крайовій частині Південно-Східного сегменту Дніпровсько-Донецького палеорифту. Утворення комбінованого реверсного типу розривів, що є зсуво-скидами по фундаменту за переважання вертикальної амплітуди зміщень у їхніх крилах, а в розрізі девону, карбону, пермі-насувами і підкладами з горизонтальною складовою тектонічних переміщень. У верхньо-палеозойському та мезозойському комплексах осадового чохла сформовано вторинні структури реїдної деформації, що є надрозломними дуплексами витискання геомас. У розрізі вони мають типову форму «квіткових структур». На врізці – лінія профілю на карті. Сейсмозріз за регіональним профілем Дробішево-Макіївка за матеріалами ТЦ ДТП "Укргеофізика" (М. Победаш, 2014)

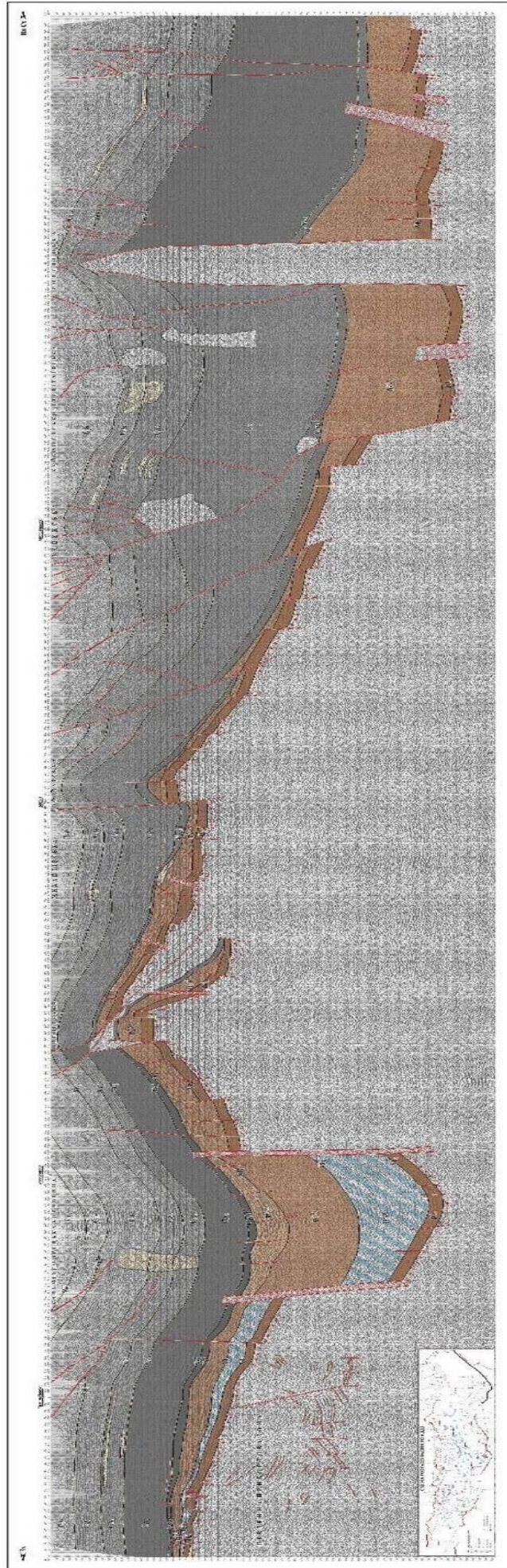


Рис. 6. Структурні ускладнення колізійного етапу в осьовій частині Західного Донбасу. Сейсморозріз за регіональним профілем Красноармійськ-Бірюкове, за матеріалами ТЦ ДП "Укргеофізика" (М. Победаш, 2014). Утворення реверсного типу розривів, що є скидо-зсувами по фундаменту і девону з переважанням вертикальної амплітуди зміщень, а в розрізі карбону – насувами і підкидами з горизонтальною складовою рухів активізованих геомас осадових порід у їхніх крилах. За цими розривами у верхньопалеозойському комплексі осадового чохла сформовано кулісну систему насувних тектонічних лусок південно-західної вергентності. На врізці – лінія профілю на карті

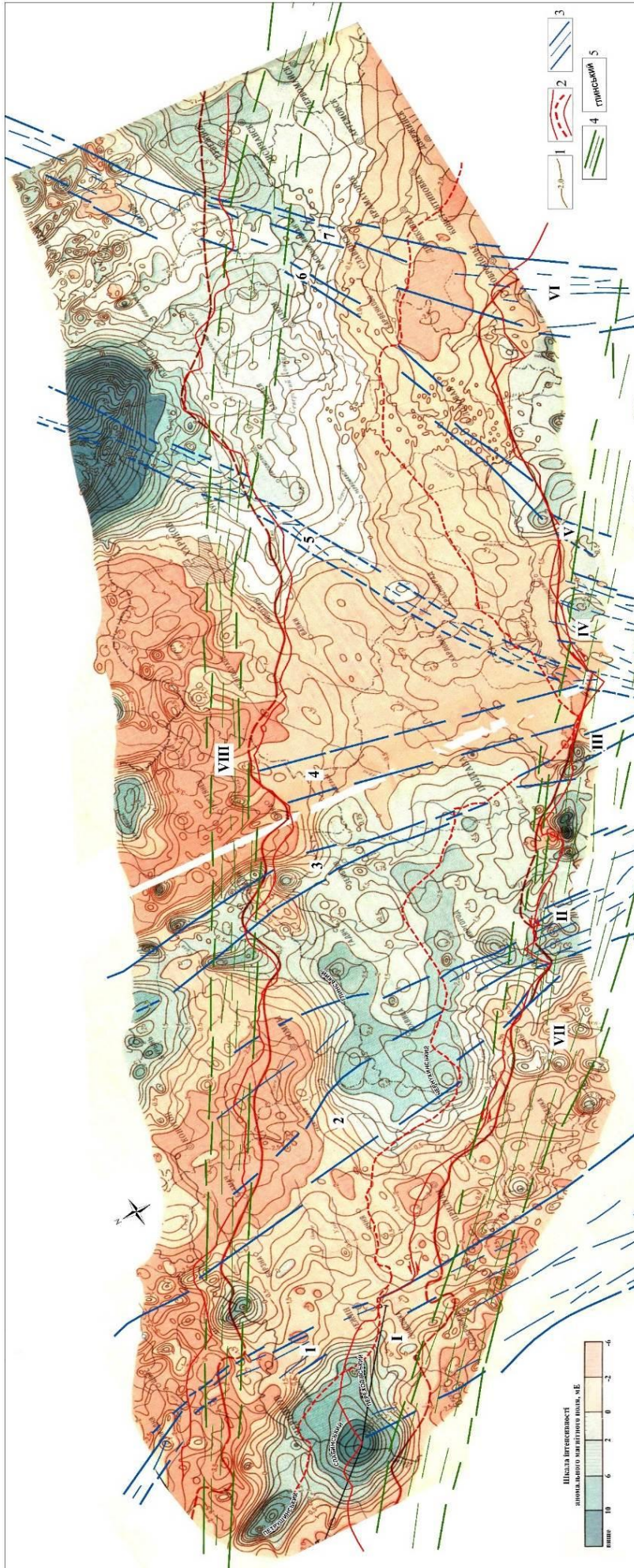


Рис. 8. Схема структурно-тектонічного каркасу постріфових ускладнень платформного осадового чохла на карті регіональних аномалій магнітного поля ΔT_{α} Дніпровсько-Донецької западної частини масштабу 1:1 000 000, згідно [19]. Цифри: шовні зони глибинних розломів- I-VI – Українського щита; I – Кіровоградська; II- Криворізько-Кременчуцька; III – Дніпродзержинська; IV – Одеська; V – Оріхово-Павлоградська; VI – Централіно-Приазовсько-Слов'яногірська; VII, VIII – регіональних крайових: VII – південного, VIII – північного. 1-7 – лінеаментні зони горизонтально-зувального контролю Дніпровського грабену: 1 – Чернігівсько-Нижинська; 2 – Глобино-Конотопська; 3 – Кобеляцько-Лебединська; 4 – Михайлівсько-Охтирська; 5 – Карлівсько-Чутуївська; 6 – Лозівсько-Старобільська; 7 – Добропільсько-Сватівська. Умовні позначення: 1 – ізолнії ΔT_{α} , мЕ; 2 – межі просторового розподілу південної і північної поздовжніх хвиль структурних ускладнень осадового чохла Дніпровського грабену постріфового етапу; 3 – шовні зони глибинних розломів Українського щита та лінеаментні зони; 4 – зони регіональних крайових глибинних розломів; 5 – максимуми магнітного поля ΔT_{α}

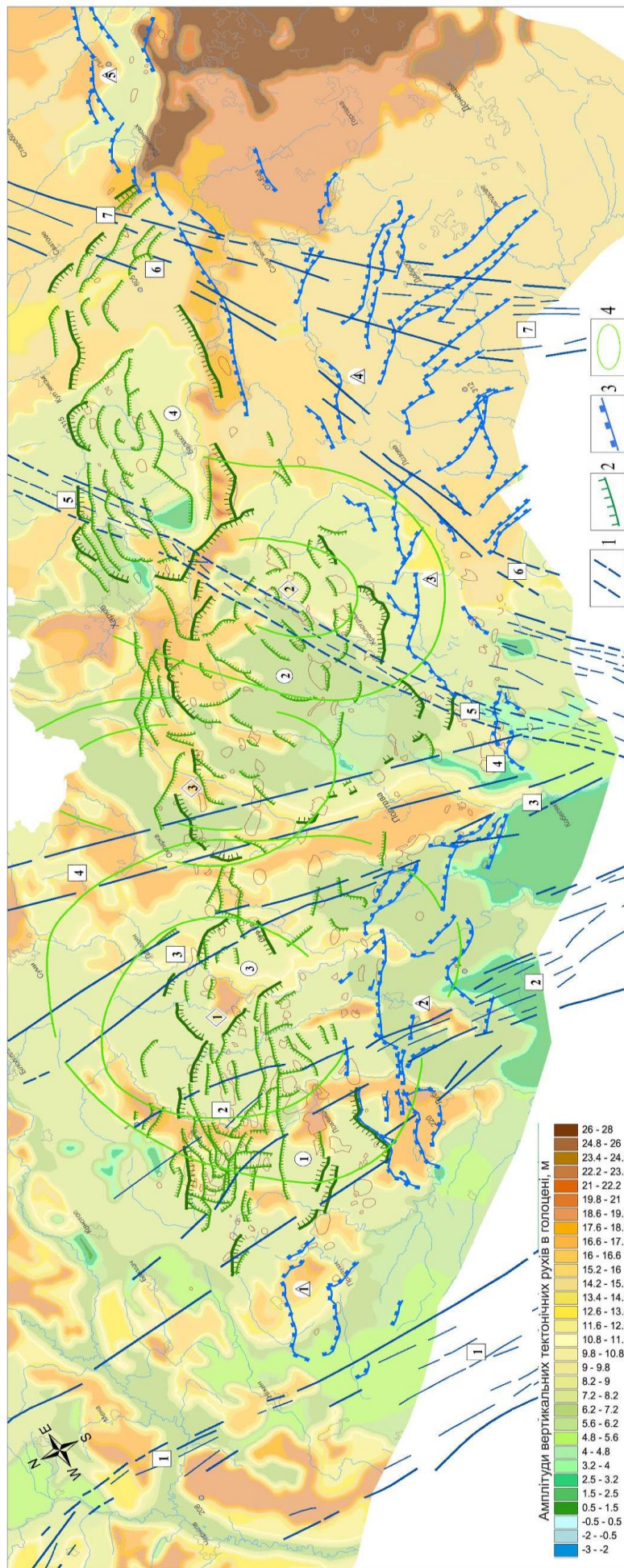


Рис. 9. Структурно-тектонічний каркас колізійного ускладнення платформного осадового чохла (верхньовізейські відклади) Дніпровсько-Донецького палеорифту на карті амплітуд вертикальних неотектонічних рухів, згідно [18]. Цифри в квадратах: 1 – 7 лінеарні зони: 1 – Чернігівсько-Ніжинська; 2 – Глобино-Конотопська; 3 – Кобеляцько-Лебединська; 4 – Михайлівсько-Охтирська (всі розтікання); 5 – Карлівсько-Чугуївська; 6 – Лозівсько-Старобільська; 7 – Дніпро-Львівсько-Сватівська. Цифри в кружечках: 1 – 4 – структурні дугоподібні: 1 – Ічнянська; 2 – Лубенсько-Решетилівська; 3 – Царичанська; 4 – Лозівсько-Селітвська 5 Савинська. Цифри в трикутниках: 1 – 5 структурні дугоподібні: 1 – Гадяцька; 2 – Богодухівська; 3 – Валківська. Умовні позначення: 1 – лінійно-Лисичансько-Луганська. Цифри в ромбах: 1 – 3 – кільцеві дугоподібні аномалії: 1 – Гадяцька; 2 – Богодухівська; 3 – Валківська. Умовні позначення: 1 – лінійно-Лисичансько-Луганська. Цифри в ромбах: 1 – 3 – кільцеві дугоподібні аномалії: 1 – Гадяцька; 2 – Богодухівська; 3 – Валківська. Умовні позначення: 1 – лінійно-Лисичансько-Луганська. Цифри в ромбах: 1 – 3 – кільцеві дугоподібні аномалії: 1 – Гадяцька; 2 – Богодухівська; 3 – Валківська. Умовні позначення: 1 – лінійно-Лисичансько-Луганська. Цифри в ромбах: 1 – 3 – кільцеві дугоподібні аномалії: 1 – Гадяцька; 2 – Богодухівська; 3 – Валківська. Умовні позначення: 1 – лінійно-Лисичансько-Луганська. Цифри в ромбах: 1 – 3 – кільцеві дугоподібні аномалії, згідно [20]

щення різнорангових тектонічних елементів і структур – сегментів, геоблоків, кулісних ансамблів розривів та динамічно спряжених з ними локальних структур реїдної деформації. Звичайним тектонічним процесом динамічної тектоніки є колізійне короблення осадової товщі, що визначає головні риси системної організації новітньої архітектури палеорифту та його сучасну

поздовжню тектонічну сегментацію. Отримані теоретичні висновки складатимуть наукові засади для розробки нової концепції структурно-кінематичної еволюції земної кори ДДП і підставу для корегування схем його геодинаміки, регіональної тектоніки та нафтогазогеологічного районування.

Література

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики [Текст] / М.В. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
2. Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон [Текст] / С. Стоянов. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
3. Копп М. Проблема пространства для деформаций, возникающих в сдвиговом поле напряжений (на примере Средиземноморско–Гималайского орогенного пояса) [Текст] / М. Копп // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании полезных ископаемых. – М.: Наука, 1991. – С.75–85.
4. Woodcock J.T. The role of strike–slip fault systems at plate boundaries [Text] // Phil. Trans. R. Soc. London, 1986. – P. 13–29.
5. Sylvester A.G. Strike–slip faults [Text] // Geol. Soc. Amer. Bull, 1988. – Vol. 100. – P. 1666–1703.
6. Обстановки осадконакопления и фации [Текст]: в 2-х т. –Т. 2: пер. с англ./ Под ред. Х. Рединга. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
7. Harding T. Petroleum traps associated with wrench faults [Text] – Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 58. – 1965. – P. 1290–1304.
8. Бартацук О. В. Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько–Донецького палеорифту. Частина 1. Лінеamenti [Текст] / О. Бартацук // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія", 2016. – Вип. 45. – С. 14–22.
9. Бартацук О. В. Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько–Донецького палеорифту. Частина 2. Лінійні зони горизонтально–здвигових дислокацій рифтового етапу [Текст] / О. Бартацук // Вісник ХНУ, серія "Геологія, географія, екологія", 2017. – Вип. 47. – С. 7–17.
10. Бартацук О. Еволюція геодинамічних умов нафтогазоносності земної кори Дніпровсько–Донецького палеорифту [Текст] / О. Бартацук. Вид–во ІГН НАН України. Серія тектоніка і стратиграфія, 2017. – Вип. 44. – С.44–56.
11. Бартацук О. В. Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько–Донецького палеорифту. Частина 3. Структурно–кінематичні парагенези тектонічної течії зон горизонтально–здвигових дислокацій [Текст] / О. Бартацук // Вісник ХНУ, серія "Геологія, географія, екологія", 2018. Вип. 48. – С. 7–27.
12. Бартацук О. Еволюція напружено–деформованого стану земної кори Дніпровсько–Донецького палеорифту у фанерозої [Текст] // Доповіді НАНУ, 2019. – № 3. – С. 62–71.
13. Бартацук О. Структурні прояви об'ємної тектонічної рухомості кристалічного фундаменту Дніпровсько–Донецького палеорифту [Текст] / О. Бартацук. Вид–во ІГН НАН України. Серія тектоніка і стратиграфія, 2018. – Вип. 45. – С.40–52.
14. Бартацук О. Горизонтальні переміщення геомасивів у континентальних рифтогенних геоструктурах (на прикладі Дніпровсько–Донецького палеорифта). Частина 1. Структурні прояви тектонічної течії у фундаменті [Текст] / О. Бартацук, В. Суярко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія". – Вип. 49. – Х.: ХНУ, 2019. – С. 10–23.
15. Бартацук О. Горизонтальні переміщення геомасивів у континентальних рифтогенних геоструктурах (на прикладі Дніпровсько–Донецького палеорифту). Частина 2. Структурні парагенези зсувної деформації осадового чохла [Текст] / О. Бартацук, В. Суярко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія". – Вип. 50. – Х.: ХНУ, 2019. – С. 27–41.
16. Копп М. Кайнозойские поля напряжений / деформаций Донбасса и их вероятные источники [Текст] / М. Копп, В. Корчемагин. // Геодинаміка, 2010. – Вип. 1 (9) – С. 17–48.
17. Копп М. Реконструкция кайнозойских напряжений / деформаций востока Русской плиты и пути ее применения для решения региональных и прикладных задач [Текст] / М. Копп, А. Колесниченко, Н. Васильев и др. // Геодинаміка, 2017. – Вип. 2 (23) – С. 46–66.
18. "Складання Атласу геолого–геофізичних карт прикордонних територій України (міжнародний проект)". [Карта]: звіт про НДР 654 (заключний)/УкрДГПР: відп. вик. А.В. Полівцев. – Київ, 2008. – 193 с.
19. Атлас геологического строения и нефтегазоносности Днепровско–Донецкой впадины [Карта] / под ред. Ю. А. Арсирия, В. А. Витенко, А. М. Палия, А. К. Цыпко. – К.: УКРНИГРИ, 1984. – 191 с.
20. Карта разрывных нарушений и основных зон линейментов юго–запада СССР (с использованием материалов космической съемки) масштаб 1:1 000 000 [Карта] / под ред. Н. Крылова. – М.: Мин. геологии СССР, 1988. – 4 л.

21. Тимурзиев А. И. *Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты [Текст]: автореф. дис...д-ра геол.-минер. наук / А. И. Тимурзиев. – Московский государственный университет. – М., 2009. – 40 с.*

UDC 551.24.548:242.7:248(477)

Oleksii Bartashchuk,

PhD (Geology), Leading Researcher, Department of Natural Gas Resources,
Ukrainian Scientific Research Institute for Natural Gases,
20 Gimnaziyna Naberejna, Kharkiv, 61010, Ukraine,
e-mail: alekseybart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7831-6134>

HORIZONTAL MOVEMENTS OF GEOMASS IN CONTINENTAL RIFTOGENIC GEOSTRUCTURES (ON THE EXAMPLE OF THE DNIEPER-DONETS PALEORIFT). PART 3. SYSTEMIC ORGANIZATION OF POST-RIFT REID DEFORMATIONS

Formulation of the problem. The article covers the results of tectonophysical studies on the structural manifestations of the collisional evolutionary stage of the continental crust, which complicate the riftogenic architecture of Dnieper-Donets paleorift. At the stages of platform activation, rocks in riftogenic structures acquire volumetric tectonic mobility due to internal structural-material transformations and deformation under the influence of reid tectonics. The structural manifestation of reid tectonics in the geological structure of the basement and sedimentary complexes of the Dnieper-Donetsk paleorift cover is the horizontal movement of its primary riftogenic segment tectonic elements, lineaments, geoblocks, tectonic structures and secondary deformation structure formation.

Review of previous publications and studies. The paleotectonic situation in the paleorift before the start of the rifting is covered by the results of plate-tectonic reconstructions carried out for Ukrainian Shield. Structural-kinematic evolution of the continental crust in the adjacent territories of the Shield in the south was reproduced, covering the stages of collision with subduction of the crust and spreading followed by the extension of continental microplates. On this basis, the important role of ancient even-petty folded structures of sub-meridional extension is determined in the structure of paleorift foundation.

Methods. In geotectonic studies an original technique was used for reconstructing the fields of tectonic deformations and tectonophysical analysis of geostructures, based on potential geophysical fields anomalies and vertical amplitudes of neotectonic movements.

Results. It was established that structural waves of secondary deformations of horizontal-plane tectonic flow were formed under the influence of mechanisms of reid tectonics. It is shown that they determine the longitudinal tectonic segmentation of the modern paleorift structure. The tectonic position and natural kinematic mechanisms in the formation of the tectonic flow local structures, linear concentration zones of reid deformation of subregional and zonal scales, ranging in size from hundreds of meters to tens of kilometers, were studied.

Scientific novelty and practical significance. In the regular submeridional direction of compression axis regional field of tectonic stresses, longitudinal structural waves of the volumetric tectonic flow of geomass formed in the sedimentary cover of the paleorift under the influence of the processes of reid tectonics. The natural mechanisms of reid deformation are caused by horizontal-planar displacements of structural elements, rocky ensembles of discontinuities and local structures of reid deformation dynamically conjugated with them. A common tectonic process of reid dynamic tectonics is collision warping of the sedimentary sequence horizons, which determines the main features of the system organization of the latest paleorift architecture and its modern longitudinal tectonic segmentation.

Keywords: volumetric tectonic mobility, reid dynamic tectonics, reid deformation zone.

References

1. Gzovsky M. (1975). *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka, 536.
2. Stoyanov S. (1977). *The mechanism of fault zones formation*. Moscow: Nedra, 144.
3. Kopp M. (1991) *The problem of space for deformations arising in a shear stress field (on the example of the Mediterranean-Himalayan orogenic belt): Shear tectonic disturbances and their role in the formation of minerals*. Moscow: Nauka, 75-85.
4. Woodcock J.T. (1986). *The role of strike-slip fault systems at plate boundaries*. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 13-29.
5. Sylvester A.G. (1988). *Strike-slip faults: Geol. Soc. Amer. Bull.*, 100, 1666-1703.
6. Reading H. (1990). *Sedimentation and facies conditions*. Moscow: Mir, 384.

7. Harding T. (1965). *Petroleum traps associated with wrench faults: Bull. Am. Ass. Petrol. Geol*, 58, 1290-1304.
8. Bartashchuk O. V. (2016). *Systemic organization of disjunctive tectonics consolidated to the foundation of the Dnieper-Donets paleorift. P. 1. Lineaments: Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 45, Kharkiv, 14-22.
9. Bartashchuk O. V. (2017). *System organization of disjunctive tectonics in consolidated foundation of Dnieper-Donets paleorift. P. 2. Linear zones of strike-slip dislocation of the rift stage: Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 47, Kharkiv, 7-17.
10. Bartashchuk O. V. (2017). *Evolution of geodynamic gas-bearing conditions of the earth's crust in Dnieper-Donets paleorift: Pub.House IGN NAS of Ukraine, Series "Tectonics and stratigraphy"*, 44, Kyiv, 44-56.
11. Bartashchuk O. V. (2018). *System organization of disjunctive tectonics of consolidated foundation of Dnieper-Donets paleorift. P. 3. Structural-kinematic paragenesis of tectonic flow zones of horizontal dislocation: Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 48, Kharkiv, 7-27.
12. Bartashchuk O. V. (2019). *Evolution of the stress-deformed conditions of the earth's crust in Dnieper-Donets paleorift in Phanerozoic: Report of NAS of Ukraine, Series "Earth science"*, 3, Kyiv, 62-71.
13. Bartashchuk O. V. (2018). *Structural manifestations of the volumetric tectonic mobility of the crystalline base of the Dnieper-Donetsk paleorift: IGN NAS of Ukraine, Series "Tectonics and stratigraphy"*, 45, Kyiv, 40-52.
14. Bartashchuk O.V. (2019). *Horizontal displacement of geomassives in continental riftogenic geostructures (on the Dnieper-Donets paleorift application). Part I. Structurally manifested tectonic flows at the foundation: Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 49, Kharkiv, 10-23.
15. Bartashchuk O.V., Suyarko V. G. (2019). *Horizontal displacement of geomassives in continental riftogenic geostructures (on the Dnieper-Donets paleorift application). P. 2. Structural paragenesis of strike-slip deformation of sedimentary cover: Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 50, Kharkiv, 27-41.
16. Kopp M., Korchemagin V. (2010). *Cenozoic stress / strain fields of the Donbass and their probable sources. Geodynamics*, 1(9), Lviv, 17-48.
17. Kopp M., Kolesnichenko A., Vasiliev N. (2017). *Reconstruction of Cenozoic stresses / strains in the drainage of the Russian Plate and ways of its application for solving regional and applied problems. Geodynamics*, 2 (23), Lviv, 46-66.
18. *Compilation of the Atlas of Geological and Geophysical Maps of the Border Territories of Ukraine (International Project). R&D Report (Final) (2008). Contract 654. Kiev: UkrDGRI, 193.*
19. Arsiri Yu. A., Vitenko V. A., Paliy A. M., Tsypko A. K. (1984). *Atlas of the geological structure and oil and gas potential of the Dnieper-Donets Depression. Kiyv: UkrRGEI, 191.*
20. Krylov, N. ed. (1988). *Map of faults and main areas of lineaments of the south-west of the USSR (using materials from space imagery). Scale 1: 1 000 000, Moscow, The Ministry of Geology of USSR, 4.*
21. Timurziev A. (2009). *The newest strike-slip tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluid dynamic aspects. Moscow State University. Moscow, 40.*

УДК 550.839

Ірина Миколаївна Безродна,

к. геол. н., ст. наук. співробітник, заст. директора ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Васильківська, 90, м. Київ, Україна,
e-mail: bezin3@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-6835-5276>;

Віталій Вікторович Антонюк,

аспірант кафедри геофізики ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
e-mail: vitaliantoniuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9741-209X>;

Олег Віталійович Олійник,

головний фахівець сектору інтерпретації даних ГДС, відділу промислово-геофізичних робіт,
Департаменту геофізики, АТ «УкрГазвидобування», вул. Кудрявська 26/28, м. Київ, Україна,
e-mail: orve@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8392>

АНАЛІЗ АНІЗОТРОПІЇ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ (НА ПРИКЛАДІ РОДОВИЩ ПРИОСЬОВОЇ ЗОНИ ДДЗ)

Авторами проведено аналіз анізотропії фільтраційних та електричних параметрів порід-колекторів середнього та нижнього кам'яновугільного комплексу за даними петрофізичних досліджень керну та каротажними даними свердловин 701-Біс Західно-Шебелинської площі та 31 Південно-Коломацької площі приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини.

Комплекс лабораторних досліджень, що включав визначення фільтраційно-ємнісних та електричних досліджень на 40 циліндричних зразках вирізаних у двох напрямках (паралельно та перпендикулярно до осі керну), проводився в петрофізичній лабораторії ННІ «Інститут геології».

Встановлено, що природа анізотропних властивостей досліджених зразків полягає в наявності значної кількості слоудистих мінералів (в деяких породах до 30 %) та шаруватості, що орієнтована під кутом 75-85 ° до осі керну, а також тріцинуватості вздовж нашарування. За результатами петрофізичних досліджень визначено коефіцієнти анізотропії проникності та питомого електричного опору, що дало змогу встановити породи з вертикально орієнтованими до осі свердловини тріцинами, а також такі в яких відсутній рух флюїду в вертикальному напрямку.

Методика дослідження руху флюїду в пластах резервуару базується на модифікованому рівнянні Козені-Кармана та концепції середнього гідралічного радіусу.

Побудовані кореляційні рівняння дозволяють визначити вертикальну проникність через горизонтальну, а також середній гідралічний радіус для досліджуваних порід-колекторів. Вивчені анізотропні параметри дадуть змогу більш точно аналізувати рух флюїду в пластах досліджуваних родовищ.

Ключові слова: породи-колектори, фільтраційні властивості, анізотропія петрофізичних параметрів, вертикальна та горизонтальна проникність.

И. Н. Безродна, В. В. Антонюк, О. В. Олейник, АНАЛИЗ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИОСЕВОЙ ЗОНЫ ДДЗ). Авторами проведен анализ анизотропии фильтрационных и электрических параметров пород-коллекторов среднего и нижнего каменноугольного комплекса по данным петрофизических исследований керна и каротажным данным скважин 701-Бис Западно-Шебелинской площади и 31 Южно-Коломацкой площади приосевой зоны Днепровско-Донецкой впадины.

Комплекс лабораторных исследований, включавший определения фильтрационно-емкостных и электрических исследований на 40 цилиндрических образцах, вырезанных в двух направлениях (параллельно и перпендикулярно оси керна), проводился в петрофизической лаборатории УНИ «Институт геологии».

Установлено, что природа анизотропных свойств, исследованных образцов заключается в наличии большого количества слоудистых минералов (в некоторых породах до 30%) и слоистости, ориентированной под углом 75-85 ° к оси керна, а также трещиноватости вдоль наслоений. По результатам петрофизических исследований определены коэффициенты анизотропии проницаемости и удельного электрического сопротивления, что позволило установить породы с вертикально ориентированными к оси скважины трещинами, а также такие, в которых отсутствует движение флюида в вертикальном направлении.

Методика исследования движения флюида в пластах резервуара базируется на модифицированном уравнении Козени-Кармана и концепции среднего гидравлического радиуса.

Построенные корреляционные уравнения дают возможность определить вертикальную проницаемость через горизонтальную, а также средний гидравлический радиус для изученных пород-коллекторов. Исследованные анизотропные параметры позволят более точно анализировать движение флюидов в пластах месторождений, которые рассматриваются в статье.

Ключевые слова: породы-коллектора, фильтрационные свойства, анизотропия петрофизических параметров, вертикальная и горизонтальная проницаемость.

Вступ. Важливою частиною моделювання нафто-газових басейнів є побудова їх гідродинамічної моделі, яка, в свою чергу, включає аналіз руху флюїдів у резервуарі. Немаловажними завданнями для вирішення цієї задачі є встанов-

лення розповсюдження проникності порід-колекторів у вертикальному та горизонтальному напрямку, а також визначення анізотропії їх фізичних властивостей в цілому.

Пласти гірських порід майже завжди характеризуються анізотропією петрофізичних властивостей за рахунок особливостей характеру осадконакопичення, історії ущільнення осадків, та вторинних змін в структурі пустотного простору порід, а також неоднорідностей їх мікробудови.

Визначення петрофізичних властивостей колекторів нафти і газу можливе як в умовах їх природного залягання, так і в лабораторії. Авторами було проведено аналіз комплексу лабораторних досліджень зразків керна, що дало значні можливості для аналізу їх властивостей та параметрів анізотропії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На даному етапі розвитку розвідувальних методик та методів, що дозволяють уточнити інформацію про петрофізичні властивості порід, дослідники та працівники нафто-газових компаній приділяють велику увагу вивченню анізотропних властивостей порід-колекторів, що допомагає в процесі оцінки, розробки нафтогазового резервуару та видобутку вуглеводнів.

Тематикою дослідження анізотропії фільтраційних властивостей в лабораторних умовах займалися Igbokeoyi A., Iheanacho P., Irayani Z., Lishman J., Shedid S., Solano N., Tiab D., Zahaf K., Вашуркін А., Дмитрієв М., Ковалев А., Котяхов Ф., Кузнецов А. та інші. Автори встановили зв'язок між вертикальною та горизонтальною проникністю чистих теригенних порід, а також порід з різною кількістю та розподілом глинистих мінералів [11, 13, 19, 20].

Лабораторні дослідження керна це єдиний прямий та найбільш простий метод визначення розповсюдження проникності за напрямком. Недоліки даного типу вимірювання обумовлюються порушенням пластових умов та складністю врахування в реальних масштабах фільтрації флюїдів в покладі наявного перешарування гірських порід.

Вивчення анізотропії фільтраційних властивостей проводяться не тільки на зразках керна стандартного розміру (діаметром близько 30 мм), а й на повнорозмірному керні (діаметром 100 мм і більше), що дає можливість зменшити вплив фактору масштабу на дослідження [8].

Окрім лабораторних досліджень кількісну інформацію про розподіл проникності за напрямком можна отримати безпосередньо в пластових умовах за допомогою гідродинамічних опробувань в свердловині, до яких відносяться: опробування свердловин на інтерференцію та селективне опробування зон в одній і тій самій свердловині [2, 3].

Tiab D. та Zahaf K. встановили кореляційну залежність між вертикальною проникністю та

середнім гідравлічним радіусом для пісковиків з різним вмістом та типом глинистих мінералів [21]:

$$K_{пр,в} = A \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right)^B, \quad (1)$$

де А та В – емпіричні константи, $K_{пр,г}$ та $K_{пр,в}$ – проникність виміряна в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно, $K_{п,еф}$ – коефіцієнт ефективної пористості, а $\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}}$ – серед-

ній гідравлічний радіус – унікальний параметр, виведений з модифікованого рівняння Козені-Кармена [1].

Shedid S., використавши рівняння (1), отримав стійкі кореляційні залежності за допомогою яких визначив вертикальну проникність для пісковиків нафтового родовища західної пустелі Єгипту [17].

Нагіваріа Т. представив методику, за допомогою якої можна розрахувати коефіцієнт анізотропії проникності продуктивних інтервалів використовуючи значення питомого електричного опору та радіуса гирла пустот, виміряних в вертикальному та горизонтальному напрямках [9].

Зв'язок між анізотропією електричних та фільтраційних властивостей досліджений Georgi D., Bepalov A., Tabarovsky L. та Schoen J. в різних масштабах (мікро, макро та в об'ємі покладу). Авторами показано, що природа анізотропії в макромасштабі обумовлена нашаруваннями піщано-глинистих зерен мінералів та залежить від умов осадконакопичення [7].

Окрім цього Rosolofosaon P. та Zinszner B. показали, що у випадку, коли природа анізотропних властивостей залежить від нашарування та тріщинуватості, пружні та фільтраційні властивості тісно корельовані в напрямку симетрії [16].

Горюнов І., досліджуючи анізотропію питомого електричного опору встановив її зв'язок з тріщинуватістю гірських порід, що дало змогу ефективно розрахувати місце при бурінні розвідувальних та експлуатаційних свердловин [18].

Продайводой Г., Масловим Б., Безродною І. та інші. розроблений новий метод математичного моделювання ефективної проникності тріщинуватих карбонатних порід-колекторів, який забезпечує чисельні розрахунки проникності моделей, максимально наближених до реальних багатоконпонентних середовищ з будь-якою системою орієнтованих тріщин [14, 15].

Метою даної роботи є визначення анізотропії петрофізичних властивостей порід-колекторів середнього та нижнього кам'яновугільного комплексу площ приосьової зони Дніпровсько-

Донецької западини (Західно-Шебелинської та Південно-Коломацької), а також встановлення кореляційних залежностей між значеннями вертикальної та горизонтальної проникності та іншими фільтраційними параметрами.

Досліджувані породи. Авторами опрацьовано матеріали петрографічного та петрофізичного вивчення порід-колекторів приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини, а саме свердловин 701-Біс Західно-Шебелинської площі та 31 Південно-Коломацької площі.

Західно-Шебелинська площа свердловина 701-Біс (інтервал глибин 4929-5380 м). За даними буріння та статистичного аналізу властивостей зразків керна авторами попередньо було виділено інтервали порід з колекторськими властивостями (4940-4943 та 5202-5211 м) [4]. Попередні дослідження в ННІ «Інститут геології» [12] довели, що виділені породи представлені низькопористими (<10 %) та слабкопроникними (<1 мД) пісковиками з шаруватою текстурою з прошарками слюдистих та глинистих мінералів, а також вуглистої речовини. Шаруватість та тріщинуватість у зразках орієнтовані під кутом 70-90° до осі свердловини. Шаруватість порід візуально проявляється у зміні відтінків прошарків, що викликано відмінностями у складі та наявністю слюдистих мінералів. Дана особливість є основною причиною анізотропії властивостей досліджуваних зразків, яка, зокрема, проявляється у зафіксованій відмінності значень горизонтальної та вертикальної проникності та електричного опору.

Південно-Коломацька площа свердловина 31, серпухівський ярус нижнього карбону, інтервал глибин 5290–5600 м. За даними результатів досліджень в ННІ «Інститут геології» [12] породи з явними колекторськими властивостями представлені двома типами пісковиків. До першого відносяться слюдисті середньо та дрібнозернисті пісковики (інтервал залягання 5356–5363 м) світло-сірого кольору, рівномірної текстури з хвилястими смужками стилітоподібних прожилків бітумоїдно-вуглистої речовини та глинисто-вуглистих включень. Шаруватість нечітко проявлена, пологохвилястошарувата, місцями косошарувата різноспрямована, утворена листуватими, нерівномірно розподіленими прошарочками, що складені слюдистим та вуглисто-слюдистим матеріалом, орієнтована до осі свердловини під кутом 70-85°. Цемент - переважно карбонатно-глинистий. В складі переважає кварц – 30-40 %, слюда – 20-30 %, цемент ≈ 30%.

До іншого типу належать кварцові крупнозернисті пісковики сірого кольору (інтервал залягання 5496-5502 м), рівномірної текстури з погано вираженою смугастістю. Смуги утворені

ділянками породи з цементом більш темного кольору за рахунок наявності в цементі чорної органічної речовини (бітумоїдів), яка у вигляді чорних прожилок та дрібних включень оточує уламкові зерна. Шаруватість субпаралельна та орієнтована під кутом 70-80° до осі керну. Породи складаються з 50-60% зерен кварцу та кварцитів, 35-45 % глинистого цементу.

Методика досліджень. Лабораторні дослідження зразків керна проводилися в петрофізичній лабораторії ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Визначені та проаналізовані параметри для екстрагованих та насичених мінералізованим розчином NaCl (мінералізація – 196 г/л) зразків включають: об'ємну густину, коефіцієнт відкритої пористості, швидкість поздовжньої хвилі, питомий електричний опір, а також коефіцієнти абсолютної газової проникності та залишкового водонасичення.

Для аналізу анізотропії властивостей досліджуваних порід, в першу чергу, проникності, зразки циліндричної форми вирізалися з плашок керна в двох напрямках: перпендикулярно та вздовж осі керна, вилученого зі свердловини.

Коефіцієнт анізотропії проникності (I_A) використовується авторами для вираження ступеня неоднорідності породи та розраховується за наступним рівнянням:

$$I_A = \frac{K_{пр,г}}{K_{пр,в}}, \quad (2)$$

Для встановлення кореляційної залежності між значеннями вертикальної та горизонтальної проникності було використано величину середнього гідравлічного радіусу (r_h) [10], який розраховується, як:

$$r_h = \sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}}, \quad (3)$$

На проникність неоднорідних глинистих пісковиків значною мірою впливає характер розподілу глин. Враховуючи, що в досліджуваних породах наявні в різній мірі глинисті мінерали, для побудови більш стійких кореляційних залежностей автори врахували також об'ємну глинистість [21]:

$$r_{h,sh} = (1 - K_{гл}) \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right) \quad (4)$$

де $K_{гл}$ – коефіцієнт глинистості визначений за даними гама каротажу.

Так як дані дослідження можуть бути використаними при побудові гідродинамічної моделі родовищ та при інженерних розрахунках в нафтогазовій промисловості, автори оперують ви-

значенням ефективної пористості, що розраховується за формулою:

$$K_{п,эф} = K_{п,в} \times (1 - K_{зв}), \quad (5)$$

де $K_{п,в}$ – коефіцієнт відкритої пористості зразків, вимірний газоволометричним методом, $K_{зв}$ – коефіцієнт залишкового водонасичення визначений методом центрифугування.

Для оцінки вмісту глинистих мінералів, автори використали результати вимірювання гама каротажу в свердловинах досліджуваних родовищ. Прив'язка ядерного матеріалу до каротажних кривих здійснювалася зіставленням коефіцієнту відкритої пористості вимірюваному в лабораторії та розрахованому за акустичним та нейтронним каротажем. Розрахунок коефіцієнту глинистості проводився поточною за формулою Ларіонова В.:

$$C_{зл_i} = \left(1,03 \times (\Delta I \gamma_i)^{1,42}\right) \times 0,85, \quad (6)$$

де $\Delta I \gamma_i = \frac{I_{\gamma_i} - I_{\gamma_{\min}}}{I_{\gamma_{\max}} - I_{\gamma_{\min}}}$, I_{γ} , $I_{\gamma_{\min}}$, $I_{\gamma_{\max}}$ – інтенсив-

ність вторинного гамма-випромінювання напроти пласта, а також мінімальна і максимальна інтенсивність по розрізу свердловини.

На питомий електричний опір гірських порід впливає: електропровідність матриці, мінералізація розчину, що насичує породи та катіонно-обмінна ємність глин. Не менш важливими факторами є звивистість пустотних каналів, розмір та тип пустот, а також тип розподілу глинистих мінералів [5]. Власне від властивостей пустотного простору залежить як питомий електричний опір, так і проникність, тому авторами було визначено і анізотропію електричних властивостей.

Коефіцієнт електричної анізотропії розраховувався за рівнянням:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_r}}, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт електричної анізотропії, ρ_v та ρ_r – питомий електричний опір вимірний у вертикальному та горизонтальному напрямках відповідно.

Результати досліджень.

Західно-Шебелинська площа. Петрофізичні параметри, отримані за допомогою лабораторних досліджень керна порід, аналіз яких проводиться в даній роботі, мають наступні значення:

- коефіцієнт відкритої пористості для екстрагованих зразків $7,6 \div 11,7 \%$;
- абсолютна газова проникність у горизонтальному напрямку – $0,074 \div 1,075$ мД, у вертикальному напрямку – $0,025 \div 0,37$ мД;
- питомий електричний опір насичених зразків у горизонтальному напрямку – $3,1 \div 5,1$ Ом·м, у вертикальному напрямку – $4,1 \div 8,6$ Ом·м;
- коефіцієнт залишкового водонасичення – $0,45 \div 0,76$.

Використовуючи значення проникності в горизонтальному та вертикальному напрямках авторами визначено коефіцієнт анізотропії проникності (I_A) досліджуваних зразків (табл.1), який змінюється в межах $0,49 \div 5$ у.о. У двох зразках (№№ 3 та 15), значення I_A менші за одиницю, що говорить про те, що проникність у вертикальному напрямку більша, ніж у горизонтальному. В решти зразків коефіцієнт анізотропії більший за одиницю ($1,6-5$ у.о.), тобто значення горизонтальної проникності вищі за значення вертикальної.

Таблиця 1

Результати визначення коефіцієнта анізотропії зразків Західно-Шебелинської площі

Коефіцієнти анізотропії, у.о.	Значення коефіцієнта анізотропії для зразків (інтервал, м та номер зразка)										
	4933-4935			4935-4944		5208-5211					5232-5239
	1	2	3	4	8	11	12	14	15	18	24
I_A	5	1,6	0,95	1,79	-	2,2	2,42	3,7	0,49	1,8	1,7
λ	0,77	0,87	1,06	0,92	0,85	0,88	0,89	0,9	0,97	0,9	0,9

Коефіцієнт електричної анізотропії (табл.1) змінюється в межах $0,77 \div 1,06$ у.о. У зразку №3 значення питомого електричного опору у вертикальному напрямку більше, ніж у горизонтальному ($\lambda \geq 1$), а найменше значення λ - в зразку № 1. В решти зразків λ варіюється в межах $0,85 \div 0,97$ у.о.

Оцінюючи отримані результати визначення коефіцієнтів анізотропії по проникності та питомому електричному опору встановлено, що в зразках №№ 3 та 15 можуть бути наявні вертика-

льні тріщини, так як проникність в вертикальному напрямку більша ніж в горизонтальному, а питомий електричний опір в вертикальному напрямку менший ніж в горизонтальному. Найбільший коефіцієнт анізотропії в зразка №№ 1, що може свідчити про практичну відсутність руху флюїду у вертикальному напрямку в інтервалі цього зразка.

Побудова залежностей між вертикальною і горизонтальною проникністю не завжди дає бажаний результат (рис.1). У дослідженій колекції

коефіцієнт кореляції для даної залежності – не стійкий ($R^2 = 0,46$), але, використавши коефіцієнт ефективної пористості, авторам вдалося [5]

побудувати тісну кореляційну залежність ($R^2 = 0,87$) між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом порід (рис. 2).

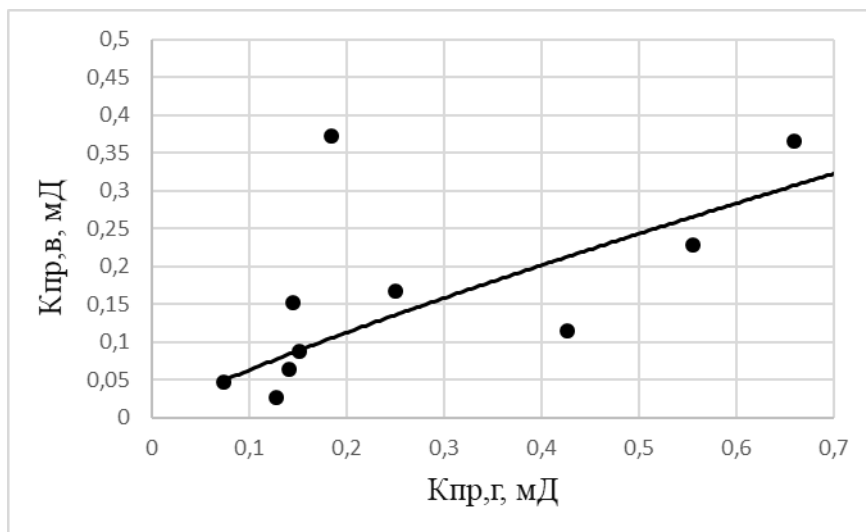


Рис. 1. Залежність між вертикальною та горизонтальною проникністю зразків Західно-Шебелинської площі

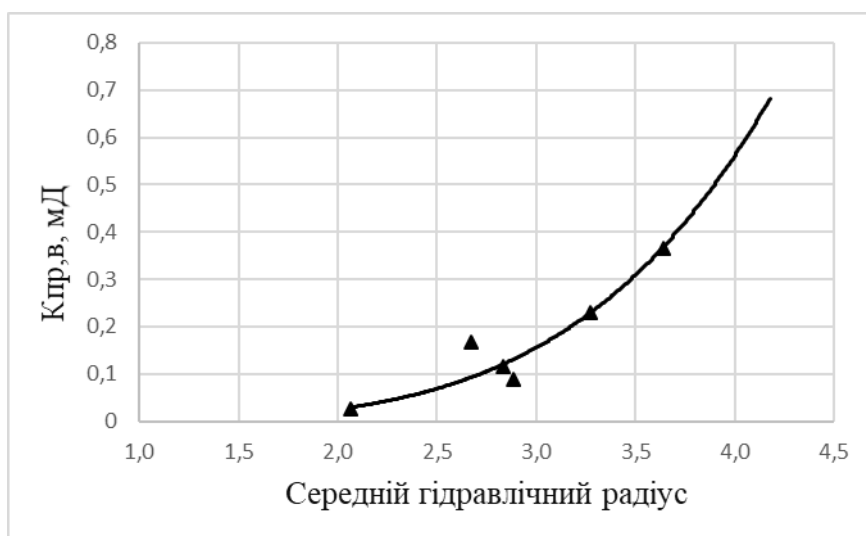


Рис. 2. Залежність між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом зразків Західно-Шебелинської площі

В результаті досліджень для визначення зв'язку між вертикальною та горизонтальною проникністю зразків, а також між коефіцієнтами анізотропії електричних і фільтраційних параметрів авторами побудовані графіки (рис.1, 2) їх залежності та встановлені наступні кореляційні рівняння:

$$1. K_{пр,в} = 0,4363 \times K_{пр,г}^{0,84} \quad \text{з } R^2 = 0,46;$$

$$2. K_{пр,в} = 0,0011 \times \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right)^{4,47} \quad \text{з } R^2 = 0,87.$$

$$3. \lambda = 0,9569 I_A^{-0,096} \quad \text{з } R^2 = 0,60;$$

Південно-Коломацька площа. За результатами лабораторних досліджень керну петрофізичні параметри мають наступні значення:

- коефіцієнт відкритої пористості для екстрагованих зразків $4,5 \div 7,1 \%$;

- абсолютна газова проникність у горизонтальному напрямку – $0,006 \div 0,65$ мД, у вертикальному напрямку – $0,024 \div 0,44$ мД;

- питомий електричний опір насичених зразків у горизонтальному напрямку – $4,2 \div 7,1$ Ом·м, у вертикальному напрямку – $5 \div 10,7$ Ом·м;

- коефіцієнт залишкового водонасичення – $0,18 \div 0,75$.

За результатами визначення анізотропії (табл. 2) встановлено, що I_A змінюється в межах

1,12 ÷ 3,05 у.о. Породи інтервалу 5356-5363 м характеризуються вищими показниками коефіцієнта анізотропії проникності (2,5 ÷ 3,05), що

пов'язано, можливо, з наявністю значної кількості слюдистих мінералів та прожилків бітумоїдно-вуглистої речовини в зразках.

Таблиця 2

Результати визначення коефіцієнта анізотропії для порід Південно-Коломацької площі

Коефіцієнти анізотропії, у.о.	Значення коефіцієнта анізотропії для зразків (інтервал, м та номер зразка)						
	5356-5363				5496-5502		
	3	4	5	6	14	15	18
I_A	2,5	2,93	2,51	3,05	1,12	2,47	1,34
λ	0,81	0,89	0,87	0,83	0,91	0,88	0,95

Значення коефіцієнту електричної анізотропії змінюється в межах 0,81 – 0,95 у.о. Значення питомого електричного опору у вертикальному напрямку більше, ніж у горизонтальному ($\lambda \geq 1$), а інтервал 5356-5363 м характеризується вищими показниками електричної анізотропії.

Встановлено, що величини електричної та фільтраційної анізотропії для всіх зразків Південно-Коломацької площі мають близькі значення, це характеризує однонаправленість в їх фільтраційних властивостях, а також те, що рух флюїду відбувається переважно в горизонтальному напрямку.

Авторами побудовано графіки залежностей між розглянутими петрофізичними параметрами. За побудованими графіками (рис.3, 4) авторами отримано наступні кореляційні залежності між досліджуваними петрофізичними параметрами:

$$1. K_{пр,в} = 0,7 \times K_{пр,г}^{1,25}; R^2 = 0,93;$$

$$2. K_{пр,в} = 0,0015 \times \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right)^4; R^2 = 0,73;$$

$$3. K_{пр,в} = 0,0106 \times (1 - K_{гл}) \times \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right)^{3,04};$$

$$R^2 = 0,86;$$

$$4. \lambda = 0,947 \times I_A^{-0,103}; R^2 = 0,56.$$

Оцінюючи отримані кореляційні рівняння встановлено, що зв'язок між вертикальною та горизонтальною проникністю для зразків Південно-Коломацької площі є найтіснішим (коефіцієнт кореляції становить 0,93) (рис. 3).

Для встановлення стійкої залежності між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом авторами аналогічно враховувалася об'ємна глинистість порід за рівнянням (4) (рис. 4).

Сумарний аналіз вивчення анізотропії досліджених зразків.

У цілому, при дослідженні наведених зразків порід, авторами отримані доволі значні величини параметрів електричної та фільтраційної анізотропії, особливо для порід Західно-Шебелинської площі та інтервалу 5356-5363 м свердловини 31 Південно-Коломацької площі. Причина анізотропності фільтраційних та електричних властивостей пояснюється наявністю в вивчених інтервалах слюдистих мінералів, які мають горизонтально розташоване залягання (тобто перешкоджають проходженню флюїду у вертикальному напрямку), а також шаруватістю та тріщинуватістю порід вздовж нашарування.

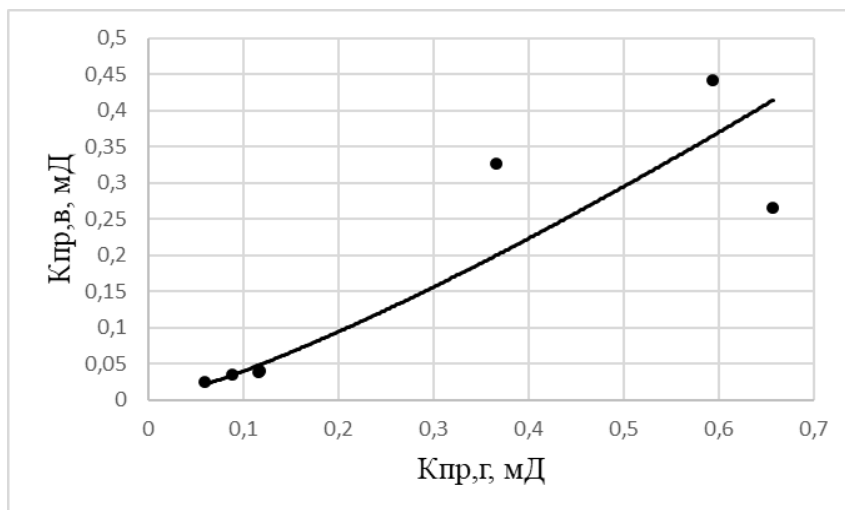


Рис. 3. Зв'язок між горизонтальною та вертикальною проникністю зразків Південно-Коломацької площі

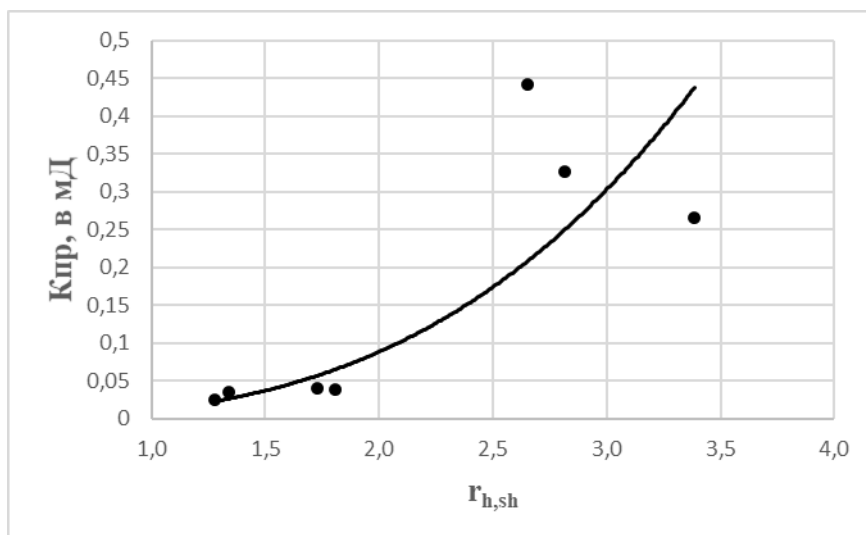


Рис. 4. Зв'язок між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом з врахуванням об'ємної глинистості зразків Південно-Коломацької площі

При сумарному аналізі даних авторами отримані рівняння з тісним кореляційним зв'язком (рис. 5, 6), за якими можна змоделювати вертикальну проникність для порід-колекторів досліджуваних родовищ приосьової зони ДДЗ за значеннями горизонтальної проникності та ефективної пористості:

1. $K_{пр,в} = 0,58 \times K_{пр,г}^{1,07}$ з $R^2 = 0,71$;
2. $K_{пр,в} = 0,0013 \times \left(\sqrt{\frac{K_{пр,г}}{K_{п,еф}}} \right)^{4,2}$ - $R^2 = 0,78$.

Iheanacho P., Tiab D. та Zahaf K. та інші в своїх дослідженнях вперше провели кореляцію між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом (рівняння 1) для пісковиків, в яких переважає міжзернова пористість басейну Іллізі Альжиру та басейну річки Нігер, Нігерія [10, 21]. Дослідниками встановлено, що статистичні коефіцієнти в рівнянні (1) становлять А:

від 0,04 до 0,05; В: від 2 до 2,5. В отриманих авторами кореляційних рівняннях для досліджуваних родовищ приосьової зони ДДЗ статистичні коефіцієнти знаходяться в межах: А: від 0,0011 до 0,0015 та В: від 4 до 4,5. На думку авторів така різниця полягає в тому, що коефіцієнти рівняння (1) залежать від літологічних особливостей порід (розподілу та типу глинистих мінералів), а також від структури пустотного простору, а розглянуті в статті зразки є складнобудованими породами з глибокозалагаючих горизонтів.

Авторами в подальших дослідженнях планується встановити, зв'язок даних коефіцієнтів від типу та пустот в породах-колекторах.

Висновки. Використовуючи дані лабораторних досліджень проникності та питомого електричного опору в горизонтальному та вертикальному напрямках авторами розраховано коефіцієнти електричної та фільтраційної анізотропії досліджуваних порід.

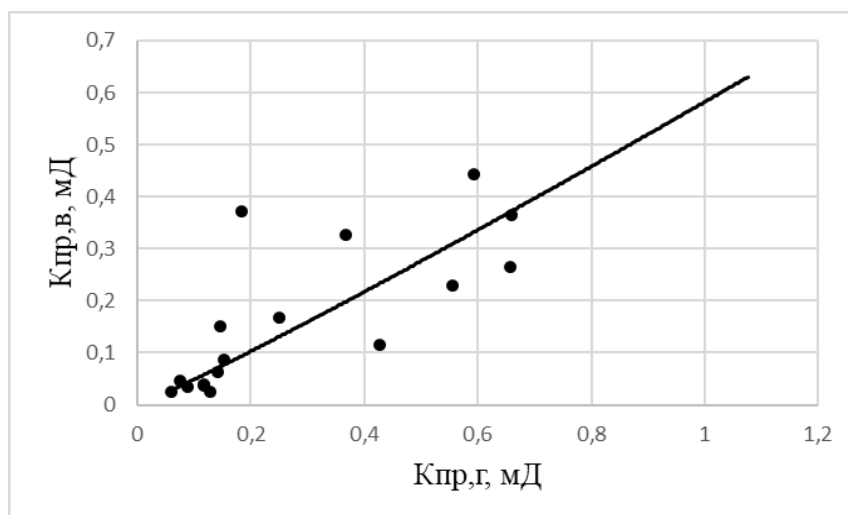


Рис. 5. Зв'язок між горизонтальною та вертикальною проникністю для досліджених порід-колекторів Південно-Коломацької та Західно-Шебелинської площі

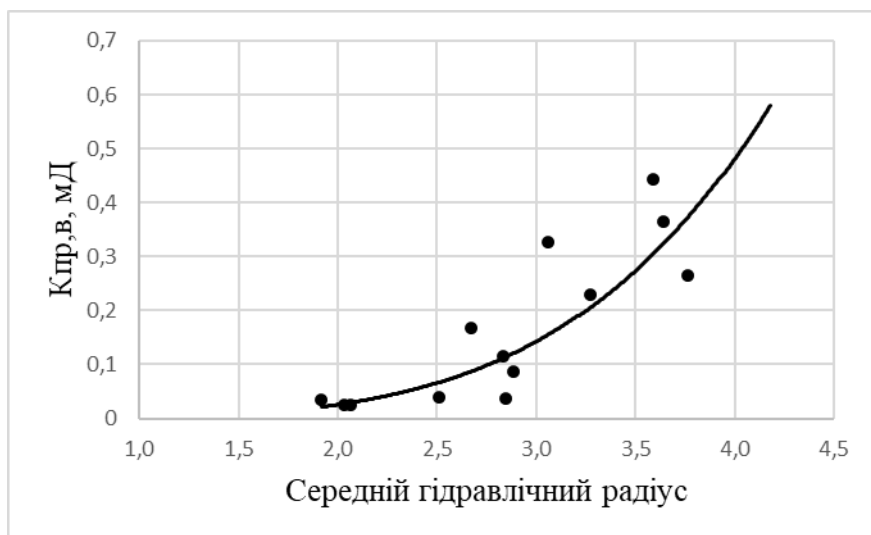


Рис. 6. Залежність між вертикальною проникністю та середнім гідравлічним радіусом для досліджених порід-колекторів Південно-Коломацької та Західно-Шебелинської площ

Виділено зразки, в яких наявні вертикальні тріщини, а також в яких майже відсутній рух флюїдів у вертикальному напрямку. Авторами наведена можливість визначення коефіцієнта горизонтальної чи вертикальної проникності через коефіцієнти анізотропії електричних і фільтраційних параметрів.

Авторами показано, що кореляційний зв'язок між вертикальною та горизонтальною проникністю, не у всіх випадках є тісним. Використавши параметр середнього гідравлічного радіусу, отримано емпіричне рівняння, за допомогою якого визначено вертикальну проникність

через горизонтальну проникність та ефективну пористість.

Отримано рівняння, які можуть використовуватися для розрахунку значень вертикальної проникності для зразків інтервалів порід середнього та нижнього кам'яновугільного комплексів Західно-Шебелинської та Південно-Коломацької площ приосьової зони ДДЗ.

При подальших дослідженнях авторами планується дослідити акустичну анізотропію досліджуваних порід для встановлення зв'язків між анізотропією акустичних та фільтраційних властивостей (для визначення розподілу тріщин та пустот за певними напрямками).

Література

1. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells / [J. O. Amaefule, M. Altunbay, D. Tiab та ін.]. // SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers. – 1993.
2. Аникеев Д. П. Определение анизотропии проницаемости по результатам гидродинамических исследований скважин / Д. П. Аникеев, Т. Н. Цаган-Манджиев. // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – №21.
3. Measuring permeability anisotropy: The latest approach / [C. Ayan, N. Colley, G. Cowan та ін.]. // Oilfield Review. – 1994. – №6. – С. 24–35.
4. Безродна І. М. Оцінка колекторських властивостей теригенних порід московського ярусу Західно_Шебелинської площі на основі даних петрофізики / І. М. Безродна, В. В. Антонюк. // Вісник Київського університету. Геологія. – 2018. – №81. – С. 34–38. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.81.05>
5. Безродна І. М. Аналіз анізотропії електричних та фільтраційних властивостей ущільнених порід-колекторів московського ярусу Західно-Шебелинської площі / І. М. Безродна, В. В. Антонюк, А. В. Шинкаренко. // XVII Міжнародна конференція: «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти». – 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801763>
6. Darling T. Well logging and formation evaluation / Toby Darling., - Elsevier, 2005. – 336 с.
7. On the relationship between resistivity and permeability anisotropy / D. Georgi, A. Bepalov, L. Tabarovsky, J. Schoen. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – 2002. <https://doi.org/10.2523/77715-MS>
8. Особенности изучения фильтрационных характеристик ориентированного ядра сложнопостроенных карбонатных коллекторов / И. П. Гурбатова, В. В. Плотников, Н. А. Попов, Н. А. Сысов. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2013. – №9.
9. Hagiwara T. To estimate permeability anisotropy from resistivity anisotropy / Teruhiko Hagiwara. // Society of Exploration Geophysicists. – 2016. – С. 5693–5697. <https://doi.org/10.1190/segam2016-13174233.1>

10. Iheanacho P. Vertical-Horizontal Permeability Relationships for Sandstone Reservoirs / P. Iheanacho, D. Tiab, A. Igbokoyi. // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 6-8 August, Lagos, Nigeria. – 2012. – №1. – С. 1–8. <https://doi.org/10.2118/163011-MS>
11. Irayani Z. Permeability anisotropy of layering rock model / Z. Irayani, U. Fauzi, F. Latief. // AIP Conference Proceedings. – 2015. – №1656. <https://doi.org/10.1063/1.4917135>
12. Перспективи нафтогазоносності ділянок північного борту та південно-східної прибортової частини Дніпровсько-Донецької западини / [О. М. Карпенко, С. Є. Шнюков, І. В. Віршило та ін.]. – Київ: Звіт з НДР, 2011. – 129 с.
13. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Федор Иванович Котяхов. – Москва: Недра, 1977. – 288 с.
14. Маслов Б. П. Дисперсия и рассеяние упругих волн в трещиноватой геологической среде / Б. П. Маслов, Г. Т. Продайвода. // Геофизический журнал. – 1999. – №20. – С. 47–55.
15. Продайвода Г. Т. Новый метод математического моделирования эффективной проницаемости карбонатных коллекторов / Г. Т. Продайвода, И. М. Байсарович, И. Н. Безродная, Т. Г. Продайвода. // Геофизический журнал. – 2008. – №30. – С. 118–124.
16. Rasolofosaon P. N. Comparison between permeability anisotropy and elasticity anisotropy of reservoir rocks / P. N. Rasolofosaon, B. E. Zinszner. // Geophysicis. – 2002. – №67. – С. 230–240. <https://doi.org/10.1190/1.1451647>
17. Shedid S. A. Vertical-horizontal permeability correlations using coring data / Shedid A. Shedid. // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.12.007>
18. Смехов Е. М. Опыт методических исследований трещинных коллекторов нефти и газа и пути их практического применения / Е. М. Смехов, И. И. Горюнов, Е. С. Ромм. – Л.: Гостоптехиздат: Тр. ин-та ВНИИГРИ, 1959. – 52 с.
19. Modeling core-scale permeability anisotropy in highly bioturbated “tight oil” reservoir rocks / [N. Solano, M. Soroush, C. Clarkson та ін.]. // Computational Geosciences. – 2017. – №21. – С. 567–593. <https://doi.org/10.1007/s10596-017-9635-2>
20. Tiab D. Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties 4th Edition / D. Tiab, E. C. Donaldson. - Gulf Professional Publishing, 2015. – 918 с.
21. Zahaf K. Vertical permeability from in situ horizontal measurements in shaly-sand reservoirs / K. Zahaf, D. Tiab. // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2002. – №41. <https://doi.org/10.2118/02-08-01>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 550.839

Iryna Bezrodna,

PhD (Geology), Senior Researcher, Deputy Director of Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine,
e-mail: bezin3@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6835-5276>;

Vitalii Antoniuk,

PhD Student of the Department of Geophysics,
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: vitaliantoniuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9741-209X>;

Oleh Oliinyk,

Chief specialist of well logging data interpretation sector,
Department of Geophysics, PJSC “Ukrigasvydobuvannya”, 26/28 Kudriavska St., Kyiv, 04053, Ukraine,
e-mail: orve@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8392>

ANALYSIS OF FILTRATION AND ELECTRICAL PROPERTIES ANISOTROPY OF TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS (FOR DDB AXIAL ZONE RESERVOIRS)

The paper **focuses on** the filtration and electrical anisotropy coefficients and relationship between vertical and horizontal permeability in sandstone reservoir rocks.

Field case study of DDB reservoir rocks. Petrophysical properties and parameters are estimated from core and log data from a Moscovian and Serpukhovian stages of Dnipro-Donetsk Basin (West-Shebelynka area well 701-Bis and South-Kolomak area well 31).

Routine core analysis included estimation of absolute permeability, open porosity, irreducible water saturation and electrical resistivity (on dry and saturated by mineralized solution) of 40 core samples along two orthogonal directions. Shale fraction is estimated using well logging data in wells which are analyzed.

The authors report that reservoir rocks are represented by compacted poor-porous ($\phi < 10\%$), low permeable ($k < 1\text{mD}$) laminated sandstone with different ratios of clay minerals (V_{sh} from 0,03 to 0,7) and high volume of micaceous minerals (in some cases 20-30 %).

Research theory. One of the main objectives of the work is to develop empirical correlation between vertical permeability and other capacitive and filtration properties for compacted sandstone reservoirs. A modified Kozeny-Carman equation and the concept of hydraulic average radius form the basis for the technique.

Results. Coefficients of the anisotropy of gas permeability (I_A) and electrical resistivity (λ) are defined based on the results of petrophysical studies. The experiments proved that I_A lies in a range from 0,49 to 5 and λ from 0,77 to 1,06. Permeability and electrical resistivity anisotropy in most cases have horizontal distribution.

It has been shown that in West-Shebelynka area sample №1 (depth 4933 m) there is probably no fluids flow in vertical direction and in samples №№3 and 15 fractures have the vertical orientation.

We have also found that the values of electrical and filtration anisotropy for all samples of South-Kolomak area are similar, this characterized the unidirectionality in their filtration properties, as well as the fact that the motion of the fluid flow mainly in the horizontal direction.

In the studied rocks the degree of anisotropy has been concluded to depend on the volume of clay and micaceous minerals, their stratification, fractures, density, and their orientation.

New correlation between vertical permeability, horizontal permeability and effective porosity are developed for Late Carboniferous DDB intervals that are analyzed.

Keywords: reservoir rocks, filtration properties, anisotropy of petrophysical parameters, vertical and horizontal permeability.

Reference

1. Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., & Keelan, D. K. (1993). Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. In SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/26436-MS>
2. Anikeev, D. P., & Tsagan-Mandzhiev, T. N. (2018). Determination of permeability anisotropy from hydrodynamic well testing studies. *Aktualnye Problemy Nefti i Gaza*, 2(21). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-21.art15> [In Russian].
3. Ayan, C., Colley, N., Cowan, G., Ezekwe, E., Wannell, M., Goode, P., & Halford, F. (1994). Measuring permeability anisotropy: The latest approach. *Oilfield Review*, 6(4), 24–35.
4. Bezrodna, I., & Antoniuk, V. (2018). Estimation of Moscovian Stage West-Shebelynka area clastic sedimentary rock reservoir properties using laboratory petrophysical data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 2(81), 34–38. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.81.05> [In Ukrainian].
5. Bezrodna, I., Antoniuk, V., & Shynkarenko, A. (2018). Analysis of electrical and filtration properties anisotropy of the compacted reservoir rocks of Moscovian stage (West-Shebelynka area). In 17th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801763> [In Ukrainian].
6. Darling, T. (2005). *Well logging and formation evaluation*. Elsevier.
7. Georgi, D., Bupalov, A., Tabarovsky, L., & Schoen, J. (2002). On the relationship between resistivity and permeability anisotropy. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2523/77715-MS>
8. Gurbatova, I. P., Plotnikov, V. V., Popov, N. A., & Sysoev, I. V. (2013). Peculiarities of filtration characteristics research of the oriented core from complex carbonate reservoirs. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, (9). <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9923/2013.9.9> [In Russian].
9. Hagiwara, T. (2016). On estimation of permeability anisotropy from resistivity anisotropy. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016 (pp. 5693–5697). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/segam2016-13174233.1>
10. Iheanacho, P. C., Tiab, D., & Igbokoyi, A. O. (2012). Vertical-Horizontal Permeability Relationships for Sandstone Reservoirs. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 6-8 August, Lagos, Nigeria (pp. 1–8). SPE. <https://doi.org/10.2118/163011-MS>
11. Irayani, Z., Fauzi, U., & Latief, F. D. E. (2015). Permeability anisotropy of layering rock model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1656). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4917135>
12. Karpenko, O. M., Shniukov, S. Y., & Virshylo, I. V. (2011). Prospects for oil and gas bearing areas of the northern board and south-eastern submerged part of the Dnipro-Donets depression. *Zvit z NDR, Kyiv*. [In Ukrainian].
13. Kotiakhov, F. I. (1977). *Physics of oil and gas reservoirs*. Nedra. Moscow. [In Russian].
14. Maslov, B. P., & Prodaivoda, H. T. (1999). Dispersion and scattering of elastic waves in a fractured geological environment. *Geophysical Journal*, 20(2), 47–56. [In Russian].
15. Prodaivoda, H. T., Baisarovych, I. M., Bezrodna, I. M., & Prodaivoda, T. H. (2008). A new method for mathematical modeling of carbonate collectors effective permeability. *Geophysical Journal*, 30(1), 118–124. [In Russian].

16. Rasolofosaon, P. N. J., & Zinszner, B. E. (2002). *Comparison between permeability anisotropy and elasticity anisotropy of reservoir rocks*. *Geophysics*, 67(1), 230–240. <https://doi.org/10.1190/1.1451647>
17. Shedid, S. A. (2019). *Vertical-horizontal permeability correlations using coring data*. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.12.007>
18. Smehov, E. M., Gorjunov, I. I., & Romm, E. S. (1959). *Opyt metodicheskikh issledovanij treshhinnyh kollektorov nefti i gaza i puti ih prakticheskogo primenenija*. Tr. VNIGRI, (144). [In Russian].
19. Solano, N. A., Soroush, M., Clarkson, C. R., Krause, F. F., & Jensen, J. L. (2017). *Modeling core-scale permeability anisotropy in highly bioturbated “tight oil” reservoir rocks*. *Computational Geosciences*, 21(3), 567–593. <https://doi.org/10.1007/s10596-017-9635-2>
20. Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties: Fourth Edition*. Elsevier.
21. Zahaf, K., & Tiab, D. (2002). *Vertical permeability from in situ horizontal measurements in shaly-sand reservoirs*. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41(08). <https://doi.org/10.2118/02-08-01>

УДК 549.621.2.01/02(477.8:292.452)

Лариса Володимирівна Генералова,

к. геол. н., доцент, кафедра загальної геології та регіональної геології, геологічний факультет,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Грушевського, 4, м. Львів, 79005, Україна,
e-mail: gen_geo@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6033-6556>;

Володимир Борисович Степанов,

к. геол.-мін. н., доцент, кафедра петрографії, геологічний факультет,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
e-mail: vbstepanov23@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0577-8682>;

Наталія Теодорівна Білик,

асистент, кафедра мінералогії, геологічний факультет,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
e-mail: natbilik@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9684-195X>;

Євгенія Мартинівна Сливко,

к. геол.-мін. н., доцент, кафедра екологічної та інженерної геології і гідрогеології,
геологічний факультет, Львівський національний університет імені Івана Франка,
e-mail: emslivko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2731-0602>

СЕРПЕНТИНИ – ІНДИКАТОРИ МЕТАМОРФІЧНИХ І ГЕОДИНАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ МЕЗОЗОЙСЬКИХ ПЕРИДОТИТІВ ВНУТРІШНІХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

В праці викладені результати дослідження серпентинізованих апоперидотитів офіолітового угольського комплексу Внутрішніх Українських Карпат. Праця ґрунтується на даних геологічного спостереження в середній течії р. Терблї та лабораторних аналізах. Розглянуто матеріали петрографічного, мінералогічного, рентгеноструктурного, термовагового та мікрозондового вивчення серпентинів. Середньотриасово-нижньокрейдові (?) серпентинізовані апоперидотити утворюють олістоліти в нижньокрейдовій соймільській олістостромово-конгломератовій товщі. Вивчені серпентини є породоутвірними мінералами лїзардитових і антигоритових серпентинітів. Лїзардитові серпентиніти мають лїнзовидно-петельчасті текстури, представлені α -лїзардитами з хромшпінелідами за підвищеної хромистості і глиноземистості при меншій залізистості. Антигоритові серпентиніти розпізнаються за смугасто-сланцеватими текстурами, складаються з β -лїзардитів, антигоритів, магнетиту. Лїзардитові серпентиніти характерні для регресивного метаморфізму верхів зеленосланцевої фації. Антигоритові серпентиніти є типовими утвореннями прогресивного метаморфізму низів зеленосланцевої – верхів епідот-амфіболітової фації. Регресивний метаморфізм був реалізований в геодинамічній обстановці спредингу. Прогресивний метаморфізм проходив у субдукційних умовах між терейнами Дація і Тисія, які призвели до закриття Трансильвансько-Муреського палеоокеану. Лїзардитові серпентиніти мають первинно-мантіїні протоліти ультраосновного (реститового) складу. Антигоритові серпентиніти характеризуються літосферними протолітами основного складу. Вивчення серпентинітів апоперидотитів угольського комплексу, є інформативним для з'ясування метаморфічних перетворень вихідних первинно-мантіїних протолітів і встановлення стадійності формування літосфери складчасто-покривних споруд.

Ключові слова: Внутрішня зона Східних Українських Карпат; перидотити; серпентини; α - і β -лїзардити, антигорит.

Л. В. Генералова, В. Б. Степанов, Н. Т. Білик, Е. М. Сливко. СЕРПЕНТИНЫ – ИНДИКАТОРЫ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ МЕЗОЗОЙСКИХ ПЕРИДОТИТОВ ВНУТРЕННИХ УКРАИНСКИХ КАРПАТ. В работе изложены результаты изучения серпентинизированных апоперидотитов офіолітового угольського комплексу Внутренних Украинских Карпат. Работа основана на данных геологических наблюдений в среднем течении р. Тербля и лабораторных анализах. Рассмотрены материалы петрографического, минералогического, рентгеноструктурного, термовагового и микророндового исследования серпентинов. Среднетриасово-нижнемеловые серпентинизованные апоперидотиты образуют олістоліти в нижнемеловой соймільской олістостромово-конгломератовой толще. Изученные серпентини являются породообразующими минералами лїзардитовых и антигоритовых серпентинитов. Лїзардитовые серпентиниты имеют лїнзовидно-петельчастые текстуры, представлены α -лїзардитами с хромшпінелідами при повышенной хромистости, глиноземистости и пониженной железистости. Антигоритовые серпентиниты распознаются по полосчато-сланцеватым текстурам, состоят из β -лїзардитов, антигоритов, магнетита. Лїзардитовые серпентиниты характерны для регресивного метаморфизма верхов зеленосланцевой фації. Антигоритовые серпентиниты являются типичными образованиями прогрессивного метаморфизма низов зеленосланцевой – верхов епідот-амфиболітової фації. Регресивный метаморфизм реализован в геодинамической обстановке спрединга. Прогресивный метаморфизм происходил в субдукционных условиях между терейнами Тиссия и Дакия, приведших к закрытию Трансильванско-Мурешского океана. Лїзардитовые серпентиниты имеют первично-мантіїные протоліты ультраосновного (реститового) состава. Антигоритовые серпентиниты характеризуются литосферными протолітами основного состава. Изучение серпентинитов апоперидотитив угольського комплексу, является информативным для выяснения метаморфических преобразований выходных первично-мантіїных протолітами и установления стадийности формирования литосферы складчато-покрывных сооружений.

Ключевые слова: Внутренняя зона Восточных Украинских Карпат; перидотиты; серпентини; α - и β -лїзардиты, антигорит.

Вступ. Перидотити офіолітових комплексів є фрагментами океанічної верхньої мантії, які були виведені на поверхню в результаті тектонічних рухів. Їхній склад визначається вихідним складом океанічної верхньої мантії, ступенем її плавлення, процесами взаємодії розплаву з оточуючими мантійними породами в процесі транспортування з області генерації в верхні горизонти земної кори. Перетворення, які переживають реститові перидотити, відбуваються на їхніх структурах і текстурах, зміні складу породоутворюючих, акцесорних та вторинних мінералів. Аналіз кінцевої будови та складу апоперидотитів дає змогу отримати дані для здійснення геодинамічних реконструкцій щодо стадійності їхнього утворення. Перидотити часто серпентинізовані. Мінерали групи серпентину формуються в різних геодинамічних умовах. Експериментальні і теоретичні дані доводять, що різні поліморфні модифікації серпентину стабільні при різних температурах і тисках.

Аналіз останніх публікацій. Вивчення магматизму для деталізації геодинамічних реконструкцій обстановок, з якими він пов'язаний займає чільне місце серед геологічних проблем Українських Карпат. Магматичні утворення мезозойського віку включають середньотріасово-нижньокрейдові комплекси ультраосновного та основного складу. За геологічними умовами та петрогеохімічними параметрами для них встановлюються спредінгові, субдукційні та плитні геодинамічні обстановки [7]. Угольський комплекс містить офіоліти, які представлені перидотитами, базальтоїдами, яшмоїдами, вапняками [16, 18].

За результатами досліджень останніх десятиліть серпентини є найпоширенішими вторинними мінералами перидотитів угольського комплексу. За даними опублікованих праць вони складають від 50–80 % об'єму порід [18] і представлені антигоритом, хризотилом, баститом. Антигорит зустрічається в парагезисі із залістим нікелем, що свідчить про серпентинізацію перидотитів угольського комплексу, яка протікала на глибинах від 40–50 км до 100 км (?), за температури 450–600°C та тиску 13–16 кбар [16].

Праці дослідників Українських Карпат сприяли розпізнаванню головних петротипів мезозойських магматичних порід у різних комплексах та формаціях. Виконані мінералого-петрографічні, петрохімічні, геохімічні дослідження було використано для моделювання тектонічної еволюції Карпатської геосинклінали [16, 18].

У світовій літературі вивченню серпентинів і серпентинітів приділяють велику увагу. Серпентинізація як процес метаморфічних перетво-

рень інтенсивно проявлена в перидотитах офіолітових комплексів. Вона відбувається майже відразу після становлення перидотитів і змінює їхній мінеральний склад в напрямі ускладнення [2]. В складчастих поясах серпентинізовані апоперидотити та серпентиніти локалізуються в шовних (сутурних) зонах, в меланжових і олістостромових товщах [9–14, 17, 21, 27, 29, 31]. Тут зустрічаються серпентиніти різних типів [12–14, 21, 23, 26, 29], які розділяються за мінералого-петрографічними, петрогеохімічними, термодинамічними та іншими ознаками. Найчастіше в літературі фігурують лізардитові і антигоритові серпентиніти, які мають відповідні породоутворюючі мінерали. Іноді розглядаються перехідні між лізардитовими і антигоритовими типи порід.

Лізардитові серпентиніти є продуктами корової низькотемпературної серпентинізації, яка проходить в умовах регресивного метаморфізму [4, 12–14] цеолітової фації та низів зеленосланцевої фації метаморфізму. Регресивний метаморфізм пов'язано з застиганням перидотитів та їхнім підняттям на вищі рівні літосфери в області рифтогенезу (концентрованого серединно-океанічного та дифузійного задугового й передугового спредінгу). Найінтенсивніша серпентинізація за цих умов тяжіє до ділянок “сухого” повільного спредінгу. За результатами кінематико-термодинамічного моделювання низькотемпературна серпентинізація має низькі і помірні тиски при температурі 130–150° С, розвивається на глибинах 3,5–4,5 км і характеризується утворенням α - та β -лізардитів (та спорадично хризотилів). При серпентинізації за перидотитами утворюються петельчасті серпентини [20] або α -лізардити [4]. За габброїдами можуть формуватися β -лізардити. Утворення лізардитів і хризотилів контролюється вихідним розміром зерен олівину вихідної породи (протоліту): при його розмірі в діапазоні 5–150 мкм утворюється лізардит, при розмірі менше 5 мкм утворюється хризотил [28].

Антигоритові серпентиніти є результатом глибинної високотемпературної серпентинізації [14], яка відбувається за умов прогресивного метаморфізму [13, 14, 24–27] з утворенням середньо- і високотемпературних асоціацій серпентинів за участі переважно β -лізардиту з магнетитом і антигоріту, для яких характерні температури 200 (350)–500 (до 300–650)°С. За підвищення температури до рівня епідот-амфіболітової фації можуть утворюватися тальк-антигоритові і тальк-олівінові породи [4, 13]. Прогресивний високотемпературний метаморфізм перидотитів, на думку фахівців, проявляється в надсубдукційних обстановках при зануренні слєбу, що супроводжується зростанням тиску і температури. На

цій стадії мають місце прояви тектонічних деформацій, локальний розігрів при вкоріненні тіл молодого інтрузивного магматизму, процеси гранітизації. Тут відмічають парагенезиси олівину та антигориту, що формуються і є стійкими на глибинах до 100 км при температурі до 650–700° С. Разом із хлоритом і амфібол-олівіновими породами цей парагенезис характерний для ультраосновних метаморфітів слєбу, який субдукує. В сучасних океанічних структурах є чисельні знахідки антигоритових серпентинітів в глибоководних жолобах (їхня повна відсутність в серединно-океанічних хребтах) [12].

За даними вивчення акцесорних мінералів різних типів серпентинітів виявлено, що свіжі хромшпінеліди зустрічаються у лізардитових серпентинітах, які пережили низькотемпературну серпентинізацію. В антигоритових серпентинітах, які утворилися завдяки високотемпературній серпентинізації при низькій активності кремнезему (SiO_2), домінує магнетит [23, 24]. Вивчення процесів серпентинізації припускає виокремлення двох фаз: спочатку відбувається утворення багатих магнієм серпентинів, пізніше формуються багаті залізом серпентини, у яких кристалізується магнетит. Термодинамічне моделювання свідчить, що в межах температурного інтервалу 100–300° С лізардит є стабільним, проте ці умови не сприятливі для осадження магнетиту [23]. В інтервалі температур 320–390° С [29] лізардит поступово заміщується на антигорит. В інтервалі 340–370° С, $P \approx 8\text{--}10$ кбар антигорит має перевагу над лізардитом, тоді ж кристалізується магнетит [25, 27], що вказує, на думку дослідників, на фазові переходи між високими фаціями зеленосланцевого – та низькими фаціями блакитносланцевого метаморфізму. При температурі вище 390° С $P \approx 11\text{--}12$ кбар антигорит є єдиним стабільним серпентиновим мінералом до початку вторинної кристалізації олівину 460° С [29].

Різні мінералогічні типи серпентинітів розрізняються за співвідношення MgO/SiO_2 , $(\text{MgO}+\text{FeO})/\text{SiO}_2$ та $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. Із зростанням ступеня метаморфічних змін, що виражено в трансформації лізардитових серпентинів на антигоритові, відмічено незначне зростання вмісту SiO_2 та $(\text{MgO}+\text{FeO})$ за виснаження Al_2O_3 . Тобто лізардитові серпентини мають більш високі значення MgO/SiO_2 [26, 29, 31] та низькі $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в порівнянні з лізардит-антигоритовими і антигоритовими серпентинітами [26, 31]. За термодинамічними розрахунками, які виконані для лізардитових серпентинітів, і розвинулись за дунітами Нової Каледонії, виявлено, що активність FeO , MgO и SiO_2 є функцією складу олівину та ортопіроксену [24]. Антигоритові серпентини формуються за переважанням флюїдів при знач-

ному окислювально-відновлювальному потенціалі з раніше утвореного серпентину (лізардиту) і бруситу з реакціями утворення магнетиту [24].

Дослідження петрохімічних складів серпентинітів Головного Уральського розлому (палеозойської субдукційної зони) дало змогу диференціювати їх за характером протолітів. Високоглиноземисті та високохромисті серпентиніти мають ультраосновні протоліти, що формувались в умовах мантії. Середньоглиноземисті та низькохромисті серпентиніти характеризуються протолітами основного складу, що зароджувались в корових умовах [10].

Вивчення мінералогічних і геохімічних особливостей двох типів серпентинітів у сутурній зоні Міанлу (Mianlue) в орогенному поясі Цінлін (Qinling) центрального Китаю дає змогу дослідникам підкреслити, що лізардитові серпентиніти збагачені ірідієвим-типом платинової групи [31]. Це є свідченням їхнього мантійного походження. Антигоритові серпентиніти утворились в результаті взаємодії серпентинізованих апоперидотитів мантійних протолітів з розплавленою породою в субдукційному каналі. Вони збагачені магнетитом [31].

Системне опрацювання мінералогічно-петрографічних ознак серпентинів сприяє виділенню стадій розвитку структур, яким відповідають певні геодинамічні режими. Така періодизація виконана для Уральської складчастої споруди [11]. Перша стадія зі становлення масивів ультрамафітів і їхня наступна лізардизація відбувається за умов рифтогенно-спредінгового геодинамічного режиму у пізньому кембрію-ордовіку. Друга стадія, на якій прослідковується антигоризація, оталькування, карбонатизація, десерпентинізація проявляються в утворенні карбонат-антигорит-олівінових порід з жилами карбонатитів відбувається у субдукційному і колізійному геодинамічних режимах у силурі-перму. Третя стадія охоплює утворення кір звітрявання по ультрамафітах за умов платформного геодинамічного режиму у крейді-палеогені. Четверта стадія представлена частковою трансформацією та знищенням кор звітрявання за епіплатформного орогенезу у неоген-четвертинний період [11].

Використання актуалістичних підходів до аналізу геологічних утворень Українських Карпат у світлі сучасних мобілістичних теоретичних уявлень, зокрема терейнової концепції, спонукало поглиблене вивчення магматичних утворень регіону і, зокрема, вторинних серпентинів перидотитів угольського комплексу. Ретельне геологічне, мінералогічно-петрографічне та петрогеохімічне дослідження серпентинізованих апоперидоти-

тів угольського комплексу, виконане нами, дали змогу отримати нові дані.

Мета роботи полягає у опрацюванні та вивченні серпентинів апоперидотитів угольського офіолітового комплексу, які формують олістоліти і олістоплаки у соймкульській світи у Мармароській зоні Скель (Вежанському покриві) та у прослідковуванні їхньої еволюції. Для досягнення мети необхідно було виконати **завдання**: провести польові дослідження для уточнення позиції просторової локалізації апоперидотитових серпентинів в складі соймкульської світи та скласти представницьку колекцію серпентинів апоперидотитів угольського комплексу; вивчити мінералогічні, петрогеохімічні, рентгеноструктурні, термічні особливості серпентинів; реконструювати процеси метаморфічних перетворень, завдяки яким виникла та, чи інша група серпентинів; реставрувати протоліти, за якими розвивалися групи серпентинів; відтворити етапи геодинамічних умов становлення перидотитів угольського комплексу.

Об'єкт досліджень: серпентини апоперидотитів угольського комплексу.

Предмет досліджень: перидотити офіолітового угольського комплексу.

Геологічна позиція перидотитів угольського комплексу Мармароської зони скель. Магматичні утворення угольського комплексу вивчали-

ся у середній течії р. Теремля, у верхів'ях її допливу Угля (рис. 1). Тут кластоліти (олістоліти) серпентинітів, метаморфізованих перидотитів та інших порід, що належать офіолітовій асоціації, занурені у матрикс нижньокрейдової соймкульської світи.

Соймкульська світа розпочинає статиграфічний розріз Мармароської скельної зони (відомої як Вежанський покрив) Внутрішніх Східних Карпат [18], складений крейдово-палеогеновими відкладами. Олістостромовою товща соймкульської світи містить крупні олістоліти двох груп порід. До першої групи відносяться фрагменти порід угольського комплексу мезозойської (середньотріасово-нижньокрейдової, [8, 17]) офіолітової асоціації (серпентинізовані перидотитами, metabазальти, червоними яшмоїдами, вапняками). Друга група олістолітів складена утвореннями, які подібні до порід Мармароського масиву (кристалічні сланці, гнейси, гранітоїди, пермотріасові кварцові конгломерати, тріас-юрські вапняки та доломіти). Матрикс олістостроми представлений хаотичними утвореннями мулистоуламкових потоків (debris-flows) [8].

Мармароська скельна зона та Мармароський масив є північно-західним закінченням композиційного мікроконтинентального терейну Тися-Дакія. Утворення соймкульської світи формувалися на південно-західних схилах нині зануреної

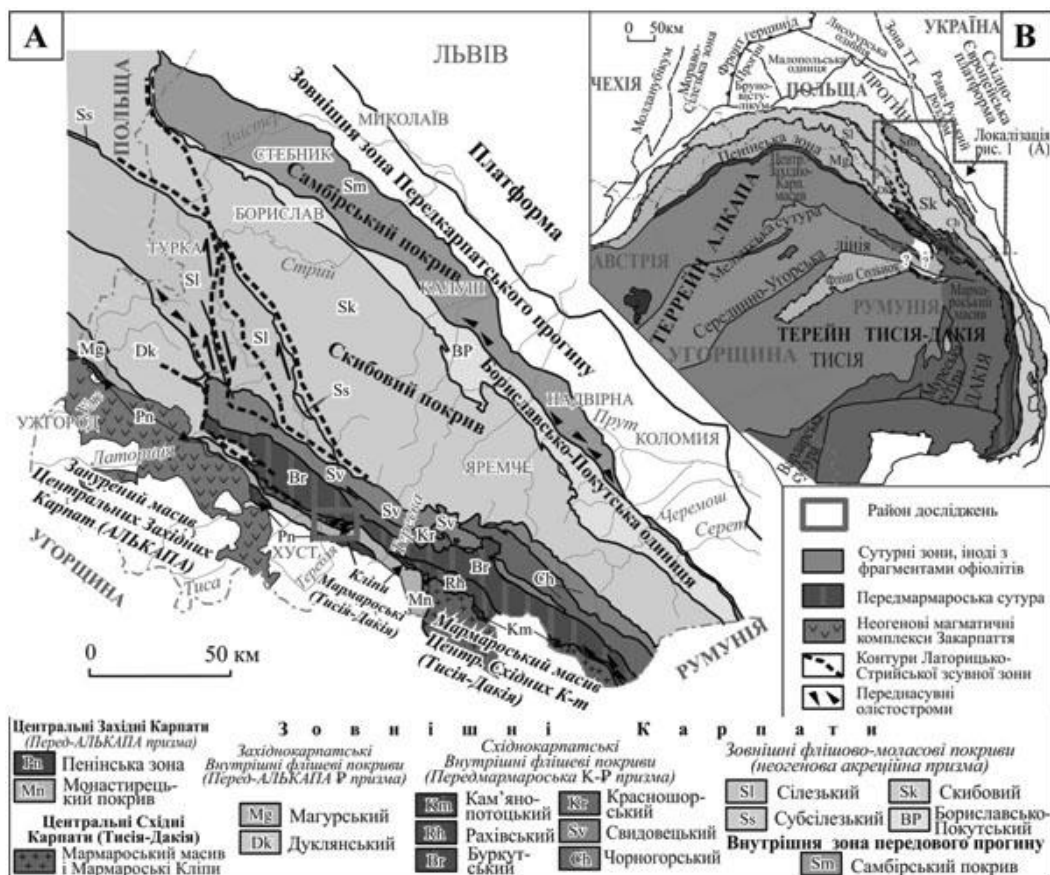


Рис. 1. (А) Схема головних тектонічних одиниць Українських Карпат [6]; (В) Регіональна схема тектонічного положення Українських Карпат, за О. М. Гнілко [17]

ділянки Мармароського масиву (“Мармароської кордільєри”), що відповідало геодинамічним умовам пізньокрейдово-палеогенової пасивної околиці континентального схилу мікроматиненту Тися-Дакія [8]. Ці умови виникли після становлення ранньоальпійських ранньокрейдових Трансільванських і Мармароських покривів. На території України Трансільванські офіолітові покриви, вірогідно, денудовані. На території Румунії вони збереглися у вигляді тектонічних останців Трансільванських ранньокрейдових покривів, які зазнали насування на кристалічний масив Центральних Східних Карпат (Мармароський масив, є частиною терейну Дакія). Коріння Трансільванських покривів розташовані між мікроматинентальними терейнами Тися і Дакія в Муреській зоні [22, 30]. Вона належить Трансільвансько-Муреській (Вардарсько-Муреській) сутурній зоні, сформованої в результаті колізії між згаданими двома терейнами, яка привела до утворення композиційного терейну Тися-Дакія [6, 8, 17]. Трансільвансько-Муреська сутура, як і олістоліти Трансільванських покривів в соймульській свиті, містить інформацію про геодинамічні процеси, що відбувалися в океанічному басейні, який розділяв мікроматинентальні терейни Тисяю і Дакію.

Методи досліджень. Нами проведений комплекс досліджень, що складався з геологічних спостережень порід у відслоненнях, лабораторних петрографічних, мінералогічних та петрогеохімічних досліджень серпентинів апоперидотитів.

При геокартувальних та тематичних роботах району досліджувались серпентиніти і серпентинізовані перидотити у природних відслоненнях. Для лабораторного вивчення відібрано серпентиніти з різних частин району дослідження, які розрізняються структурно-текстурними характеристиками. При лабораторних дослідженнях неоднорідність зразків серпентинітів контролювалися декількома незалежними методами.

Мінеральний склад та структурно-текстурні особливості порід вивчалися в прозорих шліфах у прохідному світлі оптико-мікроскопічними методами на мікроскопах фірми “Olympus”.

Мікроаналітичні дослідження серпентинітів виконувались протягом вересня–листопада 2018 р. у лабораторії фізичного факультету ЛНУ імені Івана Франка за допомогою растрового (скануючого) електронного мікроскопу РЕММА-102-02 (Суми, Україна), обладнаного енергодисперсійним аналізатором “EDAR”, аналітик Р. Я. Серкіс. Досліджувались поліровані зразки апоперидотитових серпентинітів (аншліфи). Параметри проведення аналізу такі: прискорювальна напруга 20 кВ, струм зонду 1 нА, діаметру зонду

0,1 мкм. Марка еталону використаного для калібрування приладу – НЭРМА. ГЕО1.25.10.74 ГТ; виробник – фірма “Geotechnology” (Україна). Для калібрування окремих елементів використані наступні стандарти: Na – альбіт; Mg – периклаз; Al, Si, Ca – анортит; P – фтор-апатит; S – пірит; K – мікроклін; Ti – македоніт; Cr – есколаїт; Mn – манганіт; Fe – гематит; As – GaAs (синтетичний); Ba – барит; Sc, Co, Ni, Cu, Zr, Ag, Au – чисті елементи. Для обробки отриманих даних використане програмне забезпечення “Magalanes 3.2”.

Для термічного аналізу використано дериватограф Q-1500D системи “Паулік – Паулік-Ердей” лабораторії хімічного факультету НУ “Львівська Політехніка” в жовтні 2018 р., аналітик В. В. Кочубей. Дериватограф з’єднаний з персональним комп’ютером в інтервалі температур 20–1000°C при вільному доступі повітря в піч. Швидкість нагрівання складала 10°C/хв. Маса зразків становила в середньому 10 мг. Еталонною речовиною слугував алюміній оксид. Результати комплексного термічного аналізу зразків, який включає термогравіметрію (TG), диференційну термогравіметрію (DTG) та диференційний термічний аналіз (DTA), представлені у вигляді термограм. Інтерпретація складу апоперидотитових серпентинітів проводилась з використанням каталогів стандартних термограм різновидів серпентину (лізардиту, хризотилу, антигориту), та інших мінералів перидотитів, які опубліковані в низьці рабів [2, 3, 4, 19, 20].

Рентгеноструктурний аналіз виконано в жовтні 2018 р. у рентгеновській лабораторії геологічного факультету ЛНУ ім. Івана Франка на дифрактометрі ДРОН-3 (аналітик А. М. Дворянський) за наступних параметрів: $\text{CuK}\alpha$ – випромінювання, напруга 40 кВ, сила струму 25 мА, швидкість обертання 1 град/хв. Ідентифікація мінералів здійснювалась з використанням інтернет-ресурсів MINCRYST, Mindat та за допомогою програми Match (версія 9).

Результати досліджень. Досліджені апоперидотитові серпентиніти, за результатами нашого вивчення, на 80–100 % складаються з α - і β -лізардитів та антигориту. Первинний склад порід діагностувався за вмістом олівіну і піроксенів. Серед петроструктурних ознак в апоперидотитах іноді фрагментарно відзначається плоскопаралельне орієнтування мінеральних зерен, яке, вірогідно, відбиває первинно нерівномірне розташування породотвірних мінералів. Досліджені серпентинізовані апоперидотити, очевидно, є мантійним реститом [1, 5, 15, 16, 18].

При макроскопічному візуальному аналізуванні порід зверталась увага на відмінності текстур серпентинізованих перидотитів. Одна група

порід вирізнялась виразними лінзовидно-петельчастими макротекстурами. Іншій групі взірців притаманні смугасто-сланцювате просторове розташування мінеральних компонентів. Під мікроскопом у лінзовидно-петельчастих серпентинітах серпентин представлений петельчастим мінеральним агрегатом розміром до 1,0–1,5 мм. Він безбарвний, має від'ємний знак головної зони, пряме загасання і показник заломлення $n_g=1,546$. За ромбічними піроксенами розвиваються таблитчасті псевдоморфози баститу (рис. 2 А). Кристалооптичні властивості цих морфологічно різних відмін серпентину однакові і відповідають α -лізардиту. Виразений ендоефект за температури 630° С на термограмі DTA дає змогу розпізнати α -лізардит (рис. 3А) [8, 13], що є вагомим аргументом на підтвердження наших кристалооптичних досліджень.

В породах зі смугасто-сланцюватою текстурою термічним аналізом встановлено β -лізардит та антигорит, які характеризуються чітко вираженими ендоефектами на термограмах кривих DTA (рис. 3В) в діапазоні температур 670°С і 780°С, відповідно. Мікроскопічно β -лізардит представлений петельчастими виділеннями, які переповнені пилоподібними, точковидними включеннями магнетиту, що притаманно цьому різновиду серпентина, і підтверджено в низьці праць [2, 9, 13]. Локально зустрічаються голкоподібні (розміром до 0,01 мм) індивіди серпентину, котрі перегинаються під різними кутами. Показник заломлення цих індивідів становить $n_g=1,565$, який є типовим для антигориту (рис. 2В). Взаємовідношення між β -лізардитом і анти-

горитом складні, проте можна припустити, що ці різновиди сингенетичні.

Рентгенівський аналіз серпентинів показав, що на дифрактограмах чітко фіксуються піки з міжплощинними відстанями 7,3 Å, 4,54 Å, 3,63 Å, 2,53 Å, 4,49 Å, 2,45 Å. Піки відповідають як лізардиту, так і антигориту (рис. 4). Проте інтенсивність піку з міжплощинною відстанню 3,63 Å у серпентинах, з переважанням α -лізардитів, значно нижча, ніж у серпентинах з переважанням антигориту.

Мікрозондові дослідження елементів з використанням таких параметрів як $Al^{\#}$ ($Al/(Al+Si)\times 100\%$), $Fe^{\#}$ ($Fe/(Fe+Mg)\times 100\%$), $Cr^{\#}$ ($Cr/(Cr+Al)\times 100\%$) дозволили оконтурити два поля на трикутній дискримінаційній діаграмі (рис. 5). Аналізи 1–4, локалізуються в полі α -лізардитів. Аналізи 5–9 потрапляють в поле антигоритів. α -лізардити мають більшу хромистість $Cr^{\#}=Cr/(Cr+Al)\times 100\%$, глиноземистість $Al^{\#}=Al/(Al+Si)\times 100\%$ за меншої залізистості $Fe^{\#}=Fe/(Fe+Mg)\times 100\%$. Антигорити характеризуються більшою залізистістю при меншій хромистості та глиноземистості.

Хімічний склад серпентинів [1] (табл. 1) за вмістом SiO_2 і Al_2O_3 [26, 29, 31] показав, що на бінарній дискримінаційній діаграмі $SiO_2-Al_2O_3$ аналізи 1–4 обмежені областю розвитку лізардитів, тоді як аналізи 5–9 розміщуються в області антигориту (рис. 6). Просторова локалізація фігуративних точок серпентинів доводить, що при переході лізардитів до антигоритів спостерігається збільшення SiO_2 , з одночасним зменшен-

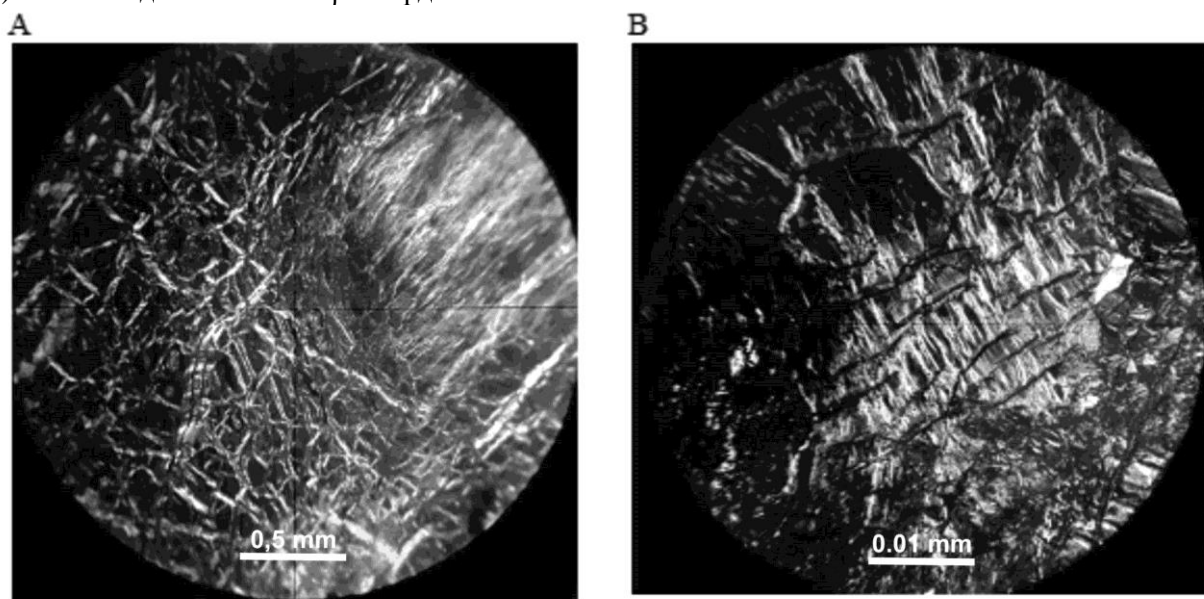


Рис. 2. Шліфи апоперидотитових серпентинітів угольського комплексу. Умовні позначення: А – петельчасті і таблитчасті виділення лізардиту та баститу: петельчастий – α -лізардит (ліворуч) і тонкопластинчастий – бастит (праворуч). Ніколі схрещені. В – видовжено-таблитчасті до голчастих виділення антигориту (біле). Ніколі схрещені. Басейн р. Мала Уголька: правий борт струмка Гребінський, 250 м вгору від гирла струмка Погарський Рункул, околиця с. Мала Уголька

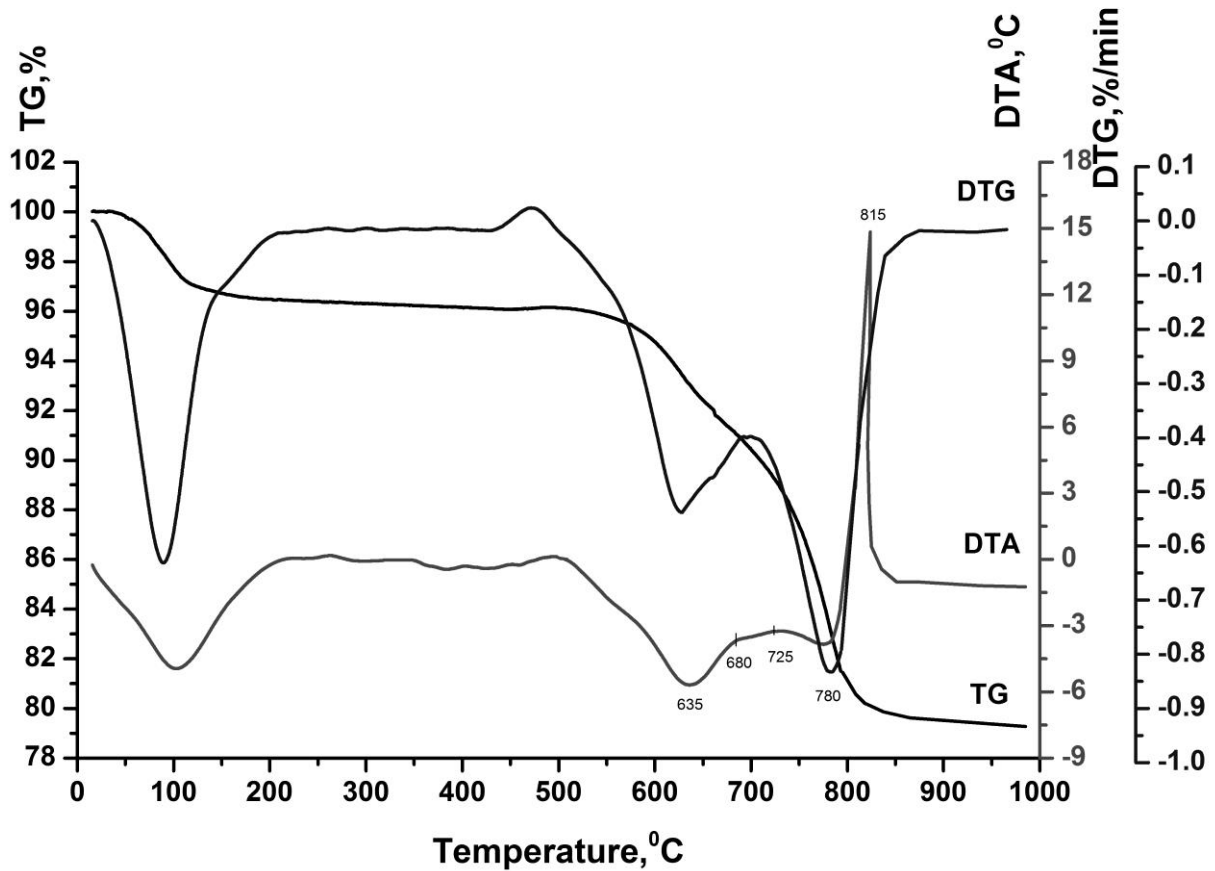
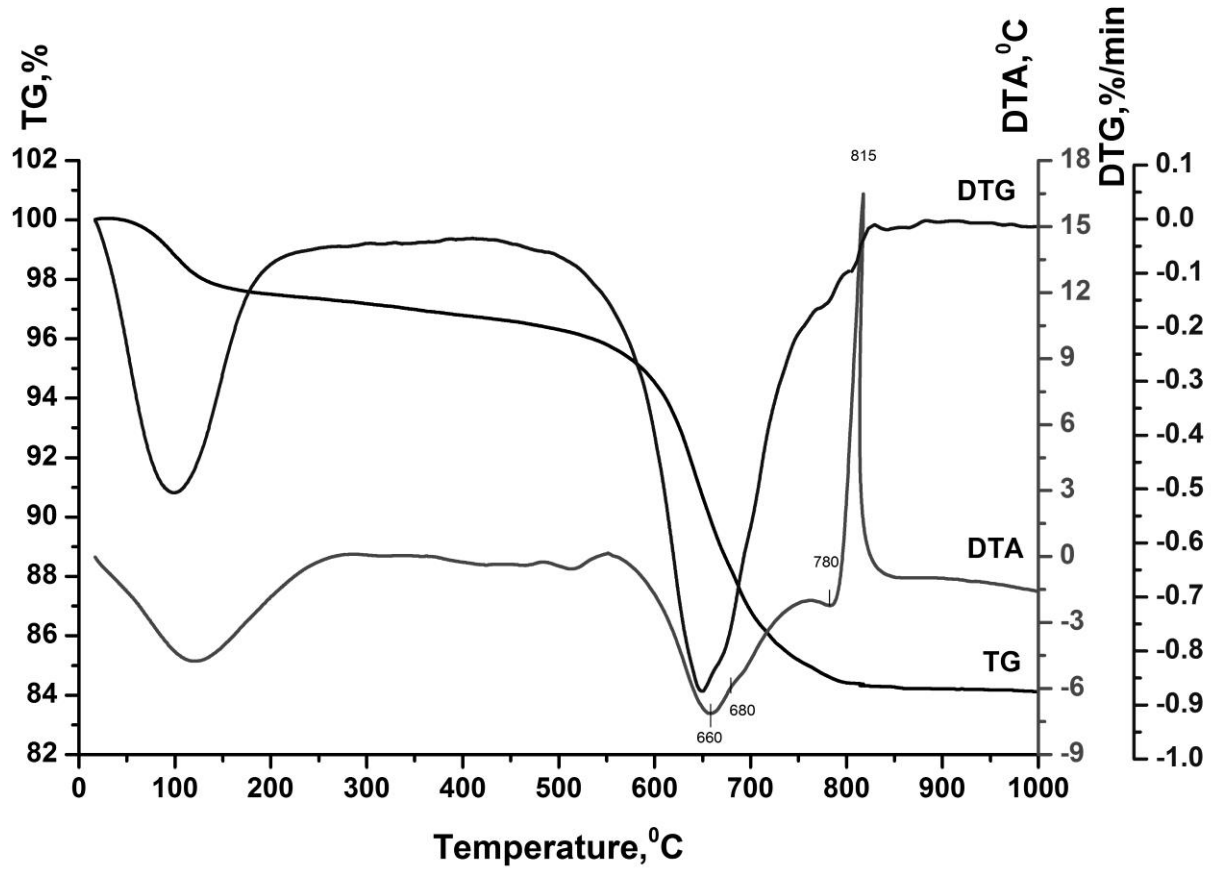


Рис. 3. Термограми серпентинів апоперидотитів угольського комплексу. Умовні позначення: DTG – диференціально-термогравіметрична крива; DTA – диференціальна крива нагрівання; TG – крива втрати маси. вгорі – α -лізардитові; внизу – β -лізардитові та антигоритові

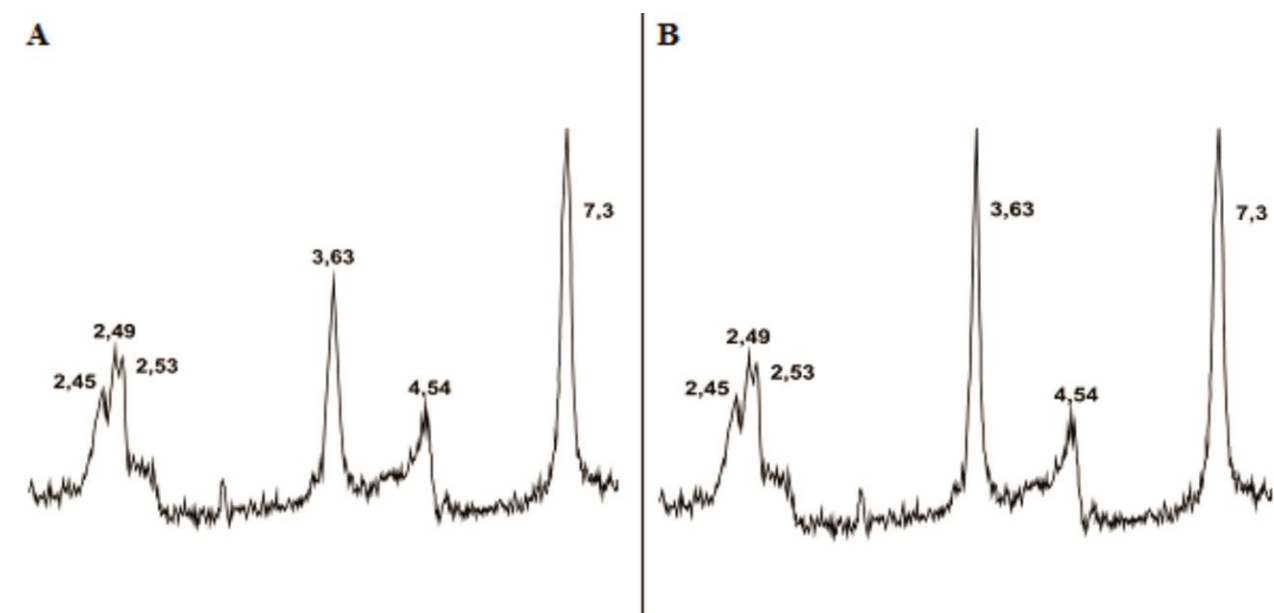


Рис. 4. Дифрактограми серпентинів апоперидотитів угольського комплексу.
Умовні позначення: А – α -лізардитові; В – β -лізардитові та антигоритові

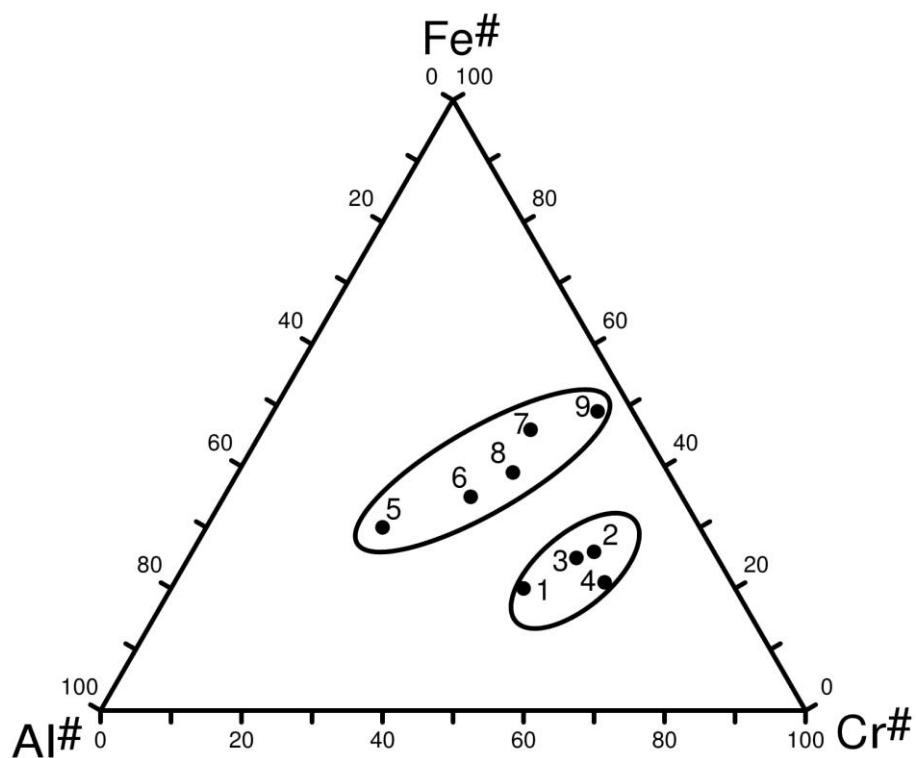


Рис. 5. Розподіл фігуративних точок серпентинів на трикутній діаграмі $Al^{\#}-Fe^{\#}-Cr^{\#}$. Умовні позначення: аналізи: 1–4 – поле лізардитів; 5–9 – поле антигоритів. $Fe^{\#} = Fe / (Fe + Mg) \times 100\%$;
 $Al^{\#} = Al / (Al + Si) \times 100\%$; $Cr^{\#} = Cr / (Cr + Al) \times 100\%$

Вміст SiO_2 та Al_2O_3 (мас. %) в серпентині за даними хіманалізу

Таблиця 1

Мас.%	Номери проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	43,08	42,11	42,02	41,09	44,12	43,92	43,90	42,96	44,10
Al_2O_3	0,61	1,99	1,59	1,95	0,21	0,99	0,55	1,86	0,87

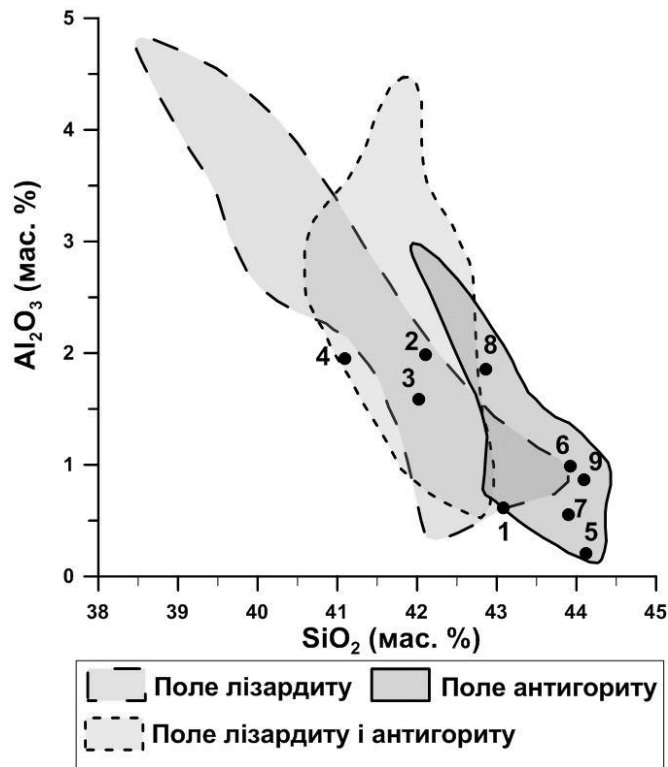
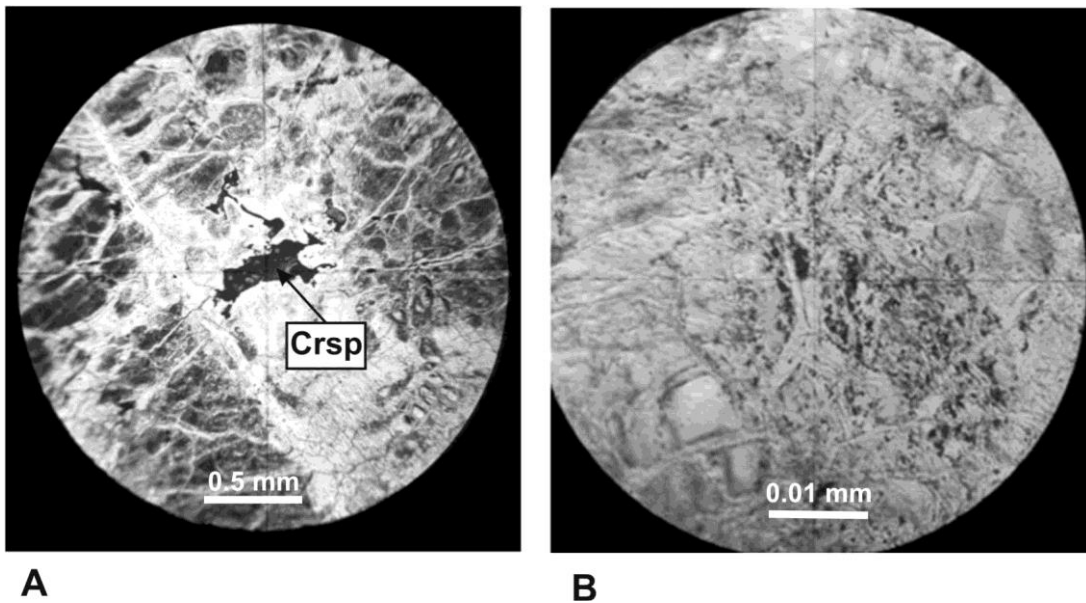


Рис. 6. Розподіл фігуративних точок серпентинів за даними мікрозондового аналізу на діаграмі $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (мас %) [26, 29]. Умовні позначення: аналізи 1–4 – поле лізардиту; аналізи 5–9 – поле антигориту



A

B

Рис. 7. Акцесорні мінерали у серпентинітах апоперидотитів угольського комплексу.

Умовні позначення: А – хромшпінелід (Crsp) в петельчастому серпентині (α -лізардит), ніколі схрещені; В – пілоподібний магнетит (чорні точки) у смугасто-слацюватому серпентині (β -лізардит, антигорит), ніколі паралельні. Верхів'я басейну р. Мала Уголька, межиріччя струмків правого борту:

Гребінський і Погарський Рункул

ням Al_2O_3 , що чітко видно на діаграмі (див. рис. 6).

При петрографічному вивченні серпентинітів апоперидотитів угольського комплексу ми звернули увагу на відмінності щодо наявності акцесорних мінералів у породах з домінуванням різних відмін серпентинів. Для порід, у яких переважають α -лізардитами, характерні відносно великі (до 0,3 мм) зерна хромшпінелідів (рис.7А). У породах з породотвірними β -лізардитами та антигоритами акцесорний мінерал представлений пілоподібним магнетитом (рис. 7В).

Згідно до петрохімічних досліджень [10] високоглиноземисті, високохромисті та середньонікелесті різновиди серпентинів, які розвиваються за мантийними ультраосновними прото-

літами та низькоглиноземисті й низькохромисті серпентиніти, які формуються за протолітами основного складу в корових умовах, корелюються з даними вивчення мікроструктури, хімічного і фазового складів порід методами ІК-спектроскопії, електронної мікроскопії, термічного, рентгенодифрактометричного і електронно-зондового аналізу, петрофізичними характеристиками та результатами акустичної емісії.

Теоретичні і практичні напрацювання щодо вивчення серпентинізації перидотитів складчасто-покривних систем [2, 3, 9, 10, 12–14, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29–31] дають змогу використати отримані результати для інтерпретації геодинамічних обстановок становлення лізардитових і антигоритових порід. Виявлені лізардитові (точніше α -лізардитові) серпентиніти сформувались в умовах регресивного корового метаморфізму в спредінгових умовах Трансильвано-Муреського палеобасейну між терейнами Тися і Дакія. Антигоритові (та β -лізардитові з магнетитом) серпентиніти утворилися за прогресивного метаморфізму, що мав місце в юрсько-ранньокрейдовий час при субдукції океанічної літосфери Трансильвано-Муреського палеобасейну [8] під енсиматичну дугу, яка знаходилась західніше мікроконтинентального терейну Дакія.

Обговорення результатів. Наведений матеріал дає змогу вперше для регіону дослідження відмітити, що головними породоутворюючими мінералами угольських апоперидотитових серпентинітів виявились α - і β -лізардити та антигорит. Серед акцесорних мінералів відмічено хромшпінеліди і магнетит. За мінеральним складом серпентиніти утворюють дві групи: лізардитові та антигоритові. Для лізардитових серпентинітів головним породоутворюючим мінералом є α -лізардит, акцесорним – хромшпінелід. Для антигоритових серпентинітів головним породоутворюючим являються β -лізардит та антигорит, акцесорний представлений переважно магнетитом. Лізардитові і антигоритові серпентиніти розрізняються макро- і мікроскопічно за структурно-текстурними особливостями і петрогеохімічними ознаками і, вірогідно, пов'язані з різними, геодинамічними обстановками формування.

Згідно до теоретичних розробок та аналітичних узагальнень по різних складчасто-покривним областям впливає, що α -лізардит є одним з породоутворюючих серпентинітів, які формуються за регресивного метаморфізму офіолітових перидотитів, антигорит є головним породоутворюючим серпентином ультрабазитів прогресивного метаморфізму. З цього ми робимо висновок, що серед досліджуваних серпентинізованих апоперидотитів є такі, які утворимось за

умов регресивного метаморфізму та такі, які сформувалися за умов прогресивного метаморфізму. Відповідно для кожного з названих типів метаморфізму характерні індивідуальні геодинамічні обстановки.

Для реконструкції геодинамічних умов утворення серпентинів, також використані наші дані з вивчення хромшпінелідів серпентинізованих перидотитів та апоперидотитові серпентинітів угольського комплексу [5]. Хромшпінеліди, які асоціюються з лізардитовими серпентинітами належать алюмохромітам, хромшпінеліди, які трапляються в антигоритових серпентинах представлені феріхромітами. Алюмохроміти більш магнезійальні і менш хромисті, феріхроміти менш магнезійальні та більш хромисті. На бінарній діаграмі Cr#–Mg# хромшпінеліди перидотитів угольського комплексу концентруються у двох областях: абісальних перидотитів та надсубдукційних перидотитів. На діаграмі кореляції середньої хромистості хромшпінелідів та повної швидкості спредінгу виявлено, що великі зерна шпінелідів лізардитових серпентинів кристалізувались за низького ступеня часткового плавлення (D_{melt} до 14 %), який властивий абісальним перидотитам. Дрібні зерна шпінелідів антигоритових серпентинів утворювались за більш вищих ступенів плавлення (D_{melt} до 30%), що характерно для порід надсубдукційних зон.

Отже, матеріали з вивчення серпентинів, що розвиваються по перидотитам отримані нами і попередніми дослідниками та за результатами порівняння їх з даними по іншим комплексам дають змогу зробити висновки щодо протолітів, по яким вони розвиваються.

Вивчені апоперидотитові серпентиніти угольського комплексу вирізняються за речовинними ознаками, які є відбиттям умов утворення і індикаторами геодинамічних обстановок формування. Лізардитові серпентиніти тяжіють до первинно-мантіїних протолітів, які зазнали метаморфічного перетворення в умовах спредінгу. Антигоритові серпентиніти маркують умови субдукції, які привели до трансформації протолітів океанічної літосфери.

Дослідження серпентинів, які розвивались по перидотитам угольського комплексу, є важливим для з'ясування типів метаморфізму по вихідним первинно-мантіїним протолітам. Серпентиніти є індикаторами геодинамічних умов формування метаморфічно перетворених порід. Дослідження сприяють виявленню закономірностей еволюції розвитку океанічної літосфери, фрагменти якої законсервовані у речовинних комплексах складчасто-покривній споруді Українських Карпат. Їх можна використати для прогнозу оцінки зруденіння серпентинів. З серпентинами

першої групи (лізардитовими) пов'язані хроміти (і елементи платинової групи), з серпентинами другої групи (антигоритовими) асоціює магнетит.

Висновки. Отримані результати серпентинів апоперидотитів угольського комплексу, що формують олістоліти в соймульській світі Мармароської скельної зони дають змогу зробити такі висновки:

Вивчені серпентини апоперидотитів розрізняються за структурно-текстурними, мінералогічно-петрографічними, петрогеохімічними особливостями. Зпівставлення цих особливостей дає змогу розділити серпентини на дві групи за домінуючими поліморфними відмінами. Відміни є породоутворюючими мінералами апоперидотитових серпентинітів, які класифікуються на лізардитові і антигоритові.

Лізардитові серпентиніти за макро- і мікроскопічними характеристиками мають лінзовидно-петельчасті текстури і переважно представлені петельчастим серпентином або α -лізардитом, іноді – баститом, акцесорним незміненим хромшпінелідом.

Антигоритові серпентиніти за макро- і мікроскопічними ознаками розпізнаються за смугасто-сланцюватими текстурами. Вони складаються переважно з β -лізардитів, антигоритів, акцесорного пілоподібного магнетиту.

Співставлення петрохімічного складу лізардитових і антигоритових серпентинів свідчить про збільшення в останніх SiO_2 , FeO при зменшенні Al_2O_3 . Крім того, для лізардитових серпентинів характерна підвищена хромістість та нижча залізистість в порівнянні з антигоритовими серпентинами. Ці матеріали добре корелюються з даними отриманими нами для шпінелідів.

За використання термічного аналізу на термограмах при дослідженнях апоперидотитових серпентинітів чітко діагностуються мінерали групи серпентину: для α -лізаритів на кривих ДТА відзначається виражений ендоефект за температури 630°C , для β -лізардиту цей пик становить 670°C , для антигориту -780°C . Зрозуміло, що для лізардитових серпентинітів породоутворюючим є α -лізардит, для антигоритових серпентинітів породоутворюючими є β -лізардит та антигорит, при чому вміст антигориту вдвічі більший за вміст β -лізардиту.

Лізардитові серпентиніти несуть термодинамічні характеристики регресивного метаморфізму верхів зеленосланцевої фації. Антигоритові серпентиніти, очевидно, характеризуються параметрами прогресивного метаморфізму низів зеленосланцевої – верхів епідот-амфіболітової фацій. Проте наявність антигориту в породах є вагомою підставою вважати породи такими, що мають фазові переходи до низьких фацій метаморфізму високих тисків.

Регресивний метаморфізм був реалізований в геодинамічній обстановці спредингу при охолодженні і підйомі перидотитов. Прогресивний метаморфізм проходив у субдукційних умовах. Лізардитові серпентиніти мають первинно-мантіїні протоліти ультраосновного (реститового) складу. Антигоритові серпентиніти характеризуються літосферними протолітами основного складу.

Регресивний метаморфізм з утворенням лізардитових апоперидотитових серпентинітів розвивався при охолодженні і підйомі перидотитів в спрединговій зоні, яка просторово знаходилась між терейнами Тися і Дакія Трансильвано-Муреського басейну, головної гілки океану Тетіс, у середньотріасово-юрський час. Прогресивний метаморфізм зі становленням антигоритових серпентинітів проявився в субдукційній зоні між терейном Дакія, енсінатичною острівною дугою океану Тетіс і / або терейном Тися в келовей-неокомський час.

Закриття Трансильвано-Муреського океану привело до колізії Тисії та Дакії та формуванню (обдукції) Трансильванських офіолітових покривів. В крейдовий час перед фронтом покривів розкрився седиментаційний олістостромовий басейн, куди осувалися олістоліти та олістоплаки з його пластин [8, 17].

Проведені дослідження, дають змогу деталізувати етапи перетворення первинних порід в різних геодинамічних обстановках і відповідно до отриманих результатів удосконалити модель їх трансформацій в структурі Трансильвансько-Муреського палеоокеану і подальшого потрапляння у Мармароську зону скель.

Синтез матеріалів має не лише теоретичний сенс, а й практичне значення. Вони є перспективними для прогнозування оцінки зруденіння апоперидотитових серпентинітів.

Література

1. Білик, Н.Т. Мінералогія і геодинамічні умови перетворення перидотитів з офіолітів Мармароської зони Скель (Українські Карпати) [Текст] / Н.Т.Білик, Л.В. Генералова, І.Г. Яценко, В.Б. Степанов // Геодинаміка. – 2016. – №2. – С. 71–83.

2. Брянчанинова Н.С. Серпентиниты и серпентины Полярного Урала [Текст]: автореф. дис... доктора геол.-мин. наук: 25.00.05, 25.00.04/ Н.С. Брянчанинова. – Институт геологии Коми НЦ Уро РАН.– Сыктывкар. – 2004. – 44 с.
3. Брянчанинова Н.С., Макеев А. Б. Методика исследования серпентинизации ультрабазитов [Текст] / Н.С. Брянчанинова, А.Б. Макеев // Минеральные индивиды, агрегаты, парагенезисы: Труды Института геологии Коми НЦ Уро РАН. – Сыктывкар. – 1995.– Вып. 88. – С. 4–11.
4. Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей [Текст] / А.С. Варлаков. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1986. – 224 с.
5. Генералова Л.В. Шпинелиды – индикаторы условий образования перидотитов угольского комплекса (Внутренние Украинские Карпаты) [Текст] / Л.В. Генералова, Н.Т. Билык, В.Б. Степанов // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: материалы V Международной конференции (Гремячинск, 2–6 сентября 2017 г.) / отв. ред. Е. В. Кислов. – Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета, 2017. – С. 87–89.
6. Гнилко О. М. Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. Стаття 2. Флішові Карпати – давня акреційна призма [Текст] / О. М. Гнилко // Геодинаміка. – 2012. – № 1 (12). – С. 67–78.
7. Гнилко О.М. Ранняя альпийская эволюция Украинских Карпат [Текст] / О.М. Гнилко, Л.В. Генералова // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с океанической/субокеанической корой в областях с континентальной корой: Матер. XLV тектон. совещ. – М.: ГЕОС, 2013. – С. 48–53.
8. Гнилко О.М. Формирование структур утесовых зон и межутесового флиша Внутренних Украинских Карпат – результат сближения и коллизии микроконтинентальных террейнов [Текст] / О.М. Гнилко, С.Р. Гнилко, Л.В. Генералова // Вестн. С.-Петерб. ун-та. – 2015. – Сер. 7. – Вып. 2. – С. 4–24.
9. Добросоцкий С.В. Особенности вещественного состава ультрабазитов дунит-гарцбургитовой ассоциации Нядокотинского рудного поля (Олься-Мусюрский массив, Приполярный Урал) [Текст] / С.В. Добросоцкий С. В. // Вестник Воронеж. ун-та. Сер. геология. – 2013. – № 1. – С. 64–74.
10. Панасьян Л.Л. Минералогические, петрофизические и акустические характеристики серпентинитов – индикаторы палеодинамических условий их образования (на примере зоны Главного Уральского разлома) [Текст] / Л.Л. Панасьян, Т.В. Посухова, Е.Б. Черепецкая, Чжан Цзини // Геология и геофизика.– 2014. – Т. 55. – № 12. – С. 1828–1840.
11. Полянин В.С. История минеральных преобразований и минералогия ультрамафитов Челябинской области [Текст] / В.С. Полянин, Е.Н. Дусманов // Ученые записки Казанского университета. – 2012. – Т. 154, кн. 4. – С. 45–54.
12. Разницын Ю.Н. Угледородный потенциал палео- и современных надсуб-дукционных областей: тектонический, геодинамический, минералого-геохимический и биохимический аспекты [Текст] / Ю.Н. Разницын, Г.Н. Савельева, М.А. Федонкин // Тихоокеанская геология. – 2018. – Том 37. – № 2. – С. 3–16.
13. Савельев Д. Е. Серпентинизация ультрабазитов Кыштымской площади [Текст]/ Д.Е. Савельев, Е.А. Бажин, В.И. Сначёв, Т.И. Черникова // Геологический сборник ИГ УНЦ РАН. – 2009. – № 8. – С. 129–137.
14. Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре [Text] / Г.Н. Савельева // Труды ГИН АН СССР. – Вып. 404. – М. :Наука, 1986. – 246 с.
15. Степанов В.Б. Мінералогія та умови утворення перидотитів офіолітів Мармароської зони скель (Українські Карпати) [Текст]/ В.Б. Степанов, Н.Т.Білик, Л.В. Генералова, О.М. Гнилко, В.В. Дикий // Десяті наукові читання імені академіка Євгена Лазаренка: матеріали / Відп. ред. О. Матковський. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – С. 93–95.
16. Ступка О. О. Офіоліти Українських Карпат: геохімія і мінералогія [Текст]: автореф. дис... канд. геол. наук: 04.00.02 / О.О. Ступка. – Ін-т геології і геохімії горюч. Копалин НАН України. – Львів. – 2013. – 20 с.
17. Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій [Текст] / К.Р. Третьак, В.Ю. Максимчук, Р.І. Кутас та ін. – Львів, в-во Львівської політехніки, 2015. – 420 с.
18. Тектоно-магматическая эволюция Карпат [Текст] / З.М. Ляшкевич, А.П. Медведев, Ю.З. Крупский и др. – Киев : Наук. думка, 1995. – 132 с.
19. Термический анализ минералов и горных пород [Текст] / В.П. Иванова, Б.К. Касатов, Т.Н. Красавина и др. – Л.: Недра. – 1974. –399 с.
20. Штейнберг Д.С. Серпентинизация ультрабазитов [Текст] / Д.С. Штейнберг, И.С. Чащухин. – М. : Наука.– 1977. – 312 с.
21. Blanco-Quintero I. F. Serpentinites and serpentinites within a fossil subduction channel LaCorea mélange, eastern Cuba [Text] / I.F. Blanco-Quintero, J.A. Proenza, A. Garcia-Casco, E. Tauler, S. Gali // Geologica Acta. – 2011. – Vol. 9. – № 3–4. – С.389–405.
22. Csontos L. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region [Text] / L. Csontos & A. Vörös // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2004. – Vol. 210. – P. 1–56.
23. Evans B.W. Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life(?) [Text] / B.W. Evans // Geology. –2010. – Vol. 38 (10). – P. 879–882.
24. Frost B.R. The process of serpentinization in dunite from New Caledonia [Text] / B R. Frost, K.A. Evans, S.M. Swapp, J.S. Beard, F.E. Mothersole // Lithos. – 2013.– Vol. 178. – P. 24–39

25. Koutsovitis P. High-pressure subduction-related serpentinites and metarodingites from East Thessaly (Greece): Implications for their metamorphic, geochemical and geodynamic evolution in the Hellenic–Dinaric ophiolite context [Text] / P. Koutsovitis // *Lithos*. – 2017. – Vol. 276. – P. 122–145
26. Lafay R. High-pressure serpentinites, a trap-and-release system controlled by metamorphic conditions: Example from the Piedmont zone of the western Alps Romain [Text] / R. Lafay, F. Deschamps, S. Schwartz, S. Guillot, M. Godard, B. Debret, C. Nicollet // *Chemical Geology*. – 2013. – Vol. 343 – P. 38–54.
27. Liu Z-B. Serpentinisation and magnetite formation in the Angwu ultramafic rocks from the central Bangong-Nujiang suture zone, Tibetan Plateau [Text] / Z-B. Liu, J.-C. Li, T. Zhao, Y. Song, G.-L. Yuan, Y. Lin, H.-S. Shao // *Geological Journal*. – 2019. – V. 1. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1002/gj.3496>
28. Malvoisin B. Serpentinization of oceanic peridotites: 2. Kinetics and processes of San Carlos olivine hydrothermal alteration [Text] / B. Malvoisin, F. Brunet, J. Carlot, S. Rouméjon, M. Cannat // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117. [Electronic resource]. – Available at : B04102, <https://doi.org/10.1029/2011JB008842>
29. Schwartz S. Pressure–temperature estimates of the lizardite/antigorite transition in high pressure serpentinites [Text] / S. Schwartz, B. Reynard, R. Lafay, B. Debret, C. Nicollet, P. Lanari, A. Line // *Lithos*. – 2013. – Vol. 178. – P. 197–210.
30. Schmid S. The Alpine-Carpathian-Dinaric orogenic system: correlation and evolution of tectonic units [Text] / S. Schmid, D. Bernoulli, B. Fugenschuh, L. Matenco, S. Schefer, R. Schuster, M. Tischler, K. Ustaszewski, // *Swiss Journal of Geosciences*, 2008. – Vol. 101. – P. 139–183.
31. Wu K. Origins of two types of serpentinites from the Qinling orogenic belt, central China and associated fluid/melt-rock interactions [Text] / K. Wu, X. Ding, M. Ling, W. Sun, L. Zhang, Y. Hu, R. Huang // *Lithos*. – 2018. – V. 302–303. – P. 50–64.

Внесок авторіє: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 549.621.2.01/02(477.8:292.452)

Larysa Heneralova,

PhD (Geology), Associate Professor, Department of General and Regional Geology, Faculty of Geology,
Ivan Franko National University of Lviv, 4 Hrushevskyyi Street, Lviv, 79005, Ukraine,
e-mail: gen_geo@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6033-6556>;

Volodymyr Stepanov,

PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Petrography, Faculty of Geology,
Ivan Franko National University of Lviv,
e-mail: vbstepanov23@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0577-8682>;

Nataliia Bilyk,

Assistant, Department of Mineralogy, Faculty of Geology, Ivan Franko National University of Lviv,
e-mail: natbilyk@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9684-195X>;

Yevheniia Slyvko,

PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor,
Department of Ecological and Engineering Geology and Hydrogeology, Faculty of Geology,
Ivan Franko National University of Lviv,
e-mail: emslivko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2731-0602>

SERPENTINES AS THE INDICATORS OF MESOZOIC PERIDOTITES METAMORPHIC AND GEODYNAMIC TRANSFORMATIONS IN THE INTERNAL UKRAINIAN CARPATHIANS

Formulation of the problem. Peridotites of ophiolite complexes, being the fragments of the oceanic upper mantle that have undergone several stages of partial melting, brought to the surface by tectonic movements, also have undergone metamorphic transformations almost immediately after its formation. Because of serpentinization, the mineral composition of the rocks became more complicated. The analysis of the final structure and composition of apoperidotites allows obtaining data for geodynamic reconstructions regarding the stage of their formation.

Review of previous publications. It has been determined that serpentines are the most common secondary minerals of peridotites of the Uholskyi complex in the Ukrainian Carpathians, and the processes of serpentinization took place at a depth of 40–50 to 100 km (?) at $T = 450\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $P = 13\text{--}16\text{ kbar}$ (Stupka O., 2013). The study of serpentinites of the Main Ural Fault (Panas'yan L. et al., 2014) revealed that high alumina and high chromium serpentinites have ultrabasic protoliths formed in the mantle, and medium alu-

mina and low chromium varieties – the protoliths of the basic composition which were born in the conditions of the crust. Based on the study of serpentinites in the orogenic Qinling belt (China), researchers (Wu K. et al., 2018) determined their mantle origin: magnetite-enriched antigorite serpentinites were formed as a result of the interaction of serpentinized apoperidotites of mantle protoliths with molten rock in the subduction channel.

Purpose. We have investigated secondary serpentines in order to reconstruct the geodynamic conditions of the formation and transformations of the peridotites (Uhol'skyi complex), localized in the Marmarosh rocky zone in the Internal Ukrainian Carpathians, and are most widely spread in the interfluvium of Velyka and Mala Uholka-rivers.

Methods. The work is based on the results of geological observations of the Uhol'skyi complex rocks in natural outcrops, as well as petrographic, mineralogical (including X-ray diffraction, thermal and microprobe analysis), and geochemical studies.

Results. The paper presents the study results of serpentinized apoperidotites of the ophiolite Uhol'skyi complex in the Internal Ukrainian Carpathians. Serpentinized apoperidotites (T_2 – K_1 ?) form olistoliths in the Soimul'ska olistostrome-conglomerate strata of the Lower Cretaceous age. The investigated serpentines are the rock-forming minerals of lizardite and antigorite serpentinites. Lizardite serpentinites are characterized by lenticular-looped textures formed by α -lizardite and non-altered chrome-spinellids. Antigorite serpentinites, recognized by striped-shale textures, contain antigorite, β -lizardite and magnetite. Lizardite serpentinites are characteristic of the regressive metamorphism of the greenschist facies upper part, and antigorite serpentinites are a typical formation of the progressive metamorphism of the lower greenschist – upper lower epidote-amphibolite facies. Regressive metamorphism occurred under geodynamic conditions of spreading and the progressive ones – under subduction conditions between the terrains of Dacia and Tisza, which led to the closure of the Transylvanian-Mureş Paleocyan. It has been concluded, that the protoliths of lizardite serpentinites were the primary mantle rocks of the ultrabasic (restitic) composition, and the protoliths of the antigorite serpentinites were the lithospheric rocks of the basic composition.

Conclusions. The complex study of serpentinized apoperidotites of the Uhol'skyi complex makes it possible to reconstruct the metamorphic transformations of the primary mantle protoliths and to determine the stages of lithosphere formation within the fold-nappe structures. The obtained results can be used for prediction of serpentinite mineralization.

Keywords: Internal zone of the Ukrainian Carpathians, peridotites, serpentinites, serpentine, α -lizardite, β -lizardite, antigorite.

References

1. Bilyk, N. T., Heneralova, L. V., Yatsenko, I. H., Stepanov, V. B. (2016). *Mineralogy and geodynamic conditions of peridotites' alteration from ophiolites of Marmarosh rocky zone (Ukrainian Carpathians)*. *Geodynamics*, 2, 71–83.
2. Brianchaninova, N. S. (2004). *Serpentinites and serpentines of Polar Urals. Abstract of the thesis for doctor's degree in geol.-mineral. sciences*. Syktyvkar, 44.
3. Brianchaninova, N. S., Makeev, A. B. (1995). *Methods for the study of ultrabasic serpentinization*. In *Mineral Individuals, Aggregates, Parageneses*. *Proceedings of the Institute of Geology, Komi SC, UrB of RAS*, 88, 4–11.
4. Varlakov, A. S. (1986). *Petrology of the Processes of Serpentinization of Ultrabasites in Folded Regions*. Sverdlovsk, 224.
5. Generalova, L. V., Bilyk, N. T., Stepanov, V. B. (2017). *Spinellids – Indicators of Formation Conditions of Ugol'skyi Complex Peridotites (Internal Ukrainian Carpathian)*. *Ultramafic-mafic Complexes: geology, structure, ore potential: materials of V International conference* (pp. 87–89). Buryat State University Publishing Department (Gremyachinsk, 2–6 September 2017), Ulan-Ude.
6. Hnylko, O. M. (1912). *Tectonic zoning of the Carpathians in terms of the terrane tectonics*. Article 2. *The Flysch Carpathian – ancient accretionary prism*. *Geodynamics*, 1 (12), 71–83.
7. Hnylko, O. M., Generalova, L. V. (2013). *Early Alpine evolution of Ukrainian Carpathians*. In *Geological history, possible mechanisms and problems of formation of basins with oceanic/sub-oceanic crust in regions with continental crust: materials of XLV tectonic meeting* (pp. 48–53). GEOS, Moscow.
8. Hnylko, O. M., Hnylko, S. R., Generalova, L. V. (2015). *The formation of the structures of the cliff zones and the inter-cliff flysch of the Inner Ukrainian Carpathians – the result of convergence and collision of microcontinental terranes*. *Bulletin of St. Petersburg University*, ser. 7 (2), 4–24.
9. Dobrosotsky, S. V. (2013). *Features of the material composition of ultrabasites in dunite-harzburgite association of the Niadokotinsky ore field (Olysia-Musiursky massif, Sub-Polar Urals)*. *Bulletin of Voronezh University*, ser. *Geology* (1), 64–74.
10. Panas'yan, L. L., Posukhova, T. V., Cherepetskaya, E. B., Jini Zhang. (2014). *Mineralogical, petrophysical, and acoustic features of serpentinites, indicators of the paleodynamic conditions of their genesis (on the example of the Main Ural Fault zone)*. *Geology and geophysics*, 55, 12, 1828–1840.

11. Polyanin, V.S., Dusmanov, E.N. (2012). *The History of Mineral Transformations and Minerageny of Ultramafites in the Chelyabinsk Region*. Scientific notes of Kazan University, 154 (4), 45–54.
12. Raznitsin, Yu. N., Savelieva, G. N., Fedonkin, M. A. (2018). *The hydrocarbon potential of paleo- and modern suprasubduction zones: tectonic, geodynamic, mineralogical-geochemical, and biochemical aspects*. Pacific geology, 37, 2. 3–16.
13. Saveliev, D. E., Bazhyn, Ye. A., Snachev, V. I., Chernikova, T. I. (2009). *Serpentinization of ultrabasites of Kyshtym area*. Geological Collection of IG UrSC RAS, 8, 129–137.
14. Savelyeva, G.N. (1986). *Gabbro-ultrabasite assemblages of the Ural's ophiolites and their analogues in modern oceanic crust*. Moscow: Nauka, 246.
15. Stepanov, V. B., Bilyk, N. T., Heneralova, L. V., Hnylko, O. M., Dykyi, V. V. (2016). *Mineralogy and formation conditions of peridotites from ophiolites of Marmarosh rocky zone*. In Academician Yevhen Lazarenko Tenth Scientific Readings (pp. 93–95). Ivan Franko National University of Lviv, Lviv.
16. Stupka, O. O. (2013). *Ophiolites of the Ukrainian Carpathians*. Abstract of the thesis for candidate's degree in geol. sciences. Lviv, 20.
17. Tretiak, K. R., Maksymchuk, V. Yu., Kutas, R. I., Rokytnianskyi, I. I., Hnylko, O. M., ... & Tereshyn, A. V. (2015). *Modern Geodynamics and Geophysical Fields of the Carparhians and Adjacent Territories*. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, Lviv, 420.
18. Liashkevich, Z. M., Medvedev, A. P., Krupsky, Yu. Z., et al. (1995). *Tectono-Magmatic Evolution of the Carpathians*. Naukova Dumka, Kiev, 132).
19. Ivanova, V. P., Kasatov, B. K., Krasavina, T. N., et al. (1974). *Thermal Analysis of Minerals and Rocks*. Nedra, Leningrad, 399.
20. Shteinberg, D. S., Chashchukhin, I. S. (1977). *Serpentinization of Ultrabasites*. Nauka, Moscow, 312.
21. Blanco-Quintero, I.F., Proenza, J.A., Garcia-Casco, A., Tauler, E., Gali, S. (2011). *Serpentinites and serpentinites within a fossil subduction channel LaCorea mélange, eastern Cuba*. Geologica Acta. 9, 3–4, 389–405.
22. Csontos, L., Vörös, A. (2004). *Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 210, 1–56.
23. Evans, B. W. (2010). *Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life(?)* Geology. 38 (10), 879–882.
24. Frost, B.R., Evans, K.A., Swapp, S.M., Beard, J.S., Mothersole, F.E. (2013). *The process of serpentinization in dunite from New Caledonia*. Lithos, 178, 24–39
25. Koutsovitis, P. (2017). *High-pressure subduction-related serpentinites and metarodingites from East Thessaly (Greece): Implications for their metamorphic, geochemical and geodynamic evolution in the Hellenic–Dinaric ophiolite context* Lithos. 276, 122–145.
26. Lafay, R., Deschamps, F., Schwartz, S., Guillot, S., Godard, M., Debret, B., Nicollet C. (2013). *High-pressure serpentinites, a trap-and-release system controlled by metamorphic conditions: Example from the Piedmont zone of the western Alps Romain*. Chemical Geology, 343, 38–54.
27. Liu, Z-B., Li, J.-C., Zhao, T., Song, Y., Yuan, G.-L., Lin, Y., Shao H.-S. (2019). *Serpentinisation and magnetite formation in the Angwu ultramafic rocks from the central Bangong-Nujiang suture zone, Tibetan Plateau*. Geological Journal. 1. 1–17. <https://doi.org/10.1002/gj.3496>
28. Malvoisin, B. (2012). *Serpentinization of oceanic peridotites: 2. Kinetics and processes of San Carlos olivine hydrothermal alteration*. Journal of Geophysical Research, 117. [Electronic resource]. – Available at: B04102, <https://doi.org/10.1029/2011JB008842>.
29. Schwartz, S., Reynard, B., Lafay, R., Debret, B., Nicollet, C., Lanari, P., Line A. (2013). *Pressure–temperature estimates of the lizardite/antigorite transition in high pressure serpentinites*. Lithos. 178. 197–210.
30. Schmid, S., Bernoulli, D., Fugenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., ... & Ustaszewski, K. (2008). *The Alpine-Carpathian-Dinaric orogenic system: correlation and evolution of tectonic units*. Swiss Journal of Geosciences, 101, 139–183.
31. Wu, K., Ding, X., Ling, M., Sun, W., Zhang, L., Hu, Y., Huang, R. (2018). *Origins of two types of serpentinites from the Qinling orogenic belt, central China and associated fluid/melt-rock interactions*. Lithos, 302–303, 50–64 <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.019>

УДК 561:551.735(477.6)

Віталій Сергеевич Дернов,

аспірант, відділ стратиграфії та палеонтології палеозойських відкладень,
Інститут геологічних наук НАН України,
ул. Олесь Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна,
e-mail: vitalydernov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5873-394X>;

Николай Иванович Удовиченко,

к. геол.-мин. наук, доцент, кафедра географії,
Луганський національний університет імені Тараса Шевченка,
пл. Гоголя, 1, м. Старобільськ, 92703, Україна,
e-mail: triakis26@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9503-3275>

К ПАЛЕОБОТАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ МОСПИНСКОЙ СВИТЫ (СРЕДНИЙ КАРБОН, ДОНБАСС)

Памяти выдающегося палеоботаника
Олега Петровича Фисуненко (1930-2003)
посвящаем эту работу.

В статье представлены результаты исследования двух местонахождений остатков макрофлоры – «Македоновка» и «Волнухино», приуроченные к породам кровли угольных слоев g^2 и g_3 (моспинская свита, верхний башкир) соответственно. Отложения данной свиты, по сравнению со смежными, слабо охарактеризованы остатками ископаемых растений. В результате проведенных исследований из местонахождения «Македоновка» определено 20 видов и 12 форм, а именно: *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Halonia* sp., *Lepidodendron lycopodioides*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum* sp., *Syringodendron* sp. 2, *Stigmara ficoides*, *Asterophyllites grandis*, *Asterophyllites longifolius*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites cistii*, *Calamites* sp., *Pinnularia capillacea*, *Sphenophyllum cuneifolium*, *Sphenophyllum* sp., *Alethopteris* sp. 2, *Dictyoxylon* sp., *Eusphenopteris* cf. *obtusiloba*, *Eusphenopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris* sp., *Neuraethopteris rectinervis*, *Neuraethopteris schlehanii*, *Lyginopteris hoeninghausi*, *Paripteris gigantea*, *Trigonocarpus parkinsonii*, ?*Trigonocarpus* sp., *Cordaicarpus cordai*, *Cordaites principalis*, *Cordaites* sp.

Из «Волнухино» установлен комплекс растений, состоящий из 36 таксонов (21 вида и 15 форм, определенных в открытой номенклатуре). Фитокомплекс выглядит следующим образом: *Asolanus camptotaenia*, *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Knorria* sp., *Lepidodendron obovatum*, *Lepidodendron aculeatum*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum majus*, *Syringodendron* sp. 1, *Stigmara ficoides*, *Asterophyllites charaeformis*, *Asterophyllites grandis*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites* cf. *sachsei*, *Calamites* sp., *Calamostachys* sp., *Sphenophyllum cuneifolium*, *Alethopteris davreuxi*, *Alethopteris* sp. 1, *Aulacopteris* sp., *Cardioneura amadoca*, *Cyclopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris beneckeii*, *Karinopteris* cf. *dernoncourtii*, *Mariopteris* cf. *nervosa*, *Mariopteris* sp., *Lyginopteris hoeninghausi*, *Neuropteris* cf. *obliqua*, *Neuropteris* sp., *Palmatopteris furcata*, *Tetragonocarpus palibinii*, *Artisia approximata*, *Cordaites* sp., *Samaropsis* sp. Исходным для изученного фитоориктоценоза растительным сообществом было мезо-гигрофильное, которое получило развитие на завершающих этапах функционирования торфяника.

Ключевые слова: Донецкий бассейн, ископаемая флора, башкирский ярус, средний карбон.

В. С. Дернов, М. І. Удовиченко. ДО ПАЛЕОНТОЛОГІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОСПИНСЬКОЇ СВИТИ (СЕРЕДНІЙ КАРБОН, ДОНБАС). В статті представлено результати вивчення двох місцезнаходжень залишків макрофлори – «Македонівка» та «Волнухине», що приурочені до порід покривлі вугільного шару g^2 та g_3 (моспинська свита, верхній башкир) відповідно. Відклади даної свити, порівняно із суміжними, слабо охарактеризовані залишками викопних рослин. В результаті проведених досліджень із місцезнаходження «Македонівка» визначено 20 видів та 12 форм рослин, а саме: *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Halonia* sp., *Lepidodendron lycopodioides*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum* sp., *Syringodendron* sp. 2, *Stigmara ficoides*, *Asterophyllites grandis*, *Asterophyllites longifolius*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites cistii*, *Calamites* sp., *Pinnularia capillacea*, *Sphenophyllum cuneifolium*, *Sphenophyllum* sp., *Alethopteris* sp. 2, *Dictyoxylon* sp., *Eusphenopteris* cf. *obtusiloba*, *Eusphenopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris* sp., *Neuraethopteris rectinervis*, *Neuraethopteris schlehanii*, *Lyginopteris hoeninghausi*, *Paripteris gigantea*, *Trigonocarpus parkinsonii*, ?*Trigonocarpus* sp., *Cordaicarpus cordai*, *Cordaites principalis*, *Cordaites* sp.

З місцезнаходження «Волнухине» встановлено комплекс рослин, що складається із 36 таксонів (21 вид та 15 форм, визначених за відкритою номенклатурою). Фитокомплекс має наступний вигляд: *Asolanus camptotaenia*, *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Knorria* sp., *Lepidodendron obovatum*, *Lepidodendron aculeatum*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum majus*, *Syringodendron* sp. 1, *Stigmara ficoides*, *Asterophyllites charaeformis*, *Asterophyllites grandis*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites* cf. *sachsei*, *Calamites* sp., *Calamostachys* sp., *Sphenophyllum cuneifolium*, *Alethopteris davreuxi*, *Alethopteris* sp. 1, *Aulacopteris* sp., *Cardioneura amadoca*, *Cyclopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris beneckeii*, *Karinopteris* cf. *dernoncourtii*, *Mariopteris* cf. *nervosa*, *Mariopteris* sp., *Lyginopteris hoeninghausi*, *Neuropteris* cf. *obliqua*, *Neuropteris* sp., *Palmatopteris furcata*, *Tetragonocarpus palibinii*, *Artisia approximata*, *Cordaites* sp., *Samaropsis* sp. Рослинним урдуванням, яке дало початок фитоориктоценозу було мезо-гигрофільне, яке мало розвиток на фінальних етапах функціонування торф'яника.

Ключові слова: Донецький басейн, викопна флора, башкирський ярус, середній карбон.

Постановка проблеми. В последние десятилетия в Донбассе неслыханных масштабов получила незаконная добыча каменного угля и песчаника. Толчком к развитию несанкциониро-

ванного недропользования стал кризис дотационной угольной отрасли в середине 90-х годов минувшего века и вызванная им деградация промышленной и социальной инфраструктуры. Несмотря на огромный вред, нанесенный окружающей среде и экономике государства, так называемые «угольные копанки» вскрыли слои каменных углей, которые шахтами не разрабатывались ввиду своей незначительной мощности. Таким образом, появилась возможность собрать массовый палеонтологический материал из стратиграфических уровней ранее ограничено доступных для исследования.

Так как Донецкий бассейн является старопромышленным регионом, не удивительно, что на его территории имеются многочисленные старые штольни, в которых еще в позапрошлом веке крестьяне добывали каменный уголь. В данной работе представляются результаты изучения остатков растений из отложений средней и верхней частей моспинской свиты (средний карбон), вскрытых старой штольной, а также карьером в процессе незаконной добычи каменного угля.

Отложения моспинской свиты (верхний башкир – рис. 1) флористически сравнительно слабо охарактеризованы. По данным Е.О. Новик [11], из указанного стратона известны растительные остатки 62 видов. Для сравнения, из более молодых отложений смоляниновской и белокалитвенских свит, известно вдвое больше видов. Причина тому – заметно меньшее количество в разрезе моспинской свиты угольных слоев и прослоев, с перекрывающими и подстилающими породами которых связаны основные захоронения остатков среднекаменноугольных растений в Донбассе. В связи с тем, что палеоботанические исследования среднекаменноугольных отложений Донбасса на данный момент практически прекратились, в то время как в соседних регионах они активно проводятся стараниями преимущественно западных ученых, уровень изученности донецкой каменноугольной флоры постепенно снижается. В связи с этим, любые новые данные, дополняющие палеоботаническую характеристику каменноугольных отложений Донбасса, имеют безусловный интерес.

Цель данной работы – выяснить систематический состав растительных остатков из двух новых местонахождений, определить условия произрастания и захоронения растений, а также сравнить комплексы макрофитофоссилий с одновозрастными флорами смежных с Донбассом регионов.

История изучения флоры карбона Донбасса. История изучения каменноугольной флоры Донбасса насчитывает почти два века. За этот

длительный срок из разреза карбона была исследована богатая ископаемая макрофлора. Ее изучением занимались Ад. Броньяр, Э.И. Эйхвальд, А.В. Гуров, М. Крендовский, И.Ф. Шмальгаузен, Н.В. Григорьев, М.Д. Залесский, Е.Ф. Чиркова, В. Йонгманс, Е.О. Новик, Т.А. Ищенко, А.К. Щеголев, О.П. Фисуненко, Н.С. Снигиревская, В.Г. Лепехина, О.П. Губская, О.Ю. Теличко, Н.И. Боярина, А.Г. Коваленко, С.В. Наугольных, З. Шимунэк и Я. Бурэш [4, 6, 9-11, 16-22].

Материал и методы исследований. Местонахождение «Македоновка» (рис. 2, фиг. 5, 6) приурочено к отвалам старой штольни на склоне крупного оврага, впадающего слева в балку у СЗ окраины одноименного села (Луганская область, Лутугинский район; координаты: 48°14'36"N, 39°17'58"E). Отложения падают полого на север под углами около 15-20°. Остатки растений встречены на нескольких стратиграфических уровнях. Наиболее многочисленные фитофоссилии собраны с отвалов, сложенных породами закрытого интервала выше слоя 1 (рис. 3; см. табл. 1). Здесь залегает угольный слой g_1^2 и вмещающие его отложения. Породы, слагающие отвал, представлены несколькими литотипами:

Литотип А: аргиллиты темно-серые, почти черные, слабо уплотненные, мягкие, углистые. Они редко демонстрируют горизонтальную слоистость, гораздо чаще скрытослоистые. В данных породах встречены ихнофоссилии, остатки наземных растений, а также животных: ядра раковин неморских пеллеципод, фрагменты панцирей неопределенных мечехвостов, чешуя кистеперых рыб и зубные пластинки брадиодонтов. Описанная порода, судя по всему, – это отложения внутренних частей обширного озера.

Литотип Б: лимонитовые уплотненные и плитчатые конкреции, иногда существенно песчаные. Встречены остатки мечехвоста и наземных растений.

Литотип В: алевролиты темно-серые, среднезернистые, плитчатые, углистые, переходящие в алевролиты крупнозернистые, неуглистые, скрытослоистые, песчаные с углефицированными остатками растений, а также в алевролиты горизонтальнослоистые, углистые, мелкозернистые, с остатками флоры. Помимо фитофоссилий, встречены также остатки, принадлежащие неопределенной артропode, возможно, многоножке. Данный литотип – это отложения заиляющихся частей обводненного торфяного болота и отложениями приморских озер.

Литотип Г: аргиллит темно-серый, углистый, фитотурбированный, с массой аппендиксов стигмариий (так называемый «кучерявчик»). Это, несомненно, породы почвы угольного слоя.

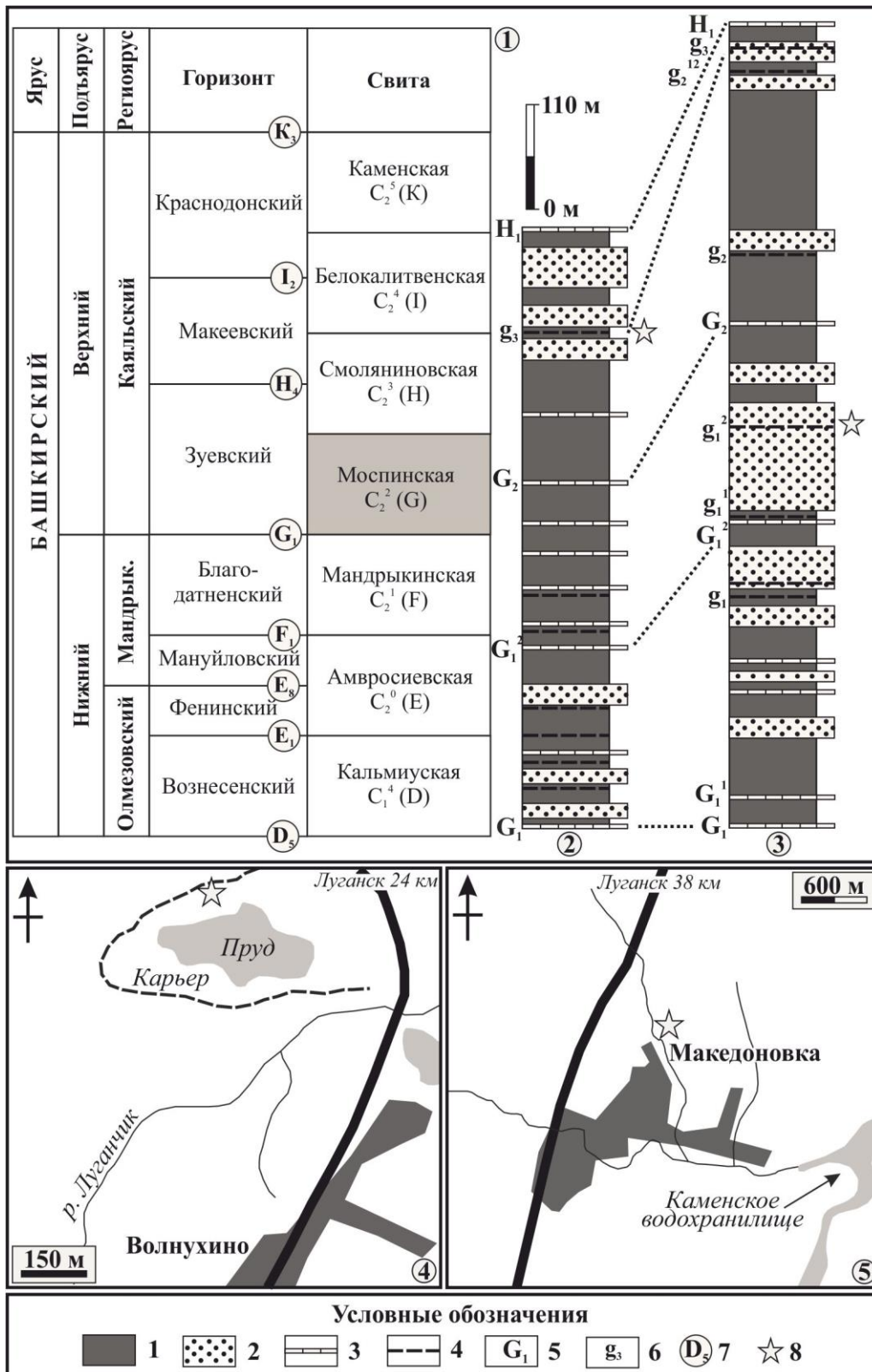


Рис. 1. Стратиграфическое и географическое положение местонахождений «Волнухино» и «Македоновка».

Фиг. 1. Схема расчленения отложений башкирского яруса Донбасса [14]. Фиг. 2. Сводный разрез моспинской свиты по Родаково-Успенскому горнопромышленному району [8] и стратиграфическое положение местонахождения «Волнухино». Фиг. 3. Сводный разрез моспинской свиты по Боково-Штереровскому горнопромышленному району [8] и стратиграфическое положение местонахождения «Македоновка». Фиг. 4, 5. Географическое положение местонахождения «Волнухино» (фиг. 4) и «Македоновка» (фиг. 5). Условные обозначения: 1 – алевролиты и аргиллиты, 2 – песчаники, 3 – известняки, 4 – каменные угли, 5 – индексы известняков, 6 – индексы углей, 7 – известняки-границы стратиграфических горизонтов, 8 – изученные местонахождения

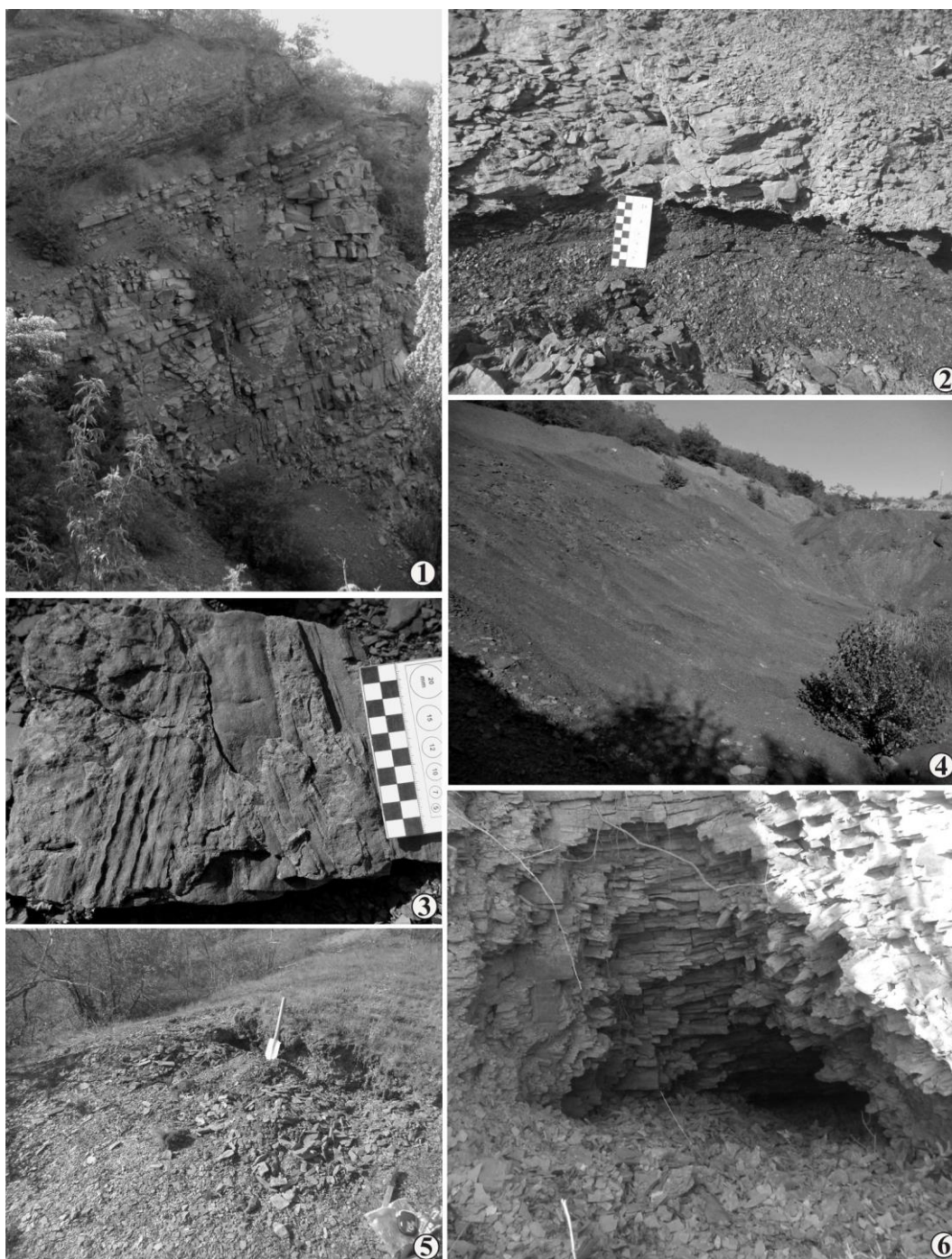


Рис. 2. Изученные местонахождения остатков растений.

Фиг. 1. Общий вид верхней части разреза местонахождения «Волнухино». Фиг. 2. Угольный прослой g_3 . Фиг. 3. Скопление фитофоссилий в песчаниках слоя 5 («Волнухино»). Фиг. 4. Обнажение флориферных алевролитов местонахождения «Волнухино». Фиг. 5. Отвал старой крестьянской штольни (местонахождение «Македоновка»). Фиг. 6. Старая штольня по угольному слою g_1^2 (местонахождение «Македоновка»)

В слое № 3 (рис. 3) встречены редкие обрывки листьев пиносид *Cordaites* sp. и фрагменты осей хвощевых *Calamites* sp. Из песчаников слоя № 4 определены *Paripteris gigantea* (Sternberg) Gothan и *Calamites* sp. Немного восточнее в этих песчаниках также наблюдаются инситные ризофоры *Stigmara ficoides* (Sternberg) Brongniart с аппендиксами. Тут же встречен

фрагмент довольно крупной оси плауновидного *Lepidodendron*.

Местонахождение «Волнухино» расположено в действующем карьере (Успенское месторождение песчаников; рис. 2, фиг. 1-4), находящемся на северной окраине села Волнухино (Лутугинский район, Луганская область; $48^{\circ}21'28''N$, $39^{\circ}16'53''E$). В процессе добычи песчаника для

производства щебня здесь был вскрыт угольный прослой g_3 , залегающий в верхней части моспинской свиты. В алевролитах слоя № 1 (рис. 3) определены инситные ризофоры *Stigmaria ficoides* с аппендиксами; в основании песчаников слоя № 5 определена *Sigillaria* sp. Основная масса остатков растений происходит из алевролитов слоя № 3.

Местонахождение «Волнухино» приурочено к Луганской структурно-фациальной зоне (далее – СФЗ) Донецкого прогиба [13]. В этой СФЗ, имеющей ширину 10-25 км и вытянутой вдоль оси Донецкого прогиба, породы карбона образуют многочисленные мелкие складки (т.н. «Северная зона мелкой складчатости»). Здесь отложения моспинской свиты представлены песчано-глинистой толщей с 15 пластами маломощных (до 0,5 м) известняков и 10 прослоями углей, из которых g_3 – наиболее мощный (до 0,45 м). Мощность свиты в указанной СФЗ – 210-730 м [13]. Местонахождение «Македоновка» находится в северной части Колпаковско-Нагольчанской СФЗ, в пределах которой угленосные отложения моспинской свиты почти полностью замещаются дьяковской серией, представленной мощной толщей глинистых сланцев и алевролитов с редкими прослоями песчаников. По нашим данным, мощность моспинской свиты и ее возрастных аналогов в Колпаковско-Нагольчанской СФЗ составляет около 750-800 м. Свита согласно залегает на отложениях мандрыкинской свиты (нижний башкир) и так же перекрывается отложениями смоляниновской свиты (верхний башкир).

Богатых местонахождений остатков растений среди отложений моспинской свиты не так уж много. В связи с этим, могут быть упомянуты обнажения алевролитов в кровле угольного прослоя g_2 в районе села Ушаковка [20], сланцев над углем g_2 у северных окраин села Македоновка (оба – Лутугинский район, Луганская область), породы кровли угольного прослоя g_3 южнее села Михайловка Перевальского района Луганской области [17], породы под известняком G_3 в балке Заповедной в окрестностях поселка Кутейниково Амвросиевского района Донецкой области [6], а также, видимо, кровля слоя g_2 в месте слияния балок Борщовой и Дерезоватой юго-западнее г. Хрустальный Луганской области [6].

Изученная коллекция, собранная в 2009-2014 гг. авторами, хранится в Геологическом музее Луганского национального университета под номером 9.

Изложение основного материала. Ниже (табл. 1) приводится список видов и форм, определенных в открытой номенклатуре, встреченных в кровле угольного прослоя g_3 (слой № 3) местонахождения «Волнухино» и вблизи уголь-

ного слоя g_1^2 местонахождения «Македоновка» (см. фототаблицы 1 и 2).

В комплексе местонахождения «Волнухино» установлено 36 таксонов растений: 21 вид и 15 форм, определенных в открытой номенклатуре. В нем доминируют птеридоспермы (42%), причем наиболее обильны и в видовом, и в количественном отношении представители рода *Kari-nopteris*. Птеридоспермы прочих родов (*Alethopteris*, *Cardioneura*, *Neuropteris* и пр.) представлены гораздо беднее. Остатки плауновидных (28%), принадлежащие исключительно древо-видным формам, представлены частями различных органов этих растений – корненосцами, побегам, филлоидами, спорофиллами и пр. Среди членистостебельных (22%) преобладают облиственные ветви (*Asterophyllites*), реже – оси (*Calamites*). Наименее разнообразны пинопсиды (8%). Встречены лишь редкие остатки семян, фрагментарные отпечатки листьев и сердцевин ствол кордаитантовых.

В состав комплекса ископаемых растений из местонахождения «Македоновка» входит 32 таксона: 20 видов и 12 форм, определенных в открытой номенклатуре. Обращает внимание отсутствие отливов сердцевин ствол пинопсид (*Artisia*) на местонахождении «Македоновка», хотя остатки листьев и семян этих растений здесь часто наблюдаются. Кроме того, удивительно полное отсутствие в составе фитокомплексов обоих изученных местонахождений папоротников, хотя из моспинской свиты, по данным Е. О. Новик [9], известно семь видов этих растений. Отличительной особенностью фитокомплекса местонахождения «Волнухино» является отсутствие в нем представителей рода *Neuralethopteris*, которые очень характерны для флор башкирского возраста Западной Европы и Северной Америки. Тем не менее, они известны из местонахождения «Македоновка». То же касается вида *Paripteris gigantea* (Sternberg) Gothan.

Ниже кратко остановимся на виде *Cardioneura amadoca* Zalessky, к которому отнесен единственный отпечаток вайи, найденный в Волнухино. Род *Cardioneura* был выделен в 1933 г. М.Д. Залесским на материале из среднего карбона Донбасса [6]. Тип рода – *C. amadoca* (В «Основах палеонтологии» в качестве типового неверно указан вид *Cardiopteris sibirica* Zal.). Изученный М.Д. Залесским материал происходит из отложений вблизи известняков G_3 и G_4 моспинской свиты окрестностей пос. Кутейниково.

Отличительной особенностью указанного выше рода является комбинация морфологических признаков перышек, присущих роду *Neuropteris* и жилкования как у рода *Cardiopteris*.

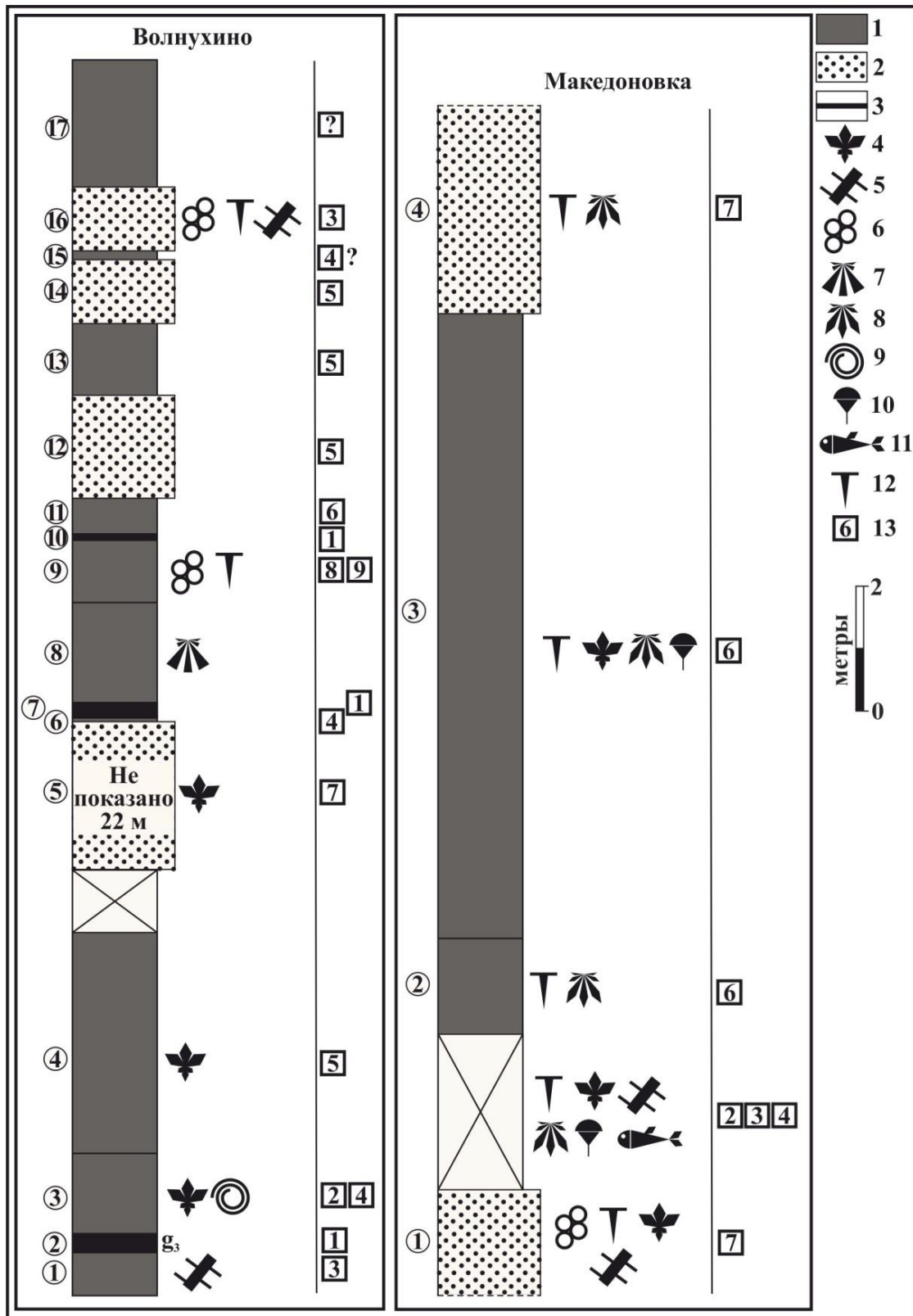


Рис. 3. Разрезы местонахождений «Волнухино» и «Македоновка»

Условные обозначения: 1 – аргиллиты и алевролиты, 2 – песчаники, 3 – каменные угли, 4 – остатки растений, 5 – стигмари, 6 – микробиально-индуцированные текстуры, 7 – морские моллюски, 8 – неморские пелециподы, 9 – микроконхиды, 10 – мечехвосты, 11 – рыбы, 12 – ихнофоссилии, 13 – номера фаций. Расшифровка номеров фаций: 1. Фация обводненных торфяных болот. 2. Фация заиляющихся частей обводненного торфяного болота. 3. Фация заболоченных прибрежноморских равнин. 4. Фация приморских озер. 5. Фация лагун и зоны волновой ряби заливно-лагунного побережья. 6. Фация лагун. 7. Фация песчаных выносов рек. 8. Фация заливов. 9. Фация глинистых осадков открытого моря (названия фаций согласно работе [15] с дополнениями)

Систематический состав комплекса макрофлоры из местонахождений «Македоновка» и «Волнухино»

«Македоновка»	«Волнухино»
Плауновидные	
<i>Bothrodendron minutifolium</i> Boulay, <i>Cyperites bicarinatus</i> Lindley et Hutton, <i>Halonia</i> sp., <i>Lepidodendron lycopodioides</i> Sternberg, <i>Lepidophloios laricinus</i> (Sternberg), <i>Lepidostrobophyllum</i> sp., <i>Syringodendron</i> sp. 2, <i>Stigmara ficoides</i> (Sternberg) Brongniart.	<i>Asolanus camptotaenia</i> Wood, <i>Bothrodendron minutifolium</i> Boulay, <i>Cyperites bicarinatus</i> Lindley et Hutton, <i>Knorria</i> sp., <i>Lepidodendron obovatum</i> Sternberg, <i>Lepidodendron aculeatum</i> Sternberg, <i>Lepidophloios laricinus</i> (Sternberg), <i>Lepidostrobophyllum majus</i> (Brongniart) Hirmer, <i>Syringodendron</i> sp. 1, <i>Stigmara ficoides</i> (Sternberg) Brongniart.
Членистостебельные	
<i>Asterophyllites grandis</i> (Sternberg) Geinitz, <i>Asterophyllites longifolius</i> (Sternberg) Brongniart, <i>Calamites carinatus</i> Sternberg, <i>Calamites undulatus</i> Sternberg, <i>Calamites cistii</i> Brongniart, <i>Calamites</i> sp., <i>Pinnularia capillacea</i> Lindley et Hutton, <i>Sphenophyllum cuneifolium</i> (Sternberg) Zeiller, <i>Sphenophyllum</i> sp.	<i>Asterophyllites charaeformis</i> (Sternberg) Goeppert, <i>Asterophyllites grandis</i> (Sternberg) Geinitz, <i>Calamites carinatus</i> Sternberg, <i>Calamites undulatus</i> Sternberg, <i>Calamites</i> cf. <i>sachsei</i> Stur, <i>Calamites</i> sp., <i>Calamostachys</i> sp., <i>Sphenophyllum cuneifolium</i> (Sternberg) Zeiller.
Птеридоспермы	
<i>Alethopteris</i> sp. 2, <i>Dictyoxylon</i> sp., <i>Eusphenopteris</i> cf. <i>obtusiloba</i> (Brongniart) Novik, <i>Eusphenopteris</i> sp., <i>Karinopteris acuta</i> (Brongniart) Boersma, <i>Karinopteris</i> sp., <i>Lyginopteris hoeninghausi</i> Potonié, <i>Neuralethopteris rectinervis</i> (Kidston) Laveine, <i>Neuralethopteris schlehanii</i> (Stur) Cremer, <i>Paripteris gigantea</i> (Sternberg) Gothan, <i>Trigonocarpus parkinsonii</i> Brongniart, ? <i>Trigonocarpus</i> sp.	<i>Alethopteris davreuxi</i> (Brongniart) Goeppert, <i>Alethopteris</i> sp. 1, <i>Aulacopteris</i> sp., <i>Cardioneura amadoca</i> Zalesky, <i>Cyclopteris</i> sp., <i>Karinopteris acuta</i> (Brongniart) Boersma, <i>Karinopteris beneckeii</i> (Huth) Boersma, <i>Karinopteris</i> cf. <i>dernoncourtii</i> (Zeiller) Boersma, <i>Lyginopteris hoeninghausi</i> Potonié, <i>Mariopteris</i> cf. <i>nervosa</i> (Brongniart) Zeiller, <i>Mariopteris</i> sp., <i>Neuropteris</i> cf. <i>obliqua</i> (Brongniart) Zeiller, <i>Neuropteris</i> sp., <i>Palmatopteris furcata</i> (Brongniart) Potonié, <i>Tetragonocarpus palibinii</i> Novik.
Пинопсиды	
<i>Cordaicarpus cordai</i> (Geinitz) Zeiller, <i>Cordaites principalis</i> (Germar) Geinitz, <i>Cordaites</i> sp.	<i>Artisia approximata</i> (Lindley and Hutton) Corda, <i>Cordaites</i> sp., <i>Samaropsis</i> sp.

Нужно отметить, что выдающийся советский палеоботаник М.Ф. Нейбург считала нецелесообразным выделение рода *Cardioneura*, так как между ним и *Neuropteris* существует множество переходных форм [2]. Е.О. Новик [9] была склонна не выделять род *Cardioneura* и относить *C. amadoca* к роду *Cardiopteris*.

По данным О.П. Фисуненко [22] и Е.О. Новик [10] в Донбассе вид *Cardioneura amadoca* зафиксирован от кровли угольного слоя g₂ моспинской свиты до кровли угольного слоя k₅¹ каменской свиты, т.е. известен из верхней половины башкирского и самых низов московского яруса.

О.П. Фисуненко уделял большое внимание находкам кардионевр в Донбассе [20, 22], так как основной ареал данного рода находится значительно восточнее и включает территорию Казахстана, Кузбасса, Таймыра, Печорского и Тунгусского бассейнов. Западные Донецкого бассейна находки рода *Cardioneura* не известны. Более того, в одном из местонахождений (Ушаковка, см. табл. 2) *Cardioneura amadoca* встречена вместе с *Lonchopteris eschweileri* Andrae [21].

Представители рода *Lonchopteris* чрезвычайно редко встречаются в Донбассе, так как основная часть ареала рода находилась западнее [21]. Помимо указанной находки, единственный обрывок вайи *Lonchopteris bricei* Brongn. описан Е.О. Новик из алмазной свиты (московский ярус). С.В. Мейен [5], тем не менее, отрицал принадлежность данной фитофоссилии к роду *Lonchopteris*. Это заключение в лишней раз доказывает предположение О.П. Фисуненко о потери непосредственной связи флор Донбасса и Западной Европы в позднем башкире. Именно это обстоятельство стало причиной отсутствия или слабого развития в московских флорах Донбасса многих типичных для Западной Европы родов. *Lonchopteris*, тем не менее, известен в среднекаменноугольной флоре Северного Кавказа, но сюда это растение проникло, видимо, не через Донбасс, а территорией Малой Азии.

Факт находки *Lonchopteris* и *Cardioneura* в одном слое весьма интересен. По этой причине, О.П. Фисуненко считал возможным использовать представителей этих родов для изучения взаимоотношений между вестфальскими и ангарскими

флорами [22].

Ближайшим к Донбассу регионом, откуда известен род *Cardioneura*, является Волгоградская область (Приволжская моноклиналь), где в глинах, датируемых верхним башкиром, Е.Ф. Залесской вместе с типичной еврамерийской флорой определен птеридосперм *Cardioneura* sp. [1]. В этом же комплексе ею определены представители родов *Cardiopteris* и *Neuropteris*, что свидетельствует о том, что автор определений различал эти роды и признавал самостоятельность *Cardioneura*.

В одной из работ [22], опубликованной, к сожалению, в малоизвестном издании, О.П. Фисуненко высказал предположение, что растение *Neurocardiopteris asiatica* Radczenko, описанное М.И. Радченко, а позже Л.А. Гогановой и соавторами из нижнекаменноугольных отложений Карагандинского бассейна, может оказаться младшим синонимом *Cardioneura amadoca* Zal. В другой работе указанных авторов, вопреки требованиям Международного кодекса ботанической номенклатуры [22], для остатков, описанных Л.А. Гогановой и соавторами, было предложено новое родовое название *Cardioneuropteris*. Существенное различие в геологическом возрасте материала из Донбасса и Казахстана (верхний башкир и верхний визе соответственно), О.П. Фисуненко объяснял особенностями расселения таксона из центра видообразования к периферии флористической области.

Заметим, что в свое время М.Д. Залесский из межеской свиты Донбасса (верхи визейского яруса) описал очень близкий к *Cardioneura* птеридосперм, названный *Neuropteris bulupalganensis* Zal. [9]. Единственным морфологическим от-

личием указанных растений является присутствие у *N. bulupalganensis* средней жилки, которая, впрочем, очень слабо выражена. Нам кажется, что провести детальное морфологическое сравнение группы видов, отмеченных нами выше, а именно – *Cardioneura amadoca*, *Neuropteris bulupalganensis*, *Neurocardiopteris asiatica* и представителей рода *Neurocardiopteris* Lutz было бы весьма полезно. Вполне возможно, что именно *Neuropteris bulupalganensis* и *Neurocardiopteris asiatica* (рис. 4, фиг. 3, 4), имеющие близкий возраст и морфологию, окажутся синонимами.

Ниже (табл. 2) перечисляются все известные местонахождения остатков вида *Cardioneura amadoca* Zal. в Донбассе.

Как видим, поднятый вопрос довольно сложен и лежит в плоскости проверки валидности таксонов. Кроме того, для определения истинного значения рода *Cardioneura* при выяснении связи флор Ангариды и Евразии необходимо изучение новых материалов из Донбасса, ревизия старых и установление пределов стратиграфического распространения вида *Cardioneura amadoca* Zal. в разрезах карбона Донецкого бассейна и Казахстана, в случае если *Cardioneura amadoca* и *Neurocardiopteris asiatica* окажутся синонимами. Кроме того, существующее мнение о соответствии рода *Cardioneura* Zal. роду *Neurocardiopteris* Lutz [2] вынуждает осторожнее подходить к вопросу значения указанных птеридоспермов для решения проблем палеобиогеографии, так как представление о почти исключительно ангарском распространении кардионевр окажется неверным, ведь второй род известен в Европе. Таким образом, на данный момент нельзя с полной уверенностью утверждать, что пред-

Таблица 2

Местонахождения остатков растений *Cardioneura amadoca* Zalessky, 1933
в каменноугольных отложениях Донецкого бассейна

Географическая привязка	Стратиграфическое положение	Автор
Украина, Луганская область, Лутугинский район, овраг у северной окраины с. Ушаковка.	Моспинская свита, алевролиты в кровле угольного слоя g ₂ .	Фисуненко, 1993; 2002
Украина, Донецкая область, Амвросиевский район, балка Заповедная северо-восточнее пос. Кутейниково.	Моспинская свита, ниже известняка G ₃ .	Залесский, Чиркова, 1938
Украина, Донецкая область, левый берег р. Крынка в районе пос. Кутейниково.	Моспинская свита, кровля угольного слоя выше известняка G ₄ .	Залесский, Чиркова, 1938
Украина, Луганская область, Лутугинский район, карьер в с. Волнухино.	Моспинская свита, алевролиты в кровле угольного слоя g ₃ .	Данная работа
Украина, Луганская область, Антрацитовский район, балка Мечетная в 2 км западнее пос. Ивановка.	Смоляниновская свита, кровля угольного слоя h ₁₁ .	Фисуненко, 1964
Российская Федерация, Ростовская область, Шахтинский район, Грушевская котловина, Шахтинский участок.	Каменская свита, кровля угольного слоя k ₅ ¹ .	Новик, 1954

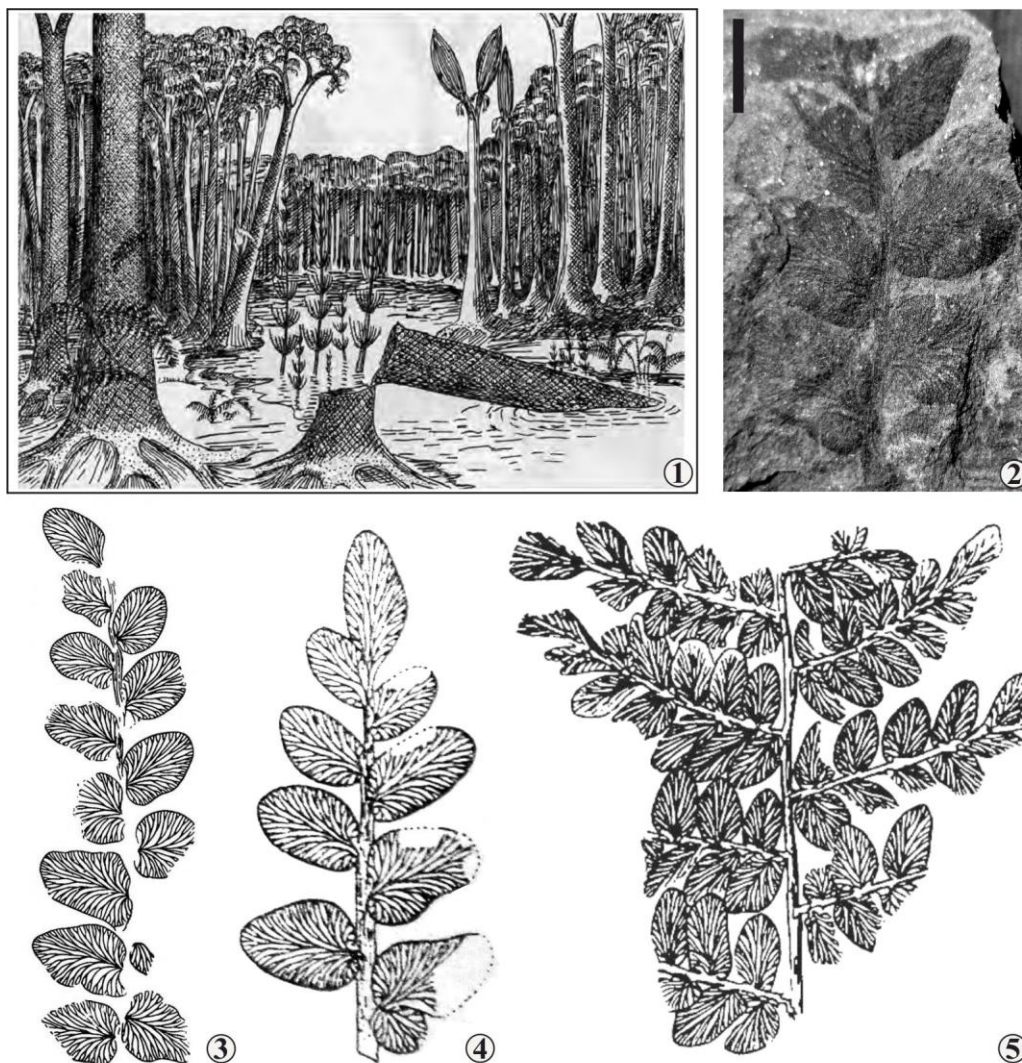


Рис. 4. Условия произрастания растений, а также *Cardioneura amadoca* и морфологически близкие к ней птеридоспермы

Фиг. 1. Ландшафт «В» среднего карбона Донбасса [18], характеризующийся развитием торфонакопления. Фиг. 2. Отпечаток вайи *Cardioneura amadoca* Zalesky из кровли угольного слоя g_2 (обнажение у с. Ушаковка, Лутугинской район); длина масштабного отрезка – 10 мм. Фиг. 3. *Neuropteris bulupalganensis* Zalesky, р. Кальмиус, верхний визе – межевская свита (рис. взят из работы [9]). Фиг. 4. *Cardioneuropteris asiatica* (Radczenko), Карагандинский бассейн, верхи визе (рис. взят из работы [22]). Фиг. 5. *Cardioneura amadoca* Zalesky, р. Крынка, верхний башкир – моспинская свита (рис. взят из работы [9])

ставители рода *Cardioneura* могут оказаться ключом к сопоставлению континентальных отложений карбона Евразии и Ангарида.

Тафономия и экология. Фитофоссилии из слоя № 4 местонахождения «Волнухино» имеют хорошую и удовлетворительную сохранность, представлены отпечатками и углистыми фитолеймами. Иногда фитофоссилии частично пиритизированы. Они, как правило, не несут следов продолжительной транспортировки.

Тем не менее, иногда встречаются остатки декортицированных побегов плауновидных (тип сохранности *Knorria* и *Syringodendron*), сильно поврежденные оси членистостебельных и пр. Также обнаружены редкие скопления остатков

спорофиллов *Lepidostrobophyllum majus* на плоскостях наслоения алевролитов, возникшие, видимо, вследствие их массового опадения после созревания.

На одном из перышек птеридосперма *Neuropteris* cf. *obliqua* из Волнухино, изображенного на фиг. 10 (табл. 2), наблюдается клиновидная вырезка, идущая от края пластинки к его срединной жилке. Эти образования, видимо, являются зонами, ослабленные некрозом вследствие поверхностного объедания листьев артроподами и, впоследствии, отъединившимися от прочей части перышка.

Фитофоссилии местонахождения «Македоновка» также представлены отпечатками и уг-

лиственными фитолеймами; некоторые остатки из литотипа В замещены лимонитом (окисленный пирит). К сожалению, применение тафономатологического анализа флоры и флороносной толщи сильно ограничивается тем, что каменный материал большей своей частью происходит не из коренника, а из отвала штольни.

Сравнивая особенности сохранности остатков растений двух изученных местонахождений, можем констатировать, что ее качество в подавляющем количестве случаев выше в Волнухино. Изученные фитоориктоценозы по классификации О.П. Фисуненко [16], должны быть отнесены к автохтонному типу (например, захоронения инситных корненосцев плауновидных в слоях № 1 и 16 местонахождения «Волнухино» или в литотипе Г местонахождения «Македоновка»), гипоавтохтонному типу (захоронение растений в нижней части слоя № 3 и, видимо, в литотипе В местонахождения «Македоновка»), а также аллохтонному типу (захоронение растений в слоях № 5 и 11 в Волнухино или в литотипе А в Македоновке).

По представлениям некоторых палеоботаников [12, 16], птеридоспермы *Lyginopteris hoeninghausi* и *Eusphenopteris* были лазающими формами с тонким цепляющимся стеблем. Птеридоспермы рода *Mariopteris*, как предполагается, произрастали преимущественно на переходных участках между озерами и болотами [16]. Представители рода *Cardioneura* в среднекаменноугольное время на территории Карагандинского бассейна произрастали на водоразделах [12]. Несомненно, что донецкие представители рода были частью растительных сообществ, распространенных гипсометрически значительно ниже, а именно в пределах приморской аккумулятивной равнины. Относительно экологии растений рода *Sphenophyllum* существует две точки зрения. Согласно первой, высказанной еще в 1845 г. Е. Гермаром [25], клинолисты были полуводными растениями. Много лет спустя А. Шенк высказал мнение о наземной форме данных растений, условия произрастания которых во многом сходны с экологическими особенностями современных лиан [25]. Древовидные хвощевидные *Calamites* были полуводными растениями и заселяли прибрежную полосу опресненных лагун, пресных озер и берега рек [23].

Как было отмечено выше, в основании угольного слоя g_3 в карьере с. Волнухино имеется палеопочвенный горизонт, который можно отнести к типу гистосолей. В современности данные почвы формируются на органическом субстрате (преимущественно торфе) и распространены очень широко – от зоны тундры до мангровых зарослей влажных тропиков [7].

В данной палеопочве встречены многочисленные остатки корненосцев плауновидных, стелющихся в горизонтальной плоскости – *Stigmata ficoides*. По данным О.П. Фисуненко [16], такой характер расположения ризофор и неглубокое их проникновение в субстрат, могут свидетельствовать об избегании корненосками глубоких горизонтов почв, которые бедны кислородом вследствие активного разложения отмерших частей растений.

Анализируя состав фитоориктоценоза местонахождения «Волнухино», можно утверждать, что исходными для него растительными сообществами были гигрофильное (рис. 4, фиг. 1) и мезо-гигрофильное (согласно взглядам О.П. Фисуненко [16]). Первое сообщество включало преимущественно плауновидные и являлось главным поставщиком органического вещества в среднекаменноугольные торфяники Донбасса. Второе сообщество получало развитие на завершающих этапах функционирования торфяника, когда он начинал заиливаться и превращался в пресноводное озеро или систему озер [23]. Оно же было торфообразователем в случае господства неблагоприятных климатических условий, таких как повышения засушливости климата, непродолжительные моменты которого, по мнению О.П. Фисуненко [17], имели место во время накопления моспинской свиты.

Судить о типе растительных сообществ местонахождения «Македоновка» нет достаточных оснований, так как нельзя точно установить соотношения отдельных групп растений в фитоориктоценозе, ведь материал собран не из коренного залегания.

Фитостратиграфия. Как видно из стратиграфического положения изученных флороносных слоев и флористического состава выявленных в них комплексов макрофитофоссилий (присутствие *Sphenophyllum cuneifolium*, *Lyginopteris hoeninghausi*, *Karinopteris acuta*, *Cardioneura amadoca*, *Neuralethopteris schlehanii*), данные отложения относятся к зоне совместного распространения *Neuralethopteris* spp. – *Lyginopteris hoeninghausii* (NL) схемы О.П. Фисуненко [19] или макрофлористической подзоне *Alethopteris decurrens* зоны *Lyginopteris hoeninghausi* шкалы Н.И. Бояриной [4]. Данная зона соответствует западноевропейской макрофлористической зоне *Lyginopteris hoeninghausii*-*Neuralethopteris schlehani* [4].

Среди географически близких к Донбассу регионов, откуда известны остатки растений близкого к изученным местонахождениям возраста, заслуживает внимания Северный Кавказ, Львовско-Волынский бассейн и наиболее удаленный Карагандинский бассейн, который в

среднем карбоне находился примерно на одной палеошироте с Донбассом [12].

На территории Львовско-Волынского бассейна (ЛВБ) и его западного продолжения – Люблинского бассейна, отложениям моспинской свиты соответствует поромовская свита, из отложений которой известны фитофоссилии, свидетельствующие о близости флоры и растительности указанных бассейнов [11, 24]. По мнению О.П. Фисуненко [16] в башкирское время между Донбассом и ЛВБ существовала континентально-лагунная связь, которая и обусловила близость их растительности и флоры.

На Северном Кавказе О.И. Анисимовой [3] близкий по возрасту фитокомплекс установлен между конгломератами толстобугорской свиты и первым вулканогенным горизонтом. Отсюда определено 15 видов, из которых 12 известны из моспинской свиты. Наиболее важными видами этого комплекса, как нам кажется, являются *Lepidodendron aculeatum* (в Донбассе распространен в пределах моспинской-горловской свит), *Neuralethopteris schlehanii* (серпухов-низы верхнего башкира), *Lonchopteris eschweiliana* (моспинская свита), *Karinopteris beneckeii* (моспинская и смоляниновская свиты), *Dactylothea aspera* (верхний предел вертикального распространения в Донбассе – основание амвросиевской свиты). По мнению О.И. Анисимовой и Е.О. Новик [11] интервал разреза, откуда происходит комплекс, соответствует смоляниновской свите, хотя, как нам кажется, возможен и более древний ее возраст (например, как возрастной эквивалент моспинской свиты).

В верхах московского яруса на территории этого региона известен эндемичный род *Vambakia* Anisimova, 1973 морфологически очень близкий к роду *Cardioneura* [3]. Необходимо также отметить, что в среднекаменноугольной флоре Северного Кавказа известны виды, характерные для лимнических бассейнов Европы и неизвестные в Донбассе [11]. Тем не менее, систематический состав среднекаменноугольных флор Донбасса и Северного Кавказа довольно сходен: из 130 видов, установленных в среднем карбоне Северного Кавказа, 95 известны в Донбассе [11].

В структуре среднекаменноугольной флоры Карагандинского бассейна, по данным М.В. Ошурковой [12], 52,2 % видов – это представители Евразийской палеофлористической области, 12,5 % видов, характерных для Ангарской области и 35,3 % эндемиков. Е.О. Новик [11] предполагала существование в позднем башкире непосредственной континентально-лагунной связи между Донбассом и Карагандинским бассейном. Таким образом, несмотря на значитель-

ную географическую удаленность, флора и растительность Донбасса и Карагандинского бассейна демонстрируют значительное сходство.

Таким образом, фитокомплекс из кровли угольного слоя g_3 является несколько своеобразным. В нем отсутствуют типичные для фиториктоценозов данного возраста остатки растений (например, *Paripteris*) и, в то же время, присутствуют фитофоссилии, чуждые захоронениям флоры в пределах Евразии (*Cardioneura*). Из отложений вблизи угольного слоя g_1^2 определены типичные для данного возраста растения.

Выводы. Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Местонахождение «Волнухино» является самым богатым местонахождением остатков флоры моспинской свиты. В то же время, данный стратон, по сравнению со смежными отложениями, является слабо палеоботанически охарактеризованным.

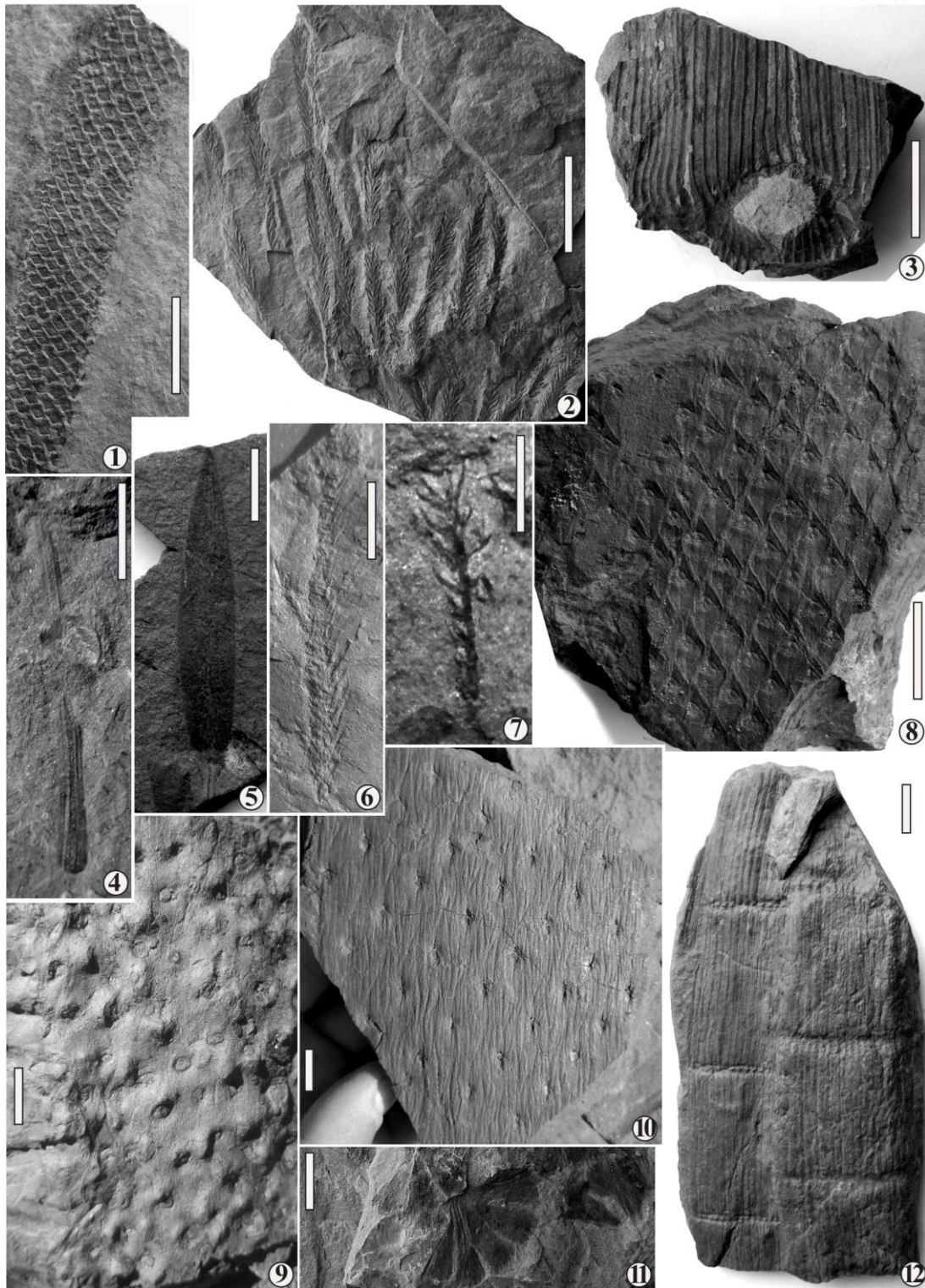
2. Флороносными отложениями являются различные по происхождению осадки, а именно: отложения пресноводного озера, заливающегося торфяника, лагуны, дельты, прибрежной аккумулятивной равнины. Прекращение торфонакопления («Волнухино») ознаменовалось сменой растительных ассоциаций – от гигрофильных сообществ, состоящих преимущественно из плауновидных, к мезо-гигрофильным сообществам, включающих птеридоспермы и членисто-стебельные.

3. Изученная флора («Волнухино») демонстрирует своеобразие, заключающееся в отсутствии некоторых родов и видов, широко распространенных в отложениях верхнего башкира Донбасса. Тем не менее, здесь также присутствуют элементы не свойственные флорам Евразии. Из отложений вблизи угольного слоя g_1^2 («Македоновка») определены растения, характерные для фитоориктоценозов верхнего башкира Донецкого бассейна.

4. Ввиду значительной научной и просветительской ценности, местонахождение «Волнухино» заслуживает предоставления статуса природоохранного объекта – палеонтологического памятника природы. Этот вопрос требует скорейшего решения, так как дальнейшая разработка песчаников в карьере с. Волнухино может привести к уничтожению местонахождения, а массы туристов, привлекаемые близко расположенным искусственным водоемом, к его разграблению и засорению бытовым мусором.

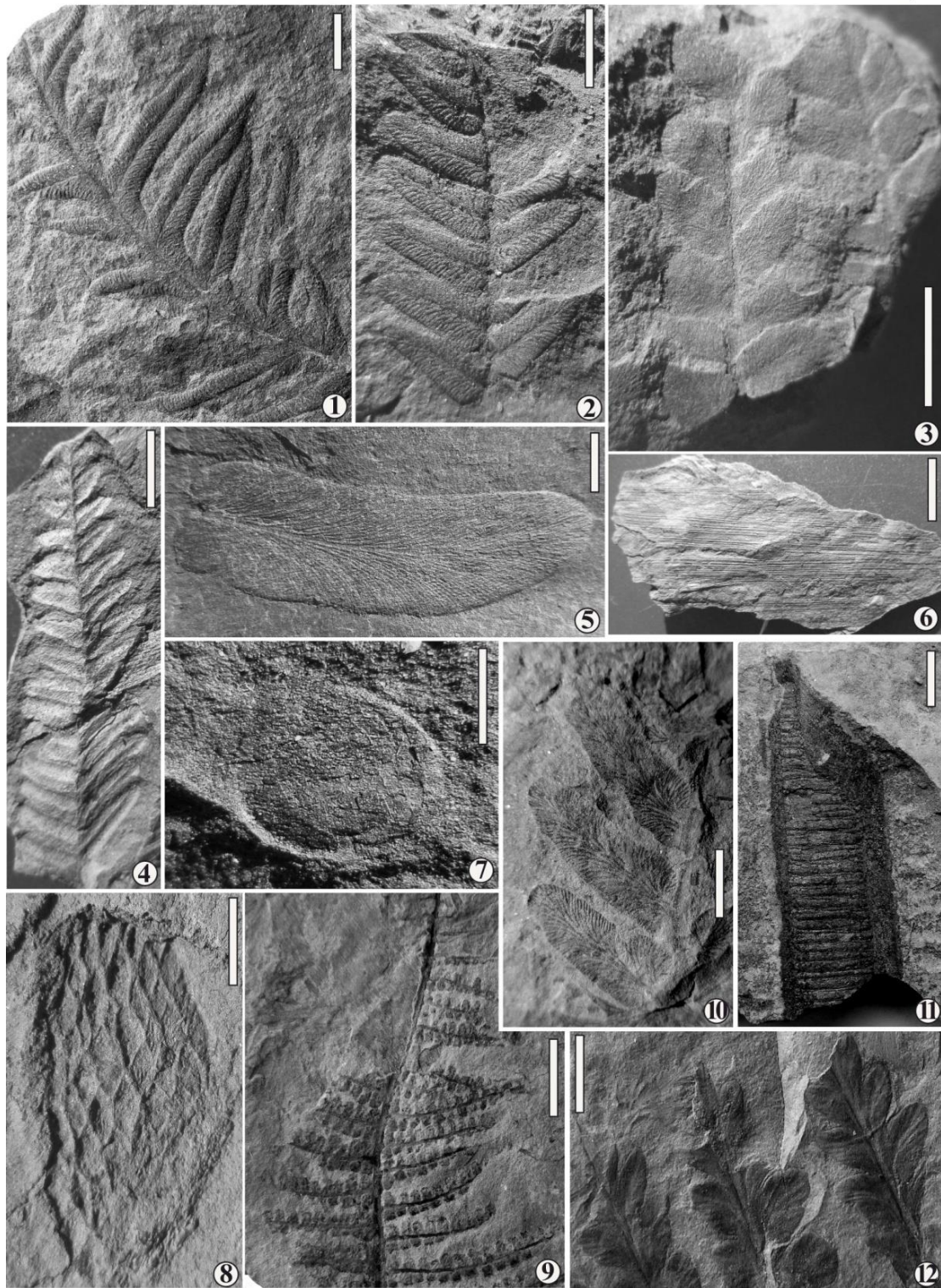
Благодарности. Авторы искренне признательны канд. геол.-мин. наук Н. И. Бояриной (Институт геологических наук НАН Украины, Киев) за ценные замечания по содержанию статьи.

Таблиця 1



Фиг. 1. *Lepidophloios laricinus* Sternb. (отпечаток оси), № 1290. Фиг. 2. *Bothrodendron minutifolium* Boulay (облиственные побеги), № 1456. Фиг. 3. *Calamites carinatus* Sternb. (внутреннее ядро оси), № 1011. Фиг. 4. *Cyperites bicarinatus* L. et H. (изолированный филлоид), № 1345. Фиг. 5. *Lepidostrobophyllum majus* Brongn. (спорофилл), № 1444. Фиг. 6. *Lepidodendron lycopodioides* Sternberg (облиственный побег плауновидного), б/н. Фиг. 7. *Asterophyllites grandis* (Sternb.) Gein. (отпечаток побега членистостебельного), № 990. Фиг. 8. *Lepidodendron obovatum* Sternb. (отпечаток поверхности оси), № 1333. Фиг. 9. *Stigmaria ficoides* (Sternb.) Brongn. (ризофор), полевое фото. Фиг. 10. *Asolanus camptotaenia* Wood (отпечаток поверхности оси), № 1189. Фиг. 11. *Sphenophyllum cuneifolium* (Sternb.) Zeiller (остатки листьев), № 998. Фиг. 12. *Calamites carinatus* Sternb. (остатки оси), № 1282. Фитофоссилии, изображенные на фиг. 1-5 и 7-11 происходят из Волнухино, прочие – из Македоновки. Длина масштабной линейки – 10 мм (фиг. 2, 4, 5, 9-12), 15 мм (фиг. 7) и 20 мм (фиг. 1, 3, 6, 8)

Таблиця 2



Фиг. 1. *Alethopteris davreuxi* (Brongn.) Goerr. (отпечаток вайи), № 983. Фиг. 2, 4. *Neuralethopteris schlehanii* (Stur) Cremer (отпечаток вайи), № 894 (фиг. 2) и № 342 (фиг. 4). Фиг. 3. *Cardioneura amadoca* Zal. (отпечаток вайи), № 1025. Фиг. 5. *Paripteris gigantea* (Sternb.) Gothan (изолированное перышко), № 2123. Фиг. 6. *Cordaites principalis* (Germar) Geinitz (отпечаток листа), № 2898. Фиг. 7. *Cordaicarpus cordai* (Geinitz) Zeiller (остатки семечка), № 1787. Фиг. 8. *Dictyoxylon* sp. (отпечаток поверхности древесины), № 2676. Фиг. 9. *Lyginopteris hoeninghausi* (Brongn.) (отпечаток вайи), № 1344. Фиг. 10. *Neuropteris* cf. *obliqua* (Brongn.) Zeill. (отпечаток вайи), № 1081. Фиг. 11. *Artisia approximata* (L. et H.) Corda (сердцевина ствола), № 1023. Фиг. 12. *Mariopteris* cf. *nervosa* (Brongn.) Zeill. (отпечаток вайи с сохранившейся фитолеймой), № 1254. Фитофоссилии на фиг. 1, 3, 9, 10-12 происходят из Волнухино, все прочие – из Македоновки. Длина масштабной линейки – 5 мм (фиг. 5), 10 мм (фиг. 1, 2, 4, 7-12), 20 мм (фиг. 3, 6)

Литература

1. Алиев М.М. Каменноугольные отложения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции [Текст] / М.М. Алиев, Г.М. Яриков, Р.О. Хачатрян и др. – Москва: Недра, 1975. – 264 с.
2. Андреева Е.М. Атлас руководящих форм ископаемых фауны и флоры пермских отложений Кузнецкого бассейна [Текст] / Е.М. Андреева, М.О. Мандельштам, Г.П. Радченко, А.П. Ротай, Л.Л. Халфин, В.И. Яворский. – Москва: ГОНТИ, 1956. – 410 с.
3. Анисимова О.И. Флора и флостратиграфия среднего карбона Северного Кавказа [Текст] / О.И. Анисимова. – Киев: Наукова думка, 1979. – 108 с.
4. Боярина Н.И. Макрофлористические зоны среднего и верхнего карбона (пенсильванской подсистемы) Донецкого бассейна [Текст] / Н.И. Боярина // Геологический журнал. – 2016. – № 1. – С. 21-35.
5. Вахрамеев В.А. Палеозойские и мезозойские флоры Евразии и фитогеография этого времени [Текст] / В.А. Вахрамеев, И.А. Добрускина, Е.Д. Заклинская, С.В. Мейен. – Москва: Наука, 1970. – 426 с.
6. Залесский М.Д. Ископаемая флора среднего отдела каменноугольных отложений Донецкого бассейна [Текст] / М.Д. Залесский, Е.Ф. Чиркова. – Ленинград-Москва: Гл. ред. горно-топливной и геолого-разв. литературы, 1938. – 170 с.
7. Клебанович Н.В. Почвы мира в системе WRB: практикум для студентов специальности 1-56 02 02 [Текст] / Н.В. Клебанович. – Минск, 2015. – 41 с.
8. Мефферт Б.Ф. Синонимика угольных пластов Донецкого бассейна [Текст] / Б.Ф. Мефферт, П.И. Степанов, Н.А. Родыгин и др. – Ленинград: Изд. Геологического комитета, 1926. – 178 с.
9. Новик Е.О. Каменноугольная флора Европейской части СССР [Текст] / Е.О. Новик. – Москва: Изд. АН СССР, 1952. – 468 с.
10. Новик Е.О. Каменноугольная флора восточной части Донецкого бассейна [Текст] / Е.О. Новик. – Киев: Изд. АН УССР, 1954. – 128 с.
11. Новик Е.О. Закономерности развития каменноугольной флоры юга Европейской части СССР [Текст] / Е.О. Новик. – Киев: Наукова думка, 1974. – 140 с.
12. Ошуркова М.В. Палеофитологическое обоснование стратиграфии верхних свит каменноугольных отложений Карагандинского бассейна [Текст] / М.В. Ошуркова. – Ленинград: Наука, 1967. – 148 с.
13. Полетаев В.И. Расчленение и корреляция разнофациальных толщ нижнего и низов среднего карбона Днепро-Донецкого авлакогена [Текст] / В.И. Полетаев, В.Г. Вакарчук, Л.Г. Винниченко и др. – Киев: ИГН АН УССР, 1991. – 52 с.
14. Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою [Текст] / Гол. ред. П.Ф. Гожик. – Київ: ІГН НАН України, 2013. – 636 с.
15. Феофилова А.П. Особенности осадко- и угленакопления в нижнем и среднем карбоне Донецкого бассейна [Текст] / А.П. Феофилова, М.Л. Левенштейн. – Москва: Изд. АН СССР, 1963. – 176 с.
16. Фисуненко О.П. Растительные сообщества и флостратиграфическое расчленение среднего карбона Донецкого бассейна: автореферат диссертации на соиск. уч. степени канд. геол.-мин. наук [Текст] / О.П. Фисуненко. – Киев, 1964. – 24 с.
17. Фисуненко О.П. Методика и геологическое значение эколого-тафономических исследований (на примере среднего карбона Донбасса): автореферат диссертации на соиск. уч. степени докт. геол.-мин. наук [Текст] / О.П. Фисуненко. – Киев, 1973. – 44 с.
18. Фисуненко О.П. Ландшафты среднего карбона Донецкого бассейна [Текст] / О.П. Фисуненко // Палеонтология и реконструкция геологической истории палеобассейнов. – Ленинград: Наука, 1987. – С. 92-99.
19. Фисуненко О.П. Зональная флостратиграфическая шкала нижнего и среднего карбона Донецкого бассейна [Текст] / О.П. Фисуненко // Геологический журнал. – 1991. – № 3. – С. 55-64.
20. Фисуненко О.П. Памятники природы Луганской области и их изучение в краеведческих походах и экскурсиях [Текст] / О.П. Фисуненко. – Луганск, 1993. – 32 с.
21. Фисуненко О.П. К систематике алетоптерид [Текст] / О.П. Фисуненко // Наука на порозі нового тисячоліття. – Луганск: Альма Матер, 2001. – С. 60-63.
22. Фисуненко О.П. Cardioneura, Neurocardiopteris или Cardioneuropteris? [Текст] / О.П. Фисуненко // 2001 – результаты науки. – Луганск: Альма Матер, 2002. – С. 26-32.
23. Фисуненко О.П. Торфообразующие растительные сообщества среднего карбона Донецкого бассейна [Текст] / О.П. Фисуненко, Н.С. Снигиревская // Жизнь на древних континентах: ее становление и развитие. – Москва: Наука, 1981. – С. 98-106.
24. Шульга В.Ф. Литолого (фациально)-палеоэкологический анализ карбоновой угленосной формации Львовско-Вольнского прогиба. Статья 2. Анализ терригенных толщ с растительными остатками [Текст] / В.Ф. Шульга, А. Котасова, А. Котас // Литология и геология горючих ископаемых. – 2008. – № 2(18). – С. 116-133.
25. Щеголев А.К. Плауновидные и клинолисты позднего карбона [Текст] / А.К. Щеголев. – Киев: Наукова думка, 1991. – 128 с.

Вклад авторов: оба автора сделали равный вклад в эту работу.

UDC 561:551.735(477.6)

Vitalii Sergeevich Dernov,

PhD Student, Department of Palaeontology and Stratigraphy of Paleozoic deposits,
Institute of Geological sciences of NAS of Ukraine,
55-b Oles Honchar St., Kiev, 01054, Ukraine,

e-mail: vitalydernov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5873-394X>;

Nikolai Ivanovich Udovichenko,

PhD (Geology), Associate Professor, Department of Geography,
Luhansk Taras Shevchenko National University, 1 Gogol Sq., Starobelsk, 92703, Ukraine,

e-mail: triakis26@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9503-3275>

**ON THE PALEOBOTANICAL CHARACTERISTIC OF THE MOSPINO FORMATION
(MIDDLE CARBONIFEROUS, DONETS BASIN)**

Formulation of the problem. Deposits of the Mospino Formation (Upper Bashkirian) are poorly characterized by plants remains. Any new data supplementing the paleobotanical characterization of the Carboniferous deposits of the Donets Basin are, undoubtedly, of interest.

The aims of the article are to find out the systematic composition of plant remains from two localities and to determine the conditions of growth and burial of plants.

The history of the study of Carboniferous flora of the Donets Basin dates back almost two centuries. During this long period, a rich fossil macroflora was investigated from the Carboniferous sediments.

Material and research methods. This article is based on the results of a study of fossil flora from two sites – Makedonovka and Volnuhino (Lutuginsky district of the Luhansk region).

Statement of the main material. Of the sediments with the coal layer g_1^2 (Makedonovka), 32 taxa were identified: 20 species and 12 forms defined in the open nomenclature. The composition of the plant complex is as follows: *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Halongia* sp., *Lepidodendron lycopodioides*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum* sp., *Syringodendron* sp. 2, *Stigmaria ficoides*, *Asterophyllites grandis*, *Asterophyllites longifolius*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites cistii*, *Calamites* sp., *Pinnularia capillacea*, *Sphenophyllum cuneifolium*, *Sphenophyllum* sp., *Alethopteris* sp. 2, *Dictyoxylon* sp., *Eusphenopteris* cf. *obtusiloba*, *Eusphenopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris* sp., *Neuraethopteris rectinervis*, *Neuraethopteris schlehanii*, *Lyginopteris hoeninghausi*, *Paripteris gigantea*, *Trigonocarpus parkinsonii*, ?*Trigonocarpus* sp., *Cordaicarpus cordai*, *Cordaites principalis*, *Cordaites* sp.

From the roof of the coal layer g_3 (Volnuhino), 36 plant taxa were determined: 21 species and 15 forms defined in the open nomenclature. Among them: *Asolanus camptotaenia*, *Bothrodendron minutifolium*, *Cyperites bicarinatus*, *Knorria* sp., *Lepidodendron obovatum*, *Lepidodendron aculeatum*, *Lepidophloios laricinus*, *Lepidostrobophyllum majus*, *Syringodendron* sp. 1, *Stigmaria ficoides*, *Asterophyllites charaeformis*, *Asterophyllites grandis*, *Calamites carinatus*, *Calamites undulatus*, *Calamites* cf. *sachsei*, *Calamites* sp., *Calamostachys* sp., *Sphenophyllum cuneifolium*, *Alethopteris davreuxi*, *Alethopteris* sp.1, *Aulacopteris* sp., *Cardioneura amadoca*, *Cyclopteris* sp., *Karinopteris acuta*, *Karinopteris beneckeii*, *Karinopteris* cf. *dernoncourtii*, *Mariopteris* cf. *nervosa*, *Mariopteris* sp., *Lyginopteris hoeninghausi*, *Neuropteris* cf. *obliqua*, *Neuropteris* sp., *Palmatopteris furcata*, *Tetragonocarpus palibinii*, *Artisia approximata*, *Cordaites* sp., *Samaropsis* sp.

A detailed morphological comparison of the following group of species is necessary: *Cardioneura amadoca*, *Neuropteris bulupalganensis*, *Neurocardiopteris asiatica*, as well as species of the genus *Neurocardiopteris* Lutz. It is possible that *Neuropteris bulupalganensis* and *Neurocardiopteris asiatica*, having close age and morphology, will turn out to be synonyms.

Hygrophilic and meso-hygrophilic plant communities were the initial plant communities for Volnuhino phytocoenosis. The deposits of the Mospino Formation belong to the zone of joint distribution *Neuraethopteris* spp. – *Lyginopteris hoeninghausii* (NL) schemes by O.P. Fisunenko or macrofloristic subzone *Alethopteris decurrens* of the *Lyginopteris hoeninghausi* zone of the scheme of N.I. Boyarina.

Conclusions. Fossil site Volnuhino is the richest locality of the flora remains of the Mospino Formation. The deposits are sediments of a freshwater lake, peat, lagoon, delta, and coastal accumulative plain. Volnuhino's locality deserves to be granted the status of a conservation object – a paleontological geosite.

References

1. Aliev M.M., Yarikov G.M., Khachatryan R.O. et al. (1975). *Carboniferous deposits of the Volga-Ural oil and gas province. Moscow, Nedra. 264.*

2. Andreeva E.M., Mandelstam M.O., Radchenko G.P. et al. (1956). Atlas of governing forms of fossil fauna and flora of the Permian sediments of the Kuznetsk Basin. Moscow, GONTI. 410.
3. Anisimova O.I. (1979). Flora and phytostatigraphy of the Middle Carboniferous of the North Caucasus. Kiev, Naukova Dumka. 108.
4. Boyarina N.I. (2016). Macrofloristic zones of the Middle and Upper Carboniferous (Pennsylvanian subsystem) of the Donets Basin. *Geological journal*. 1. 21-35.
5. Vakhrameev V.A., Dobruskina I.A., Zaklinskaya E.D., Meyen S.V. (1970). Paleozoic and Mesozoic floras of Eurasia and phytogeography of this time. Moscow, Nauka, 426.
6. Zalessky M.D., Chirkova E.F. (1938). Fossil flora in the middle part of the Carboniferous deposits of the Donets Basin. Leningrad-Moscow, The main edition of the mountain fuel and geological exploration literature. 170.
7. Klebanovich N.V. (2015). Soils of the world in the WRB system: workshop for students of the specialty 1-56 02 02. Minsk. 41.
8. Meffert B.F., Stepanov P.I., Rodygin N.A. et al. (1926). Synonymy of coal seams of the Donets Basin. Leningrad, Publishing House of Geological Committee. 178.
9. Novik E.O. (1952). Carboniferous flora of the European part of the USSR. Moscow, Publishing House of Academy of Sciences of USSR. 468.
10. Novik E.O. (1954). Carboniferous flora of the eastern part of the Donets Basin. Kiev, Publishing House of Academy of Sciences of Ukrainian SSR. 128.
11. Novik E.O. (1974). Regularities in the development of the Carboniferous flora of the south of the European part of the USSR. Kiev, Naukova Dumka. 140.
12. Oshurkova M.V. (1967). Paleophytological substantiation of stratigraphy of the upper suites of Carboniferous deposits in the Karaganda Basin. Leningrad, Nauka. 148.
13. Poletaev V.I., Vakarchuk L.G., Vinnichenko V.G. et al. (1991). Separation and correlation of different facies strata of the Lower and lower part of Middle Carboniferous Dnieper-Donetsk aulacogen. Kiev, Institute of Geological Sciences of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 52.
14. Gozhyk P.F. (Ed.). (2013). Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerosis of Ukraine. T. 1. Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic, and Mesozoic. Kiev, Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, 636.
15. Feofilova A.P., Levenshtein M.L. (1963). Features of sediment and coal accumulation in the Lower and Middle Carboniferous of the Donets Basin. Moscow, Publishing House of Academy of Sciences of USSR. 176.
16. Fisunen O.P. (1964). Plant communities and phytostatigraphic partition of the Middle Carboniferous of the Donets Basin: abstract of PhD dissertation. Kiev. 24.
17. Fisunen O.P. (1973). Methodology and geological significance of ecological-taphonomic studies (on the example of the Middle Carboniferous of Donets Basin): abstract of PhD dissertation. Kiev. 44.
18. Fisunen O.P. (1987). Landscapes of the Middle Carboniferous of the Donets Basin. Paleontology and reconstruction of the geological history of paleobasins. Leningrad, Nauka. 92-99.
19. Fisunen O.P. (1991). Zonal phytostatigraphic scale of the Lower and Middle Carboniferous of the Donets Basin. *Geological Journal*. 3. 55-64.
20. Fisunen O.P. (1993). Natural monuments of the Lugansk region and their study in local history campaigns and excursions. Lugansk. 32.
21. Fisunen O.P. (2001). To the taxonomy of aletopterids. Science on the threshold of a new thousandth. Lugansk, Alma Mater. 60-63.
22. Fisunen O.P. (2002). Cardioneura, Neurocardiopteris or Cardioneuropteris? 2001 – the results of science. Lugansk, Alma Mater. 26-32.
23. Fisunen O.P., Snigirevskaya N.S. (1981). Peat-forming plant communities of the Middle Carboniferous of the Donets Basin. Life on the ancient continents: its formation and development. Moscow, Nauka. 98-106.
24. Shulga V.F., Kotasova A., Kotas A. (2008). Lithological (facial)-paleoecological analysis of the Carboniferous coal-bearing formation of the Lvov-Volyn trough. Article 2. Analysis of terrigenous strata with plant remains. *Lithology and geology of fossil fuels*. 2(18). 116-133.
25. Schegolev A.K. (1991). Lycopods and Sphenophyllales of the Late Carboniferous. Kiev, Naukova Dumka. 128.

УДК 624.131.7

Дмитро Вікторович Рудаков,

д. техн. н., проф., зав. каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна,
e-mail: rudakov.d.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7878-8692>;

Василь Іполитович Тимощук,

к. техн. н., доц. каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: vasyl.tymoshchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3266-9828>;

Наталія Олександрівна Глущенко,

аспірантка каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: romanovska.n.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3639-7738>

ВПЛИВ ФІЛЬТРАЦІЇ ЛУЖНИХ РОЗЧИНІВ НА ДЕФОРМАЦІЙНІ ПРОЯВИ В ҐРУНТОВІЙ ОСНОВІ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Проведено аналіз впливу статичного навантаження та втрат концентрованих лужних розчинів на деформаційні прояви в ґрунтовій основі і формування крену мостового крана. Методика досліджень включала лабораторні визначення фізико-механічних та просадкових властивостей ґрунтів, зокрема, елювіально-делювіальних суглинків, визначення хімічного складу ґрунтових вод на досліджуваній ділянці та оцінки розчинення твердої фази лужним розчином з використанням рентгенофлуоресцентного спектрометра СЕР-01 ElvaX Plus, варіативні розрахунки осади та просадки на основі стандартних методик з урахуванням часткового розчинення твердої фази ґрунту.

Лабораторними дослідженнями встановлені компоненти (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O) та їх частка у масі твердої фази елювіально-делювіального суглинка (до 13.3%), що можуть переходити в більш розчинні солі у концентрованому лужному розчині. Це створює умови для розвитку просадки хімічного походження, суттєво більшої порівняно з деформаціями ґрунту в умовах фільтрації нейтральних розчинів.

Проведені розрахунки осади та просадки без та з урахуванням хімічного впливу на ґрунти в основі фундаменту споруди показали, що критичні деформації, що призводять до неприпустимого крену між елементами конструкції мостового крана понад 0,004, формуються лише у разі нерівномірних просадок хімічного походження понад 5...10 см. Розраховані деформації та крени відповідають виявленим деформаціям та крену між колонами крана, які перевищили максимально допустиме значення у 2016 р. і негативно вплинули на умови експлуатації даної споруди. При цьому, погіршення несучої здатності ґрунтів внаслідок впливу лужного розчину відбувається навіть після технічної меліорації ґрунтів, проведеної понад 20 років тому назад. Питома вага розчиненої твердої фази в ґрунті оцінюється у 1-1,5%, що відповідає результатам впливу сильних лужних розчинів, оціненого у цій роботі та в інших дослідженнях.

Отримані результати можуть бути застосовані при прогнозуванні умов довготривалої експлуатації споруд на ґрунтах, через які фільтруються хімічно агресивні розчини.

Ключові слова: ґрунт, осади, просадка, лужний розчин, суглинок, вилуговання, деформації, крен.

Д. В. Рудаков, В. І. Тимощук, Н. А. Глущенко. ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ В ҐРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЯХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. Проведен анализ влияния статической нагрузки и утечек концентрированных щелочных растворов на деформационные проявления в ґрунтовой основе и формирования крена мостового крана. Методика исследований включала лабораторные определения физико-механических и просадочных свойств ґрунтов, в частности, элювиально-делювиальных суглинков, определения химического состава ґрунтовых вод на исследуемом участке и оценки растворения твердой фазы щелочным раствором с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра СЭР-01 ElvaX Plus, вариативные расчеты осади и просадки на основе стандартных методик с учетом частичного растворения твердой фазы ґрунта.

Лабораторными исследованиями установлены компоненты (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O) и их доля в массе твердой фазы элювиально-делювиального суглинка (до 13.3%), которые могут переходить в более растворимые соли в концентрированном щелочном растворе. Это создает условия для развития просадки химического происхождения, существенно большей по сравнению с деформациями ґрунта в условиях фильтрации нейтральных растворов.

Проведенные расчеты осади и просадки без и с учетом химического воздействия на ґрунт в основании фундамента сооружения показали, что критические деформации, приводящие к недопустимому крену между элементами конструкции крана более 0,004, формируются только в случае неравномерных просадок химического происхождения более 5...10 см. Рассчитанные деформации и крены соответствуют выявленным деформациям и крену между колоннами крана, которые превысили максимально допустимое значение в 2016 г. и негативно повлияли на условия эксплуатации данного сооружения. При этом ухудшение несущей способности ґрунтов в результате воздействия щелочного раствора происходит даже после технической меліорации ґрунтов, проведенной более 20 лет тому назад. Удельный вес растворенной твердой фазы в ґрунте оценивается в 1-1,5%, что соответствует результатам воздействия сильных щелочных растворов, оцененного в этой работе и в других исследованиях.

Полученные результаты могут быть применены при прогнозировании условий длительной эксплуатации сооружений на ґрунтах, через которые фильтруются химически агрессивные растворы.

Ключевые слова: ґрунт, осади, просадка, щелочной раствор, суглинок, выщелачивание, деформации, крен.

Постановка проблеми. Згідно з різними класифікаціями процесів і факторів, можна виділити понад 10 основних видів техногенного впливу на ґрунти, як частину геологічного сере-

довища [1]. За природою впливу ці види можна умовно розділити на три групи чинників, що включають: 1) статичне та динамічне наванта-

ження, 2) вплив фільтрації води, 3) вплив хімічно агресивних речовин та розчинів.

До статичного та динамічного навантажень призводять операції під час формування будівельних виїмок, кар'єрів, підземних комунікацій, будівництва фундаментів різних споруд, створення та експлуатації транспортної інфраструктури, заходи з технічної меліорації, зокрема, ущільнення ґрунтів перед будівництвом. Вплив фільтрації води проявляється, насамперед, через зміну властивостей ґрунтів при втратах води з каналів, басейнів, інтенсивних опадах тощо. Скидання і складування промислових відходів, втрати хімічно агресивних вод і технологічних розчинів та їх подальша фільтрація у зоні аерації і водоносних горизонтах активізує перехідні процеси в твердій фазі, зокрема, хімічну суфозію, вилуговування, карст, що суттєво змінює фізико-механічні властивості ґрунтів. Результатом цього є поява додаткових деформацій ґрунту, зниження його несучої здатності та погіршення умов експлуатації споруд різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Необхідність і важливість оцінки змін властивостей ґрунтів внаслідок сукупності цих процесів вперше була відзначена Г.І. Покровським ще у 1937 р. Теоретичні основи і практичні методи урахування змін фізико-механічних властивостей ґрунтів розвивалися М.М. Гольдштейном, Н.А. Єрмолаєвим, В.В. Міхеєвим, М.М. Масловим та ін. [2].

В дослідженнях останніх десятиліть оцінювався вплив окремих чинників на зниження міцнісних властивостей та несучої здатності ґрунтів, пропонувалися методи кількісного прогнозу цих явищ. Основною закономірністю є зниження міцності ґрунтів внаслідок зростання вологості, яке, зокрема, було встановлене на прикладі суглинків [3]. Лабораторними дослідженнями було показано [4], що сили зчеплення залежать не лише від щільності та вологості, а й від речового складу ґрунту. В певних умовах осадка поверхні земляної греблі розвивається через гідравлічний зв'язок між резервуаром і зоною просочування, що було виявлено геофізичними дослідженнями [5].

Деформації штучної ґрунтової основи та вплив змін вологості на механічні властивості ґрунтів кількісно оцінювалися при розрахунку крену кільцевого крану [6] та дамб хвостосховища [7]. При оцінюванні стійкості схилу також перспективним є використання потенціалу його активації, продемонстрованого в роботі [8].

Суттєвий внесок (до 50%) у просідання поверхні під статичними навантаженнями робить відбір підземних вод, що підтверджується загальною кількістю зафіксованих просідань [9].

Значення цього чиннику підтверджується результатами моделювання та моніторингу зниження ґрунтових вод [10].

У багатьох випадках зниження міцнісних властивостей обумовлено тривалим хімічним впливом на ґрунт, зокрема, агресивних розчинів [11]. Домінуючим чинником цього процесу є розчинення твердої фази, що часто пов'язано з переходом малорозчинних сполук кальцію та алюмінію у більш мобільні форми. З точки зору кількісного опису цього процесу практичну цінність мають встановлення лінійної залежності інтенсивності вилуговування іонів Ca^{2+} від карбонатної агресивності води [12]; залежність швидкості реакції вилуговування алюмосилікатів від лужності розчину та температури процесу [13]. Дослідженнями розчинності гідроокису кальцію та масообміну Ca^{2+} в лужному середовищі було виявлено, що розчинений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ є домінуючим у розчині з рН вище 13, а $\text{Ca}(\text{OH})_2$ також утворюється, але в меншій кількості [14]. Спроба математичного опису підземного вилуговування кальцієвмісних порід на макроскопічному рівні була представлена, зокрема, у моделі, що описує взаємодію кислоти в порах, заповнених рідиною, з компонентами, які утворюють матрицю гірської породи [15]. За результатами цих досліджень, просадка, спричинена значними навантаженнями, збільшується зі зростанням верхніх навантажень і зменшується з глибиною.

Взаємозв'язок між ступенем розсіювання солей та швидкістю їх вилуговування досліджувався при оцінюванні ризиків розчинення солей на появу провалів та осідання поверхні землі з урахуванням площі взаємодії «сіль-розчинник» [16], при чисельному моделюванні впливу хімічної суфозії на просідання ґрунту [17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У попередніх дослідженнях, як правило, вивчалися прояви лише одного з чинників, а зміни під впливом одразу кількох чинників досліджувалися переважно на якісному рівні. Це, зокрема, стосується оцінки вилуговування твердої фази ґрунту хімічно агресивними розчинами та його впливу на фізико-механічні властивості і зниження несучої здатності. Параметри цих процесів або відсутні або носять загальний характер у відповідних методиках [18]. Належне врахування цих чинників і процесів є надзвичайно важливим для оцінки стійкості дамб та глинистих екранів відстійників і накопичувачів кислотних або лужних шламів та розчинів, хвостосховищ червоного шламу тощо.

Слід зважати на те, що в умовах фільтрації агресивних розчинів у ґрунтах погіршення міцнісних властивостей і втрата їх несучої здатності може проявитися через тривалий проміжок часу і

лише після цього призвести до суттєвого порушення цілісності конструкцій, формування надкритичного крену споруд тощо. З урахуванням старіння різноманітних інженерних споруд та інфраструктури, виникає актуальна задача достовірного кількісного аналізу, оцінки та прогнозу стану навантаженого ґрунтового масиву, що знаходиться під впливом хімічно агресивних рідин.

Формулювання мети статті. Метою даної роботи є аналіз впливу лужних розчинів, на ґрунтову основу інженерних споруд, та оцінка цього впливу на появу деформацій, нерівномірне осідання споруд і формування їх крену.

Сукупний техногенний вплив на ґрунт в основі споруди розглянемо на прикладі мостового крану, що розташований на території промислового підприємства у Дніпропетровській області. Ґрунти на об'єкті, побудованому понад 20 років тому, перебувають під впливом статичного навантаження колон та збільшення мінералізації ґрунтових вод внаслідок втрат з басейнів, де внаслідок обробки гранульованого шлаку металургійного виробництва утворюються лужні розчини високої концентрації, агресивні до бетону. Динамічний вплив транспорту, що доставляє матеріали на об'єкт, є незначним. У 2016 р. було зафіксовано осідання опорних колон від початкового положення до 10...15 см та перекис горизонтальних балок крану, внаслідок чого максимальний крен між окремими елементами споруди вже зараз дорівнює чи перевищує максимально допустиме значення.

У зв'язку з цим виникла необхідність з'ясування причин нерівномірного осідання фундаменту та крену між опорами крана. У більш широкому контексті, це дозволить оцінити параметри деформації та зміну несучої здатності ґрунтових основ, що піддаються впливу хімічно агресивних розчинів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Матеріали та методи. При дослідженнях використовувались матеріали інженерно-геологічних вишукувань на ділянці цеху з переробки відходів металургійного виробництва площею 5400 м², що розташований на півдні Дніпропетровської області (рис. 1).

Кран складається з 2 кареток і 27 опорних колон, кожна з яких опирається на точковий фундамент загальною площею 56 м² глибиною залягання 1,5 м; вантажопідйомність однієї каретки становить 10 т, загальна вага навантаженого крану – близько 300 т. Тиск на внутрішні та зовнішні колони становить 0,08 МПа та 0,16 МПа відповідно. Згідно проектною документації, перед будівництвом понад двадцять років тому на ділянці була проведена технічна меліорація, а саме ущільнення ґрунту, результатом чого мало стати

зменшення просадкових властивостей лесоподібних суглинків. За режимом роботи кран відноситься до категорії 7К – приводні крани мостового типу з лебідковими вантажними візками при цілодобовій роботі. Максимально допустимі горизонтальні деформації (зміщення) колон відкритих кранових естакад категорії 7К становить 5 см, а крену між сусідніми колонами – 0,004 [19].

В геоморфологічному відношенні ділянка знаходиться в межах четвертинної надзаплавної тераси правого берега р. Дніпро. За даними з 12 пробурених на ділянці свердловин глибиною 20 м, геологічна будова досліджуваної товщі порід представлена легкими елювіально-делювіальними суглинками та супісками, які повсюдно перекриті з поверхні сучасними насипними техногенними ґрунтами (рис. 2). За даними вишукувань, водотрив не розкритий, а рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині 3,2...5,5 м від денної поверхні. Отже, досліджувана ділянка не є підтопленою і фундамент крану не замочений. Товща не замочених просадкових ґрунтів під фундаментом коливається від 2,76 м до 3,3 м. Інженерно-геологічні вишукування та визначення рівня ґрунтових вод були проведені у листопаді 2016 р., дана пора року не є найбільш посушливою чи максимально водною, тому отримані виміри можна віднести до середньорічного рівня.

За хімічним складом ґрунтова вода на ділянці місцями досить агресивні і мають високі показники лужності (рН 13...14), мінералізації (11,0...19,0 г/л), загальної жорсткості (47,0...77,0 мг·екв/дм³) [20]. Лабораторний аналіз проб води показав значне перевищення гранично допустимих концентрацій макрокомпонентів [21]. Зокрема, у свердловині 1 концентрації катіонів K⁺+Na⁺ становили 5488,60 мг/л, аніонів HCO₃⁻ – 4758,00 мг/л, SO₄⁻ – 4212,11 мг/л, CO₃²⁻ – 2700,00 мг/л, Cl⁻ – 2662,50 мг/л, мінералізації – 19853,77 мг/л, значення загальної і карбонатної жорсткості співпали і становили 77,97 мг·екв/дм³. У свердловинах 2 і 3 на відстанях 20 м та 65 м від контуру басейну під краном, сума іонів становить 5325,8 мг/л та 2522,0 мг/л, а лужність 6,99 та 7,4, відповідно; це свідчить про локальний характер поширення лужних розчинів безпосередньо під басейном. Разом з тим, відібрана вода класифікована як сильно- та середньо-агресивна до окремих видів бетону, яка внаслідок тривалої експлуатації може призводити до розвитку дрібних порожнин, тріщин та проявів негерметичності.

Такі специфічні показники пов'язані, насамперед, з втратами лужних технологічних розчинів з басейнів, розташованих безпосередньо на ділянці крана, в якому гранулюється шлак, і

на відстані 50 м від крана (рис. 2). Виходячи з результатів хімічних аналізів підземної води, відібраної зі спостережних свердловин, і враховуючи тривалий час експлуатації цих споруд, де перебувають агресивні розчини, слід очікувати, що товща лесоподібних суглинків під днищем басейнів, як в зоні аерації, так і нижче рівня ґрунтових вод, насичена висококонцентрованими лужними розчинами. Бічне розтікання цих роз-

чинів відбувається повільно через відносно невеликий коефіцієнт фільтрації (до 0,5 м/добу) та специфічне для лесів переважання вертикальної проникності над горизонтальною. Таким чином, ці ґрунти тривалий час повільно фільтрують лужний розчин, що призводить до вилуговування легко розчинних солей, які, за оцінками досліджень [22], можуть становити до 10% твердої фази лесоподібних суглинків.

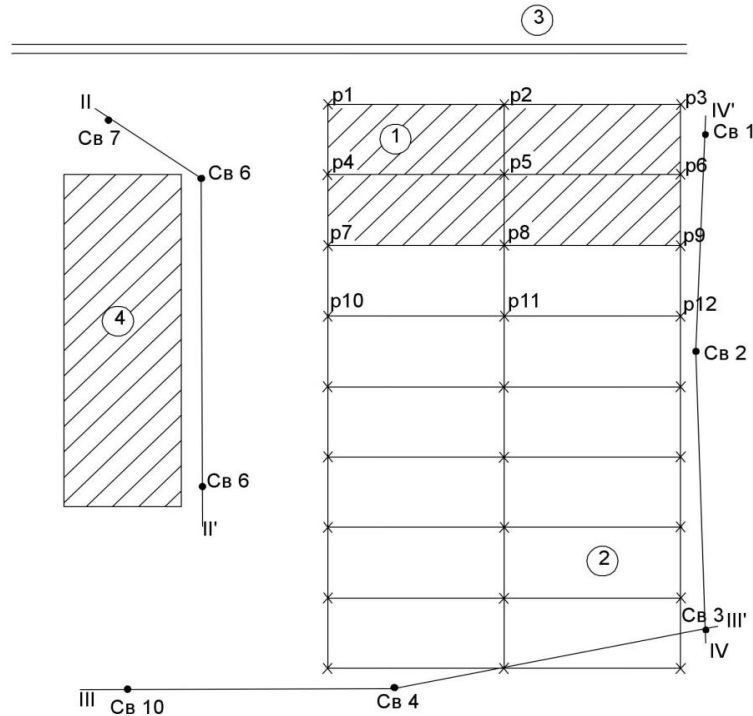


Рис. 1. Ділянка розташування мостового крана: 1 – басейни технологічних розчинів; 2 – склад гранульованого шлаку; 3 – колії залізничного транспорту для доставки шлаку на ділянку; 4 – ставок-відстійник; x – опори крана, p1, ..., p12 – точки для розрахунку осідань поверхні.

№ слоя (МЭ)	Геологический индекс	Глубина залегания слоя		Мощность, м	Литологический разрез		Глубина
		Кровля (абс. отм.)	Подошва (абс. отм.)		Консистенция	Отбор проб	
H	t Q ₄	0,00 47,40	0,70 46,70	0,70			
H	t Q ₄	0,70 46,70	1,70 45,70	1,00			1
1	vd Q ₃	1,70 45,70	3,80 43,80	1,90			2 3
2	vd Q ₃	3,80 43,80	4,80 42,80	1,20			4
2'	vd Q ₃	4,80 42,80	10,40 37,00	5,80			5 6 7 8 9 10

- Н – насипний ґрунт (гранульований шлак металургійного виробництва), суглинок сірий, напівтвердий, будівельне сміття;
- 1 – суглинок сухий, твердий, лесоподібний з прожилками карбонатів;
- 2 – суглинок, тугопластичний до текучого, лесоподібний;
- 2` - суглинок, тугопластичний до текучого, лесоподібний, водонасичений.

Рис. 2. Літологічна колонка свердловини 2 (розташування див. на рис. 1)

Технічна меліорація була застосована ще під час будівництва, в результаті чого просадка лесових суглинків була частково усунена до початку експлуатації крана. Разом з тим, за результатами інженерно-геологічних досліджень у 2016 р. були виявлені просадкові властивості ґрунтів на ділянці крана (відносна просадка незамоченого ґрунту складає до 0,03), що дозволяє зробити висновок про можливість розвитку просадки після тривалої експлуатації.

Виходячи з результатів натурних та лабораторних досліджень, ґрунти на ділянці розташування крана зазнають неоднорідного впливу статичного навантаження в умовах змін вологості та хімічного складу порового розчину. Строгий кількісний опис цих процесів можливий шляхом застосування чисельних гідрогеомеханічних моделей з урахуванням фазових переходів, що потребує належного оцінювання вихідних параметрів, особливо масообміну за умов змінного показника кислотності порового розчину. Такі моделі ще розроблюються і потребують теоретичного обґрунтування та тестування. З іншого боку, для інженерних потреб в умовах тривалої експлуатації споруд практичну та теоретичну цінність мають оцінки граничних значень властивостей ґрунтів, які безпосередньо впливають на розвиток деформацій, а також граничні значення самих деформацій, у тому числі осадки, просадки і крену. Тому у подальшому зосередимось на оцінюванні граничних значень основних параметрів та деформацій при фільтрації лужних розчинів.

Методика розрахунку. В таких умовах сумарне просідання ґрунту у ґрунтовому масиві, навантаженому фундаментами колон, можна визначити за формулою:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3, \quad (1)$$

де S_1 – осадка ґрунту, S_2 – його просадка, причому величини S_1 та S_2 залежать від вологості; S_3 – просадка внаслідок хімічного впливу лужного розчину на скелет ґрунту.

Осадку ґрунту під статичним навантаженням S_1 розраховується методом пошарового підсумовування за формулою [23]:

$$S_1 = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (2)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, $\beta = 0,8$; $\sigma_{zp,i}$ – середнє значення вертикального нормального напруження від зовнішнього навантаження в i -му шарі ґрунту по вертикалі; $\sigma_{zy,i}$ – середнє значення вертикального напруження від власної ваги ґрунту, вийнятого з котловану в i -му шарі ґрунту по вертикалі, що проходить через центр підшви, на глибині z від підшви фундаменту; h_i – товщина

i -го шару ґрунту; n – кількість шарів товщі, яка здавлює основу; E_i – модуль деформації i -го шару ґрунту за гілкою первинної навантаження; $E_{e,i}$ – модуль деформації i -го шару ґрунту за гілкою вторинної навантаження (модуль пружності).

Оскільки вплив напружень від фундаменту з глибиною залежно від властивостей порід зменшується, то в розрахунках враховувалися шари ґрунтів, що залягають до глибин 8,4...10,4 м. Для отримання більш точних результатів цей інтервал був розбитий на шари товщиною до 1,2 м. Властивості ґрунтів були визначені за лабораторними аналізами зразків, відібраних на досліджуваній ділянці.

Просідання ґрунту під фундаментом при зміні його вологості внаслідок замочування зверху, при втратах з водних комунікацій, а також замочування знизу при підйомі рівня ґрунтових вод розраховувалось для сумарних напружень під дією власної ваги ґрунту за формулою [23]:

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl,i} h_i k_{sl,i}, \quad (3)$$

де $S_{sl,i}$ – відносне просідання i -го шару ґрунту; h_i – товщина i -го шару ґрунту; $k_{sl,i}$ – безрозмірний коефіцієнт, який обчислюється за таблицею; n – кількість шарів, на які розділена зона просідання відповідно до літологічного розрізу та горизонтом S_{si} .

Розрахунок просадки ґрунту виконувався для тих самих параметрах шарів, що і розрахунок його осадки. Навантаження на кожен опорну колону були обчислені з урахуванням її положення (зовнішня чи внутрішня колонна).

Враховуючи розташування басейну під краном як найімовірніше місце фільтрації лужних розчинів і максимальних просадок, розрахунки були зосереджені на колонах, що обмежують контур басейну, та на найближчому до басейну ряді колон. Тому осадка і просадка ґрунту за формулами (2) і (3) визначалися під колонами мостового крана, що відповідають розрахунковим точкам p_1, \dots, p_{12} (рис. 1). Слід очікувати, що оцінюваний крен в межах та безпосередньо навколо цієї зони може бути найбільшим на ділянці крана через нерівномірну просадку. Потужності літологічних різностей та їх фізико-механічні властивості в розрахункових точках були визначені на основі інтерполяції даних інженерно-геологічних досліджень.

При розрахунках фундамент мостового крана був схематизований як точковий з урахуванням фактичної поверхні опорних балок крана. За цими даними був проведений розрахунок осадки та просадки для точок p_1, \dots, p_{12} , а на цій основі – крену між колонами, розташованими у цих точках.

Статичне вертикальне нормативне навантаження на колону для даного крана було прийнято при розрахунках 185 кН [19], з урахуванням цього тиск на внутрішні та зовнішні колони становив 0,08 та 0,16 МПа відповідно.

Оцінювання впливу лужних розчинів на ґрунти. З іншого боку, міцнісні та деформаційні властивості ґрунту могли знизитися через часткове розчинення твердої фази ґрунту при фільтрації лужних розчинів з басейну у зоні 1 (рис. 1). Враховуючи на дуже високу лужність порового розчину, встановлену біля басейну під краном ($\text{pH} > 13$), можна зробити висновок про те, що у товщі ґрунту на глибину кілька метрів під дном басейну в умовах повільної низхідної фільтрації відбувається процес, аналогічний активному розчиненню алюмосилікатів при виробництві глинозему, що призводить до переходу важкорозчинних сполук у більш розчинні та мобільні форми, появи додаткових порожнин та зменшення несучої здатності ґрунтів, їх додаткової просадки.

Зважаючи на умови ділянки, масштаб об'єкту та лужність розчину, провести натурний експеримент з вилугування ґрунтів аналогічним розчином є технічно неможливим. Тому кількісна оцінка ефекту розчинення твердої фази лужним розчином проводилася в лабораторних умовах, при цьому досліджувалося вилугування з суглинку, який еквівалентний ґрунту під фундаментами колон на ділянці крану. Навіска суглинку, висушеного при $105\text{ }^\circ\text{C}$ [20] до маси сухої речовини 2,0044 г, витримувалася 24 год в розчині $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{OH}$ з $\text{pH} = 10,5$, що є розбавленим еквівалентом лужного розчину в порах ґрунту з $\text{pH} > 13,0$. Маса твердої фази після сушки зменшилася на 1,22% і склала 1,98 г, при цьому pH внаслідок хімічних реакцій зменшився до 10,06. Таким чином, максимальна кінетика вилугування для даного показника pH оцінюється у $0,0122\text{ дб}^{-1}$. Результати дослідження, отримані з використанням рентгенофлуоресцентного спектрометра CEP-01 ElvaX Plus, представлені на рис. 3-5.

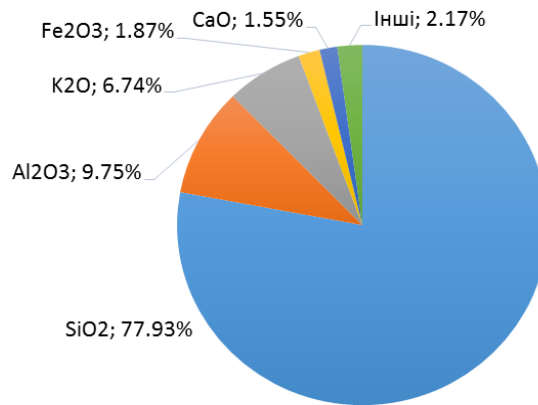


Рис. 3. Хімічний склад твердої фази необробленого зразка суглинку

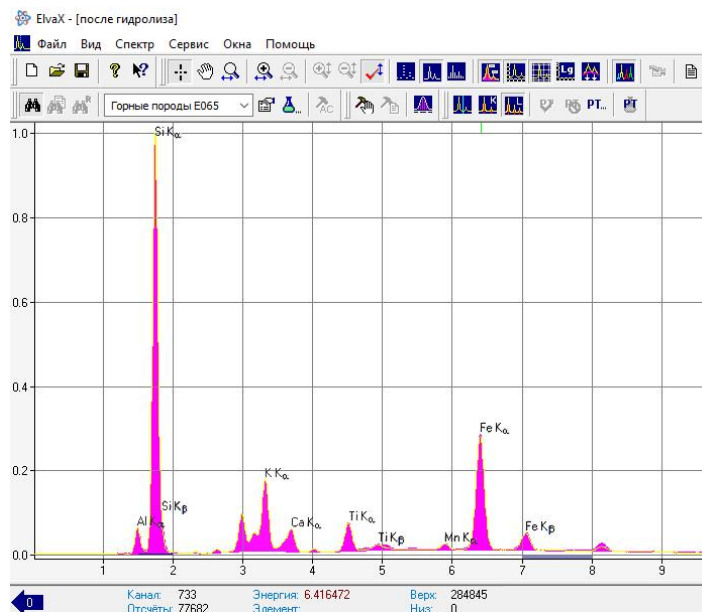


Рис. 4. Результати визначення хімічного складу твердої фази елювіально-делувіального суглинку рентгенофлуоресцентним спектрометром CEP-01 ElvaX Plus

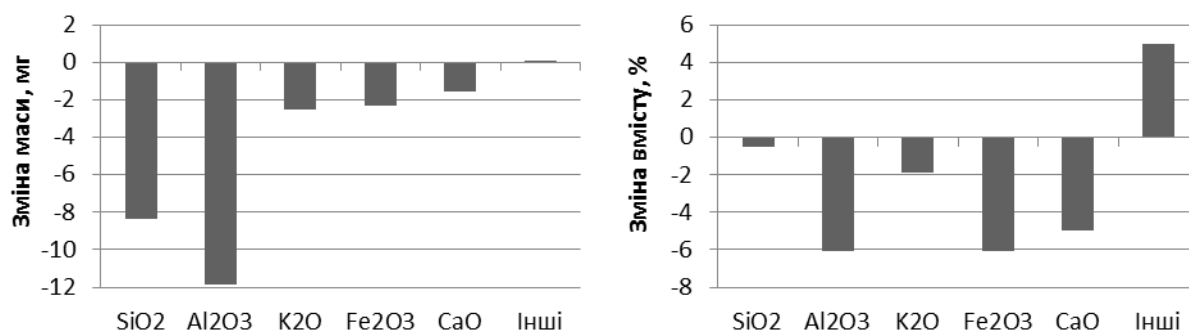
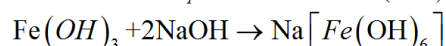
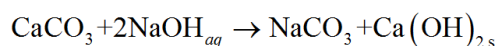
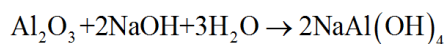


Рис. 5. Зміна маси компонентів твердої фази суглинку (а) та вмісту у ґрунті відносно їх початкової маси (б)

Зменшення маси твердої фази відбулося насамперед за рахунок таких компонентів, як Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , меншою мірою K_2O . Їх частка у загальній масі твердої фази необробленого суглинку (без K_2O) становить 13,27%, що є теоретично можливим максимумом розчинення твердої фази для даного ґрунту. З урахуванням того, що не вся маса цих сполук може фактично розчинитися в натурних умовах при повільній фільтрації, отримана оцінка добре узгоджується з результатами [2,22], згідно яких 5...10% маси лесоподібних суглинків складають сполуки, які переходять у розчинний стан під впливом луги. За результатами експерименту слід відзначити також деяке зменшення вмісту SiO_2 , але його перехід до більш розчинних форм оцінюється на порядок повільнішим і ймовірно, не буде мати визначального впливу на зменшення маси твердої фази. Незначне абсолютне зростання вмісту деяких мікрокомпонентів (0,1% від початкової маси зразка) не впливає суттєво на загальний тренд зменшення маси скелету ґрунту під впливом лужного розчину.

При перенесенні результатів лабораторного дослідження на умови ділянки слід зважати на те, що в натурних умовах показник рН є набагато вищим, а його дія на ґрунти – значно тривалішою, хоча реакції відбуваються набагато повільніше, ніж у лабораторних умовах, і за наявності тупикових пор не охоплюють увесь ґрунтовий масив.

На досліджуваній ділянці переважають катіони Na^+ та K^+ , отже, тут найбільш ймовірні такі реакції, зокрема, за участю гідроксиду натрію



де aq – рідка фаза, s – тверда фаза. Для гідроксиду калію ці реакції записуються аналогічно.

Розчинність утворюваних сполук алюмінію, заліза і кальцію суттєво вища порівняно з вихідними сполуками. В результаті нерозчинні чи малорозчинні гідроксиди алюмінію, заліза, марган-

цю і карбонату кальцію при реакції з лужним середовищем утворюють значно більш розчинні сполуки, у тому числі тетрагідроксоалюмінати та гексагідроксоферати (III), які низхідною вертикальною фільтрацією виносяться до ґрунтового водоносного горизонту та мігрують далі від ділянки з поступовим зменшенням показника рН.

Максимальну просадку внаслідок хімічного впливу на поровий розчин пропонується оцінити наступним чином. За результатами лабораторних досліджень теоретично можливе зменшення частки твердої фази внаслідок вилугування α (оцінюється у 5-10%). В умовах постійного навантаження під вагою колон та вантажів відбувається стиснення утворених додаткових порожнин у суглинках. За песимістичним сценарієм усі порожнини повністю заповнюються сусідніми частинками ґрунту, причому початкова пористість під навантаженням залишається незмінною. За таких умов додаткову просадку від хімічної дії лужного порового розчину можна оцінити за формулою:

$$S_3 = \alpha \Delta h_{ch}, \quad (4)$$

де α – частка розчиненої твердої фази ґрунту, Δh_{ch} – товщина шару ґрунту, через який фільтрується лужний розчин. Припускаючи рівномірні за площею басейну втрати та рівномірне розподілену за площею швидкість низхідної фільтрації, а також лише часткове розчинення легкорозчинних сполук у суглинку (1...2%) замість повного розчинення (10...15%), отримуємо консервативну оцінку просадки хімічного походження. Нерівномірність втрат за площею басейну може призвести до нерівномірності просадок і збільшення прогнозованого крену між колонами. Мінімальна товщина шару, що зазнає впливу лужного розчину, для ділянки басейну оцінюється у 5 м (3 м у зоні аерації під його дном та 2 м у верхній частині ґрунтового водоносного горизонту). За даними гідрогеологічного моніторингу (рис. 6) можна вважати, що вплив лужних розчинів за межами басейну зменшується в напрямку до розрахункової точки p12. Тому можна вважати що

їх вплив під точками p11 та p12 мінімальний. До точки p10 потоки підземних вод можуть донести лужні розчини, тому для цієї точки можна припустити, що вилуговування відбувається лише у верхній частині ґрунтового водоносного горизонту з оцінюваною товщиною 2 м.

Більш детальна оцінка деформацій та розвитку крену потребує розрахунку тривимірного поля швидкості фільтрації та концентрації солей, застосування рівнянь консолідації з урахуванням зміни параметра масообміну α залежно від рН розчину, швидкості вертикальної фільтрації в ґрунті, та інших параметрів.

Результати та обговорення. Результати розрахунків осадки та просадки в точках p1-p12 під впливом статичного навантаження та фільтрації лужних розчинів представлені на рис. 7, а розраховані значення крену між опорними колонами крану – у табл. 1.

Спочатку осадка та просадка були розраховані без урахування хімічного впливу. За формулою (2) осадка становила для внутрішніх та зовнішніх колон – 0,0071...0,0214 м, 0,0070...0,0214 м, а просадка за формулою (3) – відповідно 0,0425...0,038 м, 0,038...0,051 м. Сумарне максимальне значення осадки і просадки без урахування хімічного впливу становить 0,069 м в

розрахунковій точці p4, а мінімальне – близько 0,0475 м в точці p7. Оцінюваний крен для найкоротших відстаней між колонами крану не перевищує 0,001. Таким чином, статичне навантаження не могло бути головною причиною просадок та формування неприпустимого крену.

Урахування фільтрації лужного розчину через зону аерації, а також верхній шар ґрунтового водоносного горизонту під дном басейна і під точкою p10 суттєво збільшує оцінювану просадку. Навіть у разі розчинення лише 1% твердої фази ґрунту просадка хімічного походження оцінюється у 0,02-0,0542 м, а крен може досягти 0,0042, що фактично знаходиться за межею допустимого значення. Максимальна просадка фундаменту опорних балок крану за рахунок вилуговування легкорозчинних солей оцінюється в точці p6, а мінімальна – в точках p11 та p12. Сумарний крен за рахунок просадки та осадки при розчиненні 1,5% твердої фази для двох колон на межі басейну перевищує допустиме значення. Зазначимо, що оцінений діапазон параметру α узгоджується зі значенням розчинення твердої фази 1,22%, отриманим експериментальним шляхом.

Таким чином, тривала фільтрація лужних

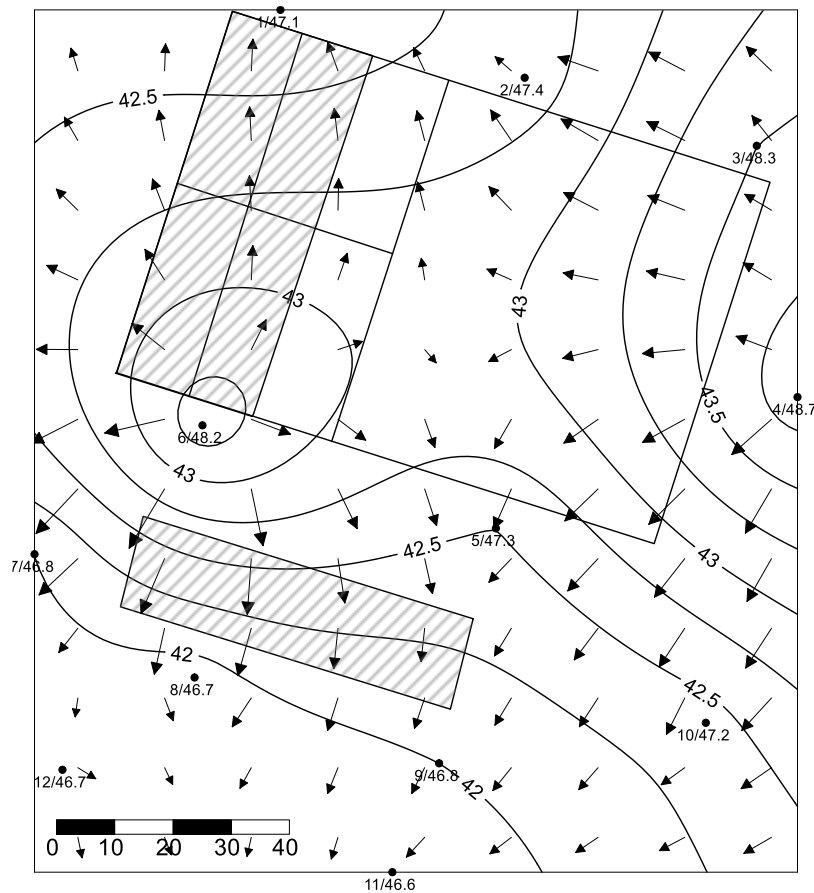
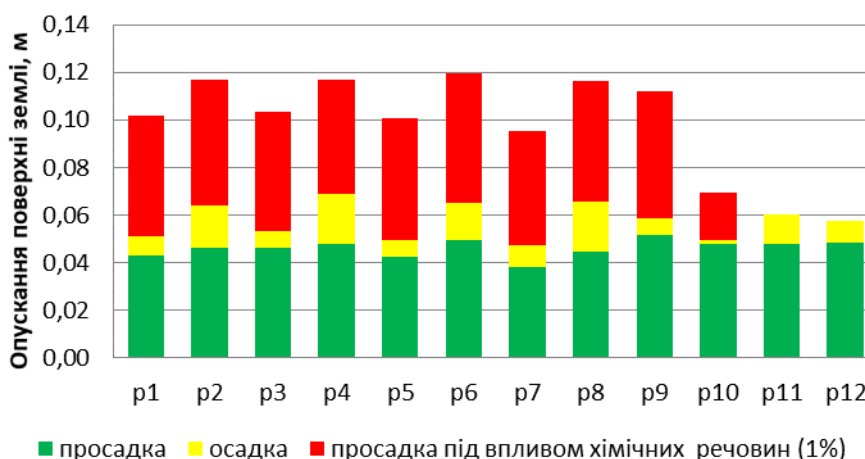
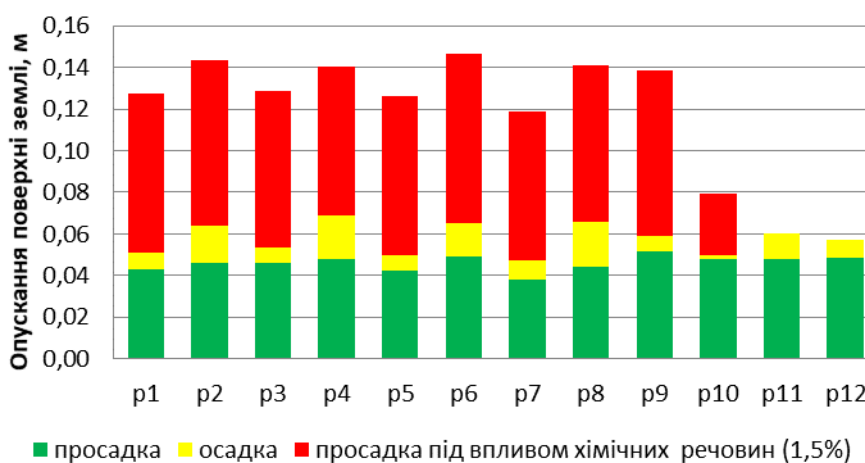


Рис. 6. Схема потоку ґрунтових вод на ділянці. Позначення біля свердловин: чисельник – номер свердловини, знаменник – рівень ґрунтових вод; заштриховані ділянки – місця розташування басейнів



а)



б)

Рис. 7. Деформації ґрунтової основи під впливом вилугування частки α твердої фази ґрунту: а) $\alpha=0,01$, б) $\alpha=0,015$

Таблиця 1

Оцінювані значення крену між опорами мостового крану з урахуванням вилугування частки α твердої фази ґрунту: а) $\alpha=0,01$, б) $\alpha=0,015$; p1,...,p12 – розрахункові точки; жирним шрифтом виділені значення крену з перевищенням критичного значення 0,004

А)

p1	0,0001	p2	0,0001	p3
0,0003		0,0001		0,0003
p4	0,0001	p5	0,0001	p6
0,0000		0,0001		0,0001
p7	0,0001	p8	0,0001	p9
0,0022		0,0040		0,0042
p10	0,00067	p11	0,0000	p12

Б)

p1	0,0001	p2	0,0001	p3
0,0004		0,0002		0,0005
p4	0,0002	p5	0,0002	p6
0,0000		0,0001		0,0001
p7	0,0001	p8	0,0001	p9
0,0033		0,0060		0,0064
p10	0,0010	p11	0,000	p12

розчинів в основі опорних колон є найбільш ймовірною причиною деформаційних проявів ґрунтів та формування неприпустимого крену між опорними колонами мостового крану. Більш детальне вивчення стану основи даної споруди потребує проведення хімічних аналізів порового розчину безпосередньо біля фундаментів колон у поєднанні з тривимірним моделюванням зон міграції лужних розчинів з відповідним уточненням інженерно-геологічних розрахунків.

Висновки.

1. За результатами аналізу інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов ділянки мостового крану на півдні Дніпропетровської області техногенні зміни стану та властивостей ґрунтів основи під впливом втрат технологічних розчинів високої лужності оцінені як найбільш ймовірні чинники значного осідання ґрунтів з формуванням неприйнятної крену конструкцій та погіршення умов експлуатації об'єкту.

2. Лабораторні дослідження впливу лужного розчину на ґрунт дозволили оцінити вміст компонентів твердої фази (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O), що переходять у більш розчинні сполуки та кінетику вилуговування при активному масообміні $0,0122 \text{ дїб}^{-1}$; при цьому теоретично можлива частка сполук, що потенційно може розчинюватись, сягає 13,27%, що корегує з оцінками вмісту легкорозчинних сполук у суглинках та результатів дослідження вилуговування алюмосилікатів при виробництві глинозему; дану частку можна розглядати як теоретичний максимум зменшення маси твердої фази даного ґрунту внаслідок тривалої фільтрації лужних розчинів.

3. Проведені розрахунки осадки та просадки без та з урахуванням хімічного впливу на ґрунти в основі фундаменту споруди показали, що критичний крен між елементами конструкції крану понад 0,004 може виникати лише у разі нерівномірних просадок з перепадом 5...10 см

на ділянках, що зазнають хімічного впливу, причому погіршення несучої здатності ґрунтів внаслідок фільтрації лужного розчину можливо навіть після технічної меліорації ґрунтів.

4. Для уточнення та розвитку отриманих результатів перспективними є більш детальні лабораторні дослідження змін фізико-механічних та міцнісних властивостей ґрунтів, що зазнали впливу хімічно агресивних розчинів у поєднанні з моделюванням їх тривимірної міграції у зоні аерації та верхньому шарі водоносного горизонту, що дозволить виконувати більш адекватні інженерно-геологічні прогнози у часі. Перспективними є також дослідження структурних змін ґрунтів, пов'язані з їх фізико-механічними властивостями.

Вдячності. Автори вдячні зав. кафедри хімії НТУ «Дніпровська політехніка» проф. Светкіній О.Ю. та її співробітникам за проведення лабораторних досліджень.

Література

1. Шутенко Л.Н. *Механика ґрунтов, основания и фундамент [Текст] / Л.Н. Шутенко, А.Г. Рудь, О.В. Кичаева и др. // X., ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова, 2015. – 501 с.*
2. Лысенко М.П. *Состав и физико-механические свойства ґрунтов [Текст] / М.П. Лысенко // М., Недра, 1980. – 271 с.*
3. Джаманбаев М.Дж. *Влияние влажности на устойчивость склона и прочностные свойства суглинистых ґрунтов [Текст] / М.Дж. Джаманбаев, С.Б. Омуралиев // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – С. 116-119.*
4. Колпашиников Г.А. *Влияние влажности и солей на прочностные и деформационные свойства дисперсных ґрунтов [Текст] / Г.А. Колпашиников, Аль-Татити Саиф Сами Хуссейн, Аль-Хаснави Раед Махмуд Абдулл-Хуссейн, И.П. Крошнер // Вестник БНТУ. – 2010. – №2. – С. 5-7.*
5. Ikard S.J. *Geophysical Investigation of Seepage Beneath an Earthen Dam / S.J. Ikard, J. Rittgers, A. Revil M.A. Mooney // Ground Water. 2015. – Vol. 53(2). – Pp. 238-250. <https://doi.org/10.1111/gwat.12185>.*
6. Тимошук В.І. *Досвід визначення деформаційних властивостей металургійних шлаків при реконструкції доменної печі №3 комбінату "ЗАПОРІЖСТАЛЬ" [Текст] / В.І. Тимошук, Т.В. Папуша, В.Т. Головка // Збірник наукових праць НГУ. – 2018. – № 54. – С. 253-261.*
7. Tymoshchuk V. *Hydro and Geomechanical Stability Assessment of the Bund Wall Bottom Slope of the Dniprovsk Tailing Dump / V. Tymoshchuk, V. Tishkov, Yu. Soroka // Mining of Mineral Deposits. Ukrainian School of Underground Mining. National Mining University. – "LizonoffPress", Dnipro, 2018. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 39-47.*
8. Садовенко И. А. *О потенциале активации оползневой лессовой массива [Текст] / И. А. Садовенко, Н. И. Деревягина // Научный вестник Национального горничого университета. – 2012. – № 2. – С. 80-84.*
9. Yang Chen, Wen Zhao, Yong Huang, Pengjiao Jia. *Investigation of land subsidence based on column element settlement model in soft-soil area // Geofluids, 2019. – 16 p. <https://doi.org/10.1155/2019/9530135>*
10. Sarah D., Syahbana A.J., Fajar Lubis R., Mulyono A. *Modelling of land subsidence along Tanah Mas-Pelabuhan section Semarang city using finite element method // Riset geologi dan pertambangan, 2011. – Vol. 21, No. 2. – Pp. 105-119.*
11. Мулюков Э.И. *Последствие зацеживания глинистых ґрунтов оснований фундаментов [Текст] / Э.И. Мулюков // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2008. – №4. – С. 44-49.*
12. Перкова Т.И. *Исследование выщелачивания трещиноватых пород под влиянием минерализованных шахтных вод [Текст] / Т.И. Перкова, Д.В. Рудаков // Вестник Нац. горничого ун-ту. – 2014. – №5. – С. 5-10.*
13. Занавескин К.Л. *Выщелачивание примесей SiO_2 и Al_2O_3 раствором гидроксида натрия из лейкоксена Ярегского месторождения [Текст] / К.Л. Занавескин, А.Н. Масленников, С.М. Занавескина, Г.С. Дмитриев, Л.Н. Занавескин, Е.Д. Политова, В.И. Власенко. Химическая технология. – 2018. – Т. 19, №4. – С. 161-172.*
14. Kutus, B., Gácsi, A., Pallagi, A., Pálkó, I., Peintler, G., Sipos, P. *A comprehensive study on the dominant formation of the dissolved $Ca(OH)_2(aq)$ in strongly alkaline solutions saturated by $Ca(II)$ // RSC Advances, 2016. Vol. 6(51). – Pp. 45231-45240. <https://doi.org/10.1039/c6ra05337h>*
15. Гальцев О.В. *Математическое моделирование процесса подземного выщелачивания на макроскопическом уровне [Текст] / О.В. Гальцев, О.А. Гальцева // Научные ведомости БелГУ. – 2018. – №4. – С. 478-486. <https://doi.org/10.18413/2075-4639-2018-50-4-478-486>*

16. Poberezhnyi L.Ya, Poberezhna L.Ya, Maruschak P.O., Panin S.V Assessment of Potential Environmental Risks from Saline Soils Subsidence // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017. – 50. – Pp. 7. <https://doi.10.1088/1755-1315/50/1/012046>
17. Мичута О.Р. Моделирование влияния химической суффозии на фильтрационную консолидацию засоленных грунтов в неизотермических условиях [Текст] / Мичута О.Р., Власюк А.П., Мартынюк П.Н. // Матем. моделирование. – 2013. – №2(25). – С. 3-18.
18. Железняков Г.В. Гидротехническое сооружения [Текст] / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибадзаде, П.Л. Иванов и др., под общ. ред. П.В. Недриги // М., Стройиздат, 1983. – 543 с.
19. Справочник проектировщика. Металлические конструкции в 2-х т. [Текст] – М.: АСВ. – 1998. – 512 с.
20. Грунты. Метод лабораторного определения содержания карбонатов: ГОСТ 34467-2018 [Действующий с 2019-01-09] – Росстандарт, 2019. – 12 с.
21. Питьева вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения: СанПиН 2.1.4.1074-01 [Действующий 2002-01-01] – М., Минздрав России, 2002. – 62 с.
22. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология [Текст] / С.Л. Шварцев // М., «Недра». – 1996. – 424 с.
23. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. [Текст] – К.: Мін-регіонбуд України. 2009. – 82 с.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 624.131.7

Dmytro Rudakov,

Doctor (Technical Sciences), Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology,
Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho St., Dnipro, 49005, Ukraine,
e-mail: rudakov.d.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7878-8692>;

Vasyl Tymoshchuk,

PhD (Technical Sciences), Associate Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology,
Dnipro University of Technology,
e-mail: vasyl.tymoshchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3266-9828>;

Nataliia Hlushchenko,

PhD Student of Department of Hydrogeology and Engineering Geology Dnipro University of Technology,
e-mail: romanovska.n.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3639-7738>

THE EFFECT OF ALKALINE SOLUTION SEEPAGE ON DEFORMATION APPEARANCES IN THE SOIL FOUNDATION OF ENGINEERING STRUCTURES

Aim. This study aims to analyze the influence of static loading and descending seepage of concentrated alkaline solution on deformation appearances in the soil foundation and forming the construction tilt using the example of an overhead crane.

Methodology. The methodology of research included laboratory determination of the physico-mechanical and subsidence properties of soils focusing on alluvial-diluvial loam and groundwater chemical composition at the studied site, evaluation of leaching parameters of loam soil phase by an alkaline solution using the X-ray fluorescent spectrometer CEP-01 ElvaX Plus, and variable-based calculations of soil subsidence based on the standard techniques applied in geotechnics taking into account partial dissolution of soil solid phase.

Findings. This study examined the case of an overhead crane with the foundation affected by the leakages of strong alkaline solutions from technological basins on the ground. Laboratory studies have established the components of Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O soluble with strong alkaline solution and their share of 13,3% in the solid phase of the alluvial-diluvial loam sampled at the site. These compounds can transform into more soluble salts in a concentrated alkaline medium, which creates the conditions for the development of soil collapse and subsidence, with the chemically induced deformations being more significant in comparison to those in soils filled with a neutral pore solution.

Calculations of soil subsidence and collapse with and without taking into account the chemical impact on soils under the overhead crane foundation showed that the non-uniform critical deformations of 5...10 cm leading to an unacceptable tilt between the crane columns of 0.004 can be caused only by the long-term descending seepage of an alkaline solution and leaching the alluvial-diluvial loam. The calculated deformations and tilt correlate with the appeared deformations and the tilt between the crane columns that exceeded the maximum allowed value since 2016, which affected the operating conditions for this construction. Reducing

the bearing capacity of soils due to the influence of alkaline solution occurred after engineering reclamation of soils performed prior to crane operation more than two decades ago.

Scientific novelty. The effect of strong alkaline solution that seeps through the upper soil layer loaded by constructions has been evaluated; the share of dissolved solid phase in the affected soil is estimated at 1-1,5%, which is in agreement with the dissolution parameters of soil influenced by strong alkaline solutions evaluated in this study and other researchers.

Practical value. The results obtained can be applied for long-term predicting the operational conditions and stability of buildings constructed on soils subjected to seepage of chemically aggressive solutions.

Keywords: soil, collapse, subsidence, alkaline solution, loam, leaching, deformation, building tilt.

References

1. Shutenko L.N., Rud A.G., Kichaev O.V. et al. (2015). *Soil mechanics, bases and foundation*. Kharkiv: A.N. Beketov KNUGH, 501.
2. Lysenko M.P. (1980). *Composition and physicommechanical properties of soils*. Moscow: Nedra, 271.
3. Dzhamanbaev M.J., Omuraliyev S.B. (2017). Influence of moisture on the slope stability and strength properties of clay soil. *Problems of modern science and education*. 5 (87), 116–119.
4. Kolpashnikov G.A., Al-Tamimi Saif Sami Hussein, Al-Hasnawi Raed Mahmoud Abdull-Hussein, & Kroshner I.P. (2010). Influence of humidity and salts on the strength and deformation properties of dispersed soils. *Bulletin of Belarusian National Technical University*. 2, 5–7.
5. Ikard S.J., Rittgers J., Revil A., Mooney M.A. (2015) *Geophysical Investigation of Seepage Beneath the Earthen Dam*. *Ground Water*. 53(2), 238-250. <https://doi.10.1111/gwat.12185>.
6. Tymoschuk V.I., Papusha T.V., Golovko V.T. (2018). The experience of determining the deformation properties of metallurgical slag in the reconstruction of blast furnace #3 of the plant "Zaporizhstal". *Proceedings of National Mining University*. 54, 253–261.
7. Tymoshchuk V., Tishkov V., Soroka Yu. (2018). Hydro- and Geomechanical Stability Assessment of the Bund Wall Bottom Slope of the Dniprovsk Tailing Dump. *Mining of Mineral Deposits. Ukrainian School of Underground Mining. National Mining University. "LizonoffPress", Dnipro*, 12, 1, 39–47.
8. Sadovenko I.O., Derevyagina N.I. (2012). On activation of loess landslide massif potential. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2, 80–84.
9. Yang Chen, Wen Zhao, Yong Huang, Pengjiao Jia. (2019). Investigation of land subsidence based on column element settlement model in soft-soil area. *Geofluids*, 2019, 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9530135>.
10. Sarah D., Syahbana A.J., Fajar Lubis R., Mulyono A. (2011). Modelling of land subsidence along Tanah Mas-Pelabuhan section Semarang city using finite element method. *Riset geologi dan pertambangan*, 21, 2, 105–119.
11. Mulyukov E.I. (2008). The consequence of alkalization of clay soils of the foundations. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortan*. 4, 44–49.
12. Perkova T.I., Rudakov D.V. (2014). Investigation of leaching of fractured rocks under the influence of mineralized mine water. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5, 5-10.
13. Zhanaveskin K.L., Maslennikov A.N., Zhanaveskina S.M., Dmitriev G.S., Zhanaveskin L.N., Politova E.D., Vlasenko V.I. (2018). Leaching of SiO₂ and Al₂O₃ Impurities with a Sodium Hydroxide Solution from the Leukoxen of the Yarega Field. *Chemical Technology*. 19(4), 161–172.
14. Kutus B., Gács, A., Pallagi A., Pálkó I., Peintler G., Sipos P. (2016) A comprehensive study on the dominant formation of the dissolved Ca(OH)₂(aq) in strongly alkaline solutions saturated by Ca(II) RSC *Advances* 6(51). 45231-45240. <https://doi.org/10.1039/c6ra05337h>.
15. Galtsev O.V., Galtseva O.A. (2018). Mathematical modeling of the process of underground leaching at the macroscopic level. *Scientific statements of Belarusian National Technical University*. 50(4), 478–486. <https://doi.10.18413/2075-4639-2018-50-4-478-486>.
16. Poberezhnyi L.Ya, Poberezhna L.Ya, Maruschak P.O., Panin S.V. (2017) Assessment of Potential Environmental Risks from Saline Soils Subsidence. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 50, 7. <https://doi.10.1088/1755-1315/50/1/012046>
17. Michuta O.R., Vlasyuk A.P., Martynyuk P.N. (2013). Modeling the effect of chemical suffusion on filtration consolidation of saline soils in non-isothermal conditions. *Mathematical Modeling*. 2(25), 3–18.
18. Zheleznyakov G.V. Ibadzade Yu.A., Ivanov P.L. et al. Nedriga P.V. (Eds.) (1983). *Hydrotechnical construction*. Moscow: Stroyizdat, 543.
19. Designer reference. *Metal structures in two volumes*. (1998). Moscow: ABC, 512.
20. Rosstandart (Effective from 2019-01-09) *Soils*. (2018). The method of laboratory determination of carbonate content: GOST 34467-2018, 12.
21. Ministry of Health of Russia (Effective 2002-01-01) *Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems: Moscow, SanPiN 2.1.4.1074-01*, 62.
22. Shvartsev S.L. (1996) *General hydrogeology*. Moscow, Nedra, 424.
23. *The basics and the foundation of the equipment*. (2009). Design guidelines: DBN V.2.1-10-2009. Kyiv, Minre-gionbud of Ukraine, 82.

УДК 552.51:551.735.1:553.98(477.5)

Олена Володимирівна Тунік,

аспірантка, кафедра геології нафти і газу,

ННІ «Інститут геології», Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна,

e-mail: alyonatanunik1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6088-7331>;

Віктор Володимирович Огар,

д. геол. н., професор, кафедра геології нафти і газу,

ННІ «Інститут геології», Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

e-mail: ogar_victor@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7566-3648>

ВТОРИННІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД НИЖНЬОГО КАРБОНУ НА ВЕЛИКИХ ГЛИБИНАХ (НА ПРИКЛАДІ ДЕЯКИХ РАЙОНІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ)

Вивчено візейські та серпуховські пісковики, розкриті глибокими свердловинами у межах Солохівсько-Диканського та Березівсько-Котелевського валів центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. Мікроскопічні дослідження показали широкий розвиток стадіальних та накладених епігенетичних змін теригенних порід. Залучення лабораторних значень пористості і проникності дозволило якісно оцінити основні тенденції впливу вторинних процесів на фільтраційно-ємнісні властивості порід. Показано, що розвиток вторинної мікротріщинуватості та каолінітизації підвищує значення пористості та проникності. Розчинення та регенерація кварцу супроводжуються локальним перерозподілом кремнезему і призводять до різкої диференціації колекторських властивостей теригенних порід в одних і тих же горизонтах. Процеси сидеритизації сприяють розвитку вторинних колекторів на великих глибинах, а карбонатизація, навпаки, призводить до зменшення їх порового простору. Присутність бітуміноїдів і вторинних кристалів піриту може свідчити про наявність та міграцію вуглеводневих флюїдів. Зіставлення результатів досліджень з термобаричними даними, отриманими як за безпосередніми вимірами тиску і температури у свердловинах, так і розрахованими теоретично на прикладі Більського газоконденсатного родовища показало, що формування катагенетичного флюїдоприву в інтервалі, обмеженому ізотермами 110 та 120° С, обумовлене процесами розчинення кварцу та інтенсивною кальцитизацією теригенних порід. Водночас, вториннопоріві колектори, що розміщуються під катагенетичним флюїдопривом поширені локально та обумовлені мікротріщинуватістю, сидеритизацією та каолінітизацією. Особливі вториннопоріві піщані колектори Березівського газоконденсатного родовища, що розміщуються в зоні, обмеженій ізотермами 110 та 120° С, виникли в умовах кислого середовища, яке спричинило розчинення кальцитового цементу та інтенсивну каолінітизацію пісковиків. Такі сприятливі для формування вторинної пористості умови на цьому родовищі могли скластись внаслідок імовірної інверсії тектонічних рухів, що призвело до інтенсивного розвитку регресивного катагенезу.

Ключові слова: Дніпровсько-Донецька западина, нижній карбон, пісковики і алевроліти, великі глибини, постседиментаційні зміни, вторинний колектор, вторинна покривка

Е. В. Тунік, В. В. Огарь. ВТОРИЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД НИЖНЕГО КАРБОНА НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ (НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ). Изучены визейские и серпуховские песчаники, раскрытые глубокими скважинами в пределах Солоховско-Диканьского и Березовско-Котелевского валов центральной части Днепровско-Донецкой впадины. Микроскопические исследования показали широкое развитие стадіальных и накладенных эпігенетических изменений терригенных пород. Привлечение к анализу лабораторных значений пористости и проницаемости позволило определить основные тенденции влияния вторичных процессов на фильтрационно-емкостные свойства пород. Показано, что развитие вторичной микротрещиноватости и каолинитизации повышает значение пористости и проницаемости. Растворения и регенерация кварца сопровождаются локальным перераспределением кремнезема и приводят к резкой дифференциации колекторских свойств терригенных пород в одних и тех же горизонтах. Процессы сидеритизации способствуют развитию вторичных колекторов на больших глубинах, а карбонатизация, наоборот, приводит к уменьшению их порового пространства. Присутствие битуминоидов и вторичных кристаллов пирита могут свидетельствовать о наличии и миграции углеводородных флюидов. Сопоставление полученных результатов с термобарическими данными, полученными как непосредственными измерениями в скважинах, так и рассчитанными теоретически на примере Бельского газоконденсатного месторождения показало, что формирование катагенетического флюидоупора в интервале, ограниченном изотермами 110 и 120° С, обусловлено процессами растворения кварца и интенсивной кальцитизацией терригенных пород. В то же время, вторичнопоровые колекторы, локализующиеся под катагенетическим флюидоупором, распространены локально и обусловлены микротрещиноватостью, сидеритизацией и каолинитизацией. Необычные вторичнопоровые колекторы Березовского газоконденсатного месторождения, размещающиеся в зоне, ограниченной изотермами 110 и 120° С, возникли в условиях кислой среды, которая обусловила растворение кальцитового цемента и интенсивную каолинитизацию песчаников. Такие способствующие формированию вторичной пористости условия на этом месторождении могли сложиться вследствие предполагаемой инверсии тектонических движений, что вызвало интенсивное развитие регресивного катагенеза.

Ключевые слова: Днепровско-Донецкая впадина, нижний карбон, песчаники и алевролиты, большие глубины, постседиментационные изменения, вторичный колектор, вторичная покривка.

Постановка проблеми. Первинні фільтраційно-ємнісні властивості (ФЄВ) теригенних колекторів у приповерхневих умовах обумовлені перш за все обстановками седиментації та пода-

льшими діагенетичними перетвореннями. На великих глибинах зростає роль вториннопоріві колекторів, які виникають внаслідок стадіальних (стадіальний епігенез) та накладених (накладе-

ний епігенез) процесів. Межа між ними є достатньо умовною, оскільки обидва процеси є багатofакторними, часто взаємообумовленими. Ймовірно, що саме з труднощами, які виникають при ідентифікації цих процесів, пов'язано те, що у англомовній літературі таке розділення не практикується. Для постседиментаційних змін порід застосовується термін діагенез (diagenesis), який поділяють на дві стадії еогенез або ранній діагенез (eogenesis, early diagenesis) та мезогенез або діагенез занурення (mezogenesis, burial diagenesis) [23].

Перетворення осадових порід в результаті стадіального епігенезу при зануренні осадових товщ обґрунтовано теоретично та експериментально [3, 6, 16]. Так, на прикладі узагальнення даних по Донбасу [1] показано, що пористість порід зменшується на стадії діагенезу у 1,5–2,0 рази (з 40–60 до 20–30%), на стадії раннього катагенезу у 1,5–2,0 (з 20–30 до 10–15%), на середній стадії також у 1,5–2,0 рази (з 10–15 до 5–7%) і на стадії пізнього катагенезу ще у 1,5–2,0 рази (з 5–7 до 2–3%). В межах окремих площ Дніпровсько-Донецької западини за даними цього ж автора на глибинах більше 3 км пористість не перевищує 5–6%, тобто породи фактично втрачають пористість і проникність, перетворюючись у неколектори.

Близькі оцінки наводить В.О. Терещенко [17, с. 28] для Глинсько-Розбишівського і Солохівсько-Диканського валів, де на глибинах 5,3–6,0 км пористість більшості піщано-алевролітових порід знижується до 3–5% і менше, а проникність до $1-15 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ і менше.

Разом з тим, ряд даних, отриманих для різних ділянок осової та приосових частин ДДЗ, свідчить про те, що і на великих глибинах можуть формуватись вториннопоріві високопроникні колектори, що виявлені, зокрема у кам'яновугільних відкладах ряду родовищ (Перевозівське, Березівське та ін.) [17]. Більше того, після відкриття глибокoзанурених (понад 6 км) покладів вуглеводнів (ВВ) на Семиреньківському газоконденсатному родовищі вивчення нафтогазоносності великих глибин розглядається як один з найперспективніших напрямів геологорозвідувальних робіт в ДДЗ [6, 9]. Поява вториннопоріві колекторів на таких глибинах пояснюється переважно впливом накладених глибинних (гіпогенних) процесів, які призводять до формування зон розущільнення та мікротріщинуватості, розвитку вторинних пористості та проникності внаслідок змін структури і мінерального складу порід (аллотигенна мінералізація).

Прогнозування вториннопоріві колекторів, що виникли в результаті накладеного епігенезу, пов'язане зі значними труднощами. Це

обумовлено тим, що формування таких накладених перетворень є багатofакторним процесом, окремі стадії якого часто роз'єднані в часі. Цей процес залежить як від первинних особливостей породи, так і від складу підземних розчинів, наявності в них вуглеводнів, фізико-хімічних умов середовища та динаміки їх змін, тобто фактично від історії розвитку осадового басейну в цілому і його окремих частин зокрема. Комбінації цих та інших факторів відрізняються не тільки для різних басейнів, але й для ділянок одного і того ж басейну, і навіть для сусідніх родовищ. Вказане обумовлює необхідність вивчення накладених процесів у межах кожного об'єкту досліджень, що особливо актуально, якщо враховувати нерівномірну охарактеризованість керном розрізів свердловин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Вплив вторинних перетворень на ФЄВ порід карбону ДДЗ вивчається тривалий час. Важливими стали роботи О.Ю. Лукіна [4; 5]. Вторинні перетворення теригенних порід карбону на великих глибинах для різних зон ДДЗ описані також О.Ю. Лукіним зі співавторами [6, 9], В.А. Барановим [1], В.П. Стрижаком [15], В.В. Макогоном [7]. Найґрунтовніші результати вивчення глибинних процесів в ДДЗ, що впливають на зміну ФЄВ порід та розподіл покладів вуглеводнів, отримані харківськими геологами. Так, Заріцький О.П. і Заріцький П.В. [3] в ДДЗ виділяють *основну зону* нафтогазонакопичення, яка розміщена під нижньопермською соленосною регіональною покришкою, та *глибинну зону* газонакопичення, що локалізована нижче раніше вперше виділеного В.О. Терещенком у 1997 р. [16] вторинного катагенетичного флюїдотриву (КФТ). Розвиваючи концепцію В.О. Терещенка, Заріцький О.П. та інші дослідники розглядають КФТ як вторинну покришку, яка обмежена ізотермами 110 до 120°C і сформована внаслідок цементації порід на геохімічному бар'єрі з нижньою межею, що збігається з градаціями катагенезу МК₂ і МК₃. Ця вторинна покришка екранує поклади ВВ, що розміщені у порово-тріщинних і тріщинних колекторах та локальних зонах вторинного розущільнення. Формування вториннопоріві колекторів під КФТ автори пояснюють тектонічними процесами, хімічним впливом агресивних відроджених у процесах катагенезу вод та вертикальною міграцією флюїдів, що на межі з КФТ може приводити до виникнення аномально високих пластових тисків (АВПТ).

Проте дослідження В.О. Терещенка [17–19] демонструють більш складну картину розміщення КФТ, а також розподілу вториннопоріві резервуарів у глибинних зонах та формування АВПТ. Зокрема, В.О. Терещенко на великих

глибинах сходу ДДЗ виділяє нижній гідрогеологічний поверх, у верхній частині якого розміщується основна зона промислової газонасності, а сучасні пластові температури коливаються в межах 110-120°C, зрідка досягаючи 140°C [17, с. 28]. Водночас, у нижній частині цього гідрогеологічного поверху розміщується потужний (300-800 м) вторинний флюїдотрив, що складений переважно глинистими та ущільненими піщано-алевритивими породами і залягає у температурних умовах, які часто значно відрізняються від інтервалу, обмеженого ізотермами - 110-120°C. За даними В.О. Терещенка на окраїнах Донбасу КФТ формується в температурному інтервалі 90-110°C, а в депресійних зонах східної частини ДДЗ він виникає при температурах від 140-160°C. Глибини залягання покрівлі КФТ про цьому змінюються від 5,1-5,8 км до 3,2-4,0 км, а підшви від 6,2-6,5 до 3,6-4,2 км [17, с. 30; 18, с. 110]

Отже, В.О. Терещенко вважає, що глибина залягання КФТ визначається як пластовими температурами, так і літолого-фаціальними особливостями порід.

Незважаючи на зазначені розбіжності, обидві групи харківських дослідників погоджуються з тим, що нижче КФТ внаслідок інтенсивних фазових перетворень значення колекторських властивостей зростають за рахунок формування вторинної пористості та тріщинуватості. Важлива роль при цьому відводиться циркуляції відроджених внаслідок перетворення монтморилоніту в гідрослоду глибинних вод, а також таких агресивних компонентів як вуглекислий газ, сірководень, що генеруються органічною речовиною на великих глибинах.

Результати досліджень вторинних змін кам'яновугільних порід в межах території досліджень викладені в публікаціях С. Ф. Поверенного зі співавторами [12, 13]. В продуктивних горизонтах В-25-25 та С-5 Березівського родовища вони виділяли особливий тип пісковиків, що здатний зберігати первинну пористість на значних глибинах, пов'язуючи його генезис з особливими фаціальними умовами формування. Значимо, що цей висновок не підтверджується нашими дослідженнями. До того ж, раніше було показано, що провідну роль у формуванні порового простору на великих глибинах відіграє не первинний фаціальний склад порід, а гіпогенно-алогенетичні процеси (інтенсивне вилуговування і метасоматоз), що відбуваються внаслідок циркуляції глибинних флюїдів і обумовлюють виникнення вторинних пор, мікротріщин та мікрокаверн [6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Отже, на сьогодні трактовка природи і розподіл порового простору і тих

процесів, які відбуваються на великих глибинах неоднозначна. Одні автори вважають найбільш важливим первинний фаціальний склад порід, інші віддають перевагу вторинним накладеним процесам, що сприяють формуванню вторинної пористості або схиляються до висновку щодо сприятливих комбінацій первиннофаціальних і вторинних накладених процесів. У визначенні умов формування вторинних катагенетичних покришок також існують суттєві розбіжності. Частина дослідників обмежують зону КФТ ізотермами 110-120°C. Водночас, інші - наводять докази більшої мінливості температурних умов і глибин формування КФТ в різних частинах ДДЗ. При цьому, вважається, що КФТ утворюється внаслідок надходження з глибинних зон великої кількості карбонатної речовини, що призводить до катагенетичної цементації, суттєвого зменшення порового простору і формування вторинних покришок. Разом з тим, наявні лише фрагментарні дані щодо мінерального складу зон КФТ і суміжних товщ, які, на нашу думку, вивчені недостатньо. Концепція КФТ передбачає, що ці вторинні утворення сучасні, відносно недовговічні в геологічній історії. Порооди, що залягають глибше КФТ на різних етапах вже пройшли стадію катагенетичної цементації і перебувають у зонах інтенсивних фазових перетворень. Характер цих перетворень в літературі окреслений лише у загальних рисах. Опубліковано дані щодо вторинних перетворень, зафіксовані для різних частин ДДЗ (але не для території досліджень), серед яких карбонатизація [13, 17], каолінізація [6, 7, 15], розчинення та регенерація кварцу [13], мікротріщинуватість і мікрокавернозність [3, 6, 10].

Формулювання мети статті. Метою статті є визначення вторинних змін теригенних відкладів візейського і серпуховського віку Центральної частини ДДЗ в зонах КФТ, а також у товщах, що їх перекривають і залягають під ними, та оцінка впливу цих змін на ФЄВ алевро-піщаних порід. Об'єкт дослідження – візейські та серпуховські алевро-піщані породи в зонах КФТ та суміжних товщах Центральної частини ДДЗ. Предмет досліджень – вторинні перетворення алевро-піщаних порід та їх вплив на ФЄВ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Район робіт розміщується в межах Солохівсько-Диканського та Березівсько-Котелевського валів і Коломацького підняття, де відкрито ряд газоконденсатних родовищ. Досліджено kern з 13 глибоких свердловин, пробурених в межах Березівського, Більського, Солохівського, Західно-Солохівського, Коломацького, Котелевського та Степового родовищ (рис. 1). Із зразків керну виготовлено та досліджено під поляризаційним

мікроскопом 43 прозорих петрографічних шліфа (табл. 1). Застосована методика досліджень вторинних перетворень осадових гірських порід під мікроскопом, розроблена та узагальнена М.В. Логвиненком, Е.І.Сергєєвою, О.В. Япаскуртом [20], В.О. Хмелевським та ін.

Для визначення відносно однорідних інтервалів, складених теригенними породами, а також прив'язки кернового матеріалу та кореляції розрізів свердловин застосовано дані геофізичних досліджень свердловин (ГДС) та виміри пласто-

вих температур. Розчленування розрізів вивчених свердловин на продуктивні горизонти (ПГ) та значення ФЄВ за даними лабораторних досліджень наведено за даними УкрНДІГазу, м. Харків (рис. 2, табл. 1). Наведені дані свідчать про те, що керном достатньо повно охарактеризована продуктивна товща візейського (ПГ В-15-26) та тільки верхня частина серпуховського (ПГ С-4-5) ярусів. Глибини відбору керну коливаються в межах від 3369 м (Солохівська площа) до

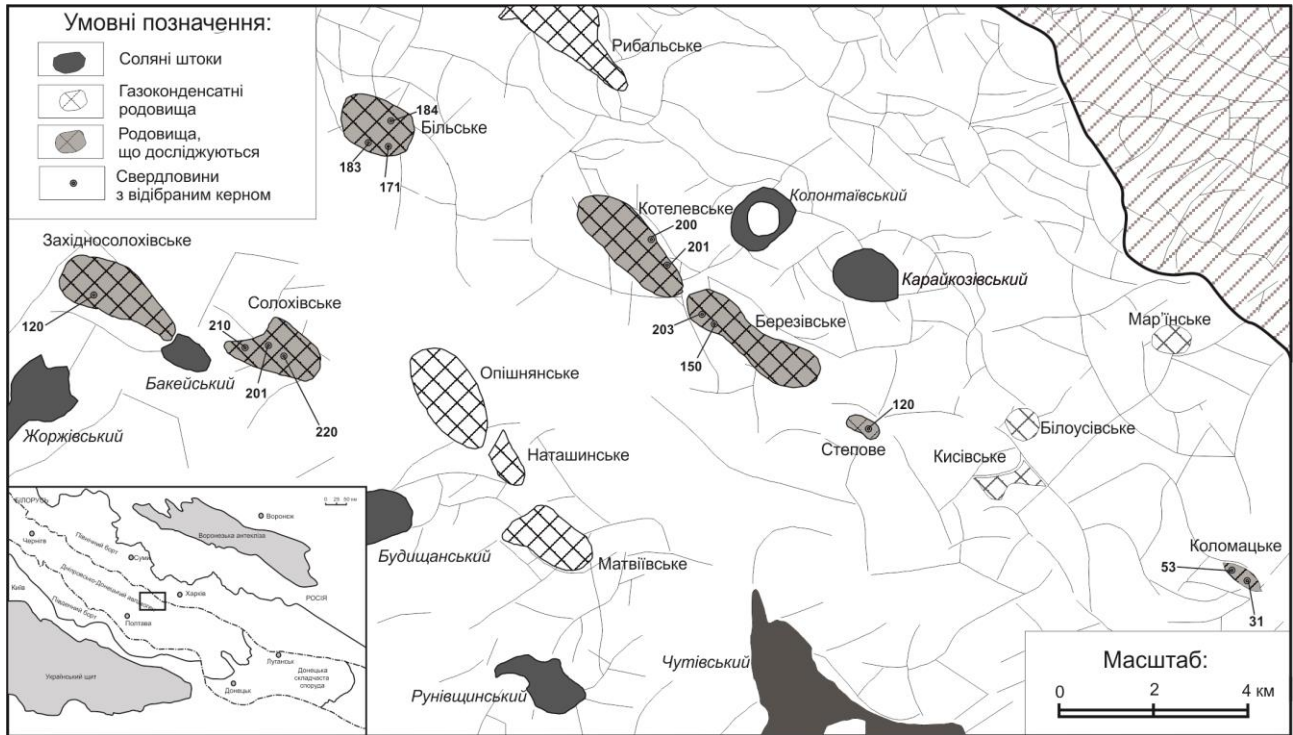


Рис. 1. Оглядова карта району досліджень



Рис. 2. Схема зіставлення ПГ, розкритих свердловинами з відібраним та вивченим керном

Загальна характеристика досліджених зразків (значення пористості і проникності та прив'язка до продуктивних горизонтів - за даними УкрНДІГаз, м. Харків)

Свердловина	Глибина відбору, м	Проникність, $\times 10^{-15} \text{м}^2$	Пористість, %	ПГ	№ шліфа	Типові вторинні зміни
Березівська 150	5912,1	4,83	12,27	В-25-26	49019	Рчн, Клн, Клц
Березівська 203	4750	173,14	14,30	С-5	45064	Триц, Сдр, Клн
Там же	4752	7,96	10,86	С-5	45069	Сдр, Клн, Рчн
Там же	4753,6	54,02	11,27	С-5	45074	Клн, Сдр
Там же	4734,1	46,26	11,29	С-5	45598	Рчн, Ргн
Там же	4734,6	73,46	12,17	С-5	45600	Клн, Сл, Рчн
Там же	4735,1	14,91	10,12	С-5	45602	Рчн, Клц
Там же	4736,5	6,72	9,36	С-5	45606	Рчн, Триц, Клн,
Там же	4737,3	25,24	9,93	С-5	45613	Триц, Рчн, Клн
Там же	4739,4	150,64	11,79	С-5	45620	Триц, Клн, Рчн
Більська 171	4176,7	0,27	0,93	В-156	29883	Клц, Клн, Рчн
Там же	4224	0,21	5,63	В -16н	30049	Рчн, Бтн
Там же	4225,3	127,42	9,56	В -16н	30054	Рчн, Клн, Клц
Більська 183	4016,3	0,04	4,01	В-15	41775	Рчн, Клц
Там же	4066,5	0,01	2,03	В-15	41779	Клц, Сл, Сдр
Там же	4077,7	16,83	9,21	В-15	41789*	Триц, Рчн, Клц
Там же	4079,8	0,03 тр.	2,33	В-15	41793	Клц, Рчн
Більська 184	4520,2	1,53 тр.	7,02	В-19-23	36066	Клц, Триц, Сдр, Сл
Там же	4521,5	8,15 тр.	9,25	В-19-23	36070	Рчн, Триц
Там же	4528,1		1,54	В-21-23	36196*	Ргн, Стил, Клн, Сл
Там же	4610,9	1,61	9,74	В-21-23	36199	Рчн, Клц
Західно-солохівська 120	4338,2	0,03	2,71	В-16а	44039	Клц, Рчн, Сл, Клн, Сдр
Там же	4340,1	0,03 тр.	3,16	В-16а	44045	Сдр, Сл, Рчн, Клц
Там же	4341,7	0,01	2,57	В-16а	44048	Клц, Рчн, Сл, Сдр
Там же	4994,8	0,01	3,14	В-22в	45291	Сдр, Клц, Триц
Коломацька 31	5356	0,06	4,12	С-4	34587	Рчн, Клн, Клц, Сл
Там же	5357,1	0,05	3,61	С-4	34591*	Сл, Клц, Рчн
Коломацька 53	5529,2	0,13 тр.	4,76	С-5	40473	Рчн, Клн, Клц
Там же	5531,3	2,43	9,25	С-5	40480*	Клн, Триц, Рчн Сдр
Там же	5555,5		1,91	С-5	40486	Сл, Клц, Рчн, Сдр
Котелевська 200	5570,6	0,51	5,19	В-16	33296	Клц, Ргн, Рчн, Пі
Там же	5571,4	0,01	1,77	В-17і	33299*	Ргн, Клц
Там же	5844,1	0,54 тр.	2,98	В-23	33818*	Рчн, Клц, Триц
Там же	6067,1	0,01	0,52	В-24-26	35721*	Клц, Рчн, Пі
Котелевська 201	5828,6	0,01	2,58	В-23	43148*	Триц, Ргн, Клц, Клн
Солохівська 201	3369,5	96,65	10,85	В-15а	40803	Клц, Триц, Рчн
Там же	3812,2	0,01	3,70	В-17	40854	Сдр, Рчн
Солохівська 210	3605,4	0,01	1,74	В-16	42324	Клц, Рчн
Там же	3605,7		2,21	В-16	42325	Б.зн.з.
Там же	3751,4		1,15	В-17б	42328	Б.зн.з.
Солохівська 220	4552,5	0,43	6,34	С ₁ В ₁	45332	Б.зн.з.
Степова 120	5668,6	0,01	1,37	–	48316	Сдр, Сл, Клц, Пі, Рчн
Там же	5669,2	0,01	1,22	–	48318*	Клц, Рчн, Пі, Бтн
Там же	5683	0,07	7,48	В-15	48320*	Сдр, Клн, Клц

Примітки: Скорочені позначення вторинних змін, що зафіксовані в шліфах (розміщені у послідовності, починаючи з найінтенсивніше проявлених для кожного зразка): Рчн – розчинення кварцу, Ргн – регенерація кварцу, Триц – мікротріщинуватість, Стил – мікростилітизація, Клн – каолінітизація, Клц – кальцитизація, Сдр – сидеритизація, Сл – слюди́зація, Пі – піритизація, Бтн – бітуміноїди, Б.зн.з. – без значних змін. Знак * - відображає номери шліфів, фото яких розміщені в статті; тр. – тріщинуватість

5912 м (Березівська площа).

Вивчені зразки теригенних порід за значеннями відкритої пористості та проникності згідно з традиційною класифікацією А.А. Ханіна відносяться до III-го та нижчих класів колекторів. Деякі з них мають дуже низькі значення ФЄВ. Наведені в таблиці дані лабораторних досліджень пористості і проникності залучались для попередньої оцінки впливу зафіксованих проявів вторинних перетворень порід на їх ФЄВ. Вивчені зразки керну та шліфи зберігаються на кафедрі геології нафти і газу ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Результати робіт.

Серед досліджених порід переважають пісковики світло-сірі, дрібно-тонкозернисті, зрідка крупно- та середньозернисті або різнозернисті, шаруваті або неясношаруваті, мономіктового кварцового або олігоміктового кварц-польовошпатового складу. Зерна у більшості не обкатані та слабообкатані, цемент карбонатний, каоліновий, регенераційний або змішаний. Породи формувались в мілководноморських та у перехідних

дних прибережних умовах з середньою та високою гідродинамічною активністю середовища [6].

Нижче наведена характеристика найпоширеніших вторинних змін піщано-алевритових порід, виявлених авторами при мікроскопічних дослідженнях.

Трактовка умов, при яких могли відбуватися ті чи інші епігенетичні процеси запозичена з опублікованих джерел.

Розчинення та регенерація кварцу відбувається у лужному середовищі (рН 9 і більше) [8]. Інтенсивність цих процесів зростає із збільшенням температури. Найчастіше вони проявляються на пізньокатагенетичній стадії [21]. Процеси розчинення та регенерації кварцу генетично пов'язані і підпорядковуються відомому правилу Рікке. Регенерація кварцу у більшості випадків супроводжує процес розчинення. Як видно з фото (рис. 3А), регенераційні смужки мають мінливу товщину та відділяються від початкових уламкових зерен кварцу тонкими лініями, утвореними ймовірно глинистим матеріалом.

Корозія та розчинення зерен кварцу у дослі-

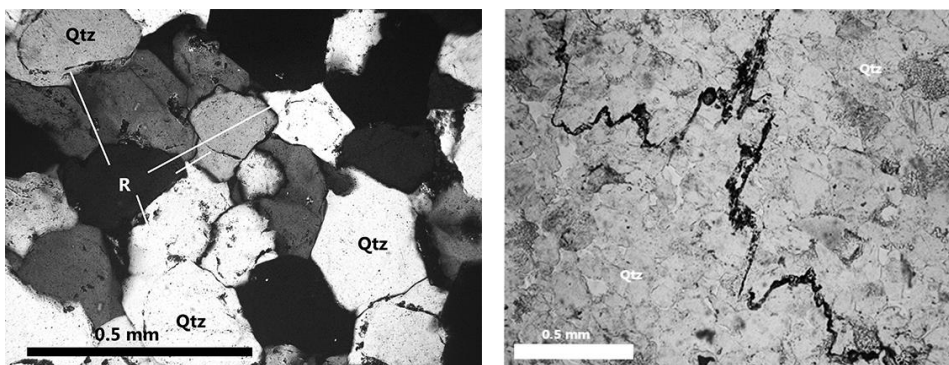


Рис. 3. Регенерація кварцу та мікростилолітизація піщаних порід. А – регенерація кварцу. Видно ввігнуто-випуклі (конформні) контакти кварцових зерен та виразно проявлені межі (R) між зернами кварцу і регенераційними смужками мінливої товщини (шліф 33299, св. Котелевська 200, гл. 5571.4 м). Б – мікростилолітова тріщина в пісковіку з регенераційним кварцовим цементом (шліф 36196, св. Більська 184, гл. 4528,1 м).

Тут і далі на рис. 3-7: прив'язка та ФЄВ зразків, з яких виготовлені шліфи, наведена в табл. 1; застосовано скорочення мінералів у відповідності з міжнародними рекомендаціями [22]

джених зразках виражається в спотворенні форми зерен, границі яких набувають сутурної, «роз'їденої» форми (рис. 4 А, В).

Просторово розчинення і регенерація кварцу можуть бути роз'єднаними, що пов'язано з перерозподілом кремнезему у товщі порід. Рис. 3А демонструє конформні контакти між окремими зернами та регенераційний кварцовий цемент. Ймовірно подібним перерозподілом можуть пояснюватись відмінності в пористості в породах одного і того ж продуктивного горизонту. Це можна бачити на прикладі кварцових пісковиків з ПГ С-5, що мають явні ознаки розчи-

нення та регенерації кварцу при близькому літологічному складі. Так, пористість пісковіку з св. Коломацька 53 (шліф 40473, гл. 5529,2 м) становить 4.76%, водночас, пісковик зі св. Березівська 203 (шліф 4598, гл. 4734,1 м) має пористість 11.29% (див. табл. 1).

Отже, процеси розчинення, регенерації та перевідкладення кварцу могли призводити до нерівномірного перерозподілу кремнезему в породі, суттєво збільшуючи або зменшуючи до мінімальних значень ФЄВ пісковиків та формуючи локальні ділянки розрізу як із суттєвим підвищенням, так і з дуже зниженими значеннями по-

ристості та проникності. Закономірності такого перерозподілу потребують детальнішого вивчення.

Мікростилолітизація виникає внаслідок розчинення мінералів під тиском. Інтенсивність розчинення зростає з підвищенням лужності середовища. Мікростилолітові тріщини характерні для ущільнених порід з інкорпораційним з'єднанням зерен кварцу та регенераційним цементом. На великих глибинах в зонах катагенезу [9] формування мікростилолітових швів обумовлюється підвищеним флюїдним тиском, тобто генетично вони пов'язуються з процесами флюїдорозриву. Така реакція породи призводить до збільшення глибинної пористості та проникності порід [20]. Однак, досліджений нами зразок з проявленою мікростилолітизацією не демонструє підвищених значень пористості (св. Більська 184, глибина 4528.1 м, шліф 36196), що можна пояснити локальним проявом цього процесу. Мікростилолітові тріщини у цьому зразку заповнені чорною бітуминозною речовиною, що ймовірно є результатом міграції вуглеводневих флюїдів (рис. 3Б).

Каолінітизація – гідротермально-метасоматичний процес, результатом якого є формування кристалів каолініту та діккіту. Каолінітизація відбувається тільки в різко кислому середовищі. Описано два основних варіанти виникнення таких обстановок в осадовій товщі. По-перше, кисле середовище може виникати на великих глибинах внаслідок надходження збагачених вуглекислою флюїдів і розчинення карбонатних мінералів [11, 16, 20, 21]. Ймовірно, що рух таких флюїдів міг відбуватись у проникних зонах, які виникали як завдяки тектонічним факторам, так і внаслідок флюїдорозриву. По-друге, таке середовище характерне для зон інверсійних підняття і регресивного катагенезу. В цьому випадку діоксид вуглецю утворюється внаслідок руйнування вуглеводнів, надходження великих обсягів якого у перекриваючі товщі призводять до розчинення кальциту, децементатії уламкових порід з масовим утворенням каолініту [20, с. 38].

Каолінітизація є одним з найважливіших процесів, що суттєво впливає на ФЄВ на великих глибинах. Це пов'язано з тим, що цей процес призводить до зменшення об'єму породи, внаслідок чого розвивається вторинна пористість [2, 4-5, 11, 15].

Каолінітизація польових шпатів спостерігалась у зразках зі св. Березівська 203, 150, св. Степова 120, св. Коломацька 53 (рис. 4Г, 5А), де зафіксовані підвищені значення ФЄВ (див. табл. 1). Особливо характерна вона для зразків з Березівського ГКР. Водночас, в св. Більська 184 та

Коломацька 53, де в окремих інтервалах виявлені ознаки каолінітизації, значення ФЄВ низькі, що може пояснюватись більш пізніми накладеними на каолінітизовані породи процесами карбонатизації, які призвели до скорочення порового простору. Зафіксовано також випадки каолінітизації мусковіту (шліф 45600, св. Березівська 203, гл. 4734,6 м).

Кальцитизація, на відміну від каолінітизації, відбувається у лужному середовищі. Саме тому кальцитизація, супроводжує процеси корозії кварцу (рис. 4 А, В). Разом з тим, це часто багатостадійний процес, який залежить перш за все від наявності в осадовій товщі діоксиду вуглецю і кислотності-лужності середовища. При дефіциті діоксиду вуглецю виникає лужне середовище, сприятливе для кальцитизації, і навпаки, при надходженні цього компонента формується кисле середовище, в якому кальцит повністю або частково розчиняється. Такі інверсії середовища в осадовій товщі могли відбуватись неодноразово, що призводило до утворення декількох генерацій кальциту. Як вже згадувалось вище, в ДДЗ надходження глибинної карбонатної речовини формує КФТ в інтервалі пластових температур (110-120° С).

Ознаки кальцитизації часто спостерігались у шліфах (рис. 4А-В, 5А), а також виявлялись при макроскопічному дослідженні керну за реакцією породи на слабкий розчин соляної кислоти. Така реакція спостерігалась зокрема при дослідженні пісковиків із ПГ В-19-23, розкритих св. Більська 184. Вторинний кальцит заповнює порожнини та відкриті тріщини (кальцитовий цемент пойкилітового типу). Наші дані підтверджують відому закономірність, яка полягає в тому, що процеси кальцитизації призводять до зменшення порового простору теригенних порід [7, 21]. В цьому легко пересвідчитись, якщо порівняти пористість зразків з одних і тих же горизонтів з проявленою кальцитизацією та без такої. Наприклад, пісок ПГ С-5 св. Коломацька-53 (гл. 5555,5м) з проявленою кальцитизацією має пористість 1,91%, натомість, пористість пісковика з того ж самого ПГ (гл. 5531,3 м), але без проявленої кальцитизації становить 9,25%. Табл. 1 ілюструє також і інші приклади подібних співвідношень.

Слюди́зація – це процес метасоматичного та гідротермального заміщення мінералів слюдами або формування слюд в порожнинах та тріщинах. У досліджених пісковиках та алевролітах переважають слюди світлих відтінків (мусковіти, гідромусковіти). За походженням слюди поділяються на 2 типи: первинні та вторинні (новоутворені). Кристали первинних слюд конформні та спотворені, натомість слюди вторинного походження мають досконалу форму лусок

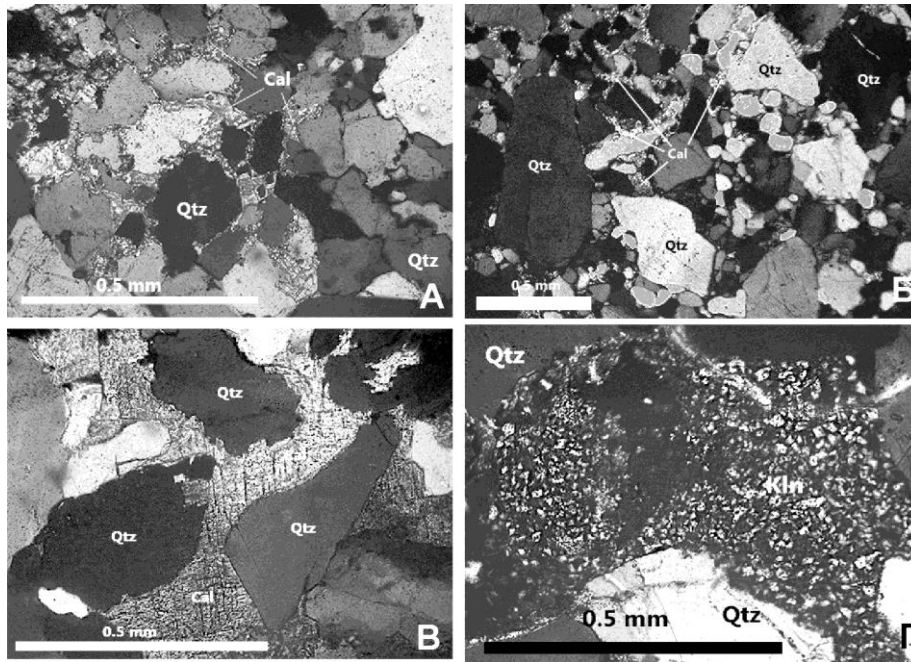


Рис. 4. Розчинення кварцу, кальцитизація, каолінізація. А – В – у дрібнозернистому пісковику (шліф 33818, св. Котелевська 200, гл. 5844,1 м) видно кородовані «роз’їдені» зерна кварцу (Qtz). Міжзерновий простір заповнений вторинним кальцитом (Cal). Б – різнозернистий пісковик з вторинним кальцитом у міжзерновому просторі (шліф 43148, св. Котелевська 201, гл. 5828,6 м). В – середньозернистий кварцовий пісковик з карбонатним цементом. Видно сліди розчинення кварцу, заповнені кальцитом, що свідчить про вторинність останнього (шліф 43148, св. Котелевська 201, гл. 5828,6 м). Г – міжзерновий простір пісковика заповнений каолінітовим агрегатом (Kln). Кутасті контури агрегату (справа вгорі) свідчать про його розвиток по зернах польового шпату (шліф 40480, св. Коломацька 53, гл. 5531,3 м)

та розташовані дисконформно відносно сусідніх зерен (рис. 5А). Останні є результатом накладених епігенетичних процесів.

Відомо, що біотит на великих глибинах втрачає стійкість, де гідратується та хлоритизується або перетворюється на мусковіт та згодом на гідромусковіт. В кислому середовищі відбувається каолінізація мусковітів, в лужному – гідролізидизація. Одночасно, велика кількість мусковіту може залишатись без змін або незначно змінюватись. Також, встановлено, що у присутності вуглеводнів катагенетичне перетворення слюдистих мінералів сповільнюється [20].

Утворення вторинного мусковіту спостерігалось у зразках зі св. Західносолохівська 120, Березівська 203, Коломацька 31,53, Більська 184, Степова 120. Найчастіше слюдизація траплялась у зразках із Західносолохівського ГКР.

Масштаби розвитку вторинної слюдизації незначні, що мабуть пов’язано з обмеженим вмістом польових шпатів у алевро-піщаних породах. Суттєвого впливу слюдизації на ФЄВ вивчених порід не зафіксовано.

Мікротріщинуватість пов’язана з катагенетичними перетвореннями та виникненням нерівномірних напружень в породі, що спричинює мікророзриви зерен. На великих глибинах такі

нерівномірні напруження в породі можуть виникати внаслідок інтегрованої дії тектонічних факторів (дилатансія) та процесів флюїдорозриву з формуванням матричної мікротріщинуватості [6, 9]. Мікротріщинуватість спостерігалась у шліфах 41789, св. Більська 183, гл. 4077.7 м та 45064, св. Березівська 203, 4750 м (рис. 6А). За результатами лабораторних досліджень породи з проявленою мікротріщинуватістю мають підвищені значення ФЄВ (див. табл. 1).

Сидеритизація та піритизація відбуваються у близьких умовах. Сидерит є одним з головних мінералів-маркерів, що свідчить про вторинні зміни в породі. Він утворюється в слабо-відновлювальній обстановці за наявності в порових розчинах окисненого заліза в кислому або нейтральному середовищі [10].

Сидеритизація спостерігалась у зразках зі св. Березівська 203, Степова 120, Коломацька 31, Більська 183 (рис. 5Б). Помічена цікава закономірність, яка полягає в тому, що зразкам з повністю сидеритизованим міжзерновим цементом властиві покращені колекторські властивості (св. Березівська 203, Степова 120). Водночас, незначний вміст сидериту, що трапляється в інтервалі глибин від 4000 до 5300 м різних родовищ, не призводить до суттєвої зміни ФЄВ порід (св. Ко-

ломацька 31, Більська 183). Також, асоціація вторинних мінералів сидерит-каолінит характерна для найбільш глибинних зон Степового та Коломацького родовищ.

Пірит представлений ідіоморфними кристалами кубічної форми. Піритові скупчення тяжіють до тріщин, заповненим бітуміною речовиною (рис. 6Б), що може вказувати на їх зв'язок з міграцією ВВ [21]. При такій міграції виникало стійке відновлювальне середовище, що сприяло утворенню ідіоморфних кристалів піриту. Підтвердженням останнього є зразки керну зі св. Степова 120. При виготовленні шліфів з цих зра-

зків відчувався бітумінозний запах та візуально спостерігались включення кристалічного піриту.

Стадіальні перетворення. За характером вторинних змін досліджені породи нижнього карбону перетворені наприкінці раннього (початкового) – початку пізнього (глибинного) прогресивного катагенезу. Ознаки пізньої стадії ранньокатагенетичних перетворень широко проявлені у вигляді корозії зерен кварцу та кальцитизації, що призвело до катагенетичної цементації порід та формування вторинної катагенетичної покришки.

Про пізньокатагенетичні перетворення, що

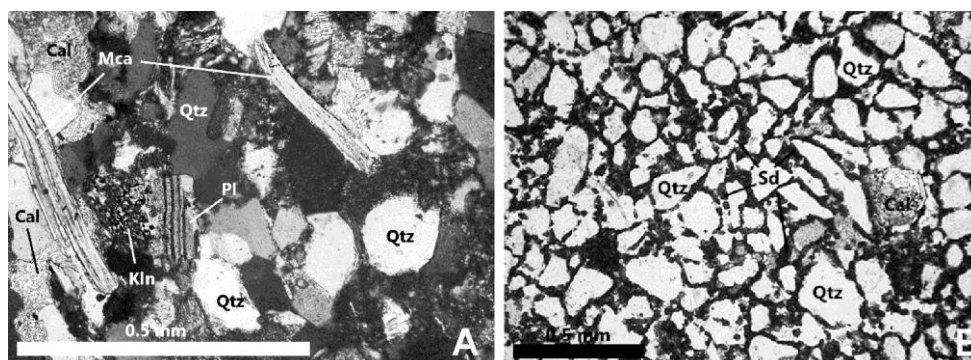


Рис. 5. Слюдизація та сидеритизація. А – дрібнозернистий олігоміктовий пісковик з зернами плагіоклазу (Pl) та вторинними дисконформними кристалами слюди (Mca), а також зміненими процесами кальцитизації та каолінізації міжзерновим простором (шліф 34591, св. Коломацька 31, гл. 5357,1 м).

Б – дрібнозернистий кварцовий пісковик з сидеритовим (Sd) цементом (шліф 48320, св. Степова 120, гл. 5683 м)

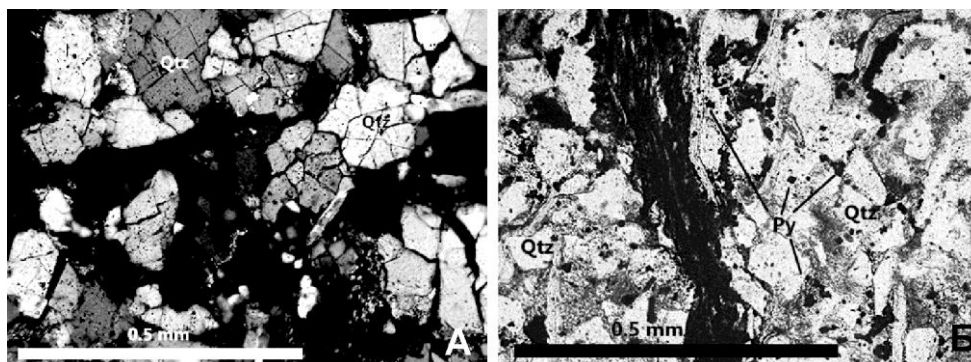


Рис. 6. Мікротріщунуватість, бітуміноїди та піритизація. А – дрібнозернистий кварцовий пісковик, розбитий мікротріщинами (шліф 41789, св. Більська 183, гл. 4077,7 м). Б - дрібнозернистий кварцовий пісковик з карбонатним цементом (шліф 48318, св. Степова 120, гл. 5669.2 м). Видно широкую тріщину, заповнену чорною бітумоподібною речовиною, та дрібні кубічні кристали піриту (Py)

встановлені на найбільш занурених інтервалах розрізу, свідчить розвиток конформних та регенераційних структур кварцу, перевідкладення та утворення базального кварцового цементу, каолінізація, мікротріщунуватість та мікростилолітизація. Це приблизно відповідає даним, отриманим раніше за показниками відбивальної здатності вітриніту. Так, у межах Котелевської і Березівської площ на глибинах, що перевищують 4000 м, R_0 0,77-0,95% [14], що відповідає кінце-

вій стадії раннього (МК₂) та початковій стадії пізнього катагенезу (МК₃).

На Березівському ГКР ідентифіковано ознаки регресивного катагенезу, проявлені у вигляді практично повсюдного прояву каолінізації на фоні зростання ФЄВ пісковиків, що пов'язано з розчиненням кальцитового цементу в умовах різко кислого середовища.

Деякі закономірності прояву вторинних процесів. Для аналізу і узагальнення отриманих даних залучено усереднені розрахункові дані

щодо положення зон КФТ на різних родовищах Березівсько-Котелевського та Солхівсько-Диканського валів (рис. 7). Згідно з цими даними КФТ достатньо повно охарактеризований зразками на Більському ГКР. Тут виявлено прояви типових вторинних процесів, що могли призвести до суттєвої редукції порового простору. До

таких процесів перш за все відноситься розчинення кварцу та кальцитизація, які зафіксовані майже у всіх вивчених зразках, і майже всі вони мають низькі значення пористості і проникності. Винятком є два зразки з чітко проявленою мікротрищинуватістю, пористість і проникність яких дещо підвищена (див. табл. 1).

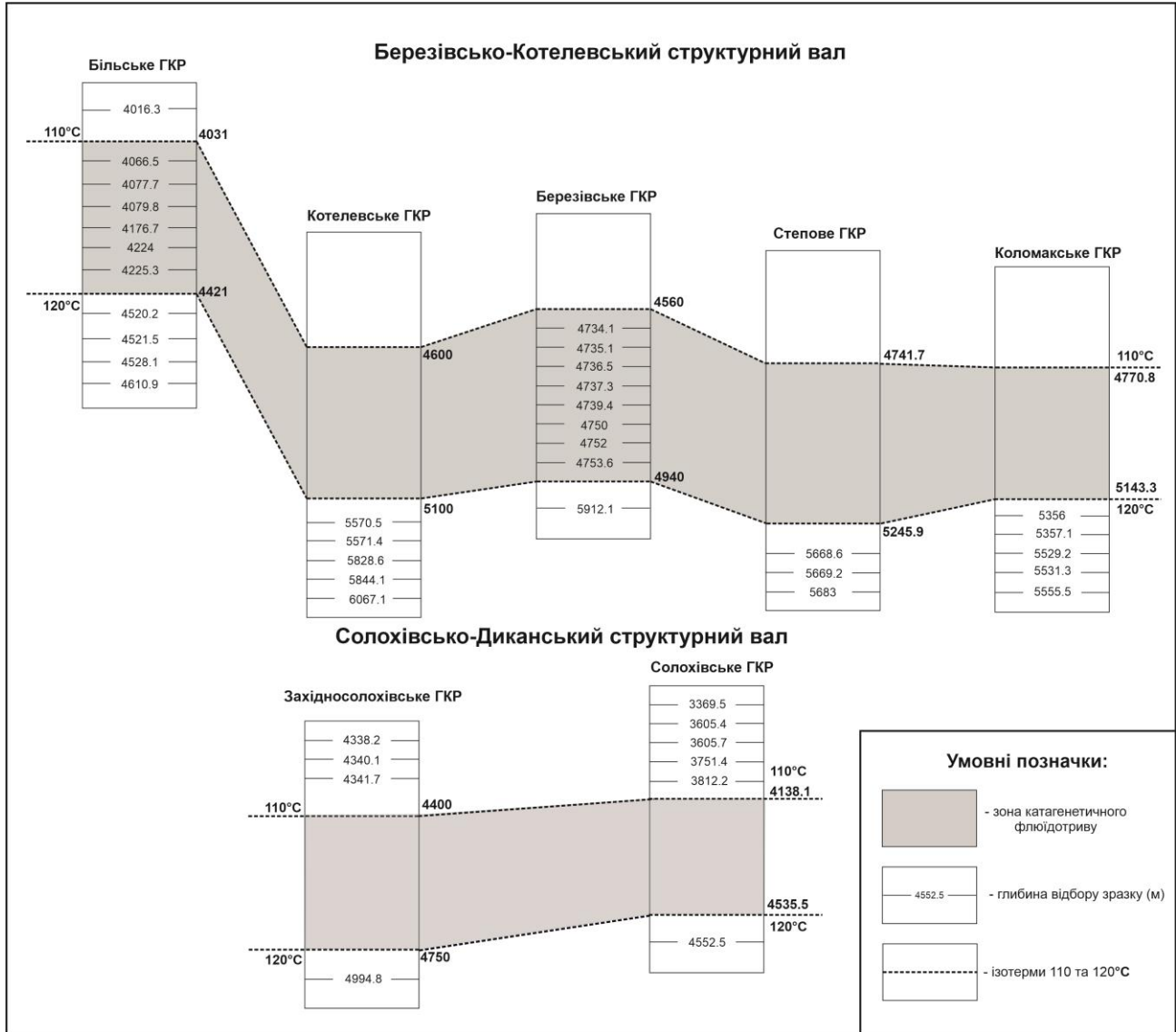


Рис. 7. Розрахункове положення катагенетичного флюїдотриву (за даними УкрНДІгаз) та відносне розміщення відібраних зразків. Положення ізоТЕРМ 110 та 120 градусів визначалося як прямими вимірюваннями в свердловинах, так і теоретично за геотермічними градієнтами. Фактична глибина залягання ізоТЕРМИ в кожній окремій свердловині може відрізнитись від узагальненої по родовищу та може уточнюватись за прямими вимірами

Зразки порід, які характеризують зону, розташовану над КФТ, відібрані переважно з розрізів свердловин Західносолохівського та Солохівського ГКР. Серед них виявлені породи, в яких суттєвих вторинних змін не зафіксовано, а також пісковики і алевроліти з проявами слюдизації, розчинення кварцу, кальцитизації, сидеритизації. Всі вони мають низькі значення колекторських властивостей за винятком пісковиків з мікротри-

щинуватістю кварцу (Солохівська 201, гл. 3369,5 м).

Породи, що залягають під КФТ вивчені переважно у свердловинах Більського, Котелевського, Степового та Коломацького ГКР. Більшість із них мають низькі колекторські властивості. Спостерігались прояви вторинних процесів розчинення, регенерації та перевідкладення кварцу, мікротрищинуватості, стилілітизації, кальцити-

зації, сидеритизації та каолінізації. Особливої уваги заслуговують ознаки суттєвого перевідкладення кварцу, масштаби якого з'ясувати поки що не вдалось.

Підвищені значення пористості та проникності для вториннопорових колекторів, розміщених під зоною КФТ, зафіксовано для зразків з чітко проявленою мікротріщинуватістю, сидеритизацією та каолінізацією (див. табл. 1).

Таким чином, незважаючи на недостатню кількість вивчених зразків, вдалося виявити тенденції у зміні вторинних процесів для різних глибинних зон вивченої території. Зокрема, для зони КФТ Більського родовища найбільш характерними є розчинення кварцу та кальцитизація, що призвели до катагенетичної цементації порід.

Водночас, зразки з зони КФТ Березівського родовища з підвищеними значеннями ФЄВ демонструють прояви зовсім інших процесів, серед яких типовими є мікротріщинуватість, каолінізація та сидеритизація. Ці процеси властиві вторинним колекторам, що розміщуються під зоною КФТ, наприклад на Більському, Степовому, Коломацькому ГКР. Такі прояви більш глибинних процесів в зоні потенційного КФТ на Березівському родовищі можуть пояснюватись інверсією тектонічних рухів, які: 1) вивели в цю зону вторинні колектори, що утворились на великих глибинах; 2) за рахунок руйнування, розміщених глибше покладів вуглеводнів з утворенням великої кількості діоксиду вуглецю, спричинили формування різко кислого середовища. Останнє призвело до розчинення кальцитового цементу, широкого розвитку процесів каолінізації та, у підсумку, суттєвого зростання вторинного порового простору.

Висновки. Результати виконаних досліджень доповнюють та уточнюють інформацію щодо характеру вторинних змін нижньокам'яновугільних теригенних порід на великих глибинах у межах Березівсько-Котелевського та Солохівсько-Диканського валів. Вивчення теригенних порід візейського і серпуховського віків виявило основні види вторинних перетворень

глибоко занурених теригенних порід та дозволило окреслити найважливіші тенденції впливу цих перетворень на ФЄВ порід.

1. Показано, що парагенетичний зв'язок між корозією кварцових зерен та вторинною карбонатизацією різко знижує ФЄВ піщано-алевритових порід і характерний для зони КФТ, яка досліджена у свердловинних Більського ГКР.

2. Формування вториннопорових колекторів під зоною КФТ пов'язане з мікротріщинуватістю, сидеритизацією та каолінізацією, що підтверджено прикладами Більського, Котелевського, Степового та Коломацького родовищ. При цьому, для глибинних зон Степового і Коломацького ГКР зафіксовано стійкий парагенезис каолініт-сидерит, що властивий породам з підвищеними значеннями ФЄВ.

3. Встановлено невідповідність характеру вторинних перетворень пісковиків Березівського ГКР зоні КФТ, в яку вони попадають згідно з теоретичними розрахунками. Це може пояснюватись інверсією тектонічних рухів і спричиненим нею регресивним катагенезом. Глибинні вториннопорові колектори тут потрапили у різко кисле середовище, яке спричинило збільшення порового простору пісковиків внаслідок розчинення карбонатного цементу і інтенсивної каолінізації порід. Хоча природа цієї тектонічної інверсії потребує окремих досліджень, отримані дані дозволяють відхилити концепцію С. Ф. Поверенного зі співавторами щодо природи подібних колекторів, обумовленої первинними фаціальними умовами

Автори висловлюють вдячність Українському науково-дослідному Інституту природних газів в м. Харкові філії АТ "Укргазвидобування" НАК "Нафтогаз України" за надання ядерного матеріалу, результатів лабораторних досліджень та даних геофізичних досліджень в свердловинах. Особливу подяку висловлюємо співробітнику цього ж інституту С.В. Горяйнову за конструктивні зауваження до початкової версії статті.

Література

1. Баранов В. А. Стадии литогенеза и закономерности уплотнения пород / В. А. Баранов. // *Науковий вісник Дніпропетровського гірничого університету. Геологія.* – 2014. – №2. – С. 35–44.
2. Жуковская Е. А. Влияние вторичных изменений на коллекторские свойства верхнеюрских продуктивных отложений Крапивинского месторождения / Е. А. Жуковская, Г. Г. Кравченко // *Известия Томского Политехнического Университета.* Т. 316. – 2010. – №1. – С. 93–98.
3. Зарицкий А. П., Зарицкий П. В. Зональные особенности нефтегазоаккумуляции Днепровско–Донецкой впадины / А. П. Зарицкий, П. В. Зарицкий // *Вісник Харківського національного університету. Серія геологія – географія – екологія.* – 2013. – № 1084. – С. 71–75.
4. Лукин А. Е. Формации и вторичные изменения каменноугольных отложений Днепровско–Донецкой впадины / А. Е. Лукин. – Москва: Недра, 1977. – 102 с.
5. Лукин А. Е. Литогодинамические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. Киев / А. Е. Лукин. – Киев: Наукова думка, 1997. – 224 с.

6. Лукин А. Е. О генезисе вторичных коллекторов нефти и газа на сверхбольших глубинах / А. Е. Лукин, И. П. Гафич // *Доповіди Національної академії наук України*. – 2016. – №7. – С. 86–94.
7. Макогон В. В. Деякі особливості вторинних теригенних колекторів центральної частини Дніпровсько–Донецької западини / В. В. Макогон // *Мінеральні ресурси України*. – 2017. – №4. – С. 24–28.
8. Маметова Л. Ф. Процеси розчинення і регенерації мінералів в пісковиках вугільних родовищ / Л. Ф. Маметова // *Геотехнічна механіка*. – 2015. – №122. – С. 129–139.
9. Нефтегазоносные коллекторы глубокозалегающих нижнекаменноугольных комплексов центральной части Днепровско–Донецкой впадины / А. Е. Лукин, Н. В. Щукин, О. И. Лукина, Т. М. Пригарина // *Геофизический журнал*. – 2011. – №1. – С. 2–27.
10. Осипова Е. Н. Влияние катагенетических преобразований на коллекторские свойства пласта Ю11 Хвойного нефтяного месторождения / Е. Н. Осипова, А. В. Ежова // *Известия Томского Политехнического университета*. – Т. 317. – 2010. – №1. – С. 105–109.
11. Парагенезисы и история формирования глинистых и титанистых минералов терригенных коллекторов Западной Сибири – основа прогноза зон нефтегазоаккумуляции / [А. Д. Коробов, Л. А. Коробова, А. Т. Колотухин и др.]. // *Известия СГУ*, Т.13. – 2013. – №1. – С. 69–78.
12. Пісковики з аномально низькою буримістю / С. Ф. Поверенний, Р. А. Діц, М. В. Боровик, О. В. Піддубна // *Нафтогазова галузь України*. – 2014. – №3. – С. 23–26.
13. Піщаний колектор горизонту В–25–26 Березівського газоконденсатного родовища за даними вивчення керну / С. Ф. Поверенний, С. В. Кривуля, А. Й. Лур'є, О. В. Піддубна // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. – 2015. – №46. – С. 23–36.
14. Показатели отражения витринита угольной органики осадочной толщи Доно–Днепровского и Переддобрджинского прогибов с установленными палеогеотермическими градиентами и амплитудами вертикальных перемещений тектонических структур: каталог / [сост. Иванова А. В.] – Киев: НАН Украины. Киев, Ин-т геол. наук, 2012. – 100 с.
15. Стрижак В. П. Потенціал глибоких горизонтів східного нафтогазоносного регіону (на прикладі Центральної частини Дніпровсько–Донецької западини) / В. П. Стрижак, Л. І. Стрижак, С. Г. Вакарчук. // *Проблеми нафтогазової промисловості: збірн. наук. праць*. – 2012. – №10. – С. 54–58.
16. Терещенко В.А. Гидродинамическая структура нижнего гидрогеологического этажа Днепровско–Донецкого артезианского бассейна / В. А. Терещенко // *Вестник Харьковского университета. Серия : Рациональное природопользование*. – 1997. – № 306. – С. 48–50.
17. Терещенко В. А. Гидрогеологические условия газоносности Днепровско–Донецкой впадины на больших глубинах / В. А. Терещенко // *Вісник Харківського національного університету. Серія «геологія – географія – екологія»*. – 2008. – № 824 – С. 27–36.
18. Терещенко В. А. Природа аномально високих пластових давлень в Днепровско–Донецкой впадине и подходы к их прогнозированию / В. А. Терещенко // *Вісник Харківського національного університету. Серія «геологія – географія – екологія»*. – 2009. – № (30) 864. – С.103–112.
19. Терещенко В. А. Закономерности традиционного и нетрадиционного газонакопления а аспекте гидрогеологической и катагенетической зональности (на примере Днепровско–Донецкой впадины) / В. А. Терещенко // *Вісник Харківського національного університету. Серія геологія – географія – екологія*. – 2013. – № (39)1084 – С. 119–125.
20. Япаскурт О. В. Стадиальный анализ литогенеза / О. В. Япаскурт. – Москва: Изд-во МГУ, 1995. – 138 с.
21. Япаскурт О. В. Предметаморфические изменения осадочных пород в стратиферее: Процессы и факторы / О. В. Япаскурт. – Москва: ГЕОС, 1999. – 260 с.
22. Siivola J. and Schmid R. List of Mineral Abbreviations. Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07. Режим доступу: <http://www.bgs.ac.uk/scmr/home.html>.
23. Worden, R. H., Burley, S. D. Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone. Sandstone Diagenesis / Eds S. D. Burley and R. H. Worden. Cornwall: Blackwell Publishing Ltd, 2003. – P. 3–44. <https://doi.org/10.1002/9781444304459.ch>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 552.51:551.735.1:553.98(477.5)

Olena Tunik,

PhD Student (Petroleum geology), Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, 90 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine,
e-mail: alyonatunik1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6088-7331>;

Viktor Ohar,

Doctor of Sciences (Geology), Professor, Petroleum Geology Department,
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: ogar_viktor@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7566-3648>

SECONDARY ALTERATIONS OF DEEP BURIED LOWER CARBONIFEROUS TERRIGENOUS ROCKS IN SOME AREAS OF THE DNIEPER-DONETS BASIN

Problematics. Due to the ambiguous understanding of the nature and void space distribution within reservoir rocks, prediction of prospective deep buried and low permeable reservoirs becomes more uncertain. There are many factors influencing on the pore space, such as primary rock composition, hydrogeological regime, tectonic processes, geological time, epigenetic processes etc. Moreover, in explanation of different factors the influence of secondary reservoirs formation, systematization problems become more essential. Either, it is important to identify ‘working’ conditions of influencing factors to make the prediction of hydrocarbon deposits at great depth more certain. Finding universal criteria of prospective secondary reservoir rocks identification will allow us to enhance the discovery rate of deep buried hydrocarbon deposits.

Analysis of previous studies. Many researches were devoted to epigenetic processes in the second part of XXth century. There were described major secondary alterations which may occur at great depth. Recent publications showed the expansion of previous knowledge about epigenetic processes and their influence on the secondary deep buried reservoir formation. Some scientists state that major influencing factors on reservoir quality are tectonic and primary mineral composition, others bring epigenetic imposed processes to the top of influencing factors.

Purpose. The purpose of the research is to study secondary alterations and find possible zonation based on the alteration intensity of Carboniferous (Viséan and Serpukhovian) rocks within Central part of the Dnieper-Donets basin.

Methods. During this research we studied 43 thin sections of Carboniferous sandstones from cores of Central part of the Dnieper-Donets basin, using polarizing microscope. Alteration stage analyses were used for determination of mineral sequence transformations.

Results. Carboniferous (Viséan and Serpukhovian) sandstones discovered by deep wells within Solokhivsko-Dykanskyi and Berezivsko-Kotelevskyi archs in Central part of the Dnieper-Donets depression have been studied. Microscopic studies have shown widespread development of imposed epigenetic alterations in terrigenous rocks. The involvement of laboratory evaluation of porosity and permeability, as well as the values of formation temperatures, allowed us to determine the main trends of secondary processes effect on reservoir properties of rocks. It is shown that the development of secondary microfracturing, kaolinitization and sideritization increases the value of porosity and permeability. Dissolution, regeneration and redeposition of quartz are accompanied by calcitization and lead to the significant decrease of the reservoir properties of terrigenous rocks and formation of secondary epigenetic seals. Sideritization facilitates the development of secondary reservoirs at great depth, meanwhile calcitization leads to decrease of the pore space. Bitumoids and pyrite presence may be the evidence of hydrocarbon migration process. Combination of the research results with thermobaric data retrieved directly from borehole measurements as well as theoretically calculated on Bilske gas condensate field shows that formation of epigenetic seal in the temperature interval of 110-120 °C is caused by quartz dissolution and intensive calcitization of terrigenous rocks. Consequently, secondary reservoir rocks below the epigenetic seal have local spreading caused by microfracturing, sideritization and calcitization. Specific secondary sandy reservoirs of Berezivske gas condensate field are located within 110 and 120 °C isotherm. They occurred in acid environment leading to dissolution of calcite cement and intense sandstone kaolinitization. Such favorable conditions for secondary porosity formation may occur as a result of possible tectonic movements inversion which triggered the development of regressive epigenesis.

Keywords: Dnieper-Donets depression, Lower Carboniferous, sandstones and siltstones, great depth, post-sedimentational alterations, secondary reservoir rocks, secondary seal.

References

1. Baranov, V. A. (2014). Stages of lithogenesis and rock compression behavior. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 22(2), 35-34.
2. Zhukovskaya, Y. A., & Kravchenko, H. H. (2010). Effect of secondary alterations on the filtration capacity properties within Upper Jurassic pay zone of Krapivinskiy field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 316(1), 93-98.
3. Zaritskiy, A. P., & Zaritskiy, P. V. (2013). Zonal peculiarities of oil and gas accumulation within Dnieper-Donets depression. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 39(1084), 71-75.
4. Lukin, A. Y. (1977). *Rock formations and secondary alterations of Carboniferous rocks in the Dnieper-Donets basin*. Moscow: Nedra.
5. Lukin, A. Y. (1997). *Lithogeodynamic triggers of oil and gas accumulation in aulacogen basins*. Kyiv: Naukova Dumka.
6. Lukin, A. E., & Gaphich, I. P. (2016). On the genesis of secondary reservoirs of oil and gas at superdeep depths. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, (7), 86-94. Retrieved from doi.org/10.15407/dopovidi2016.07.086
7. Makogon, V. V. (2017). Some peculiarities of secondary terrigenous reservoirs of the central part of DDB on large depths. *Mineralni resursy Ukrainy*, (4), 24-28.
8. Mametova, L. F. (2015). Processes of mineral dissolution and regeneration in the sandstones of coal deposits. *Geotekhnicheskaya mekhanika*, (122), 129-139.
9. Lukin, A. E., Schukin, N. V., Lukina, O. I., & Prigarina, T. M. (2011). Oil and gas bearing collectors of deep-lying Lower Carboniferous complexes of the central part of the Dnieper-Donets Basin. *Geophysical journal*, (1), 2-27.
10. Osipova, E. N., & Yezhova, A. V. (2010). Catagenetic transformations effect on reservoir properties of Yu11 pay zone of Khvoynoye oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 317(1), 105-109.
11. Korobov, A. D., Korobova, L. A., & Kolotukhin, A. T. (2013). Parageneses and Formation Histories of Clayey and Titanian Minerals from the West Siberian Terrigenous Reservoirs – the basis for Predicting Oil and Gas Accumulation Zones. *Izvestiya of Saratov University*, 13(1), 69-78.
12. Poverennyi, S. F., Dits, R. A., Borovyk, M. V., & Piddubna, O. V. (2014). Sandstones with abnormally low drillability. *Oil and Gas industry of Ukraine*, (3), 23-26.
13. Poverennyi, S. F., Kryvulya, S. V., Lurye, & A. Y., Piddubna, O. V. (2015). Core study of sandstones composing V-24-26 pay zone of Berezivske gas condensate field. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, (46), 23-36.
14. Ivanova, A. V. (2012). *Vitrinite reflectance catalogue of coal organic matter in terrigenous strata of the Dono-Dniprovskaya and Predobrudzhenskaya depressions with established paleogeothermal gradients and vertical travel range of tectonic structures*. Kyiv: NAN Ukrainy. Institut geologicheskikh nauk.
15. Stryzhak, B. P., Stryzhak, L. I., & Vakarchuk, S. H. (2012). Prospects of the deep buried sediments of the eastern oil and gas bearing region (in the case of the central Dnieper-Donets basin). *Problemy naftohazovoyi promyslovosti: zbirnyk naukovykh prats*, (10), 54-58
16. Tereshchenko, V. A. (1997). Hydrodynamic structure of the lower hydrogeologic level of the Dnieper-Donets artesian basin. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Ratsyonalnoie Prirodopolzovaniie"*, (306), 48-50.
17. Tereshchenko, V. A. (2008). The hydrogeological conditions of gas bearing of Dnieper-Donets basin on the great depths. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (824), 27-36.
18. Tereshchenko, V. A. (2009). The nature of abnormal high pressures in Dnieper-Donets depression and point of view to its forecast. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 30 (864), 103-112.
19. Tereshchenko, V. A. (2013). Principles of conventional and unconventional gas accumulations in terms of hydrogeologic and catagenetic zonation (in the case of the Dnieper-Donets depression). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 39 (1084), 119-125.
20. Yapaskurt, O. V. (1995). *Stage-based lithogenesis analysis*. Moscow: Izd-vo MGU
21. Yapaskurt, O. V. (1999). *Premetamorphic sedimentary transformations in the stratosphere: processes and drivers*. Moscow: GEOS
22. Siivola J. and Schmid R. 12. List of Mineral Abbreviations. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07. Access: <http://www.bgs.ac.uk/scmr/home.html>.
23. Worden, R. H., Burley, S. D. *Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone*. Sandstone Diagenesis Cornwall: Blackwell Publishing Ltd, 2003. 3-44. <https://doi.org/10.1002/9781444304459.ch>

Iryna Viktorivna Chushkina,

Senior Lecturer, Department of Civil Engineering, Construction Technologies, and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25 S. Yefremov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: zalomiy80@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1251-6664>;

Dmytro Serhiiovych Pikarenia,

Doctor of Sciences (Geology), Professor, Department of Ecology and Environmental Protection, Dniprovsky State Technical University, 2 Dniprobudivska St., Kamianske, 51900, Ukraine, e-mail: nippel@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0003-1405-7801>;

Olha Viktorivna Orlinska,

Doctor of Sciences (Geology), Professor, Head of the Department of Civil Engineering, Construction Technologies, and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, e-mail: egmsitb@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4670-7787>;

Nataliia Mykolaivna Maksymova,

PhD (Technics), Associate Professor, Department of Ecology, Dnipro State Agrarian and Economic University, e-mail: natalya.maksimova@i.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1684-7479>

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE NPEMFE GEOPHYSICAL METHOD TO SOLVE ENGINEERING AND GEOLOGICAL PROBLEMS

І. В. Чушкіна, Д. С. Пікареня, О. В. Орлінська, Н. М. Максимова. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОФІЗИЧНОГО МЕТОДУ ПІЕМПЗ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ. В наш час діагностування технічного стану гідротехнічних споруд (ГТС), водогосподарського комплексу також як і локалізації ділянок, які потребують першочергового ремонту, є досить актуальними науково-практичними задачами. Багаторічні польові дослідження показали високу ефективність застосування геофізичного методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) для виявлення зон підвищеної фільтрації і порушень в тілі ґрунтових ГТС. Вперше були проведені лабораторні дослідження для аналізу характеру генерації електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в зразках пухких ґрунтів під час їх навантажень, щоб експериментально обґрунтувати можливість використання швидкого і маловитратного (за часом та фінансами) методу ПІЕМПЗ для діагностування технічного стану ґрунтових ГТС водогосподарського призначення. Результати експериментальних досліджень дозволили встановити основні закономірності розвитку коливань ЕМВ в ґрунтовій товщі під час її стиснення та обводнення, що пояснює можливість визначення зон фільтрації та замочування в тілі ґрунтових ГТС. Ефективність застосування геофізичного методу ПІЕМПЗ розглянута на прикладі регулюючого басейна (РБ) Калинівської зрошувальної системи, розташованого в Синельниківському районі Дніпропетровської області. Дослідження технічного стану регулюючого басейну проведено в комплексі з «кількісним» методом вертикального електричного зондування, який доповнив дані зйомки ПІЕМПЗ. Достовірність результатів зйомки підтверджується збіжністю рисунка поля ПІЕМПЗ, отриманого в результаті моніторингу РБ в 2013 р. і 2017 р. Економічна доцільність впровадження не руйнуючого методу для діагностики технічного стану гідротехнічних споруд зрошувальних систем підкреслюється необхідністю покращення еколого-меліоративного стану прилеглих територій.

Ключові слова: метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі, метод вертикального електричного зондування, одометр, пухкі породи, електромагнітне випромінювання, ґрунтові гідротехнічні споруди, діагностика технічного стану

И. В. Чушкіна, Д. С. Пікареня, О. В. Орлінская, Н. Н. Максимова. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ЕИЭМПЗ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ. В настоящее время диагностика технического состояния грунтовых гидротехнических сооружений (ГТС), также как и локализация участков, требующих первоочередного ремонта, и снижение фильтрационных потерь оросительной воды, являются достаточно актуальными научными и практическими задачами. Многолетние полевые исследования показали высокую эффективность применения геофизического метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) для обнаружения зон повышенной фильтрации и нарушения сложения в теле грунтовых ГТС. Впервые были проведены лабораторные исследования для анализа характера генерации электромагнитного излучения (ЭМИ) в образцах рыхлых грунтов при их нагрузке, чтобы экспериментально обосновать возможность использования быстрого и недорогого (с точки зрения времени и финансов) метода ЕИЭМПЗ для диагностики технического состояния грунтовых ГТС сельскохозяйственного назначения. Результаты экспериментальных исследований позволили определить основные закономерности развития колебаний ЭМИ в грунтовой толще при её сжатии и обводнении, что объясняет возможность определения зон фильтрации и обводнения в теле грунтовых ГТС. Эффективность применения геофизического метода ЕИЭМПЗ рассмотрена на примере регулирующего бассейна (РБ) Калиновской оросительной системы (ОС), исследование технического состояния которого было проведено в комплексе с «количественным» методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), дополняющего данные съемки ЕИЭМПЗ. Достоверность результатов съемки методом подтверждается схожестью рисунка поля ЕИЭМПЗ, полученного в результате мониторинга состояния РБ в 2013 и 2017 годах. Экономическая целесообразность внедрения не разрушающих методов для диагностики технического состояния гидротехнических сооружений оросительных систем подчеркивается необходимостью улучшения эколого-мелиоративного состояния прилегающих территорий.

Ключевые слова: метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли, метод вертикального электрического зондирования, одометр, рыхлые породы, электромагнитное излучение, грунтовые гидротехнические сооружения, диагностика технического состояния.

Statement of the problem. Majority of the earth hydroengineering structures (HES) of hydroeconomic purpose were built in the middle of the last century; the structures belong to CC1 structure category. Nowadays, most of those structures are at the end of their resources due to considerable technical wear. That has resulted in deterioration of their technical conditions and decreased level of their safe operation. Almost all old-design hydroengineering structures need maintenance operations. They are impossible to be repaired simultaneously; thus, it is necessary to implement a complex of diagnostic tests to specify the HES requiring priority repair. Currently, technical condition of those structures as well as their meeting the safety requirements are evaluated mostly visually, making it possible to identify only certain sites of damaged plates of face lining and filtration-proof membrane. That also concerns the components of agricultural irrigation networks – retention basins (RB) and principal channels (PC) surrounded by the earth dams. Hidden filtration zones within the dams may be found by using control and measuring equipment or remote sensing methods.

According to the recommendations of normative documents, it is proposed to determine zones of increased filtration within the earth dam body, protective dams, and reservoir beds using a system of geophysical methods including the following ones: vertical electric sounding (VES), microelectric sounding (MES), electric profiling (EP), and method of natural electric fields (NEF) [1].

Unfortunately, those methods are considered to be rather time- and labour-consuming. That highlights the topicality of developing and implementing the innovative methods for complex evaluation of technical condition and detection of hidden filtration zones within the bodies of earth HESs; that will help localize and maintain timely the specified site making it possible to prolong operation period of the object and prevent rise of ground water level within the neighbouring territories.

During the recent 10 years, Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU) and Dniprovsky State Technical University (DSTU) have been applying a method of natural pulse electromagnetic field of Earth (NPEMFE), developed in the 1980s, to determine hidden zones of filtration, watering, and suffusion development within the HES dams [2-6]. Traditionally, that method is used to prospect ore deposits and ground water, to evaluate slides and other phenomena [2, 8-2], and to perform quick examination of HES technical condition; moreover, the technique is of low estimated cost. Its main disadvantages are as follows: lack of theoretical and experimental substantiation and, as a result, impossibility to carve up the section and define the

depth down to the anomaly object. The NIEFF method has been substantiated experimentally for the cases of mineral deposit prospecting as well as solving engineering and geological problems within the crystalline and sedimentary consolidated rock; in terms of man-made loose soils, electromagnetic radiation (EMR) has not been studied yet [7, 11-21, 25].

Analysis of recent studies and publications.

As a rule, generation of electromagnetic radiation was analyzed during deformation of crystalline or consolidated sedimentary rocks as well as artificial building materials. Such issues were considered by Vorobiov, O.A., Salnikov, V.N., Gold, R.M., Bepalko, A.A., Yavorovich, L.V., Salomatin, V.N., Zashchinsky, L.A., Vyshnevsky, N.L., Bulat, A.F., Prykhodchenko, V.L., Soboliev, G.A., Kurlenia, M.V., Yakovytska, G.Ye., Malyshev, S.Yu., Yegorov, P.V., Alekseev, D.V., Kolpakova, L.A., Goncharov, A.I., Trubetsky, K.N., Viktorov, S.D., Osokin, A.A., Shliapin, A.V., Yeremenko, A.A., Shtyrts, V.A., Zang, A., Stenberg, L., Specht, S., Milkereit, C., Schill, E., Kwiatek, G., Dresen, G., Zimmermann, G., Dahm, T., Weber, M., Cornet, F.H., Hagag, W., Obermeyer, H., Naoi, M., Rubinstein, J.L., Mahani, A.B., Sedlak, P., Sikula, J., Lokajicek, T., Mori, Y., Balageas, D., Maldague, X., Burleigh, D., Vavilov, V.P., Oswald-Tranta, B., Roche, J.M., Carlomagno, G.M., Vavilov, V., Świdorski, W., Derusova, D., and others [2,7,10-31].

Papers [28-30] analyzed qualitative contribution of electromagnetic signal intensity with energy properties of solid bodies. It has been defined that the intensity of electromagnetic signal grows along with the increase in mechanical and electric density of solid bodies [11]. Studies [32] proposed the approach based on the measured minor flows within the loaded rocks to determine their integrity.

Studies by Bepalko, A.A. and Yavorovych, L.V. [11] dealing with EMR during dynamic effect of sandstone samples in terms of their different water-saturation and changes in the solution mineralization (Fig.1) are of special interest. When sandstone is held in the distilled water that results in considerable decrease in EMR amplitude comparing with the sample in its initial state. Saturation of distilled water with NaCl is accompanied by the increasing EMR amplitude. In this context, EMR of porous sandstone of different water-saturation degree is proportional to the effecting energy.

Singling out previously unsolved parts of the general problem. Problems concerning the nature of EMR occurrence in loose rock, e.g. argillaceous, loamy, and sandy soils, which usually makes up the HES body of CC1 structure category in terms of irrigation systems, reservoirs, and tailing facilities, have not been studied before.

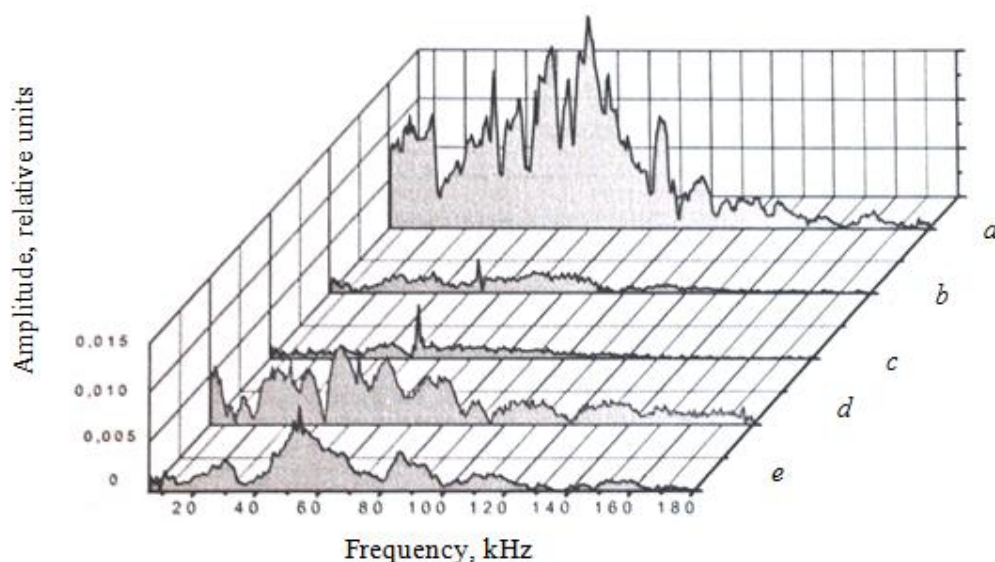


Fig. 1. Amplitude-frequency spectra of electromagnetic signals in terms of acoustic excitation of sandstone samples [11]: *a* – in the initial sample state; *b* – within the samples held in distilled water during 24 hours; *c* – in NaCl water solution with the concentration of 1%; *d* – 2.5%; *e* – 3.75%

Formulation of the paper objective. Objective is to substantiate experimentally application of the NPEMFE method within the man-made ground and evaluate its possibility for determining hidden filtration zones in terms of agricultural HES.

Description of the research methodology (structure, sequence). To analyze interaction between the changes in electromagnetic radiation (EMR) amplitude occurring within the man-made earth dams of retention basins during their filling-emptying, a series of experiments has been carried out involving compression of man-made ground samples on the odometer within simultaneous record of density of EMR pulse flow being generated during the loading.

Physical characteristics of soils (humidity, density and solid phase, porosity and porosity coefficient) were determined according to standard methodologies [33].

During the first series of experiments, loading values of ground samples on the odometer were selected basing upon the real loads in the retention basin filled with water completely up to the level of 4.2 m. According to the calculations, water pressure is 42.2 kPa; taking into consideration pressure of concrete plates, overall loading value is specified as 45.3 kPa.

Second series of experiments meant studies in terms of RB emptying before winter time. When water was discharged from the basin, 0.4-0.5 m layer of water was left in the basin forming pressure of 5.3 kPa along with the plates. Those experiments were carried out to study EMR level during relaxation of natural soils.

The experiments have resulted in the construction of graphs of dependences of EMR pulse flows

upon the loading degree of the ground samples. To validate the NPEMFE method application, monitoring studies have been performed in terms of retention basin of Kalynivska irrigation system (IS) in 2013 and 2017. To determine the ground water level (GWL), method of vertical electric sounding was applied along with the NPEMFE method.

Statement of the basic research material. Retention basins and bund walls are built from the native ground represented by loessoid varieties. According to the majority of inter-regional water economy authorities, the dams are constructed using heavy clay loams or sand loams. Ground samples taken from the dams and near basins belong to clay loams and sandy loams. Basing on the proper studies by the picnometer method, average density of sandy loam soil is 2.74 g/cm^3 ; in terms of plasticity and flow values, they belong to plastic varieties ($I_p = 1.8-2.5$; $I_L = 0.5$); as for granulometric composition, they belong to dusty soils as they are characterized by following granulometric composition (in terms of fraction fineness mass): 0.5-1 mm – 0.07 %; 0.25-0.5 mm – 0.61 %; 0.1-0.25 mm – 61.25 %; >0.1 mm – 38.07 %. Average natural moisture is 8.63 %.

Density of the clay soil particles is 2.75 g/cm^3 ; in terms of plasticity and flow value, they belong to light ($I_p = 17,51-18,32$), solid ($I_L = -(0.23-0.18)$) type; content of sandy particles is 0.02 % which also indicates some varieties [36]. Natural moisture of clays is 19.3 %.

Table 1 represents results of compression tests on the odometer.

Along with the compression studies, pulses of electromagnetic radiation were registered according to the scheme represented in Fig. 2.

Let's consider the results of the effect of soil compression upon the changes in pulse electromagnetic radiation. Figures 3-11 show compression curves $\varepsilon = f(t)$ combined with the density of EMR pulse flow (pulse/second). Periods of EMR rise and drop during the experimental studies are marked with red straight lines, which coincide conditionally with the results of EMR curve smoothing by means of polynomial approximation. Curves of the trend represented in blue are constructed with the help of Microsoft Excel; they are described by the sextic

equation.

Thus, in terms of maximum loads (45.58 kPa) corresponding to the conditions of a water-filled retention basin, wavelike alternation of ranges of EMR pulse numbers with their repeated excitation has been obtained (Fig. 3-5). That is traced properly beginning from 1320 s since the start of experiment #1 (Fig. 3), from 1380 s – for the experiment #2 (Fig. 4), and in terms of the experiment #3 – from 1200 s since the third loading stage or from 4680 s since the beginning of the study (Fig. 5).

Table 1

Initial data and experimental results

Experiment number	Maximum pressure, kPa (number of loading degree)	Soil type (backfilling height, mm)	Soil density before compression, g/cm ³	Soil density after compression, g/cm ³	Relative compression	Loading period, s (hour)
1	45.58 (1)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.61	1.99	0.015	2700 (0.75)
2	45.58 (1)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.64	2.06	0.087	2820 (0.78)
3	45.58 (3 degrees: 16.3, 16.3, 13.0 kPa)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.64	2.04	0.073	5460 (1.5)
4	5.3 (1)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.68	2.34	0.038	2520 (0.7)
5	5.3 (1)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.64	1.95	0.041	2580 (0.72)
6	5.3 (1 degree)	sandy loam with natural moisture (24 mm)	1.69	2.01	0.015	2827 (0.79)
7	5.3 (1)	sandy loam with additional moistening (9 mm)	1.65	1.99	0.0129	2760 (0.77)
8	5.3 (1)	sandy loam with additional moistening (12 mm)	1.61	1.93	0.0199	2760 (0.77)
9	5.3 (2 degrees.65 kPa)	clay with natural moisture (24 mm)	1.65	1.96	0.011	120360 (33.43)
10	5.3 (4 × 1.325)	clay with natural moisture (24 mm)	1.71	2.38	0.025	533100 (148.08)

Note: additional moistening of sandy loams was applied to simulate watering process in case of filtration from the retention basin.

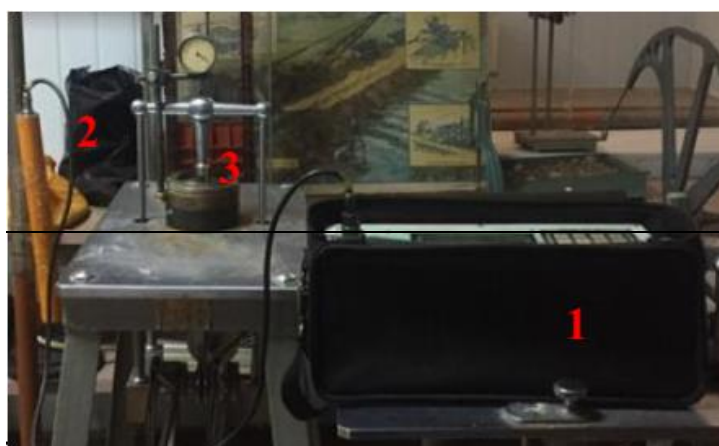


Fig. 2. Appearance of «МІЕМП-14/4» device 4 (1) with receiving antenna (2) during simultaneous EMR recording and loading of clay loam and sandy loam samples on the odometer (3)

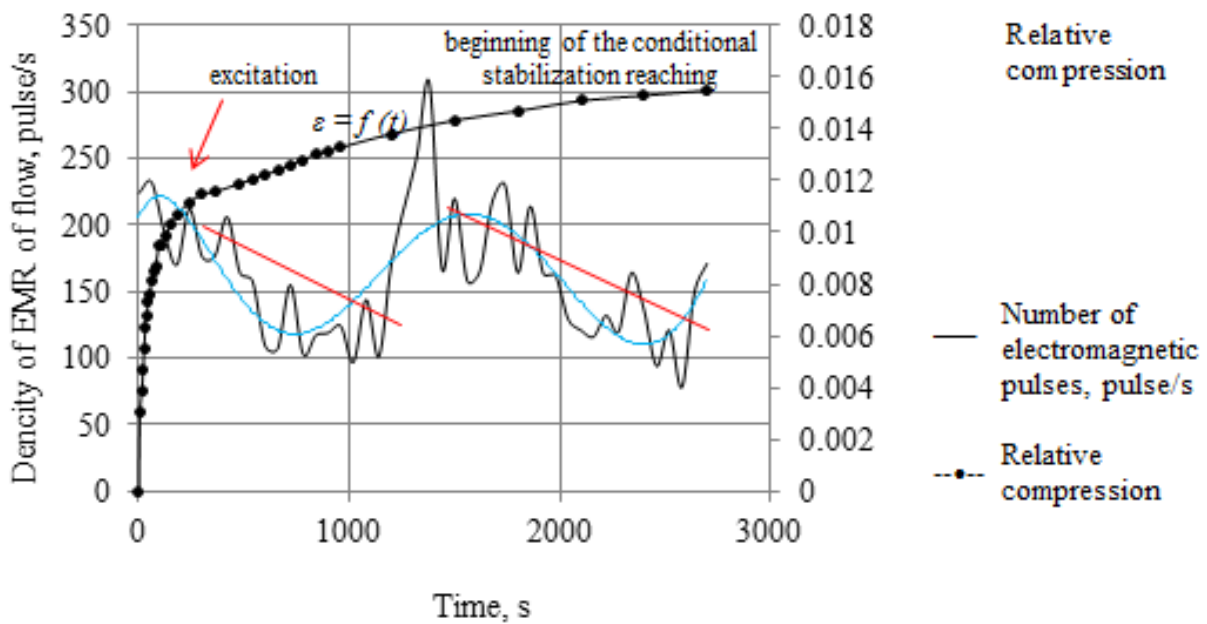


Fig. 3. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #1)

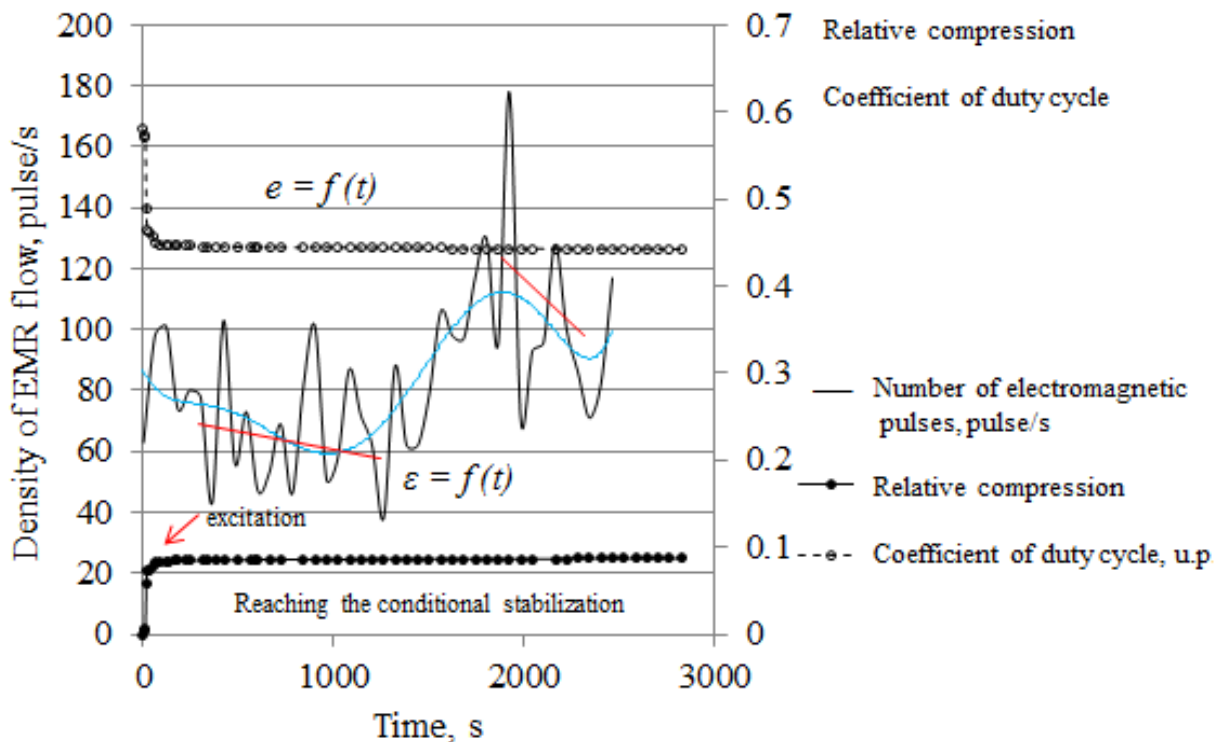


Fig. 4. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #2)

Probably, first peak of the density of EMR pulse flow is stipulated by the closing of gaps and cavities in the soil sample in terms of loading increase. It is most likely that the drop of EMR curve is determined by the decrease in acoustic emission, which transfers partially into EMR. EMR growth (second maximum) may be connected with the deformation of crystals of argillaceous materials characterized by minor piezo-effect with following re-orientation of crystals and their fragments into the plane perpendicular to the pressure (descending branch of graphs after the second maximum).

Further experiments were carried out with the decreased pressure (down to 5.3 kPa); that corresponds to the conditions of a retention basin, which is not completely emptied (Fig.6-8).

Fig. 9 and 10 show EMR generation during artificial additional moistening of sandy loam samples up to 24.7-25.4 % during the experiment in terms of the emptied retention basin; that simulates processes of watering due to filtration. It is clear that EMR curve has one excitation type at the beginning of compression; then, it experiences dramatic fall demonstrating flat lines. In this context, it should be

noted that the more moistened the soil is, the more straight the line is (Fig.10). That is very important observation since it demonstrates that in terms of sandy loam watering, there is the absorption of EMR pulses being the basis to specify zones of watering and filtration with the help of the NPEMFE method.

Fig. 11 shows the nature of EMR changes during the argillaceous soil loading. In this context, EMR excitation in terms of the compression stabilization of a sample is observed.

Results of compressive studies have shown that the increased EMR values correspond to the maxi-

mally stressed state of the man-made ground and vice versa – their drop is peculiar for relaxation of the soil samples. Thus, extremes of the amplitude of EMR oscillation are recorded at the beginning of the compression experiments during the most intensive sample compression. The peak excitation is followed by slight “drop” in the pulse number with its further slow rising. That is stipulated by the decreased intensity in the process of soil compression. In terms of the watered soils, amplitude of EMR oscillation is insignificant owing to the moisture redistribution (experiments #7, 8).

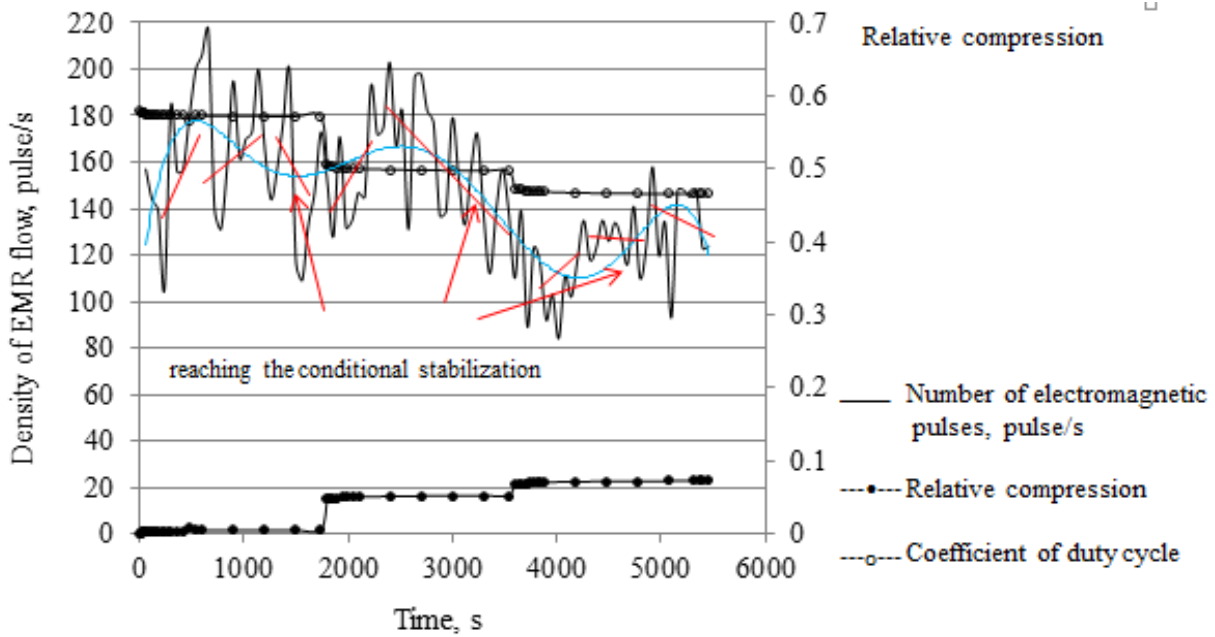


Fig. 5. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #3)

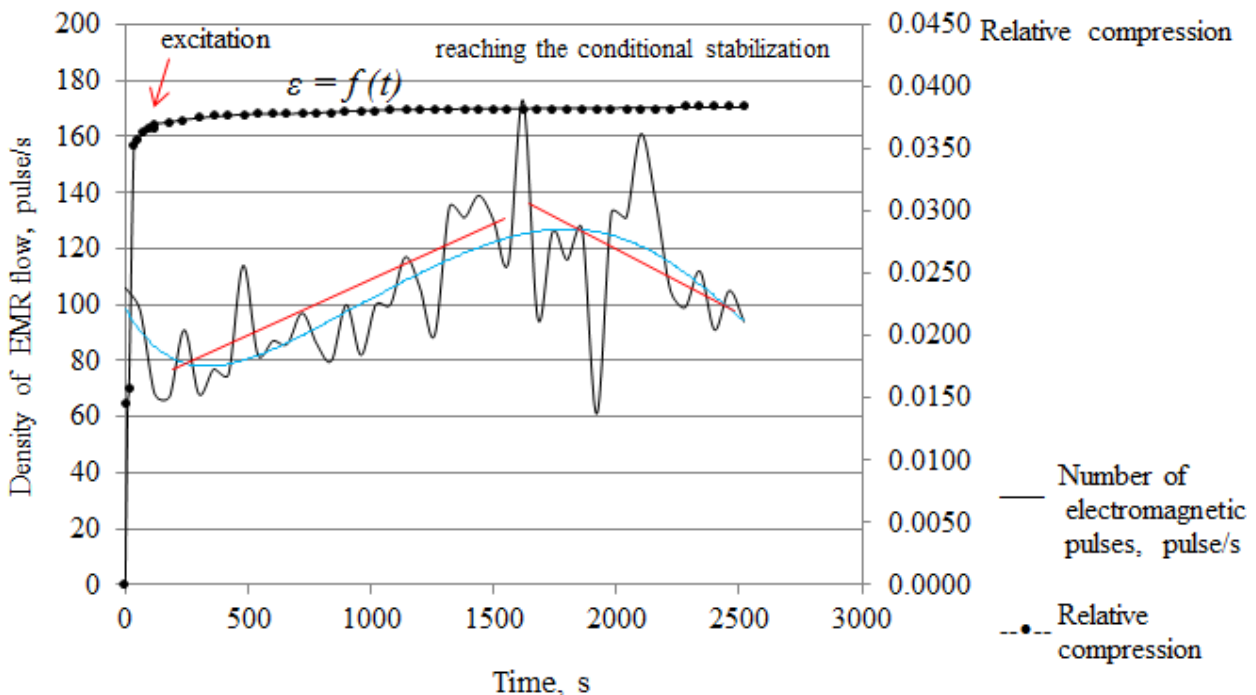


Fig. 6. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #4)

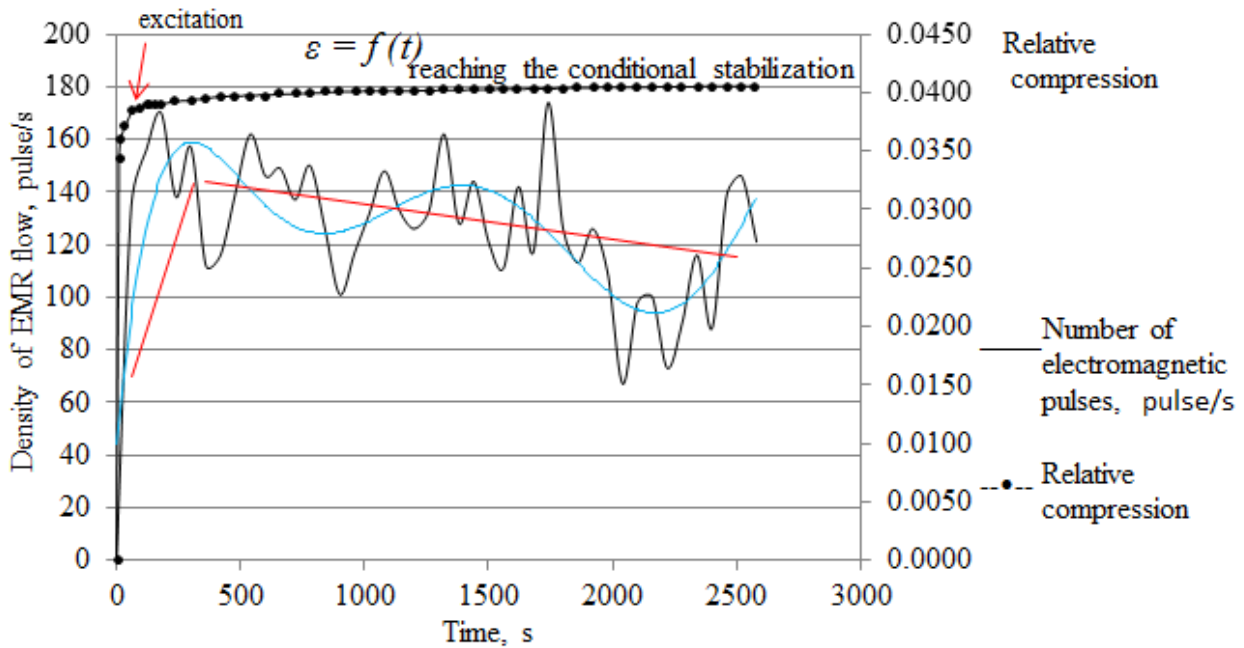


Fig. 7. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #5)

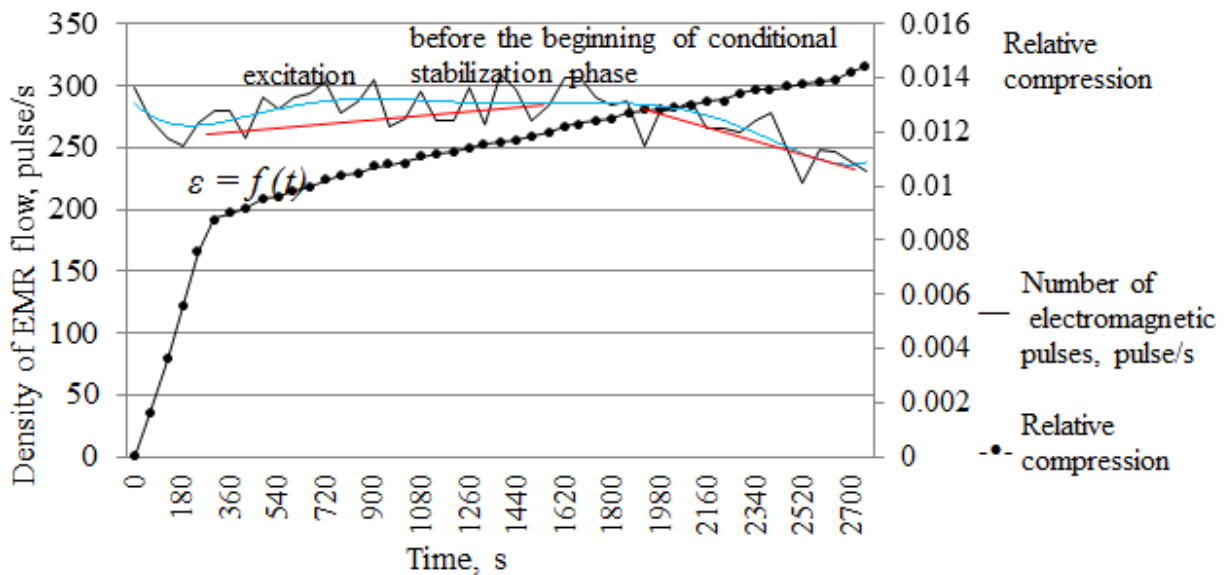


Fig. 8. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #6)

Laboratory studies of the uniaxial compression of argillaceous soils on the odometer have helped determine the following.

1. Increasing pressure on the sample results in the development of electromagnetic signal similar in its characteristics to the signal received in terms of the loading, which effect the samples of crystalline and consolidated sedimentary rock.

2. For the first time, as a result of analysis of compression of sandy loam and clay samples on the odometer, it has been determined that increasing stress-strain state of the soils provoke gradual rise of the electromagnetic radiation amplitude (it is observed at the beginning of every loading stage).

3. Availability of electromagnetic radiation during the transfer of uniaxial loading on the argilla-

ceous soil sample may be explained by the decrease in its porosity and occurrence of acoustic signal during the closing of pores, being characteristic for experiments # 4-10, taking into consideration transferred pressure $p = 5.3 \text{ kPa}$ onto the argillaceous soil samples, and at the beginning of experiments # 1-3, if $p = 45.58 \text{ kPa}$.

4. It is proved experimentally that in terms of man-made ground moistening, EMR amplitude experience its decrease.

Thus, the specified regularities make it possible to substantiate experimentally possible application of the NPMEFE method to detect technical condition of the retention basins and principal channels by localizing zones of loosening and watering of the HES body; those zones are characterized by low

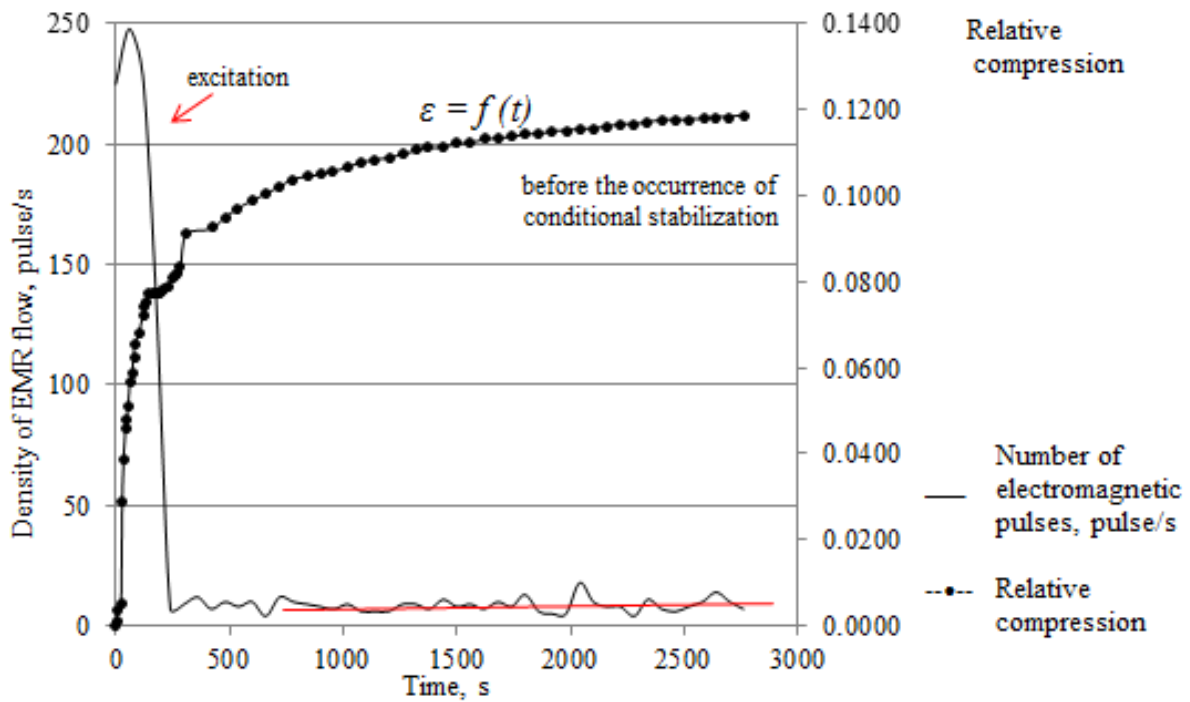


Fig. 9. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #7), artificial moistening is 24.7 %

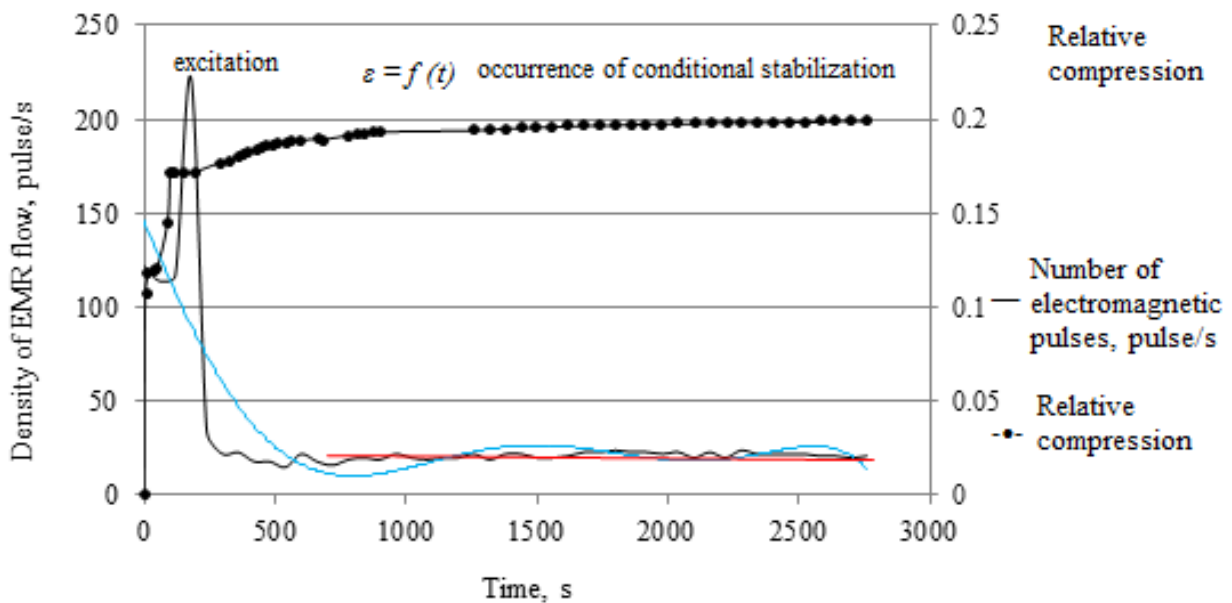


Fig. 10. Graph of EMR dependence upon sandy loam loading (Experiment #8), artificial moistening is 25.4 %

EMR values. Results of technical evaluation of the earth HESs, including agricultural ones, – 10 retention basins and 2 irrigation channels, are represented in detail in papers by the authors [2-6].

Consider the results of detecting hidden filtration zones within the HES body in terms of retention basin ПБ-1 of Kalynivska irrigation system located in Sinelnikovo district of Dnipropetrovsk Region.

To validate the data obtained using the NPEMFE method, in spring 2013 and autumn 2017 technical conditions of RB of Kalynivska irrigation system were monitored in terms of its two states:

before its filling with water and in when it was water-filled.

According to the data of field studies using *Golden Software Surfer 8* computer product, schematic maps of the density of pulse flow of the NIEFF magnetic component have been built (Fig. 12). The maps demonstrated the repeated nature of the results of field studies of 2013 and 2017. Interpretation of the field study results is based on the effect of intense absorption of the NPEMFE pulses by the considerably moistened rock or building materials.

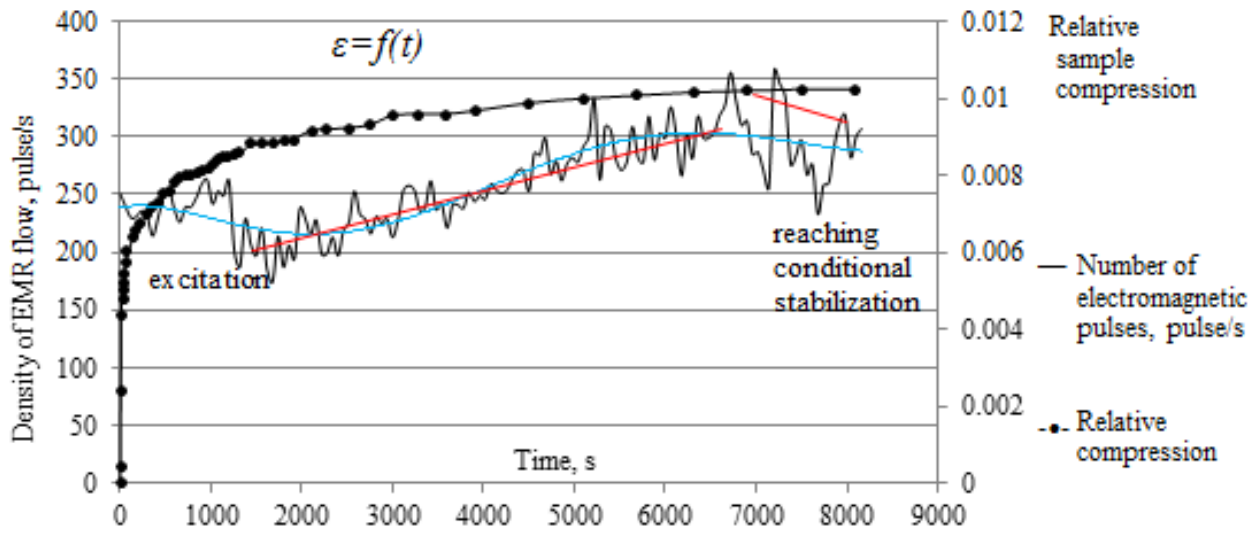


Fig. 11. Graph of EMR dependence upon clay loading (Experiment #9)

In terms of the schemes, sites of the decreased values of density of pulse flow of the NPEMFE magnetic component (red and yellow colours) correspond to the zones of EMR absorption; they are diagnosed as the sites of watering and filtration. Shape of isolines and general image of the NPEMFE field make it possible to highlight anomalies of low values as well as to determine their dimensions. The NPEMFE method is a “quantitative” one; thus, while interpreting the image, fields lie relative to the value – increasing or decreasing in the pulse number

within certain period of time.

In 2013, according to the results of field studies, certain sites of filtration and watering were singled out within the western side and within the joint zone of western and southern sides. Total length of the sites is 46 m. According to the VES data, ground water level (GWL) right under the sides was at the depth of 7.5 m; at the distance of 20 m, the depth was 13.0 m (Fig.13). According to the formula by V.V. Vedernikov, filtration losses were 86.02 m³/day [37].

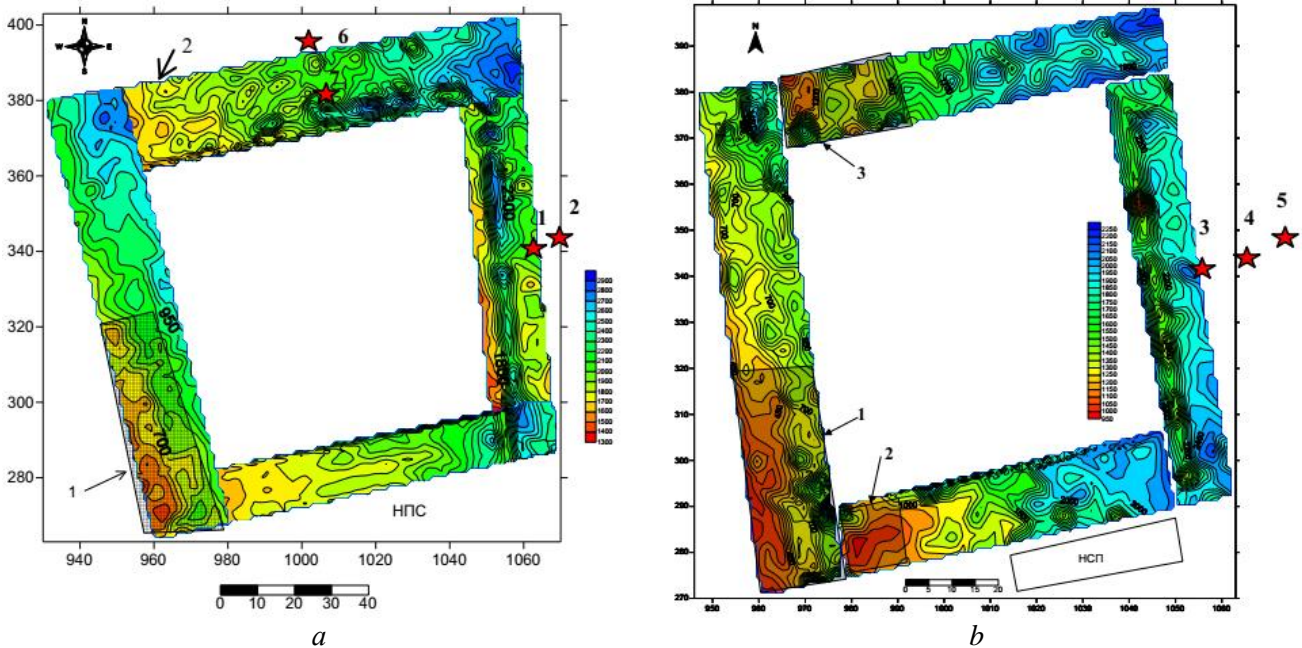


Fig. 12. Schematic maps of the density of pulse flow of magnetic component of the NPEMFE within the retention basin of Kalynivska irrigation system during different years of observation: a – 2013; b – 2017; 1, 2, 3 – filtration sites; НПС – boosting pump station. Crosshatching – zones of pulse absorption and their numbers. Stars – VES points. Coloured scale characterizes density of the magnetic component flow, in pulse/sec. Basin is filled. Coordinate system is conditional, metric

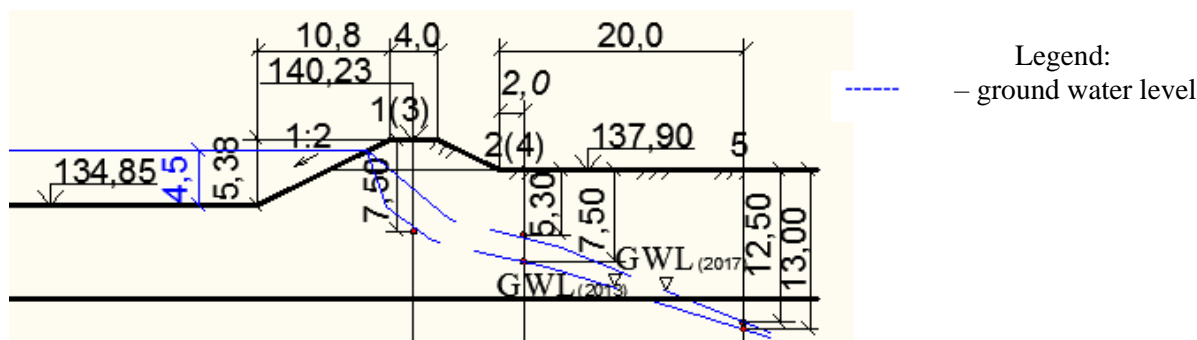


Fig. 13. Comparison of the ground water level according to the surveying data in 2013 and 2017

In autumn 2017, technical state of RB of Kalynivska irrigation system was monitored involving the same complex of geophysical diagnostic methods – NPEMFE and VES. The same zones of filtration and watering were singled out on the maps of the density of the NPEMFE magnetic component flow. However, according to the results of field surveying in 2017, increase in the length of filtration zones due to improper technical condition of RB western side has been defined. Within the southern side, length of filtration zones has increased by 42 m; value of filtration losses is 161.4 m³/day or 4842 m³/month. When five-month irrigation period is completed, financial losses will be UAH 96.84 thous. taking into account average cost of irrigation water being 4 UAH/m³. Geophysical operations in terms of the retention basin of Kalynivska irrigation system cost UAH 17.0 thous. being by 5.7 times lower comparing to the monetary equivalent of the lost irrigation water.

GWL rise by 0.5 m within the territory neighbouring the basin within the period of 2013-2017 can be explained by the studies carried out during different seasons. Deterioration of RB technical state within the period of 4 years makes it possible to assume that redistribution of filtration water around the basin took place during the irrigation interval in 2013; due to that fact, GWL rose from 13.0 m to 12.5 m at the distance of 20 m from the RB.

Thus, singling out of filtration zones in terms of HES earth dams involving the NPEMFE method is rather expedient both practically and economically, which is proved by the corresponding work order by the Regional Office of Water Resources of Dnipropetrovsk Region.

Conclusions. Results of the laboratory com-

pression and field monitoring studies have proved the possibility of applying geophysical electric surveying method of natural pulse electromagnetic field of Earth (NPEMFE) to localize the water filtration sites and broken state of earth dams of agricultural HESs.

According to the results of compressive studies, it has been demonstrated that the increase in stressed state of sandy loam and argillaceous soils corresponds to gradual rise of electromagnetic radiation amplitude, and its drop is characteristic for soil relaxation after the loading removal. In terms of retention basins, that may be interpreted as the increasing action of loading on the soil, when the basin is water-filled; as for the loading decrease that occurs in terms of basin emptying.

Possibility to detect the zones of EMR absorption using the NPEMFE method along with the VES technique allows both determining filtration zones and ground water levels and evaluating nonproductive water losses from the earth HESs of the irrigation systems. It should be noted that the first method is a “qualitative” one, i.e. it helps localize the sites of broken technical state of the earth HESs, which are not found visually. Efficiency of the use of quick and low-cost NPEMFE method is proved by high frequency of the results of technical state monitoring of the retention basin in 2013 and 2017.

Within more than 10 years of observations of technical state of the earth HTSs of CC1 structure category, the authors have emphasized following regularity [3-6]: almost all the retention basins are characterized by sufficient state of the bottom; zones of excessive moistening and filtration within the bottom areas of the basins have not been recorded, which is possible to be explained by colmation of fissures with sludge deposits.

References

1. Методика проведення натурних обстежень земляних гребель і захисних дам водогосподарського призначення. Посібник до ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000 «Регулювання русел річок. Норми проектування». Затверджено: наказом директора ІГіМ УААН за № 79 від 6 травня 2005 р. Київ: Інститут гідротехніки і меліорації УААН, 2003. 36 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/2809/1/nd121%20zah.pdf> (дата звернення: 23.02.2019).
2. Пикареня, Д.С. Опыт применения метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) для решения инженерно-геологических и геологических задач / Д.С. Пикареня, О.В. Орлинская.

Днепропетровск: СВИДЛЕР, 2009. – 120 с.

3. Орлінська, О.В. Моніторинг технічного стану регулюючого басейну Калинівської зрошувальної системи геофізичними методами/ О.В. Орлінська, І.В. Чушкіна, Д.С. Пікарєня. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Природа для води», присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів], (Київ, 22 березня 2018 р.) / Інститут водних проблем і меліорації. – К: Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2018. – С. 204-205.
4. Орлінська, О.В. 2015 Технічний стан гідротехнічних споруд Дніпропетровської області / О.В. Орлінська, І.В. Чушкіна, І.В. П'ятницька, Д.С. Пікарєня. Вісн. Нац. ун-ту водного гос-ва та природокористування. – Вип. 3 (71). Ч. 1. Техн. науки. Рівне: НУВГтаПК. – С. 143-150.
5. Орлінська, О.В. 2012. Оцінка міцностних властивостей ґрунтових дамб методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі / О.В. Орлінська, Д.С. Пікарєня, Н.М. Максимова, Г.В. Гапич, В.М. Іценко. Зб. наук. праць НГУ. – № 37. – С. 17–23.
6. Пікарєня, Д.С. Выявление зон фильтрации воды из оросительных систем геофизическим методом / Д.С. Пікарєня, О.В. Орлинская, Н.Н. Максимова, Г.В. Гапич, И.В. Чушкіна, В.Г. Наконечный. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Геосистемный подход к изучению природной среды Республики Казахстан»], (Республика Казахстан, Астана, 13-14 апреля 2018 г.). Т. 2. Астана: Евразийский нац. ун-т им. Л.Н. Гумилева, 2018. – С. 26-30.
7. Воробьев, А.А. Механоэлектрические явления преобразования энергии при пластической деформации твердых тел. Томск: ТПИ, 1977. – 92 с.
8. Чебан, В.Д. Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Деякі аспекти застосування // Геофизический журнал – 2001. – Том 23, № 4. – С. 112-121.
9. Кузьменко, Э.Д. 2002. Об использовании некоторых электрических параметров при прогнозе оползневых явлений / Э.Д. Кузьменко, Е.П. Вдовина, В.Д. Чебан. Наук. вісн. НГАУ. – № 4. – С. 89–91.
10. Саломатин, В.Н. Многолетний опыт применения метода ЕИЭМПЗ при решении комплекса задач в Украине / В. Н. Саломатин. Сборник трудов Междунар. научн. конф. [«Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. А.А. Воробьева], (Томск, 14–16 сентября 2009 г.) / Томский политехн. ун-т. Т.2. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – С. 384–391.
11. Беспалько, А.А. Физическое моделирование механоэлектрических преобразований в образцах горных пород / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович. Становление и развитие научных исследований в высшей школе: сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева, Томск, 14-16 сентября 2009 г. / Российская академия наук (РАН); Ассоциация инженерного образования России (АИОР); Томский политехнический университет (ТПУ). 2009. – Т. 2. – С. 306-313.
12. Яковичина, Г.Е. Разработка метода и измерительных средств диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук; специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Новосибирск: Институт горного дела Сибирского отделения Российской Академии наук, 2007. – 45 с.
13. Беспалько, А.А. Физические основы и реализация метода электромагнитной эмиссии для мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13 / Беспалько Анатолий Алексеевич. Томск, 2019. – 395 с.
14. Яворович, Л.В. Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Яворович Людмила Васильевна. Томск, 2005. 190 с.
15. Sedlak, P. Acoustic and electromagnetic emission as a tool for crack localization / P. Sedlak, J. Sikula, T. Lokajicek, Y. Mori. Meas. Sci. Technol. – Vol.19, №4. – С. 1-7. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/4/045701>.
16. Трубецкой, К.Н. Прогноз горных ударов на основе контроля эмиссии субмикронных частиц при деформировании и разрушении горных пород/ К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов, А.А. Осокин, А.В. Шляпин. Горный журнал, 2017. – №6. – С. 16-20.
17. Naoi, M. Et al. Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, Tectonophysics, 2015. – V. 649. – P. 100–114.
18. Vavilov, V. Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites / V. Vavilov, W. Świdorski, D. Derusova. Quantitative InfraRed Thermography Journal. – V.12, № 2. – P. 162–172.
19. Беспалько, А.А. Электромагнитная эмиссия горных пород после взрывов/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, А.А. Еременко, В.А. Штирц. ФТПРПИ, 2018. – №2. – С. 10-18.
20. Cornet, F.H. Seismic and aseismic motions generated by fluid injections, Geomech. Energy Environ., 2016. – V. 5. – P. 42–54.
21. Balageas, D. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection / D. Balageas, X. Maldague, D. Burleigh, V.P. Vavilov, B. Oswald-Tranta, J.M. Roche, G.M. Carlomagno. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016. – Vol.35, № 1. – P. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0331-7>
22. Hagag, W. & Obermeyer, H. Detection of active faults using EMR Technique and Cerescope at Landau area in central Upper Rhine Graben, SW Germany, J. Appl. Geophys., 2016. – V. 124. – P. 117–129.
23. Zang, A. Hydraulic fracture monitoring in hard rock at 410 m depth with an advanced fluid-injection protocol and extensive sense or array / O. Stephansson, L. Stenberg, K. Plenkers, S. Specht, C. Milkereit, E. Schill, G. Kwiatek, G.

- Dresen, G. Zimmermann, T. Dahm, M. Weber. *Geophys. J. Int.*, 2017. – V. 208. – P. 790–813. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw430>
24. Rubinstein, J.L. & Mahani, A.B. Myths and Facts on waste water injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity, *Seismol. Res. Lett.*, 2015. – V. 86(4). – P. 1060–1067.
25. Зайцев, В.Ю. Детектирование акустических импульсов в речном песке. *Эксперимент* / В.Ю. Зайцев, А.Б. Колпаков, В.Е. Назаров. *Акустический журнал*, 1999. – Том 45, № 2. – С. 235-241.
26. Бессмертный А.Ф., Соломатин В.Н. Решение инженерно-геологических задач на основании результатов наблюдений естественного импульсного электромагнитного поля Земли. *Геофиз. журн.* 1999. – Вып. 21. – № 1. – С. 119-126.
27. Долгий М.Е. Исследование естественного электромагнитного поля Земли / М.Е. Долгий, С.Г. Катаев // *Вестник Томского государственного университета*, 2015. – Выпуск 2 (34). – С. 61-70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-estestvennogo-impulsnogo-elektromagnitnogo-polya-zemli> (дата звернення: 02.03.2019).
28. Беспалько А.А. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Е.В. Вишман, П.И. Федотов // *Геодинамика*. 2008. – № 1(7). – С. 54-60.
29. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Колесникова С.И. и др. Исследование изменений характеристик электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского рудника. *Изв. вузов. Физика*. 2011. – № 1/2. – С. 78-84.
30. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / Г.Е. Яковицкая. Новосибирск: Параллель, 2008. – 315 с.
31. Яковишина Г.Е. Разработка метода и измерительных средств диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии: автореф. ... докт. техн. наук: 25.00.20. Новосибирск: Институт горного дела Сибирского отделения Российской Академии наук, 2007. – 45 с.
32. Aydin A. Observation of pressure stimulated voltage in rocks us in gan electric potential sensor / Aydin A., R.J. Prance, H. Prance, C.J. Harland // *Applied Physics Letters*, 2009. – V. 95. – Is. 12. <https://doi.org/10.1063/1.3236774>
33. ДСТУ Б В.2.1-17:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. [на заміну ГОСТ 5180-84; чинний з 01.10.2010] Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 36 с.
34. ДСТУ Б В.2.1-4-96 Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності (ГОСТ 12248-96). [на заміну ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85; Чинний від 01.04.1997] Вид. офіц. К.: Мінбуд України, 1996. – 102 с. URL: http://libgost.ru/gost/7069-GOST_12248_96.html (дата звернення: 18.08.2018).
35. Рубан С.А., Шинкаревський М.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України: монографія. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.
36. ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95) Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Класифікація [на заміну ГОСТ 25100-82; чинний від 01.04.1997]. Затверджено: Держкоммістобудування України, наказ від 01.11.1996р. №189. URL: http://geo-ingeo.narod.ru/olderfiles/1/DSTU_B_V.2.1-2-96_Grunty_Klassifikaciya.pdf (дата звернення: 12.05.2019).
37. Железняков, Г.В. Гидротехнические сооружения (Справочник проектировщика) / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибадзаде, П.Л. Иванов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work.

UDC 631.672.3:627.826

Iryna Chushkina,

Senior Lecturer, Department of Civil Engineering, Construction Technologies, and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25 S. Yefremov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: zalomiy80@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1251-6664>;

Dmytro Pikarenia,

Doctor of Sciences (Geology), Professor, Department of Ecology and Environmental Protection, Dniprovsky State Technical University, 2 Dniprobudivska St., Kamianske, 51900, Ukraine, e-mail: nippel@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0003-1405-7801>;

Olha Orlinska,

Doctor of Sciences (Geology), Professor, Head of the Department of Civil Engineering, Construction Technologies, and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, e-mail: egmsitb@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4670-7787>;

Nataliia Maksymova,

PhD (Technics), Associate Professor, Department of Ecology, Dnipro State Agrarian and Economic University, e-mail: natalya.maksimova@i.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1684-7479>

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE NPEMFE GEOPHYSICAL METHOD TO SOLVE ENGINEERING AND GEOLOGICAL PROBLEMS

Topicality. Preservation and increasing of soil fertility is the essential problem for the agricultural melioration. It was solved in the most intensive way during the period of 1960s-1980s within the framework of “Large-scale program of the melioration development”. Poor technical condition of the internal economic network of Dnipropetrovsk Region is peculiar for more than 136 thous. ha being 68.6 % of the irrigation land area. That results in considerable filtration losses, which stipulates both increased prime cost of the irrigation water and deterioration of environmental and melioration conditions of the neighbouring territories. For a long time, reconstruction of the irrigation system has not been financed properly. Implementation of the measures aimed at restoration and development of irrigation is one of the priorities of the Agreement on the Association between Ukraine and the European Union.

Nowadays, much attention is paid to diagnostics of technical state of hydroengineering structures (HES) in melioration systems of CC1 structure category (especially, to the retention basins of irrigation systems) involving non-destructive instrumental methods.

According to the recommendations of normative documents, it is proposed to determine the zones of increased filtration within the earth dam body, protective dams, and reservoir beds using a system of geophysical methods including the following ones: vertical electric sounding (VES), microelectric sounding (MES), electric profiling (EP), and method of natural electric fields (NEF).

Unfortunately, the mentioned methods are often rather cost- and labour-consuming ones. That emphasizes the topicality of developing and implementing the innovative methods for complex evaluation of technical condition and detection of hidden filtration zones within the bodies of earth HESs. That will help localize and maintain timely the identified site making it possible to prolong operation period of the object and prevent rise of ground water level within the neighbouring territories.

Objective of the paper is experimental substantiation of the efficiency of using labour- and time-saving geophysical NPEMFE method to detect filtration and watering zones, being undetected visually, within the hydroengineering structures of melioration systems to improve their operational qualities, reduce their maintenance cost, and prevent deterioration of environmental and melioration conditions of the neighbouring territories.

Research methodology. The following conventional methods were applied during the scientific and engineering survey activities: field – geophysical research methods NPEMFE and VES to determine filtration zones, which were not detected visually; experimental – involving odometer of standard modification to detect electromagnetic radiation during the loading of loose argillaceous soil samples; laboratory - standard techniques to specify physical and mechanical properties of soils before and after their compressive studies; computational-analytic – to determine dimensions of filtration water losses from the basin. Golden Software Surfer 8 and AutoCad 10 programme complexes were applied to process the obtained results.

Scientific novelty of the research results. For the first time, it has been proved experimentally that electromagnetic radiation increases when loaded with loose argillaceous samples and decreases when the samples are moist. That makes it possible to apply the NPEMFE method to identify visually non-detected filtration zones within the body of hydroengineering structures of melioration systems.

Practical value of the research: possibility to use time- and labour-saving NPEMFE method to identify visually non-detected zones of filtration and watering within the body of hydroengineering structures in melioration systems of CC1 structure category has been substantiated experimentally.

Keywords: method of natural pulse electromagnetic field of Earth, method of vertical electric sounding, odometer, loose rocks, electromagnetic pulses, earth hydroengineering structures, diagnostics of technical condition.

References

1. *Metodyka provedennya naturnykh obstezhen' zemlyanykh hrebel' i zakhysnykh damb vodohospodars'koho pryznachennya. Posibnyk do VBN V.2.4-33-2.3-03-2000 «Rehulyuvannya rusel richok. Normy proektuvannya».* [Methodology to perform field examination of earth dams and protective dams of hydroeconomic purpose. Manual for BCS B.2.4-33-2.3-03-2000 "River correction. Design standards"]. (2003). Kyiv: Institute of Hydroengineering and Melioration of the UAAS, 36. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/2809/1/nd121%20zah.pdf>.
2. Pikarenia, D.S., Orlinskaia, O.V. (2009). *Opyt primeneniia metoda yestestvennogo impul'snogo elektromagnitnogo polia Zemli (YEIEMPZ) dlya resheniia inzhenerno-geologicheskikh i geologicheskikh zadach* [Practice of applying the method of natural pulse electromagnetic field of Earth (NPEMFE) to solve engineering and geological problems]. Dnepropetrovsk, Ukraine: SVIDLER, 120.
3. Orlinska, O. V., Chushkina, I. V., Pikarenia, D. S. (2018). *Monitorinh tekhnichnoho stanu rehulyuyuchoho baseynu Kalynivskoyi zroshuval'noyi systemy heofizychnymy metodamy* [Monitoring of technical state of the retention basin of Kalynivska irrigation system involving geophysical methods]. *Proceedings from mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Pryroda dlya vody» – The International scientific and practical conference “Nature for Water”*. (pp. 204-205). Kyiv: Institute of Water Problems and Melioration of the NASU [in Ukrainian].
4. Orlinska, O. V., Chushkina, I. V., Piiatnytsia I. V. & Pikarenia D. S. (2015). *Tekhnichnyy stan hidrotekhnichnykh sporud Dnipropetrovskoyi oblasti* [Technical state of hydroengineering structures of Dnipropetrovsk Region]. *Newsletter of the National University of Water and Environmental Engineering*, 3, 143–150 [in Ukrainian].
5. Orlinska, O. V., Pikarenia D. S., Maksymova N. M., Hapich H. V. & Ishchenko V. M. (2012). *Otsinka mitsnostnykh vlastyvostey gruntovykh damb metodom pryrodnoho impul'snoho elektromagnitnogo polya Zemli* [Evaluating strength properties of earth dams involving the method of natural impulse electromagnetic Earth's field]. *Collection of scientific papers of the NMU*, 37, 17–23 [in Ukrainian].
6. Pikarenia, D. S., Orlinska O. V., Maksymova N. N., Hapich H. V., Chushkina I. V. & Nakonechny V. H. (2018). *Vyyavleniye zon fil'tratsii vody iz orositel'nykh sistem geofizicheskim metodom* [Detecting filtration zones of irrigation systems by geophysical method]. *Proceedings from mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Geosistemnyy podkhod k izucheniyu prirodnoy sredy Respubliki Kazakhstan» – The International scientific and practical conference “Geosystematic approach to studying natural environment of the Republic of Kazakhstan”*. (pp.26-30). Astana: L.M. Gumiliov Eurasian National University. 2. [in Russian]
7. Vorobiov, A. A. (1977). *Mekhanoelektricheskiye yavleniia preobrazovaniia energii pri plasticheskoy deformatsii tverdykh tel* [Mechanoelectric phenomena of energy transformations in terms of plastic deformation of solid bodies]. Tomsk, Russia: TPI, 92.
8. Cheban, V. D. (2001). *Metod pryrodnoho impul'snoho elektromagnitnogo polya Zemli. Deyaki aspekty zastosuvannya* [Method of natural impulse electromagnetic Earth's field. Some aspects of its application]. // *Geophysical journal*, 23(4), 112–121 [in Ukrainian].
9. Kuzmenko, E.D. Vdovina Ye. P., Cheban V. D. (2002). *Ob ispol'zovanii nekotorykh elektricheskikh parametrov pri prognoze opolznevnykh yavleniy* [On using some electric parameters while predicting landslides]. *Scientific Bulletin of the NMAU*, 4, 89–91 [in Russian].
10. Salomatin, V. N. (2009). *Mnogoletniy opyt primeneniia metoda YEIEMPZ pri reshenii kompleksa zadach v Ukraine* [Long-term experience of applying the NPEMFE method while solving a complex of tasks in Ukraine]. *Proceedings from Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Stanovleniye i razvitiye nauchnykh issledovaniy v vysshey shkole» –The International scientific conference “Origin and development of scientific studies in the higher educational institutions”*. (pp. 384-391). Tomsk: Ed. House of TPU. 2. [in Russian].
11. Bepalko, A. A., Yavorovich L. V. (2009). *Fizicheskoye modelirovaniye mekhanoelektricheskikh preobrazovaniy v obraztsakh gornakh porod* [Physical modeling of mechanoelectric transformations within the rock samples]. *Proceedings from Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Stanovleniye i razvitiye nauchnykh issledovaniy v vysshey shkole» –The International scientific conference “Origin and development of scientific studies in the higher educational institutions”*. (pp. 306-313). Tomsk: Ed. House of TPU. 2. [in Russian].
12. Yakovishina, G. Ye. (2007). *Razrabotka metoda i izmeritel'nykh sredstv diagnostiki kriticheskikh sostoyaniy gornykh porod na osnove elektromagnitnoy emissii* [Developing a method and measuring means to diagnose critical states of rocks on the basis of electromagnetic emission]. *Mining Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. Novosibirsk*. 45.
13. Bepalko, A. A. (2019). *Fizicheskoye osnovy i realizatsiia metoda elektromagnitnoy emissii dlya monitoringa i kratkosrochnogo prognoza izmeneniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniia gornykh porod* [Physical basics and implementation of the method of electromagnetic emission to monitor and short-term prognosis of changes in stress-strain state of rocks]. Tomsk. 395.
14. Yavorovich, L. V. (2005). *Vzaimosvyaz' parametrov elektromagnitnykh signalov s izmeneniyem napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniia gornykh porod* [Interconnection between the parameters of electromagnetic signals with changes in stress-strain state of rocks]. Tomsk. 190.

15. Sedlak, P., Sikula, J., Lokajicek, T., Mori, Y. (2008). Acoustic and electromagnetic emission as a tool for crack localization. *Meas. Sci. Technol.*, 19, 4, 1–7. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/4/045701>
16. Trubetskoi, K. N., Viktorov, S. D., Osokin, A. A., Shliapin, A. V. (2017). Prognoz gornyykh udarov na osnove kontrolya emissii submikronnykh chastits pri deformirovani i razrushenii gornyykh porod [Prognosis of rock hits based on the control of submicron particles emission in terms of rock deformation and disintegration]. *Mining journal*, 6, 16–20 [in Russian].
17. Naoi, M., Otsuki, K., Nakatani, M. Yabe, Y. (2015). Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress. *Tectonophysics*, 649, 100–114.
18. Vavilov, V., Świdorski, W., Derusova, D. (2015). Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 12(2), 162–172.
19. Bepalko, A. A., Yavorovich L. V., Yeremenko A. A., Shtirts V. A. (2018). Elektromagnitnaya emissiya gornyykh porod posle vzyryvov [Electromagnetic emission of rocks after blasting]. *FTPRPI*, 2, 10–18 [in Russian].
20. Cornet, F. H. (2016). Seismic and aseismic motions generated by fluid injections. *Geomech. Energy Environ.*, 5, 42–54.
21. Balageas, D., Maldague, X., Burleigh, D., Vavilov, V. P., Oswald-Tranta, B., Roche, J. M. et al. (2016). Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0331-7>
22. Hagag, W. & Obermeyer, H. (2016). Detection of active faults using EMR Technique and Cerescope at Landau area in central Upper Rhine Graben, SW Germany. *J. Appl. Geophys.*, 124, 117–129.
23. Zang, A., Stephansson, O., Stenberg, L., Plenkers, K., Specht, S., Milkereit, C., et al. (2017). Hydraulic fracture monitoring in hard rock at 410 m depth with an advanced fluid-injection protocol and extensive sense or array. *Geophys. J. Int.*, 208, 790–813. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw430>
24. Rubinstein, J. L. & Mahani, A. B. (2015). Myths and Facts on waste water injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismol. Res. Lett.*, 86(4), 1060–1067.
25. Zaitsev, V. Yu., Kolpakov, A. B., Nazarov, V. Ye. (1999). Detektirovaniye akusticheskikh impul'sov v rechnom peske. Eksperiment [Detecting acoustic pulses within the river sand. Experiment]. *Acoustic journal*, 45(2), 235–241 [in Russian].
26. Bessmertnyi A. F. & Solomatin V. N. (1999). Resheniye inzhenerno-geologicheskikh zadach na osnovanii rezul'tatov nablyudeni yestestvennogo impul'snogo elektromagnitnogo polya Zemli [Solving engineering and geological problems based on the results of observation for natural impulse electromagnetic Earth's field]. *Geophys. Journal*, 21(1), 119–126 [in Russian].
27. Dolgii, M. Ye. & Katayev, S. G. (2015). Issledovaniye yestestvennogo elektromagnitnogo polya Zemli [Studying natural impulse electromagnetic Earth's field]. *Newsletter of Tomsk State University*, 2(34), 61–70 [in Russian].
28. Bepalko, A. A., Yavorovich, L. V., Viitman, Ye. V. & Fedotov, P. I. (2008). Mekhanoelektricheskiye preobrazovaniya v gornyykh porodakh Tashtagol'skogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Mechanic -electric transformations within the rocks of Tashagolsky iron ore deposit]. *Geodynamics*, 1(7), 54–60 [in Russian].
29. Bepalko, A. A., Yavorovich, L. V., Kolesnikova, S. I., Bukreyev V. G., Mertvetsov A. N. & Fedotov P.I. (2011). Issledovaniye izmeneni kharakteristik elektromagnitnykh signalov pri odnoosnom szhatii obratzov gornakh porod Tashtagol'skogo rudnika [Studying changes in characteristics of electromagnetic signals in terms of uniaxial compression of rock samples of Tashagolsky iron ore deposit]. *News of HEIs. Physics*, 1/2, 78–84 [in Russian].
30. Yakovitskaia, G. Ye. (2008). Metody i tekhnicheskiye sredstva diagnostiki kriticheskikh sostoyaniy gornyykh porod na osnove elektromagnitnoy emissii [Methods and technical means to diagnose critical state of rocks on the basis of electromagnetic emission]. *Novosibirsk, Russia: Parallel*, 315.
31. Yakovishina, G. Ye. (2007). Razrabotka metoda i izmeritel'nykh sredstv diagnostiki kriticheskikh sostoyaniy gornyykh porod na osnove elektromagnitnoy emissii [Developing a method and measuring means to diagnose critical states of rocks basing on the electromagnetic emission]. *Mining Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. Novosibirsk*. 45.
32. Aydin, A., Prance, R. J., Prance, H., Harland, C.J. (2009). Observation of pressure stimulated voltage in rocks us in gan electric potential sensor. *Applied Physics Letters*, 95(12). <https://doi.org/10.1063/1.3236774>
33. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennya fizychnykh vlastyvostey [Bases and foundations of buildings and structures. Grounds. Methods of laboratory analysis of physical properties]. (2010). DSTU B V.2.1-17:2009 from 1st October 2010. Kyiv: Ministry of Energy and Construction of Ukraine [in Ukrainian].
34. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennya kharakterystyk mitsnosti i deformatynosti [Bases and foundations of buildings and structures. Grounds. Methods of laboratory analysis of strength and deformability properties]. (1996). DSTU B V.2.1-4-96 from 1st April 1997. Kyiv: Ministry of Energy and Construction of Ukraine. [in Ukrainian].
35. Ruban, S. A., Shinkarevskii, M. A. (2009). Hidroheolohichni otsinky ta prohnozy rezhymu pidzemnykh vod Ukrayiny [Hydrogeological evaluation and prognosis of the ground water mode in Ukraine]. Kyiv: UkrDGRI, 572.
36. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Klasyfikatsiya [Bases and foundations of buildings and structures. Grounds. Classification]. (1996). DSTU B V.2.1-2-96 from 1st October 1996. Kyiv: Derzhkommistobuduvannya Ukraine [in Ukrainian]
37. Zhelezniakov, G. V., Ibudzade Yu. A., Ivanov P. L. [et al.] (1983). Gidrotekhnicheskiye sooruzheniia (Spravochnik proyektirovshchika) [Hydroengineering structures (Manual of designer)]. Moscow, Russia: Stroiizdat, 543.

ГЕОГРАФІЯ

UDC 911.2:911.9:528.9

Ivan Platonovich Kovalchuk,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geodesy and Cartography,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
17 Vasylkivska St., Building 6, Kyiv, 03040, Ukraine,
e-mail: kovalchukip@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2164-1259>;

Oksana Ivanivna Mykytchyn,

PhD (Geography), Senior Lecturer, Ivan Franko State Pedagogical University of Drohobych,
23 T. Shevchenko St., Drohobych, Lviv region, 82100, Ukraine,
e-mail: omykytchyn@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8146-5947>;

Andrii Ivanovich Kovalchuk,

PhD Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
2a Akad. Glushkov Av., Kyiv, SME-680, Ukraine,
e-mail: kovalchuk94a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6448-4727>

GEOSYSTEMS MODELING OF ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE BASIN GEOSYSTEMS (CASE STUDY OF DNISTER RIGHT TRIBUTARIES)

І. П. Ковальчук, О. І. Микитчин, А. І. Ковальчук. ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АНТРОПОГЕННОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ БАСЕЙНОВИХ ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИКЛАДІ ПРАВОБЕРЕЖНИХ ПРИТОК ДНІСТРА). У статті акцентовано увагу на методах кількісного оцінювання антропогенного навантаження на річково-басейнові геосистеми. Зокрема, розглянуто методики, які базуються на визначенні співвідношеннях різних видів землекористування (Ф.М. Милькова, С. Клементової та В. Гейніге, П.П. Борщевського, М.В. Боярин, Н.М. Рідей і Д.Л. Шофолова) і ті, в яких використовуються вагові коефіцієнти, що вказують на ступінь і глибину перетворення природи кожним видом землекористування (П.Г. Щиценка, А.М. Третьяка). На прикладах річково-басейнових геосистем Бережницьі та Быстриці (Прикарпатських правобережних приток Дністра) за допомогою геоінформаційного моделювання оцінена репрезентивність результатів, отриманих за цими методиками, відзначено особливості та переваги і недоліки кожної з оцінюваних методик. Для досліджуваних геосистем визначено ступінь антропогенної трансформації, геоecологічний стан агроландшафтів, геоecологічну стабільність та антропогенну трансформацію, виявлено спільні закономірності та відмінні особливості річково-басейнових геосистем. В ході роботи вирішувалося питання вибору оптимальних структурних одиниць геопростору, в розрізі яких варто здійснювати аналіз антропогенного навантаження, а також способи наповнення бази даних для картографічного моделювання. На прикладі річково-басейнової геосистеми Бережницьі доведено важливість оцінки природних об'єктів (в даному випадку річкових басейнів) у розрізі природних структурних одиниць нижчого порядку (підбасейнів). Оскільки в даному випадку ускладнюється збір інформації про структуру землекористування, яка зазвичай формується у розрізі адміністративних одиниць, з метою наповнення бази даних обґрунтована доцільність використання даних дистанційного зондування Землі. Одержані результати свідчать про те, що вагома роль у стабілізації антропогенного навантаження відводиться збереженню лісових масивів, які властиві верхнім ділянкам басейнів, зменшенню розораності нижніх частин басейну, підтримці в належному стані меліоративних каналів, зменшенню впливу промисловості на довкілля та уникненню концентрації значної кількості промислових об'єктів в одній структурній одиниці – суббасейні.

Ключові слова: річково-басейнові геосистеми, геоінформаційне моделювання, структура землекористування, антропогенна трансформація.

И. П. Ковальчук, О. И. Микитчин, А. И. Ковальчук. ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ БАСЕЙНОВЫХ ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ПРАВОБЕРЕЖНЫХ ПРИТОКОВ ДНЕСТРА). В статье акцентировано внимание на методах количественного оценивания антропогенной нагрузки на бассейново-речные геосистемы. В частности, рассмотрены методики, основанные на определении соотношений различных видов землепользования (Ф.М. Милькова, Е. Клементовой и В. Гейниге, П.П. Борщевського, М.В. Боярин, Н.М. Ридей и Д.Л. Шофолова) и методики, которые используют весовые коэффициенты, указывающие на степень и глубину преобразования природы суббасейна каждым видом землепользования (П.Г. Щиценка, А.М. Третьяка). С помощью геоинформационного моделирования на примере бассейново-речных геосистем Бережницы и Быстрицы (Прикарпатских правобережных притоков Днестра) оценена репрезентативность результатов, полученных по каждой из методик, отмечены их особенности и преимущества. Для исследуемых геосистем определены степень антропогенной трансформации, геоecологическое состояние агроландшафтов, геоecологическая стабильность и антропогенная трансформированность, выявлены общие закономерности и отличительные особенности бассейново-речных геосистем. В ходе работы решался вопрос выбора оптимальных структурных единиц, в разрезе которых следует осуществлять анализ антропогенной нагрузки и избирать способы наполнения базы данных для геоинформационно-картографического моделирования. На примере бассейново-речной геосистемы Бережницы доказана важность оценки состояния природно-хозяйственных объектов (в данном случае речных бассейнов) в разрезе структурных единиц низшего порядка (подбасейнов). Поскольку в данном случае осложняется сбор информации о структуре землепользования, которая обычно формируется в разрезе административных единиц, с целью наполнения базы данных предложено использовать материалы дистанционного зондирования Земли. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значительная роль в стабилизации антропогенной нагрузки отводится сохранению лесных массивов.

которые свойственны верхним частям бассейнов, уменьшению степени распаханности нижних частей бассейна, поддержанию в надлежащем состоянии мелиоративных каналов, уменьшению влияния промышленности на окружающую среду и избежанию концентрации промышленных объектов в одной структурной единице – суббассейновой геосистеме.

Ключевые слова: *бассейново-речные геосистемы, геоинформационное моделирование, структура землепользования, антропогенная трансформация.*

Formulation of the problem. It is believed that there is no place on the globe that hasn't been affected by human activity. Even the most remote areas are polluted by unusual substances due to the global circulation of air and water. Economic development extends not only horizontally, but also actively penetrates into the thickness of rocks. It changes the state of not only biotic components of geosystems, but also abiotic, affecting the development of natural complexes, which are transformed into anthropogenically modified, and then into anthropogenic complexes. Very often, these changes lead to irreversible processes with negative consequences both for ecosystems, and for people and society. Under such conditions, the problem of assessing the state and transformation of natural systems under the anthropogenic pressure becomes more and more relevant and of interest to a wide range of specialists. The growth of anthropogenic pressure is, in particular, observed within the territory of our country and is characterized by the destruction of landscape systems due to rapid deforestation, unreasonable increase of arable land areas, large-scale urbogenic and man-made influences. Anthropogenic changes have occurred in all the natural components – relief, relief formation deposits, flora and fauna, soil cover, surface waters and groundwater, etc. Therefore, complex approach is needed to assess these consequences. From such point of view, river basins are perfect objects for systematic geoenvironmental studies, as they are represented by holistic integrated entities [10-12]; therefore, we consider it most appropriate to study anthropogenic transformation of the environment just in the context of these structural units of geographical space.

Analysis of recent research and publications.

Studies of territorial complexes anthropogenic transformation are topical considering the increasing technogenic influences on the environment and are carried out by a number of landscape studies schools in Ukraine. Depending on the main idea of anthropogenic changes research, two conceptual scientific approaches are distinguished. Proponents of the first approach base their research on the concept developed by F.M. Milkov [16] that states that the changes in any component of the landscape very quickly propagate to all other components and to the landscape complex as an whole [4; 6; 7]. Followers of L.S. Berg, N.A. Solntsev and A.G. Isachenko support the idea of inequality of the components of nature by the force with which they influence each

other. This approach and the concept of anthropogenic transformation of geosystems were elaborated by L.I. Voropay, V.P. Korzhik, M.M. Kunitsa, Y.P. Skrypnyk, V.N. Gutsulyak, Y.A. Ivanov, I.P. Kovalchuk, I.S. Kruhlov, P.G. Shyshchenko [6; 13; 14; 21; 22; 26; 27]. Regional studies of anthropogenic changes of the environment were conducted in works of I.P. Kovalchuk, S.I. Kukurudza, A.V. Melnyk, P.I. Stoiko, I.B. Koynova, I.S. Kruhlov, M.M. Prikhodko, M. M. Proskurnyak, L.Y. Sorokina [9; 10 -12; 14; 15; 20; 22; 26; 27]. The issues of anthropogenic pressure and of the estimation of river basins transformation are highlighted by V.I. Vishnevsky, I.P. Kovalchuk, O.V. Kirilyuk, O.A. Liho, Y.M. Andreichuk, A.V. Mykhnovych, O.V. Pylpovych, L.P. Kurhanevych [3; 7; 8; 10-12; 15-19; 23; 25] and others. In foreign geography, these questions are raised by F. Gossain [29], J. Batista and B. Barros [28], J. Lautze, S. Phiri, V. Smakhtin et al. [30], J. Lee et al. [31], L. Liu et al. [32]. Foreign authors analyze the problem in the context of mapping support of the sustainable development of the Zambezi river basin system [30; 34], mapping the properties of soils of the studied basins [32], search for the most accurate and economical methods for determining water discharges [31], developing a semi-automated delimitation algorithm for protected areas along watercourses [28], modeling the geoenvironmental state of river basin system with the use of remote sensing; the investigation by means of the indicative properties of the hydrographic network in the absence of hydrological observation points and water flow data, [29]. J. Szpikowski [33], while investigating the Perznica basin, located in the northwest of Poland, over the course of a number of years of nature change has used such methods as the analysis of archival large-scale maps, digitization of topographic maps, vectorization of spatial objects and mapping the types of terrestrial surfaces and their changes for the 200-year period.

At the same time, not all aspects of the problem are studied with the same degree of detail. New opportunities are being opened using methods of remote sensing to obtain high-quality information, as well as technologies of geoinformation and cartographic modeling of the respective processes. The article highlights these aspects of the anthropogenic transformation study of river-basin systems environment.

Quantitative methods for evaluating the degree of anthropogenic pressure that take into account the structure of land use, natural and anthropogenic el-

ements, are described in the works of I.P. Kovalchuk, M.A. Petrovska, F.M. Milkov, P.G. Shyshchenko, A.M. Tretyak, P.P. Barshchevsky, N.M. Ridey and D.L. Shofolov, M.V. Boyarin, Y. Clementova and V. Heinige et al. [1-2; 5; 8-13; 15-19; 21; 23; 25].

There are two main approaches to determining the anthropogenic pressure by quantitative methods, which follow from two different conceptual directions of the study. The first approach is based on calculations of the ratio of areas under different types of land use; the basis of the second approach is the use of weighting factors that indicate the degree of conversion of the environment by various types of economic activity.

Among the methods based on the use of the first approach the most commonly applied method is that by F.M Milkov [16], which determines the ratio of areas of natural and anthropogenically modified territorial complexes. Landscape systems fall into the categories by the ratio of anthropogenic and natural unaltered lands: antropogenic (natural land cover occupies less than 25% of total area), natural-anthropogenic (25-50%), anthropogenic-natural (50-75%) and natural landscape systems (75%). Similar in essence is the definition of the transformation coefficient of the territory in the method proposed by M.V. Boyarin [2]. This coefficient reflects the proportion of anthropogenically altered areas in the land use structure of the studied basins.

The relative proportion of arable lands to the group of sustainably used lands like perennial plants, hayfields, pastures, land for shelter belts, defines the geoenvironmental condition of agricultural landscapes (Table 1) (proposed by N.M. Ridey and D. L. Shofolov [21]) and the level of ecological balance of the territory, proposed by M.V. Boyarin [2]. These two models are very similar. Their only difference is in the approach to classification, since the definition of the territory balance considers the multiplicity of cultivated lands ratio, while the geoenvironmental state determination of agricultural landscapes is based on the percentage of arable land and land of sustainable use. The disadvantage of these two techniques is the fact that they take into account only some types of land use, among those

present in the study area. This leads to an exclusion of the study areas where no land use types included in this calculation are present. It also complicates automatic calculation when the area in the denominator equals zero.

Due to the fact that these models take into account only the ratio of arable land and lands of sustainable use, we consider it appropriate to consider all the types of land use represented in the study area in the analysis of anthropogenic pressure indicators.

This approach is used in the methodology for determining the coefficient of environmental stability of the territory, proposed by E. Clementova and V. Heinigge [9] This coefficient is defined as the ratio of areas of environmentally stable lands to areas of environmentally unstable lands. A higher coefficient means a higher rate of stability of the territory. By the coefficient value of ecological stability five states can be distinguished in the studied areas. If the coefficient of ecological stability of the territory <0,5 - the territory is unstable with apparent instability, 0,5-1,0 - unstable, 1,0-3,0 - conditionally stable; 3,0-4,5 - stable; > 4.5 - stable with pronounced stability.

Whilst being similar to the methodology by E. Klementova and V. Heinige, the methodology for calculating the environmental stability of the territory (1), proposed by P. P. Borschevsky [1] is based on a different approach and takes into account the weight coefficients of different types of land use:

$$C_{es} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i C_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (1)$$

where C_{es} – coefficient of environmental stability of the territory, C_i – coefficient of environmental properties of the land type of i kind (Table 2), S_i – area of land type of i kind, h_a ; n – number of indicators. The values of the coefficient C_{es} are given in Table 2.

If the obtained value of C_{es} is less than 0.33, then land use is deemed environmentally unstable; if C_{es} varies from 0.34 to 0.50, land use is considered to be continuously unstable; if it is in the range of 0.51 to 0.66 then it falls into the category of medium stability, and if C_{es} exceeds 0.67, then the land use is environmentally sustainable.

Table 1

Scale for assessing the environmental state of agrolandscapes by the ratio of land use types (N. M. Ridey, D. L. Shofolov) [21]

The share of land % to the sum of the area of arable lands and the lands of sustainable use		State
Arable lands	Lands of sustainable use	
<20	>80	Optimal
20:35	65:80	Good
35:55	45:65	Adequate
55:70	30:45	Inadequate
>70	<30	Critical

Table 2

The environmental properties coefficients value for the different types of lands [1]

Land type	C
Built up area and roads	0
Arable land	0,14
Vineyards	0,29
Shelter belts	0,38
Perennial plantations, shrubs	0,43
Household plots	0,5
Hayfields	0,62
Pastures	0,68
Ponds and marshes of natural origin	0,79
Forests of natural origin	1

The methods by A.M Tretyak [24] and P.G. Shyshchenko [26] are widely used to determine the degree of anthropogenic transformation using weight coefficients.

These techniques are distinguished by the fact that in the first, which is calculated by the formula (2), different weight coefficients for different types of land use are used:

$$Cap = \frac{\sum_{i=1}^n S_i p_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2)$$

where Cap – coefficient of anthropogenic load; S_1 - S_n – area of land with a certain level of anthropogenic loading; p_1 - p_n – evaluation ranks of the corresponding area (the 5-point scale is shown in Table 3); n – number of indicators.

On the other hand, in the method by P.G. Shyshchenko [26] simultaneously with the rank of transformation another correctional coefficient is

being taken into the equation – the depth of transformation of the investigated area.

$$Cat = 0,01 \sum_{i=1}^n r_i p_i q_i, \quad (3)$$

where Cat – coefficient of anthropogenic transformation; r_i – the rank of anthropogenic transformation of the territory by the i-type of land use; q_i – index of the transformation depth of territory (tab. 4.); p_i – area of rank, %; n – number of land use types within the studied territory.

The classification results also differ from one method to the other.

According to the coefficients of anthropogenic load, obtained by A.M. Tretyak’s method, the following categories of territories by the degree of transformation are distinguished: the least developed (Cat up to 2,5); weakly transformed (Cat 2.6 - 3.0); transformed (Cat 3.1-3.5); moderately transformed (Cat 3.6 - 4.0); strongly transformed (Cat 4.1-4.5);

Table 3

Ranking assessment of the degree of anthropogenic pressure on land resources [24]

Lands	Rank
Lands used by of industry, transport, built-up lands	5
Arable lands, perennial plantations	4
Natural forage lands, grass-covered gulches	3
Shelter belts, shrubs, forests, swamps, submerged lands	2
Micro-reserves	1

Table 4

Weight ratios of the rank and depth indices of landscapes anthropogenic transformation [26]

Types of land use	q_i	r_i
Protected areas	1	1
Forests	2	1,05
Swamps and wetlands	3	1,1
Meadows	4	1,15
Gardens and vineyards	5	1,2
Arable land	6	1,25
Rural built-up areas	7	1,3
Urban built-up areas	8	1,35
Water reservoirs, channels	9	1,4
Lands of industry	10	1,45

very strongly transformed (Cat 4,6 and more).

The P.G. Shyshchenko's method divides territories by their Cat: at Cat 2,00-3,80 the territory is being referred as weakly converted; at Cat 3,81-5,30 - as converted; at Cat 5,31-6,50 - as moderately converted; at Cat 6,51-7,40 - as highly converted; at Cat 7.41-8.00 - as excessively converted.

All these data indicate that these two methods are different and, accordingly, geoinformation models created by them will look different. The analysis of these two methods indicated [24; 26] that P.G. Schyshchenko's method reflects the situation more accurately, since it takes into account antropogenic pressure, the state of agro-landscapes, the balance and stability of land use.

In 1980s, P.G. Shyshchenko created a map of landscape antropogenic transformation on the national level [27]. Subsequently, his methodology gained popularity and was used at the regional level, in particular for the territorial analysis of antropogenic transformation of the natural environment in certain regions (Kherson, Lviv, Ivano-Frankivsk, Volyn, etc.), owing to the use of official statistical indicators that are collected by administrative-territorial principle.

Identification of previously unresolved parts of the general problem. In assessing the antropogenic pressure on natural objects, a particular method is usually chosen, based on existing statistical information in the context of administrative units. Since the administrative division is not representative for the study of river-basin geosystems, it is important to choose an optimal method among the existing ones, to isolate the structural natural subsystems of the lower ranks, and to form within them data on antropogenic changes in the environment. This approach is optimal and is implemented in our study.

Formulating the purpose of the article. The purpose of this work is to analyze the antropogenic transformation of Subcarpathian river-basin geosystems by means of geoinformation modeling using various methods of quantitative estimation of antropogenic pressure, to compare the modeling results on the basis of administrative-territorial and natural units, to select the optimal structural units for the study of antropogenic changes in basin geosystems.

Exposition of the main research material. Using F.M. Milkov's method, based on the determination of the ratio of natural areas to antropogenically-altered natural-territorial complexes, we have analyzed the antropogenic transformation of the natural environment both for administrative divisions (Stryi district of Lviv region) and natural geosystems – the river basins (the basins of the Berezhnytsia river (Lviv region) and Bystrytsia (Ivano-

Frankivsk region)). Both rivers are the right tributaries of the Dniester, but with different areas of their respective basins.

By comparing the results of the implemented researches, it is possible to clearly state the expedience of using the basin approach to the study of natural complexes antropogenic transformation.

Figure 1 shows the model of antropogenic transformation of the natural environment, created for the same territory, but using different approaches. In this model, part of the Berezhnytsia river basin is located within the administrative-territorial units of the Stryi district, which are a part of the studied basin. In the first case, the calculation of antropogenic transformation is based on the data which are provided by the administrative-territorial principle and are contained in the form "6-zem", which contains the statistical information on the availability of lands and their distribution by land users. The analysis of antropogenic transformation in the other approach was carried out within the limits of natural, not administrative, units, which were sub-basins of the thalweg network. The choice of such units is due to the specific feature of Berezhnytsia river basin structure: one third of the studied basin surface is fully meliorated and is lacking any natural watercourses. Therefore, antropogenic pressure analysis should be carried out on the basis of pre-allocated (on a topographic map of a large scale) water catchments of the natural watercourses network, and in the reclaimed portion of the basin – on the basis of delineated basins of reclamation channels. This will, to a greater extent, ensure the homogeneity of the studied units and the possibility of comparative analysis of their conditions from the standpoint of nature components antropogenic transformation.

However, analyzing antropogenic transformation using natural units, one has to face the problems caused by the lack of statistical information that reflects the economic activity within their boundaries. It is possible to solve this problem using remote sensing data, which allows to estimate the land use structure of the study area. A model of Berezhnytsia basin system antropogenic transformation in terms of sub-basins created by us, was thus based on remote sensing data.

The overlay analysis used to compare these two approaches suggests a significant difference between the results obtained, since the use of the administrative-territorial units even of the lowest level did not allow to correctly assess the antropogenic transformation of natural objects, boundaries of which for the most part do not coincide with the boundaries of the administrative divisions. In particular, the indicator of antropogenic transformation of the natural environment of the rural coun-

cils indicates that there are no natural surfaces in them, while in fact, they amount to 15% in the investigated part of the basin (according to the model of anthropogenic transformation of sub-basins).

A similar situation has occurred on the model of the basin system anthropogenic transition created by us using the method by P.G. Shyshchenko (Fig. 2). The use of administrative-territorial units as an estimated geospatial objects shows the excessive transition of the natural environment in the basin exclusively within town Morshyn. The model of anthropogenic transformation in the context of sub-basins allows us to visualize the over-transformed parts of the basin, which are present on the right bank throughout the length of the river, and cover vast areas downstream of the town of Dashawa. Sub-basins with excessively transformed natural environment are present within the weakly transformed natural landscapes of rural councils.

This approach should be utilized for the river basins, where it is difficult to allocate equal structural units. In the case of studying a river basin with large area and dense river network, this approach will yield a mosaic picture, which complicates the identification of the basic regularities in the analysis. Therefore, in order to determine the anthropogenic transformation of the basin geosystem of the Bystrytsia River, we have identified sub-basins with homogeneous geomorphological and hydrological features that allow us to trace the differences between the main parts of the basin.

A series of GIS models was created to interpret the anthropogenic transformation of the basin geosystems of Berezhnytsia and Bystrytsia rivers (Figure 3); they show that the largest changes have occurred in the basins of a higher ranks. Regarding the spatial location, the upper part of the basins is dominated by natural and natural-anthropogenic sub-basins with man-made changes that consist of the deforestation and the presence of small settlements; and anthropogenic impact is rising downstream. In particular, on the left bank of the middle reaches the share of anthropogenic sub-basins increases from Berezhnytsia village in Stryj district to the settlement Dashawa (by increasing the area of agricultural land and due to the location of the settlements exclusively on the left bank). The most transformed is the lower, actively reclaimed part of the basin, where anthropogenic sub-basins predominate. This situation has arisen due to the significant plowing of the land, which was facilitated by the drainage reclamation and the flat terrain of the basin.

As for the basin of Bystrytsia, there are three groups of sub-basins: natural-anthropogenic (the highest part of the basin), anthropogenic-natural (mountainous part) and anthropogenic (low-altitude

and plain parts of Bystrytsia river basin system - RBS).

Models of the geoenvironmental state of agricultural landscapes (Figure 4) indicate the domination of territories with a satisfactory, good and optimal condition of agrolandscapes in the upper and forested parts of the basins (due to low percentage of arable land in mountain parts, domination of forests, meadows, pastures and swampy areas), and an increase in the share of territories with unsatisfactory and critical condition on plain areas. Here, among the important factors influencing the environmental state of agricultural landscapes are: the fairly high level of agricultural land cultivation, low fertility of background soils, high acidity, active manifestation of degradation processes, contamination by mineral fertilizers and remedies for protecting agricultural crops from pests, diseases and weeds, etc. The worst conditions of agro-landscapes are observed in the reclaimed valleys of the main rivers and their tributaries.

The model of geoenvironmental stability, based on the ratio of stable and unstable lands (Figure 5), shows contradictory results for the two basins, due to the fact that considerable area in the basin of the Berezhnytsia river appears to be an unstable territory with pronounced instability. This is explained by the fact that in subbasins located in forest lands, there are widespread forest cutting, as well as forest clearings and roads building. Instead, such a model for the Bystrytsia basin, in comparison with the model created by P.P. Borshchevsky (Figure 6), indicates the presence of stable territories in the most upper and forested part of the basin, since they are less developed than the forested territories in the basin of Berezhnytsia.

Continuously unstable conditions are widespread among subbasins located near the settlements that border geoenvironmentally unstable areas.

Determination of the degree of the natural environment anthropogenic transformation in sub-basins was carried out using two methods – one of A.M. Tretyak [24] (Fig. 7) and the other of P.G. Shyshchenko [26] (Fig. 8). In the method by A.M. Tretyak weight coefficients for different types of land use are used, and P.G. Shyshchenko's method takes into account the depth index and the rate of conversion for each type of land use. Accordingly, the results are different.

An analysis of the map compiled in accordance with A.M. Tretyak's technique, shows that the anthropogenic transformation of the Bystrytsia river basin grows downstream and changes from the weak to the average type.

The Berezhnytsia river basin includes the least transformed territories and highly transformed ones,

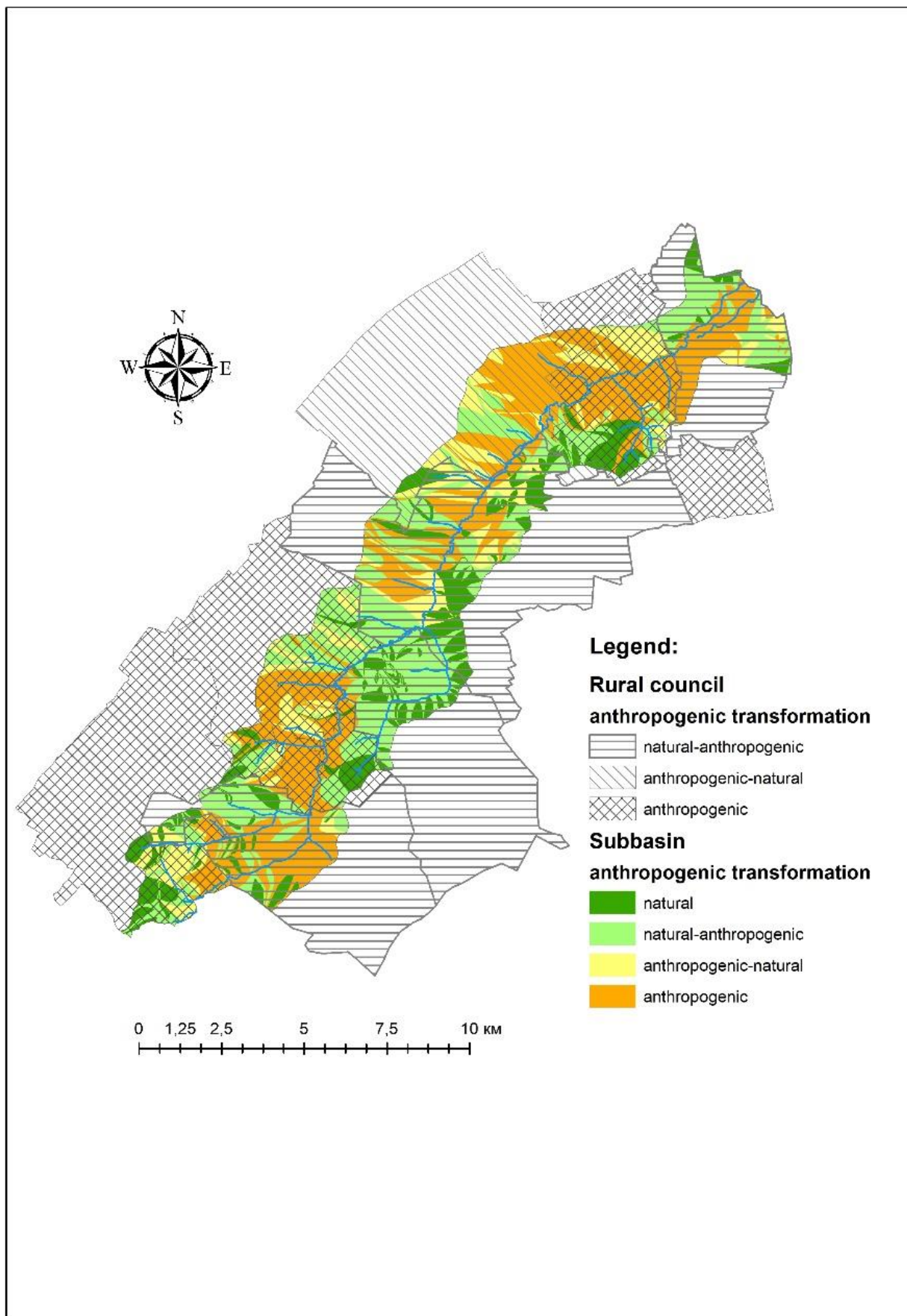


Fig. 1. Anthropogenic transformation of the natural environment in the subbasins and administrative units of the RBS Bereznytsia

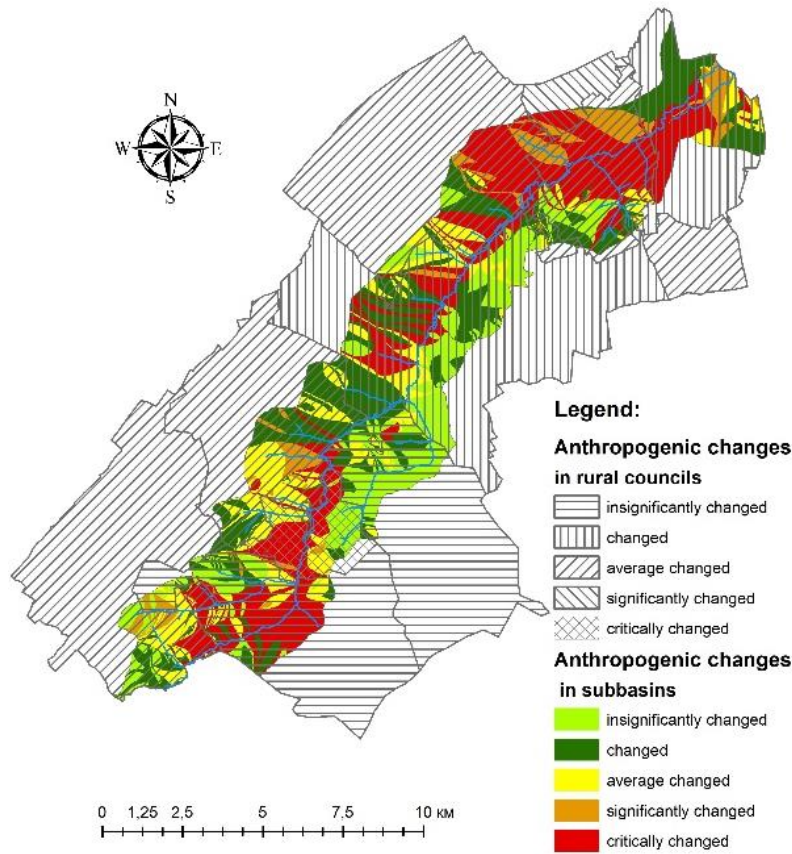


Fig. 2. Anthropogenic changes of the natural environment in the subbasins and administrative units of the RBS Berezhnytsia

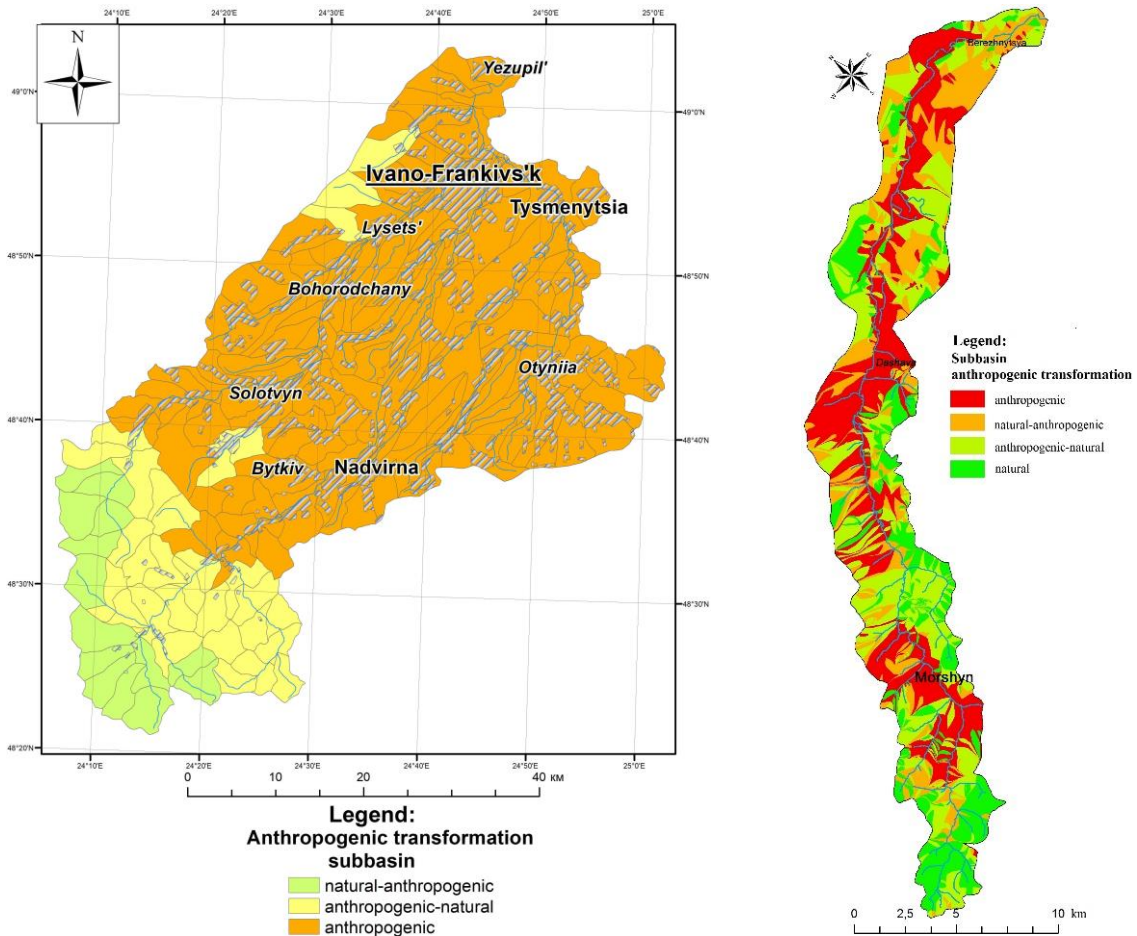


Fig. 3. Anthropogenic transformation of the river-basin systems of Bystrytsia and Berezhnytsia (calculated by the authors according to F.M. Milkov's method)

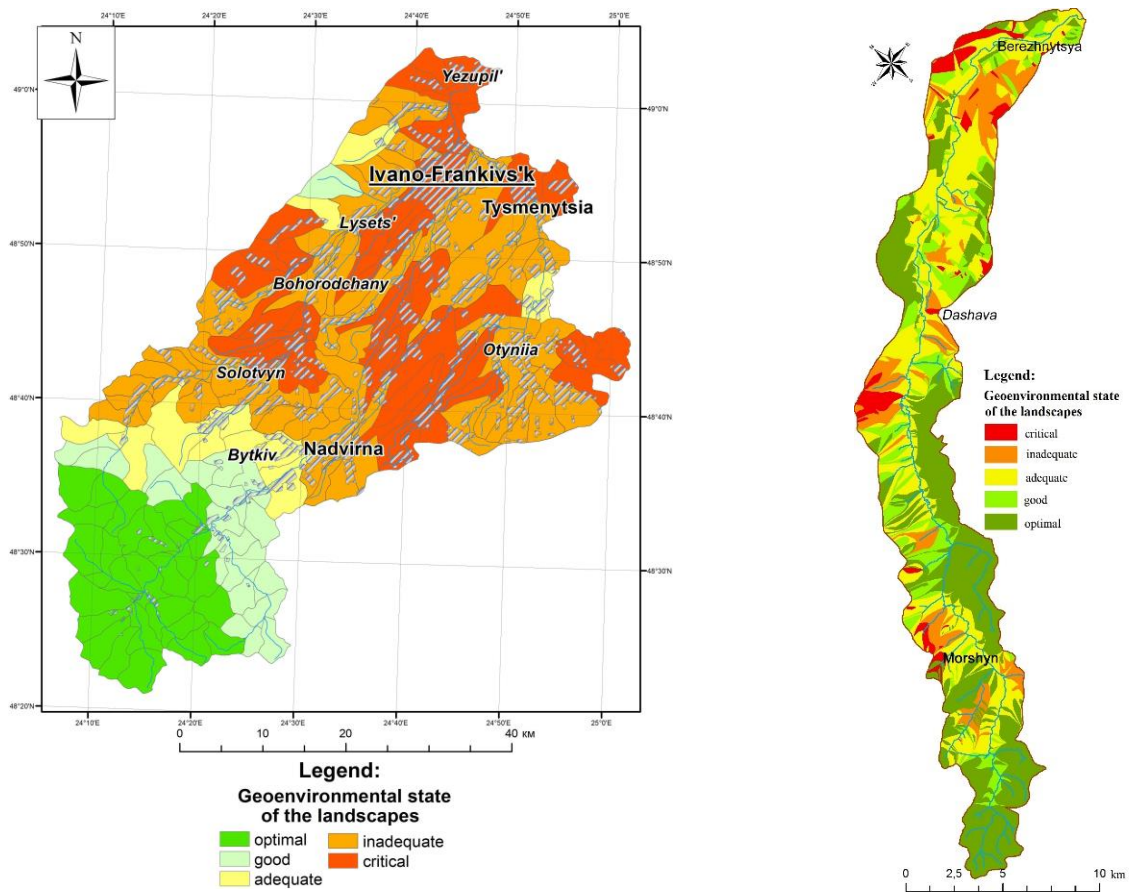


Fig. 4. Geoenvironmental state of agro-landscapes in the rivers-basin systems of Bystrytsia and Berezhnytsia (calculated by the authors according to the method by N. M. Ridey and D. L. Shofolov)

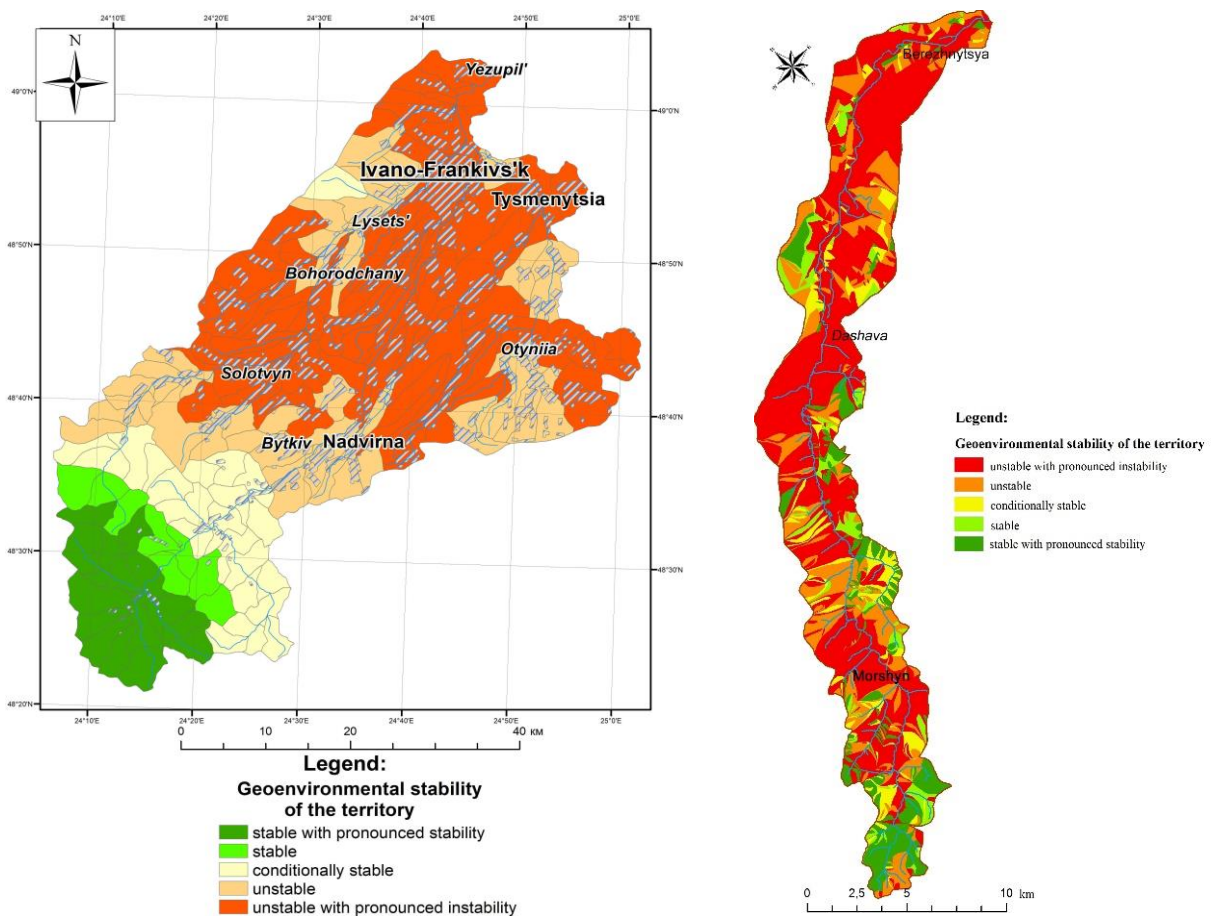


Fig. 5. Geoenvironmental stability of the RBS landscapes of Bystrytsia and Berezhnytsia (calculated by the authors according to the method by E. Klementova and V. Heinige)

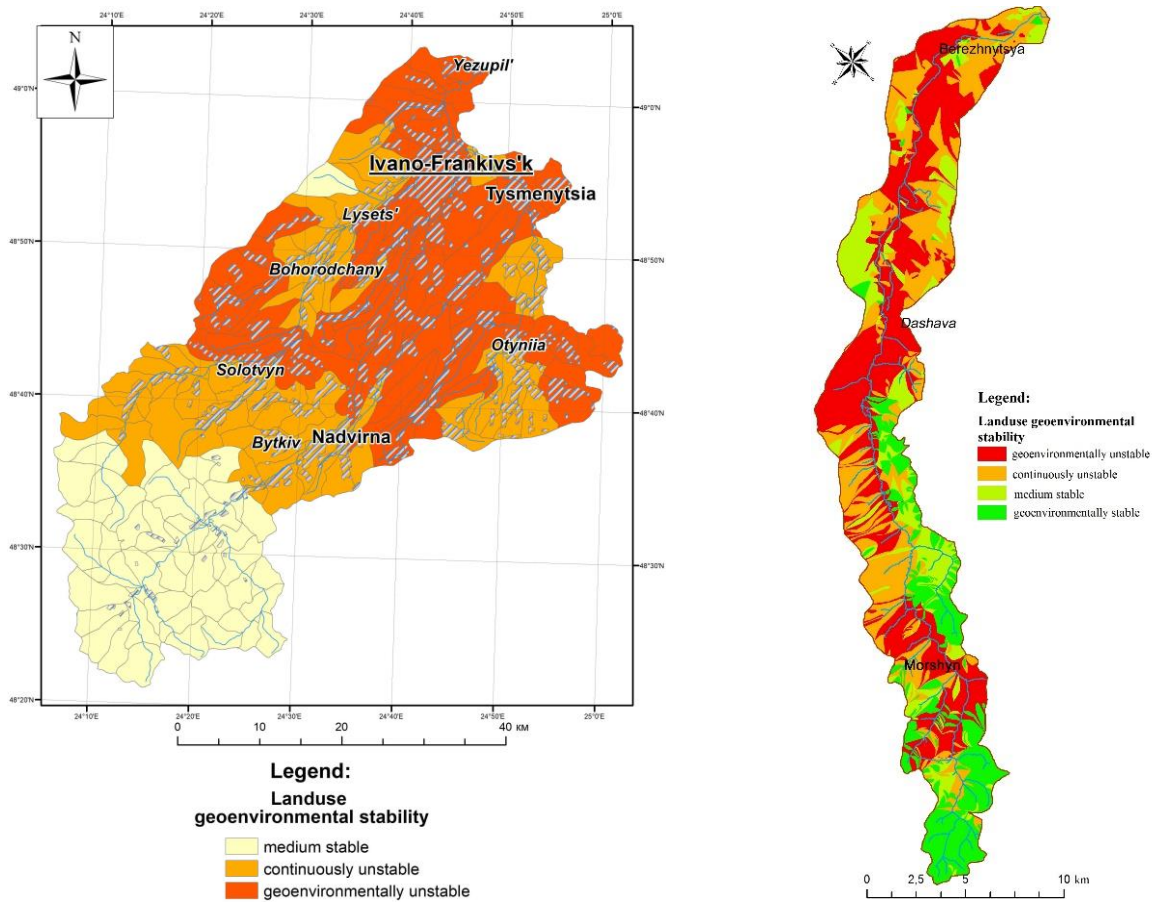


Fig. 6. Geoenvironmental stability of the river basin systems of Bystrytsia and Berezhnytsia (calculated by the authors according to P.P. Barshchevsky's methodology)

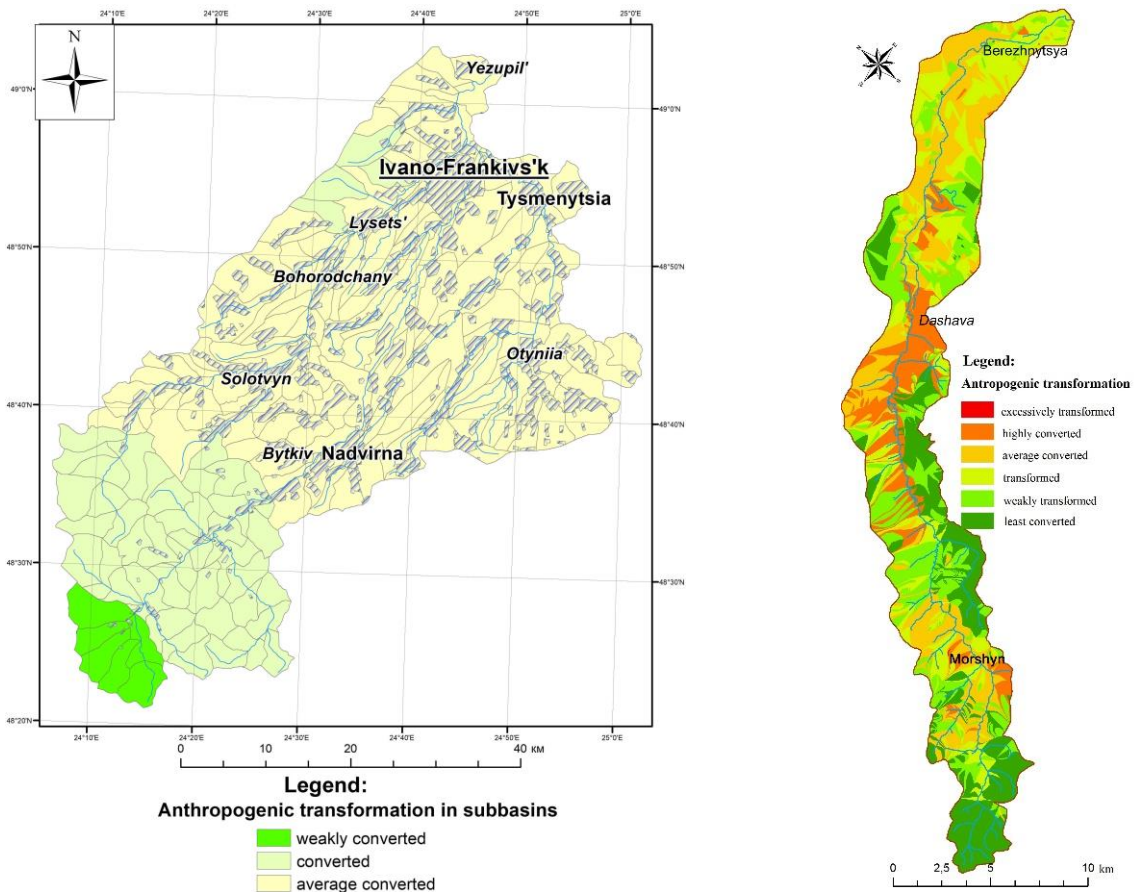


Fig. 7. Anthropogenic transformation of the river-basin systems of Bystrytsia and Berezhnytsia (calculated by the authors according to the method by A.M. Tretyak)

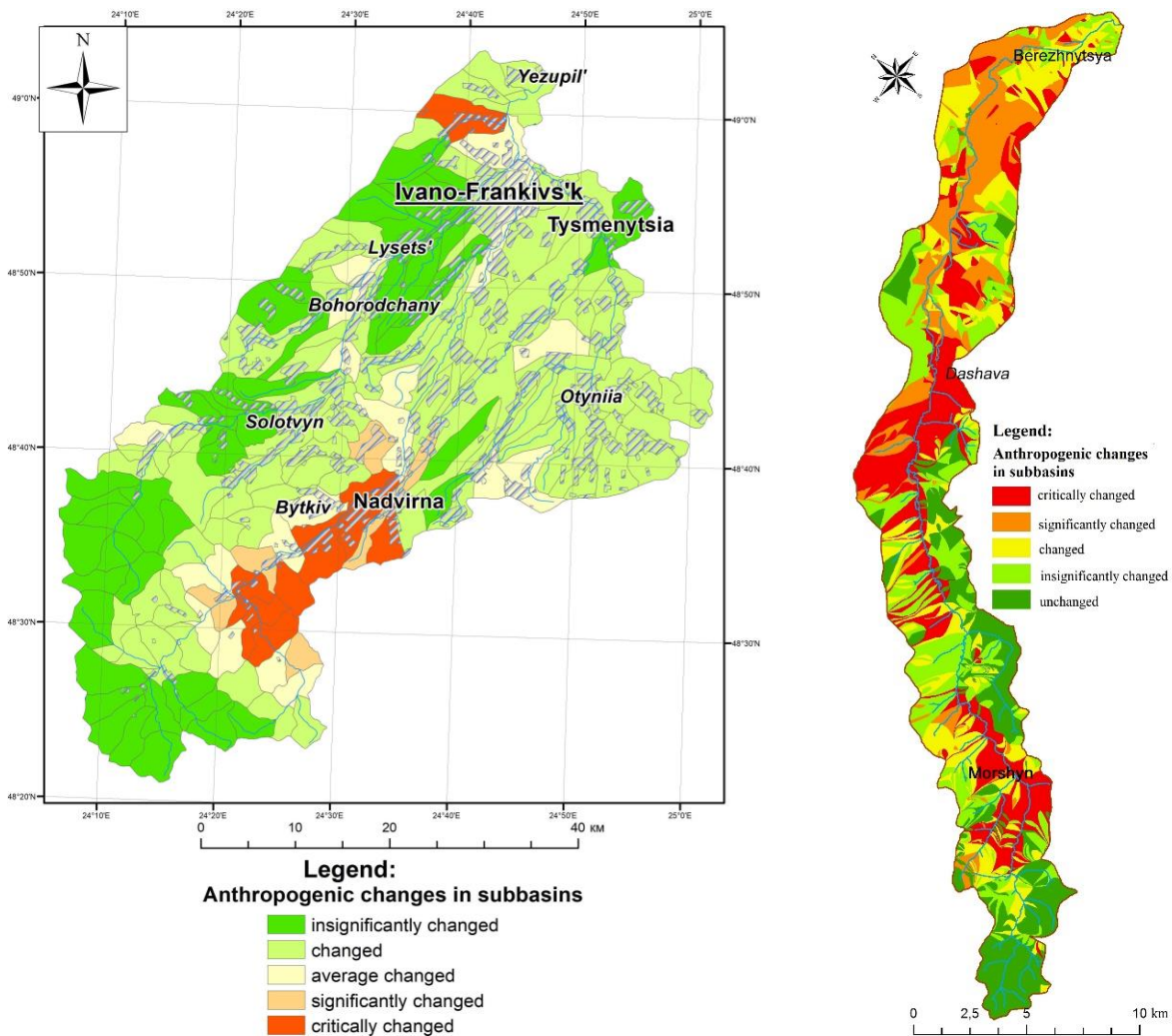


Fig. 8. Anthropogenic transformation of the river-basin systems of Bystrytsia and Berezhnysya (calculated by the authors according to P.G. Shyshchenko's method)

the latter are represented by the most cultivated sub-basins (in the middle part of the basin system).

The created models show that the method of P.G. Shyshchenko allows to more accurately reflect the situation with anthropogenic transformations of the natural environment in the basin, since, apart from the consideration of anthropogenic pressure, the state of agrolandscapes, and the balance and stability of land use (reflected on other models we have created), it also provides their ranking on the depth of the transformation of their environment. Therefore, in our opinion, this model is more accurate.

In the basin system of the Berezhnysya River, sub-basins of higher ranks, located in the lower part of the basin are strongly over-transformed. This situation has arisen due to their much greater population and the proportion of arable land. In particular, the fourth part of the studied basin is occupied by over-transformed sub-basins, which concentrate along the middle course of the Berezhnysya River (mostly on the left bank).

In the lower part of the basin, they are represented by the most cultivated sub-basins of the reclamation network. Weakly transformed subbasins

(approximately 20% of total subbasin number) were formed on forest lands that were cut down and in the wetlands of the lower part of the basin, where the share of arable lands (in particular, in the mouth area) decreased and in the low populated areas of the left bank. The smallest anthropogenic changes affected subbasins which occupy 8% of the territory, that are mostly located within forest lands.

Another distribution of anthropogenic transformation indicators is observed in the basin of the Bystrytsia river. In contrast to the Berezhnysya river basin, in the Bystrytsia basin industrial lands are present where the environment is affected the most. The presence of a significant number of built-up land, land under transport and communication facilities, technical infrastructure, in conjunction with the lands of factories, quarries and areas for oil extraction, resulted in the location of the most transformed sub-basins in the watersheds (in the northern part of the basin) and above the town of Nadvirna and Bytkiv settlement. It is worth noting that a significantly higher level of transformation is observed in the basin of Bystrytsia Nadvirnianska river and after its merging with Bystrytsia Sotolvynska.

Conclusions. 1. The features of quantitative analysis methods of assessing the transformation processes in basin systems, based on different conceptual approaches are revealed. Particular attention is paid to the verification of the most frequently used methods by A.M. Tretyak and P.G. Shyshchenko, their disadvantages and advantages being determined depending on the purpose of the study.

2. In the case study of the rivers and basins of Bystrica and Berezhnytsia (right tributaries of the Dniester river within the Lviv and Ivano-Frankivsk regions), the choice of subbasins of the thalweg network and lower rank subbasins as natural structural units, where it is expedient to determine the level of anthropogenization of the natural environment, is substantiated. The utility of using remote sensing data as the basis for analyzing the state and scale of anthropogenic transformation of natural geosystems in river basins of various ranks is emphasized.

3. A series of digital cartographic models that display the anthropogenic pressure on the river-basin systems of Berezhnytsia and Bystrytsia have been created and analyzed. A number of common traits have been identified due to the physical geography features of river basins, in particular, the increase in the level of anthropogenization of the natural environment from the headwaters to the river mouth. The minimal amounts of such influence are observed in the mountainous parts and they increase in settlements and in the zones of reclamation channels functioning. The features of the subbasin geosystems state due to different types and intensity of economic influence on them in plain and mountainous parts of the studied basins are determined. A set of measures aimed at improving the geoenvironmental state of the sub-basins of the studied river basin systems of Bystrytsia and Berezhnytsia and ensuring the rational use of their natural resources are proposed.

References

1. Борщевський П. П. Підвищення ефективності використання, відтворення і охорони земельних ресурсів регіону / П. П. Борщевський, М. О. Чернюк, В. М. Заремба. – К. : Аграр. наука, 1998. – 240 с.
2. Боярин М. В. Конструктивно-географічні основи природокористування в басейні річки Західний Буг / М. В. Боярин // Науковий вісник Волинського національного університету ім. Лесі Українки – Луцьк, 2010 – Випуск №15. – С.164–168.
3. Вишневецький В. І. Антропогенний вплив на річки України. : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора геогр. наук : спец. 11.00.01 «Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів» / В.І. Вишневецький. – Львів, 2003. – 35с.
4. Денисик Г. І. Антропогенні ландшафти Правобережної України Вінниця: Арбат, 1998. – 242 с.
5. Дубіс Л.Ф. Структурна організація та функціонування річкових систем гірської частини басейну Тиси / Автореферат дисертації на здобуття наук. ступеня канд. географ.наук. – Львів, 1995. – 25 с.
6. Іванов С. А. Історико-географічні та ландшафтно-динамічні аспекти трансформації природно-господарських систем гірничопромислових територій / С. А. Іванов, І. П. Ковальчук // Наук. записки Вінниць. держ. пед. ун-ту ім. М. Коцюбинського. Серія : Географія. – Вінниця : 2007. – Вип. 14. – С. 15–20.
7. Казаков Л. К. Ландшафтоведение с основами ландшафтного планирования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Л. К. Казаков. –2-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
8. Кирилюк О. Визначення антропогенного навантаження на басейн малої річки / О. Кирилюк // Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки: Мат. 5 міжнар. наук. конф. (Чернівці, 5–6 травня 2006 року). – Чернівці: Зелена Буковина, 2006. – С. 327–333.
9. Клементова Е. А. Оценка экологической устойчивости сельскохозяйственных ландшафтов: текст. / Е. А. Клементова, В. Гейниге // Мелиорация и водное хозяйство. – Москва :1995. – № 6. – С. 33–34.
10. Ковальчук А.І. Атласне картографування річково-басейнових систем: монографія / А.І.Ковальчук, І.П.Ковальчук / за наук. ред. проф. І.П.Ковальчука. – Л.: Простір-М, 2018. – 348 с.
11. Ковальчук І. П. Наукові засади досліджень деградаційних процесів у річкових системах Подільської височини / І. П. Ковальчук // Дослідження малих річок, аналіз проблеми, пропозиції // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Дослідження, відтворення та охорона малих річок». – Хмельницький: ТОВ «Триада-М», 2005. – С. 63–75.
12. Ковальчук І.П. Аналіз трансформаційних процесів басейнів малих рік верхньої частини сточища Дністра / І. П. Ковальчук, О. І. Швець, Ю. М. Андрейчук // Географічна наука і практика: виклики епохи: Матеріали міжнародної наукової конференції, присвяченої 130-ти річчю географії у Львівському університеті. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2013. – Том 3. – С. 199–203.
13. Койнова І. Б. Антропогенна трансформація ландшафтних систем західної частини Волинського Полісся : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук : спец. 11.00.01 «Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів» / І. Б. Койнова. – Львів : Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 1999. – 24 с.
14. Круглов І. С. Природні геоекосистеми басейну верхнього Західного Бугу / І. С. Круглов // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія : Географія. – 2015. – № 2. – С. 165–173.

15. Лихо Е.А. Оптимизация ландшафтной территориальной структуры бассейнов малых рек Полесья Украины / Академику Л.С. Бергу – 140 лет: Сборник научных статей. – Бендеры: Еко-TIRAS, 2016. – С. 158–161.
16. Мильков Ф.Н. Антропогенные ландшафты: структура, методы и прикладные аспекты изучения. Сб. науч. трудов / Под ред. Ф.Н. Милькова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. – 144с.
17. Михнович А. Структура річкових систем басейну Верхнього Дністра та її трансформація під впливом природно-антропогенних факторів / А. Михнович // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. географ. – Львів, 1998. – Вип. 21. – С. 161–167.
18. Петровська М.А. Оцінка впливу землекористування на геоecологічну ситуацію Сколівського району Львівської області / Л. Курганевич, М. Петровська // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія. – Випуск 38. – Тернопіль: СМП «Тайп». 2015. – С. 180–187.
19. Пилипович О.В. Геоecологія річково-басейнової системи Верхнього Дністра : монографія / О.В.Пилипович, І.П.Ковальчук / за науковою редакцією професора І.П.Ковальчука. - Львів - Київ : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 284 с.
20. Приходько М.М. Екобезпека природних і антропогенних геосистем: проблеми, цілі, пріоритети / М.М. Приходько // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: географія. Спеціальний випуск: Стале природокористування: підходи, проблеми, перспектива. – Тернопіль: СМП "Тайп", 2010. – № 1 (вип. 27). – С. 219-225.
21. Рідей Н. М. Екологічна стандартизація для забезпечення сталого землекористування та охорони земель / Н. М. Рідей, Д. Л. Шофолов // Людина і довкілля. Проблеми неоекології. – Харків, 2009 – Випуск 11(12). – С. 41–50.
22. Сорокіна Л. Ю. Концептуальні засади дослідження ландшафтів, що перебувають під впливом техногенних об'єктів / Л.Ю. Сорокіна // Укр. геогр. журн. – 2009. – № 1. – С. 3–8.
23. Сухий П.О. Оцінювання антропогенного впливу на басейнові системи / П.О. Сухий, Я.П. Скрипник, І.С. Березка // Науковий вісник Чернівецького університету. Географія. – Вип. 612–613. – Чернівці, 2012. – С. 166–168.
24. Третяк А.М. Методичні рекомендації оцінки екологічної стабільності агроландшафтів та сільськогосподарського землекористування / А.М.Третяк, Р.А.Третяк, М.І. Шквир — К.: Ін-т землеустрою УААН, 2001. – 16 с.
25. Швець О.І. Трансформаційні процеси у басейнових геосистемах правобережної притоки Дністра – р. Бережниця та методи їх оцінювання і картографування / І. П. Ковальчук, О. І. Швець, Ю. М. Андрейчук // Фізична географія та геоморфологія : Міжвідомчий науковий збірник. – К. : ВГЛ "Обрії", 2013. – Вип. 2 (70). – С. 282–294.
26. Шищенко П. Г. Прикладная физическая география / П. Г. Шищенко. – К.: Вища школа, 1988. – С. 44.
27. Шищенко П. Г. Принципы и методы ландшафтного анализа в региональном проектировании : монография. / Шищенко П. Г. – Киев : Фитосоциоцентр, 1999. – 284 с.
28. Batista de Jesus J. Methodology for automatically delimiting permanent preservation areas along water courses - the use of GIS in the hydrological basin of the Sergipe river, Brazil [Електронний ресурс] / J. Batista de Jesus, B. Barros de Souza / Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, São Cristóvão, SE – Brasil, 2016. – Режим доступу: <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v40n2/0100-6762-rarv-40-02-0229.pdf>.
29. Hossain F. Advancing river modelling in ungauged basins using satellite remote sensing: the case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna basin [Електронний ресурс] / F. Hossain // International Journal of River Basin Management. – Volume 14, Issue 1, 2. – January 2016. – Pp. 103-117. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15715124.2015.1089250>.
30. Lautze J. The Zambezi River Basin. Water and Sustainable Development [Електронний ресурс] / J. Lautze, Z. Phiri, V. Smakhtin and D. Saruchera // Earthscan Series on Major River Basins of the World, 2017. – Режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2s2.085013391398&origin=resultslist &sort=plf-f&src=s&sid=225f3a7f399b0e4b0aa533134c2a067b&sot=a&sdt=a&sl=57&s=%28Zambezi+River+Basin++Atlas+of+the+changing+Environment%29&relpos=16&citeCnt=2&searchTerm=>
31. Li Jiaye. An Efficient Method for Mapping High-Resolution Global River Discharge Based on the Algorithms of Drainage Network Extraction [Електронний ресурс] / Li Jiaye, Li Tiejian, Liu Suning, Shi Haiyun // Water. Open Access Journal, 2018. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/533>
32. Lu Ling. Mapping the Soil Texture in the Heihe River Basin Based on Fuzzy Logic and Data Fusion [Електронний ресурс] / Lu Ling, Liu Chao, Li Xin, Ran Youhua // Sustainability. Open Access Journal, 2017. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1246>.
33. Szpikowski Józef. Geomorphological effects of river valleys anthropogenic transformations in the Perznica catchment during the last 200 years (Drawsko Lakeland, Parsęta River basin) [Електронний ресурс] / Józef Szpikowski // Quaestiones Geographicae 30(1), 2011. – Режим доступу: <https://content.sciendo.com/view/journals/quageo/30/1/article-p105.xml?rskkey=VOrorX&result=1>
34. Zambezi River Basin: Atlas of the Changing Environment (2012) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://gridarendalwebsite.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/145/original/ZambeziAtlas_screen.pdf?1483646695

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work.

UDC 911.2:911.9:528.9

Ivan Kovalchuk,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geodesy and Cartography,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
17 Vasylykivska St., Building 6, Kyiv, 03040, Ukraine,
e-mail: kovalchukip@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2164-1259>;

Oksana Mykytchyn,

PhD (Geography), Senior Lecturer, Ivan Franko State Pedagogical University of Drohobych,
23 T. Shevchenko St., Drohobych, Lviv region, 82100, Ukraine,
e-mail: omykytchyn@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8146-5947>;

Andrii Kovalchuk,

PhD Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
2a Akad. Glushkov Av., Kyiv, SME-680, Ukraine,
e-mail: kovalchuk94a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6448-4727>

GEOINFORMATION MODELING OF ANTROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE BASIN GEOSYSTEMS (CASE STUDY OF DNISTER RIGHT TRIBUTARIES)

The purpose of the article is to analyze anthropogenic transformation of river-basin geosystems of the outer Subcarpathian region by geoinformational modeling tools using various methods of quantitative estimation of anthropogenic pressure; comparison of modeling results on the basis of administrative-territorial and natural units, selection of optimal structural units for the study of anthropogenic changes in basin geosystems.

Research methods. The features of estimation methods of anthropogenic transformation level of territorial complexes, based on various conceptual approaches to the study of anthropogenic changes in the components of the environment were investigated. In particular, the article compares methods of F.M. Milkov, P.G. Shyshchenko, E. Klementova and V. Geinige, P.P. Borschevsky, M.V. Boyarin, I.P. Kovalchuk, N.M. Ridey and D.L. Shofolov, A.M. Tretyak and others and by the means of geoinformation modeling of river-basin geosystems (namely, the case study of the outer Subcarpathian Dniester tributaries) shows the degree of representativeness of the results produced by each of them. It is noted that the technique by P.G. Shyshchenko allows to more accurately reflect the state of anthropogenic transformation of the river-basin system's natural conditions

Results. A range of digital cartographic models was developed to evaluate and compare anthropogenic transformation level of the two Carpathian basin systems and to identify similar and distinctive features of the state and the transformation level of the basin systems' natural environment and stability of agricultural and forest landscapes in the studied basin geosystems. In particular, the study has revealed that the anthropogenic transformation of the outer Carpathian river basins is rising downstream. In the upper parts of the basins, it manifests itself in deforestation, while in the lower parts agricultural influence dominates. In addition, the index of anthropogenic transformation is rising with an increase in the order of sub-basins. The worst conditions of agro-landscapes are observed in the reclaimed valleys of the main rivers and their tributaries (due to the considerable level of plowing in the plain parts of the basins due to low fertility of soils, high levels of their acidity, degradation processes and chemical pollution). Stable territories are inherent exclusively in sub-basins which remain in their natural state or bear only traces of human activity. Settlements, which influence adjacent areas, are characterized by unsustainable land use. As for anthropogenic transformation, in the basin geosystem of the Berezhnytsia river its indicators increase upwards due to an increase in the share of arable land. On the contrary, in the basin of Bystrica much more land is occupied by industrial facilities, which affect the components of the geosystem the hardest. In this regard, the largest values of nature anthropogenic transformation indicators are found in the northern part of the basin and upstream of the city of Nadvirna and the town of Bykiv.

Scientific significance. Case study of the administrative regions and the river basin located within them reveals the advantages of studying the geoenvironmental state of the territories according to their natural geographic taxonomic units, which allows to determine the most strained areas in geosystems. Particular attention is paid to the choice of optimum sized geospatial objects during the study of diverse basin systems. River sub-basins of the third order (according to the classification scheme of A. Strahler) were chosen to this purpose. Their size corresponds to that of the combined territorial communities' area. The importance of formation a database that reflects on the state of the geospatial entities under study is emphasized. For this purpose, it is appropriate to convey the structure of land use, represented by indices of different land cover

and land use types (protected areas, forest covered areas, swamps and wetlands, meadows, gardens and vineyards), arable land, land under rural and urban development, natural objects modified by human activities (reservoirs, ponds, channels), land utilized by industry and transport in each investigated object. The article shows that the best solution to this problem is provided by the processing of high-resolution spatial (in pan-chromatic and multispectral) remote sensing data. The most appropriate in this case are QuickBird satellite imagery, designed to create and update topographic maps and plans, to make inventories of forests and agricultural lands and to assess their condition, therefore allowing mapping of land use types that are not identified in statistical inventories.

Practical significance. The results of this work will be helpful in selecting the specific technique allowing the most complete representation of anthropogenic transformation of natural objects; in choosing the most optimal spatial units to carry out the analysis and, accordingly, to fill in the database. The developed models reveal the most anthropogenically loaded parts of river-basin geosystems of the outer Subcarpathian region, which is essential for the extrapolation of the obtained results to other right tributaries of the Dniester River.

Keywords: river-basin geosystems, geoinformation modeling, land use structure, anthropogenic transformation.

References

1. Borschevsky, P.P., Chernyuk, M.O., Zaremba, V.M., Korenyuk, P.I., & Knyazhiv, V.O. (1998). *Improving the efficiency of use, reproduction and protection of land resources of the region*. Kyiv: Agrarian Science, 240.
2. Boyarin, M. V. (2010). *Constructive-geographical Basis of Management in the West Bug River Basin*. *Scientific Bulletin of Volyn Lesya Ukrainka National University: Geographical science*, 15, 164-168.
3. Vishnevskiy, V.I. (2003). *Anthropogenic impact on the rivers of Ukraine*. *Extended abstract of Doctor's thesis*, Lviv, 35.
4. Denisik G.I. (1998). *Anthropogenic landscapes of the Right-bank of Ukraine*. Vinnitsa, Arbat, 292.
5. Dubis, L.F. (1995). *Structural organization and functioning of river systems of the mountainous part of the basin Tisza*. *Extended abstract of candidate's thesis*, Lviv, 25.
6. Ivanov, Ye. A., & Kovalchuk, I.P. (2007). *Historical-geographical and landscape-dynamic aspects of the transformation of natural-economic systems of mining areas*. Vinnitsa *Scientific notes of M. Kotsyubinsky Vinnitsa State Pedagogical University. Series: Geography*, 14, 15-20.
7. Kazakov, L.K. (2007). *Landscape science with the basics of landscape planning*. Moscow: Akademiya, 335.
8. Kyrlyuk, O.V. (2010). *Estimation of small river basins transformation as step to determination of anthropogenic changes of hydromorphological terms*. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 18, 283-289.
9. Klementova, E., & Geynige, B. (1995). *Assessment of the environmental sustainability of the agricultural landscape*. *Irrigation and Water Management*, 5, 24-35.
10. Kovalchuk, A.I., & Kovalchuk, I.P. (Ed.). (2018). *Atlas mapping of river-basin systems*. Lviv: Prostir-M, 348.
11. Kovalchuk, I.P. (2005). *Scientific research principles of degradation processes in river systems of the Podolsk upland*. *Research, reproduction and protection of small rivers*. *Materials of the All-Ukrainian scientific-practical conference* (pp. 63-75). Khmelnytsky.
12. Kovalchuk, I.P., Shvets, O.I., & Andreychuk, Yu.M. (2013). *Analysis of transformation processes of small river basins of the upper part of the Dniester river basin*. *Geographical science and practice: challenges of the era: Materials of the international scientific conference devoted to the 130th anniversary of geography in Lviv University*, 3 (pp. 199-203). Lviv.
13. Koynova, I.B. (1999). *Anthropogenic Transformation of the Landscape Systems of the Western Part of Volynske Polessia*. *Extended abstract of candidate's thesis*, Lviv, 24.
14. Kruhlov, I.S. (2015). *Natural geosystems of the upper Western Bug basin*. *Scientific Notes Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Geography*, 2, 165-173.
15. Licho, E.A. (2016). *Optimization of the landscape territorial structure of the basins of the small rivers of Polesie Ukraine*. *Academician L.S. Berg - 140 years: Collection of scientific articles* (pp. 158-161). Bendery.
16. Milkov, F.N. (1988). *Natural-anthropogenic landscapes as a special category of natural complexes*. *Anthropogenic landscapes: structure, methods and applied aspects of their study*, 4-13.
17. Mykhnovych, A.V. (1998). *Structure of river systems of the Upper Dniester basin and its transformation under the influence of natural and human factors*. *Visnyk of Ivan Franko National University of Lviv: Geography*, 21, 161-167.
18. Petrovska, M., & Kurhanevych, L. (2015). *Assessment of the impact of land use on geocological situation in Skole subregion of Lviv region*. *Scientific Notes Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Geography*, 38, 180-187.
19. Pylypovych, O.V., & Kovslichuk, I.P. (Ed.) (2017). *Geocology of the Upper Dniester river-basin system*. Lviv-Kyiv: LNU of Ivan Franko, 284.
20. Prykhodko, M. M. (2010). *Ecological safety of natural and anthropogenic geosystems: problems, aims, advantages*. *Scientific Notes Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Geography* 1(27), 219-225.

21. Ridey, N.N., & Shofolov, D. L. (2009). *Ecological standardization for sustainable land use and land protection. Man and environment. Problems of neoecology*, 11 (12), 41-50.
22. Sorokina, L. Yu. (2009). *The conceptual foundations of the investigation of landscapes influenced by technogenic objects. Ukrainian Geographic Magazine*, 1, 3-8.
23. Suchij, P.O., Skrypnyk, Y.P., & Berezka, I.S. (2012). *Assessment of anthropogenic impact on the basin system. Scientific Herald of Chernivtsi University: Geography*, 612-613, 166-168.
24. Tretiak A.M., Tretiak, R.A., Shkvyrya, M.I. (2001). *Guidelines for the assessment of environmental sustainability of agricultural landscapes and agricultural land use. Kyiv*, 16.
25. Kovalchuk, I.P. Shvets, O.I., & Andreychuk, Yu.M. (2013). *Transformation processes in the basin geosystems of the Dnister right-bank – Berezchnytsa river and methods of their assessment and mapping. Physical geography and geomorphology: Interdepartmental scientific collection*, 2 (70), 282–294.
26. Shishchenko, P. G. (1988). *Applied Physical Geography. Kyiv, Parent publisher publishing association "Vishcha School"*, 192.
27. Shishchenko P.G. (1999). *The principles and methods of landscape analysis in regional planning. Kiev: Fito-sotsiotsentr*, 284.
28. Batista de Jesus, J., & Barros de Souza, B. (2016). *Methodology for automatically delimiting permanent preservation areas along water courses - the use of GIS in the hydrological basin of the Sergipe river, Brazil. Available at <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v40n2/0100-6762-rarv-40-02-0229.pdf>*.
29. Hossain F. (2016). *Advancing river modelling in ungauged basins using satellite remote sensing: the case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna basin. International Journal of River Basin Management* 1(14), 2016, 103-117. Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15715124.2015.1089250>.
30. Lautze, J., Phiri, Z., Smakhtin, V., & Saruchera, D. (2017). *The Zambezi River Basin. Water and Sustainable Development. Available at <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.085013391398&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=225f3a7f399b0e4b0aa533134c2a067b&sot=a&sdt=a&sl=57&s=%28Zambezi+River+Basin++Atlas+of+the+changing+Environment%29&relpos=16&citeCnt=2&searchTerm=>*
31. Li, J., Li, T., Liu S., & Shi H. (2018). *An Efficient Method for Mapping High-Resolution Global River Discharge Based on the Algorithms of Drainage Network Extraction. Water. Open Access Journal. Available at <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/533>*
32. Ling Lu, Chao Liu, Xin Li, & Youhua Ran (2017). *Mapping the Soil Texture in the Heihe River Basin Based on Fuzzy Logic and Data Fusion. Sustainability. Open Access Journal, 2017. Available at <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1246>*.
33. Szpikowski Józef (2011). *Geomorphological effects of river valleys anthropogenic transformations in the Perznica catchment during the last 200 years (Drawsko Lakeland, Parsęta River basin). Quaestiones geographicae* 30(1), Available at <https://content.sciendo.com/view/journals/quageo/30/1/article-p105.xml?rskey=VOrorX&result=1>
34. *Zambezi River Basin: Atlas of the Changing Environment* (2012). Available at https://gridarendalwebsite.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/145/original/ZambeziAtlas_scre en.pdf?1483646695

UDC 911.3:314.151.3-054.73(477)

Liudmyla Mykolaivna Niemets,

Doctor of Sciences (Geography), Professor,
Head of the Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: soc-econom-region@karazin.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9943-384X>;

Nataliia Volodymyrivna Husieva,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
e-mail: gusewa3110@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3620-1213>;

Taras Heorhiiovych Pohrebskyi,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Economic and Social Geography,
Faculty of Geography, Lesya Ukrainka Eastern European National University,
9 Potapova St., Lutsk, 43000, Ukraine,
e-mail: taraspogrebskyi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2290-134X>;

Oksana Volodymyrivna Bartosh,

Associate Faculty, School of Humanitarian Studies, Environment, Sustainability,
2005 Sooke Road, Victoria BC V9B 5Y2, Canada,
e-mail: okasana.bartosh@royalroads.ca;

Maryna Oleksandrivna Lohvynova,

PhD Student, Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
e-mail: logvinova_mari94@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3190-710X>

INTEGRATION OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS OF UKRAINE: REALITIES, PROBLEMS, PERSPECTIVES

Л. М. Немець, Н. В. Гусєва, Т. Г. Погребський, О. В. Бартош, М. О. Логвинова. ІНТЕГРАЦІЯ ВНУТРІШНЬО ПЕРЕМІЩЕНИХ ОСІБ УКРАЇНИ: РЕАЛІЇ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ. Проблема вимушених внутрішніх переміщень в Україні стала надзвичайно гострою з 2014 р. На початок березня 2019 р. на обліку в державі перебувало 1 млн. 365 тис. внутрішньо переміщених осіб (ВПО) з Донецької та Луганської областей, Автономної Республіки Крим та м. Севастополя (3,2 % від загальної чисельності населення України). Вимушені внутрішні переміщення в таких масштабах і такої, вже досить серйозної тривалості (5 років) викликають складні питання, пов'язані з соціальною адаптацією та інтеграцією ВПО в місцеві соціуми.

Самооцінка ВПО України своєї інтегрованості у місцеві громади характеризується наступними особливостями: 1) на кінець 2018 р. складає 50 % (ще 34 % вважають себе інтегрованими частково); 2) протягом останніх двох років має негативні тенденції (що може свідчити про накопичення і загострення проблем переселенців через відсутність довгострокових рішень щодо їх розв'язання); 3) суттєво перевищує оцінку, надану фахівцями (які вважають, що інтегрованими в місцеві громади є 24 % ВПО, ще 63 % – частково інтегрованими); 4) збільшується по мірі віддаленості від території конфлікту (найнижчий рівень інтегрованості – 43 % – спостерігається у сусідніх з тимчасово окупованими територіями Донбасу регіонах).

Політика України щодо ВПО в першу чергу повинна бути спрямована на вирішення нагальних проблем переселенців, але в той же час мати середньострокову і довгострокову перспективи. При цьому при прийнятті управлінських рішень необхідно віддавати пріоритет програмам, спрямованим на довгостроковий ефект вирішення проблем ВПО, їх соціалізацію, адаптацію та інтеграцію в місцеві громади. Важливим кроком на шляху до цього є прийняття в листопаді 2018 р. «Стратегії інтеграції ВПО та впровадження довгострокових рішень щодо внутрішнього переміщення на період до 2020 року», метою якої є соціально-економічна інтеграція ВПО та впровадження довгострокових рішень для реалізації та захисту їх прав, свобод і законних інтересів, підвищення рівня їх самодостатності та незалежності з урахуванням інтересів приймаючих територіальних громад, налагодження ефективної взаємодії ВПО з приймаючими територіальними громадами, органами державної влади та органами місцевого самоврядування на засадах партнерства, результатом якого є досягнення соціальної єдності.

Ключові слова: вимушені внутрішні міграції, внутрішньо переміщені особи, приймаючі громади, проблеми, інтеграція, адаптація.

Л. Н. Немец, Н. В. Гусева, Т. Г. Погребский, О. В. Бартош, М. А. Логвинова. ИНТЕГРАЦИЯ ВНУТРЕННЕ ПЕРЕМЕЩЕННЫХ ЛИЦ УКРАИНЫ: РЕАЛИИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ. Проблема вынужденных внутренних перемещений в Украине стала чрезвычайно острой с 2014 г. На начало марта 2019 г. в государстве насчитывалось 1 млн. 365 тыс. внутренне перемещенных лиц (ВПЛ) из Донецкой и Луганской областей, Автономной Республики Крым и г. Севастополя (3,2 % от общей численности населения Украины). Вынужденные внутренние перемещения в таких масштабах и такой продолжительности (более 5 лет) вызывают сложные проблемы, связанные с социальной адаптацией и интеграцией ВПЛ в местные социумы.

Самооценка ВПЛ Украины уровня своей интегрированности в местные общины характеризуется следующими особенностями: 1) на конец 2018 г. составляет 50 % (еще 34 % переселенцев считают себя частично интегрированными); 2) в течение последних двух лет имеет негативные тенденции (что может свидетельствовать о накоплении и обострении

проблем ВПЛ, т.к. государство не принимало долгосрочных мер по их решению) 3) существенно превышает оценку, данную специалистами (которые считают, что интегрированными в местные общины являются всего 24 % ВПЛ, еще 63 % – частично интегрированными); 4) увеличивается по мере удаленности от территории конфликта (самый низкий уровень интегрированности – 43 % – наблюдается в соседних с временно оккупированными территориями Донбасса регионах).

Политика Украины относительно ВПЛ в первую очередь должна быть направлена на решение насущных проблем переселенцев, но в то же время иметь среднесрочную и долгосрочную перспективы. При этом при принятии управленческих решений необходимо отдавать приоритет программам, направленным на долгосрочный эффект решения проблем ВПЛ, их социализацию, адаптацию и интеграцию в местные общины. Важным шагом на пути к этому является принятие в ноябре 2018 г. «Стратегии интеграции ВПЛ и внедрения долгосрочных решений относительно внутреннего перемещения на период до 2020 года», целью которой является социально-экономическая интеграция ВПЛ и внедрение долгосрочных решений для реализации и защиты их прав, свобод и законных интересов; повышение уровня их самостоятельности и независимости с учетом интересов принимающих территориальных общин; налаживание эффективного взаимодействия ВПЛ и принимающих территориальных общин, органов государственной власти и органов местного самоуправления на принципах партнерства, результатом которого станет достижение социального единства.

Ключевые слова: вынужденные внутренние миграции, внутренне перемещенные лица, принимающие общины, проблемы, интеграция, адаптация.

The research problem statement. The problem of forced internal displacement in Ukraine has become extremely acute since 2014. Thus, according to the departments of social protection of the population in the regional state administrations and Kyiv state administration there were 1 million 365 thousand immigrants [5] from Donetsk and Luhansk regions, the Autonomous Republic of Crimea and the city of Sevastopol (3.2% of the total population of Ukraine at the beginning of March 2019) [28]. Forced internal displacement on such a scale and of such serious duration (5 years) raises complex issues related to social adaptation and integration of internally displaced persons into local societies. These issues relate to the availability of workplaces for migrants, housing arrangements, access to health facilities, education, etc. Local communities that have received a significant number of internally displaced persons get an additional burden on a limited local infrastructure, as well as a significant rise in house and food prices, which are compounded by low wages and difficulty in finding employment [22]. All of this impedes the successful integration of forced migrants into local communities.

In this regard, one of the priority tasks of the state is to identify the main problems of the integration of internally displaced persons and to make long-term decisions on their solution. As a result, individuals who are now internally displaced, will be able to successfully integrate into local communities. This will increase the level of their self-sufficiency and independence, taking into account interests of host territorial communities. Internally displaced persons will no longer require specific assistance and protection measures in connection with their movement, will be able to exercise their rights without restrictions on the level with other citizens. An effective interaction with host communities, state authorities and local self-government bodies will be based on partnership principles. The result of this will be achievement of social unity [22].

The aim of the paper is to analyze the realities, prospects and possible ways of solving the problems of integration of Ukrainian settlers in the local communities based on the analysis of the real situation and international experience in the regulation of the situation with the internally displaced persons, numerous studies of the forced migrations of foreign and Ukrainian scholars.

Analysis of previous research. Peculiarities of migrants' integration into host communities are studied not only by scholars of different fields (sociologists, political scientists, lawyers, economists, social geographers, etc.), but also by international organizations and public associations. Problems of adaptation and integration of internally displaced persons in different countries (especially in Somalia, Yemen, Libya, Nigeria) are studied by international organization UNHCR (Office of the United Nations High Commissioner for Refugees) [26].

International Organization of Migration in its research "Reasons to remain (part 2): determinants of IDP integration into host communities in Iraq" (2019) is studying steady integration of internally displaced persons in the governorates of Baghdad and Sulaymaniyah. During the 2014-2018 period, these governorates have hosted many internally displaced persons, among which few have returned [42].

International organization "The Global Knowledge Partnership on Migration and Development" (KNOMAD) in 2017 has conducted a study on the impact of internally displaced persons on host communities in Colombia [34].

Investigation of forced resettlement in Georgia, internally displaced persons attitude towards conflict, return and justice was conducted by the Caucasian Research Resource Center (CRRC) in conjunction with Reconciliation Resources (CR) with the financial support of the European Commission's Instrument for Stability. The survey was conducted in June 2010 among the internally displaced persons of Abkhazia, who now live in the country's temporary collective settlement centers [36].

The geography of international research on the integration of internally displaced persons is expanding. J. Crisp, formulating the concept of integration, studied local integration and local refugee settlements [33]. B. Otabor and J. Shodeinde have studied the social integration of the internally displaced persons of Nigeria and the role of civic organizations in these processes. The study consist in investigation of the consequences of an uprising on the lives of internally displaced persons, the problems encountered by non-governmental organizations in securing the social integration of internally displaced persons in local communities [44].

M. Aysa-Lastra has made a comparative analysis of labor adaptation of internally displaced persons on official and informal labor markets, using data from an experimental census carried out in the metropolitan area of Bogota (Colombia). It is confirmed that internally displaced persons are more often unemployed or working in the informal sector of the economy [31].

H. Young and K. Jacobsen have investigated the adaptation of internally displaced persons in urban areas, on example of the province of Darfur (Sudan) [46]. S. Fransen and Ö. Bilgili have drawn attention to the insufficient research of the internally displaced persons integration. They investigated how various factors, such as the experience of repatriation and return conditions, affect the reintegration of Burundi [35].

O. Arowolo proposed a programmatic approach to achieving social and economic reintegration for all categories of returning migrants. A clear list of key elements for an effective reintegration program is required, and governments should focus on the institutional mechanism of integration, including the establishment of a responsible authority or agencies [30].

N. Vrecer examines the processes of integration of forced migrants from Bosnia and Herzegovina in Slovenia. Due to spatial constraints special attention is paid to economic, political and psychological integration [45].

Daniel V. Perrucci, Bianca A. Vazquez, Can B. Aktas have studied how internally displaced persons adapt to local climatic conditions at a new place of residence, noting that assistance and temporary housing should take into account the real needs and desires of settlers to adapt to local climatic conditions [40].

A sociological research of the peculiarities of social adaptation and integration of internally displaced persons in local communities of Ukraine was conducted by "The Ukrainian Office of IFAK Institute International Research Agency" [41].

Problems of integration of migrants in Ukraine were highlighted in the study "Internally Displaced

Persons: Social and Economic Integration in Host Communities Based on Materials of Vinnytsia, Zaporizhzhia, Ivano-Frankivsk and Poltava Regions" in 2016 [24].

NGO "Youth Alternative" conducted a study "Assessment of Problems of Psychological, Socio-Economic Adaptation and Integration of Women from Internally Displaced Persons into New Communities (Vinnytsia, Lviv and Kyiv regions)", assessing the problems of adaptation of migrant women to new living conditions, opportunities for interaction between internally displaced persons and local authorities and host communities, suggestions for power, etc. [3].

The CEDOS Analytical Center presents the index of integration of internally displaced persons in 20 Ukrainian cities, which was valued according to three criteria: access to urban infrastructure, the ability of authorities to respond quickly to migration, the interaction of local communities and migrants [18].

In 2014-2015, scientific institutions of Ukraine began to explore the problems of internally displaced persons. In autumn 2014, the State Institution "Institute of Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine", the M. V. Ptukha Institute of Demography and Social Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine, the Institute of Economic and Legal Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Institute of Industrial Economics of the National Academy of Sciences of Ukraine in cooperation with non-governmental organizations of the internally displaced persons (in particular, "Congress of the East of Ukraine") have created a permanent Forum on the resolution of internally displaced persons problems. On the basis of the Forum in 2014-2015 two scientific conferences and a series of "round tables" were held. Interim results of scientific research were summarized in the National report "Policy of Integration of Ukrainian Society in the Context of Challenges and Threats of Events in the Donbass" [21]. Scientific researches aimed at solving the problems of internally displaced persons were conducted simultaneously by scientists at universities, central and local government services and authorities, as well as state (National Institute for Strategic Studies) and non-governmental (for example, Crimea-SOS, CEDOS), think tanks [25].

From the point of view of sociology, the problems of adaptation and integration of internally displaced persons were handled by M. Sobolevska, considering these problems in the context of the processes that influenced Ukrainian society during the last three years [43]. I. Titar explored the possibility of interpreting the concepts of "adaptation of internally displaced persons" and "integration of

internally displaced persons" within the framework of socio-cultural and resource-based approaches. He reviewed the theoretical and practical dimensions associated with the conditions for the abolition of the immigrant's status [25].

From the standpoint of political science, V. Antonyuk studied the problem of adaptation and integration of internally displaced persons. The author identified the areas for improvement of socio-economic policy regarding the more effective use of the potential of the internally displaced persons for solving their own problems and the development of territorial communities [1].

N. Krakhmalova has proved that the overwhelming part of the problems faced by internally displaced persons in the process of adaptation remains unresolved (among them the problem of housing, employment, financial position, dissolution of family ties, the problem of adaptation) [19].

M. Filak and Y. Zavadovska have analyzed the state of socio-economic adaptation of settlers in host communities, comparing the main intermediate factors of the integration of forced migrants [27]. In addition, studies by S. Zadorozhna and I. Karpova, which analyzed the state of integration of internally displaced persons in local communities in the sociological aspect, investigated the factors of integration of internally displaced persons into local communities, identified the main problems of settlers and their level of awareness of themselves as part of the local community, intentions after the end of the conflict on the Donbass [8].

T. Dlugopolska investigated the role of international and public organizations in the social adaptation and integration of internally displaced persons in host communities in Ukraine. Based on surveys conducted in several regions of Ukraine (448 respondents from six regions), the perception of the majority of the population of migration as a challenge for social security was substantiated. However, in general, tolerant attitude of local residents to the internally displaced persons was recorded [6].

A. Dyachenko studied the ways to ensure the integration of internally displaced persons in Ukraine, considering its directions and possible relief measures, in particular, housing and employment [7]. Expert of the Institute of Democracy by P. Orlik V. Kipen points out that internally displaced persons for the country, the state and local communities should not be an annoying problem but an additional resource for development. The migrants themselves are able to adapt in their host communities and be full citizens, overcoming the pain of loss and the difficulties of living in new conditions. In order to successfully integrate internally displaced persons into local communities, the scientist pro-

poses to consolidate the efforts of the state and civil society [29].

M. Zakirov emphasizes, that in view of the extent of resettlement and difficult economic and political circumstances, lack of practical experience, Ukraine is gradually moving towards the solution to the problems of internally displaced persons due to their successful integration into new communities and creation of a social protection system for this category of population [9,10].

At the end of 2018 in Ukraine the " Strategy for the integration of internally displaced persons and the implementation of long-term decisions on internal movement for the period up to 2020" was adopted at the legislative level. It is aimed at solving the problem of the internal displacement of Ukrainian citizens and their consequences, creation of effective tools of state administration, meeting the urgent and permanent needs of internally displaced persons [23].

Consequently, the problems of socialization, adaptation and integration of internally displaced persons into host communities are extremely topical and of concern to the international community. At the same time, they remain insufficiently researched, especially from the standpoint of human geographers. Further research needs to improve the concept and terminology of the study of the integration of internally displaced persons, in particular, the clear delineation of the concepts of "integration" and "adaptation", the development of integration criteria, research on the integration of migrants in regions and large cities, ways of successful integration of internally displaced persons into host communities, etc. The question remains as to who should be associated with the internally displaced persons to integrate into the local community: who considers himself integrated and does not intend to return to his place of residence even after the end of the conflict, that is, based on subjective criteria? Are those who are considered integrated professionals (representatives of non-governmental organizations, social workers, local authorities, etc.), that is, taking into account an objective assessment of integration? Those who bought their own accommodation at the place of movement? Those who have a sense of belonging to the community in their current place of residence, that is, according to the criterion of identity? Or must all these criteria be taken into account at the same time? There is no single answer to this question.

Adaptation and integration of internally displaced persons. An important task for any state faced with the problem of internal forced displacement is to ensure the adaptation and integration of internally displaced persons.

Adaptation is understood as the process of adapting a migrant to new living conditions. Geographic, social, cultural, medical-biological, psychological and other types of adaptation are allocated [20]. The notion of "adaptation" to forced migrants means a process that lasts for a short period after moving to a new location and involves the need to survive the change in the place of residence and adapt their lifestyles to new conditions [25].

Integration is the final stage of the migration process. This is the process of deep embedding of the migrant into the host society by the state-

established integration model: multiculturalism, integration, assimilation or segregation [20].

In general, two theoretical and methodological approaches to understanding of the adaptation and integration of the internally displaced persons – socio-cultural and resources (Table 1) can be distinguished. The socio-cultural approach pays more attention to the inner world of internally displaced persons, subjective dimensions of adaptation and integration, resources approach – to the external attributes of internally displaced persons and, accordingly, the objective parameters.

Table 1

Theoretical and methodological approaches to understanding of the adaptation and integration of internally displaced persons (compiled by [25])

Approach	Adaptation	Integration
Socio-cultural approach	overcoming shock from changing the habitual cultural environment and the need to adapt to another culture, including finding a way to coexist the identity of the internally displaced persons with the identities of the surrounding groups. The measure of adaptation of the internally displaced persons is to overcome the psychological stress caused by the fact of moving to a new place of residence.	the convergence of identities of internally displaced persons and communities, among whom live internally displaced persons, the establishment of communication and the formation of harmonious cultural forms between forced migrants and all other members of society. The process of such convergence can be both one-sided (assimilation) and two-way (multiculturalism). Signs of integration in this approach are the convergence of cultural and social distances between the internally displaced persons and the rest of the groups. The success of integration is evidenced by the number of conflicts and tensions between the internally displaced persons and the host community, the importance of the social distance.
Resources approach (in the broad sense it can also be called "economic")	adapting to the loss of a significant part of the resources that had internally displaced persons before to move, as well as access to resources in a new location. For the first time, the approach was clearly presented by anthropologist B. Harrell-Bond [37]. The measure of adaptation of the internally displaced persons is to obtain information on the availability and location in the new place of residence of the resources necessary to maintain "life" (housing, food, sources of income (wages, business income, social benefits), health care, educational institutions, transport and communications, etc.).	setting up and harmonizing the sharing of resources between the internally displaced persons and the host community. According to the widely used study of migrants (refugees) by B. Harrell-Bond, integration is defined as "... a situation in which receiving communities and refugees can co-exist, sharing the same resources (both economic and social) without more mutual conflicts than those that exist in the host community" [37]. In measuring the success of integration, attention will be drawn to the socio-demographic and economic well-being of individuals and families who have migrated. In addition, an indirect but important indicator may be the percentage of internally displaced persons that did not remain at the appropriate place to which they moved [32].

In Ukrainian conditions, taking into account the fact that there are in fact no significant differences in culture and identities between the internally dis-

placed persons and the communities that host them, the socio-cultural approach is less relevant. The same as in the world, the resources approach may be

more relevant. At the same time, the socio-cultural approach will be more relevant for some groups that really differ significantly in their culture and identity (for example, Roma from the Donetsk region or traditionalist-minded Muslim communities in the AR Crimea). Therefore, it is advisable to use synthesis of both approaches and to check which ones are more appropriate for specific groups and conditions [25].

Full integration will take 5-10 years [18]. The Office of the United Nations High Commissioner for Refugees identifies three forms of integration:

- 1) local integration at the place of displacement;
- 2) integration in a new location;
- 3) return and reintegration [26].

These are three possible ways of migrating from a temporary vulnerable state to a state where the needs caused by its forced displacement are generally satisfied. The choice of this path is not made by the state, but by every person respecting freedom of movement, private and family life, the prohibition of discrimination, and taking into account other rights and freedoms. In order to ensure the proper

implementation of such an election of internally displaced persons, the state must create the right conditions [23].

Regarding the interaction between forced migrants and the local population, three categories can be distinguished:

- integration and interaction (the result: internally displaced persons is the driving force of regional development);
- partial interaction (internally displaced persons are successfully integrated, but practically do not affect on the development of host communities);
- disintegration (the local population is negatively related to the internally displaced persons, which leads to conflicts and discrimination, the emergence of new geopolitical faults).

Level of integration of internally displaced persons of Ukraine into the local communities. As of the end of 2018, 50% of Ukrainian internally displaced persons reported that they were integrated into local communities, 34% – partly integrated, and 14% – that they were not integrated (*Figure 1*).

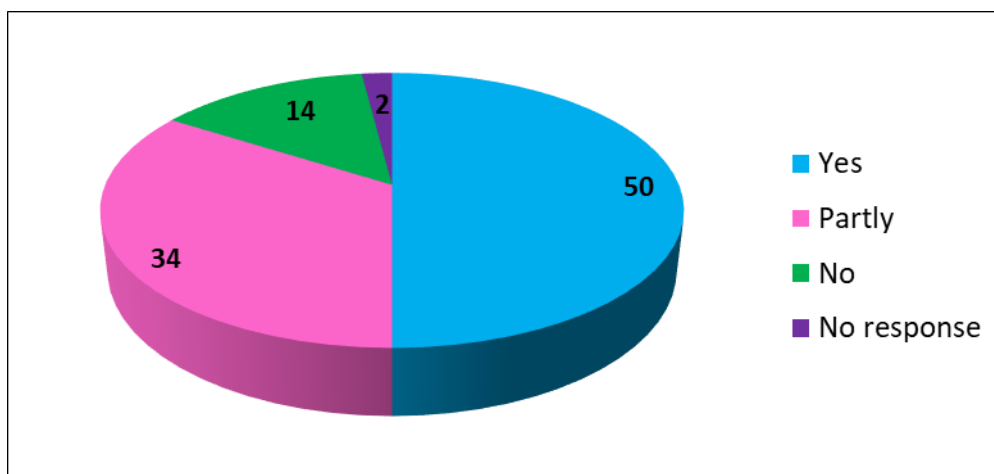


Fig. 1. IDPs' self-assessment of their integration in the local community by December 2018, % of respondents (compiled by [16])

With regard to regional features in general, it can be noted that the level of integration increases with the distance from the territory of the conflict. Accordingly, the lowest level (43%) is observed on Donbas territories controlled by Ukrainian authorities (*Figure 2*). This can be explained by the fact that the internally displaced persons who from the very beginning intended to return to their places of residence after the end of the conflict and have not changed it to this day migrated to the adjacent temporarily occupied territories of Donbas region.

Despite the fact that 5 years have already passed, such migrants consider their current place of residence as temporary and do not take any action to integrate into the local community.

Self-assessment of the internally displaced persons as to integration into local communities has had negative tendencies over the last one and a half years (*Figure 3*). While in mid-2017 about 11% of immigrants reported on non-integration into local communities, at the end of 2018 there were already 14%. Accordingly, the level of integration of migrants has decreased from 56% to 50%. This may indicate an accumulation and exacerbation of internally displaced persons problems due to the lack of long-term solutions to their problems, which impedes the successful integration of forced migrants into local communities.

The self-assessment of internally displaced persons integration is subjective and substantially ex-

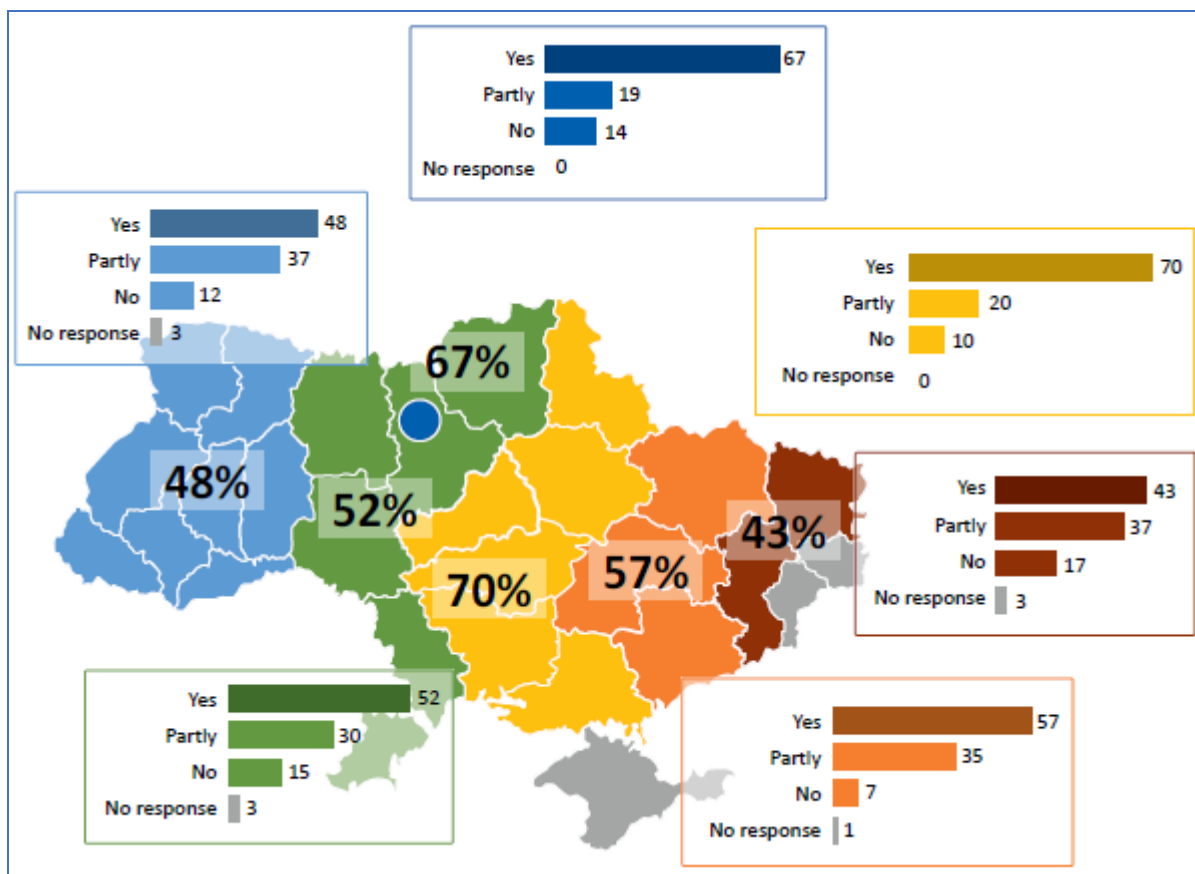


Fig. 2. IDPs' self-assessment of their integration in the local community by regions of Ukraine by December 2018, % of respondents [16])

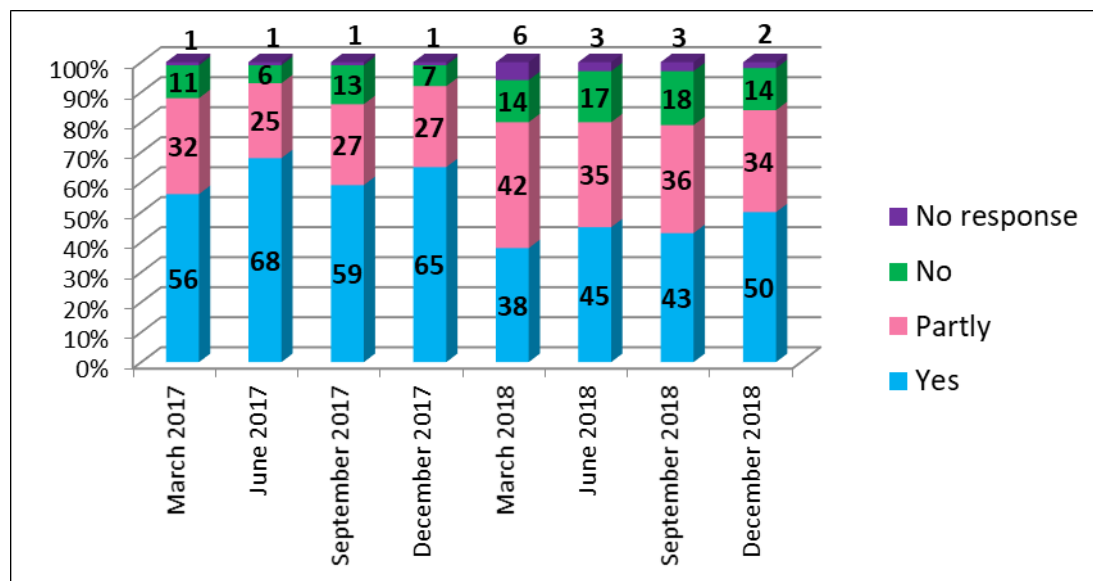


Fig. 3. Dynamics of IDPs' self-assessment of their integration in the local community during March 2017 – December 2018, % of respondents (compiled by [16])

ceeds the objective assessment provided by competent persons (representatives of non-governmental organizations, social security workers, local authorities, educational institutions, healthcare facilities, etc.) who work closely with forced migrants (Figure 4-5).

Conditions for the successful integration of internally displaced persons into local communi-

ties. Main conditions for the successful integration of internally displaced persons are housing (87%), permanent income (77%) and employment (48%). Other commonly mentioned conditions were family and friends in the same place (44%), access to social services (38%), community support (29%), easy access to documents (18%) and the possibility to vote on local elections (13%) [16] (Figure 6). But

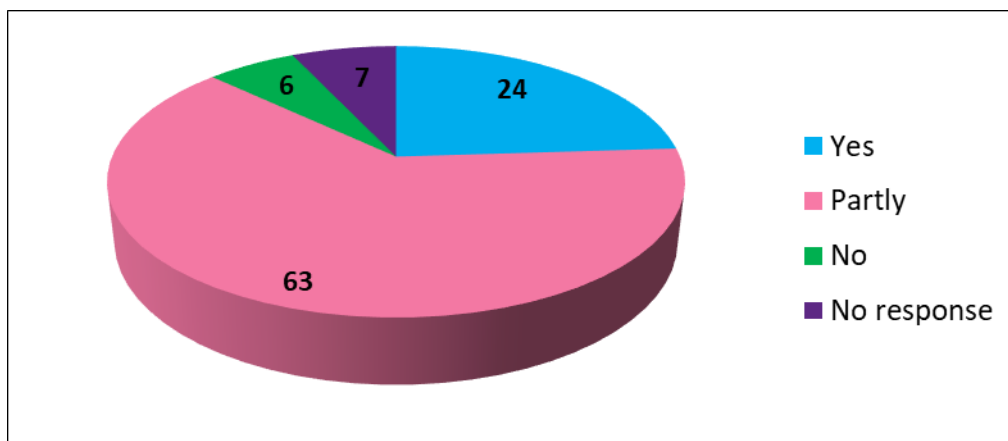


Fig. 4. Objective assessment of IDPs' integration in the local community by December 2018, % of respondents (compiled by [16])

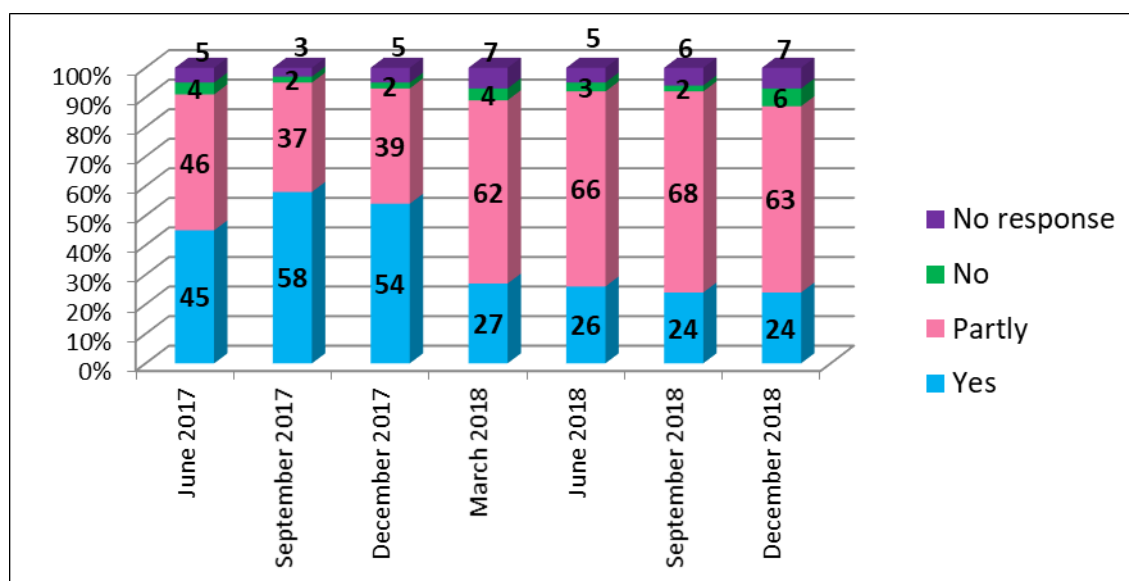


Fig. 5. Dynamics of objective assessment of IDPs' integration in the local community during June 2017 – December 2018, % of respondents (compiled by [16])

these are only formal indicators of successful integration. Deep factors include, in particular, the identity, mental characteristics of the receiving society. But this issue, due to its complexity, requires a much longer and more detailed study.

Self-assessment of internally displaced persons integration into local communities most closely correlates with a sense of trust in the local population, with the frequency with which they turn to local people for help in everyday affairs, as well as with a sense of belonging to people at their present place of residence (Figure 7-9).

Problems of integration of the internally displaced persons in Ukraine. According to the "Strategy for the integration of internally displaced persons and the implementation of long-term decisions on internal movement for the period up to 2020" [22], the most common problems of internally displaced persons integration into local communities are:

- social uncertainty of the internally displaced persons because of the continuation of the international armed conflict, lack of opportunities to find decent housing and to equip their everyday life in a new place;
- preserved risks of social exclusion of internally displaced persons in the workplace due to the inadequacy of qualifications for local labor markets, lack of jobs in the specialties on which the migrants have the appropriate qualifications and professional experience;
- limited financial resources of territorial communities to address the issues of access of internally displaced persons for quality living conditions, medicine and education, vocational training (retraining);
- risk of poverty for able-bodied migrants due to problems with access to local labor markets and/or lack or low incomes, in particular from entrepreneurial and individual activities;

- ineffectiveness of legal mechanisms for the protection of rights, including the mechanism for confirmation of acts of civil status, and the lack of an effective network of assistance to internally displaced persons in the regions [22].

The greatest obstacle to the involvement of internally displaced persons in the life of a territorial community is lack of their own housing, the problem of obtaining social services and the problem of

employment. These issues were discussed in detail in the articles "Forced internal displacement in Ukraine: realities, socio-economic problems, perspectives" [38] and "Migration Challenges of the 21st Century: The Experience of Ukraine" [39]. Interestingly, some ways to address these problems create additional barriers to the integration and social adaptation of internally displaced persons in host communities. This applies, in particular, to

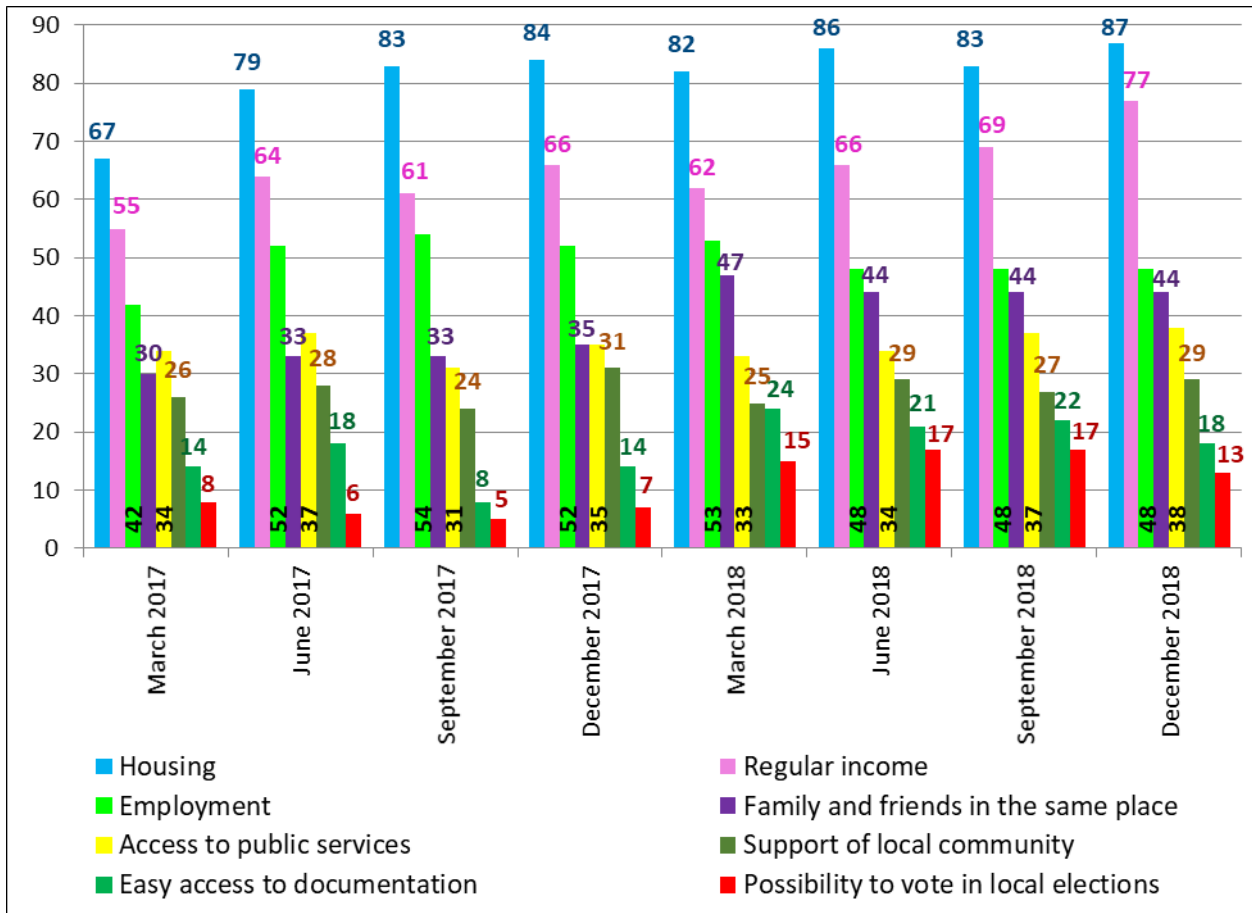


Fig. 6. IDPs' conditions for integration in the local community during March 2017 – December 2018, % (compiled by [16])

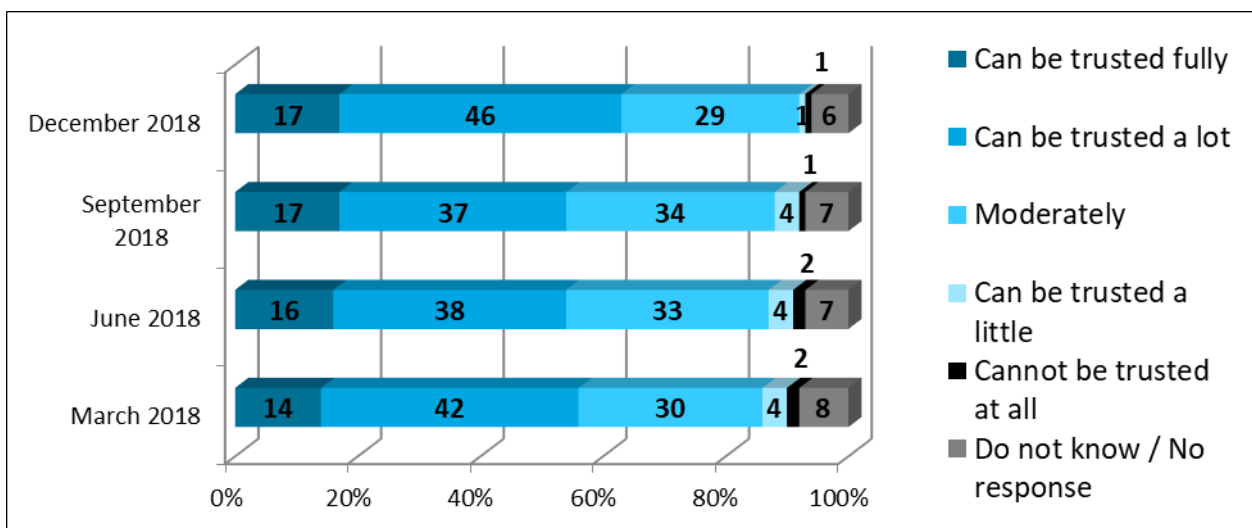


Fig. 7. IDPs' level of trust towards the local population in their current place of residence, % (compiled by [16])

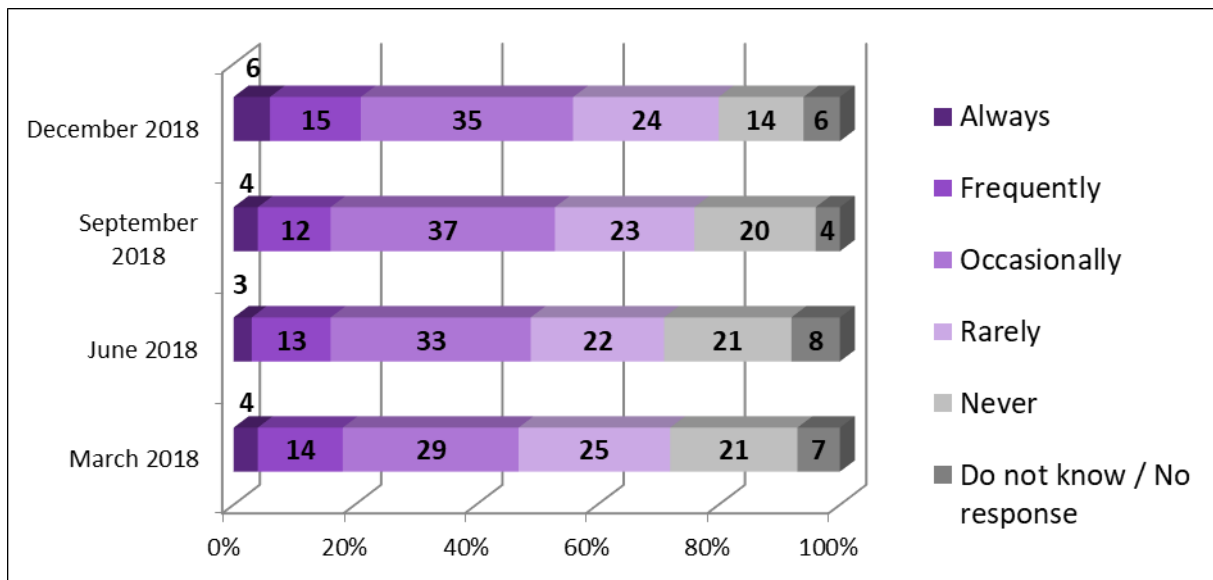
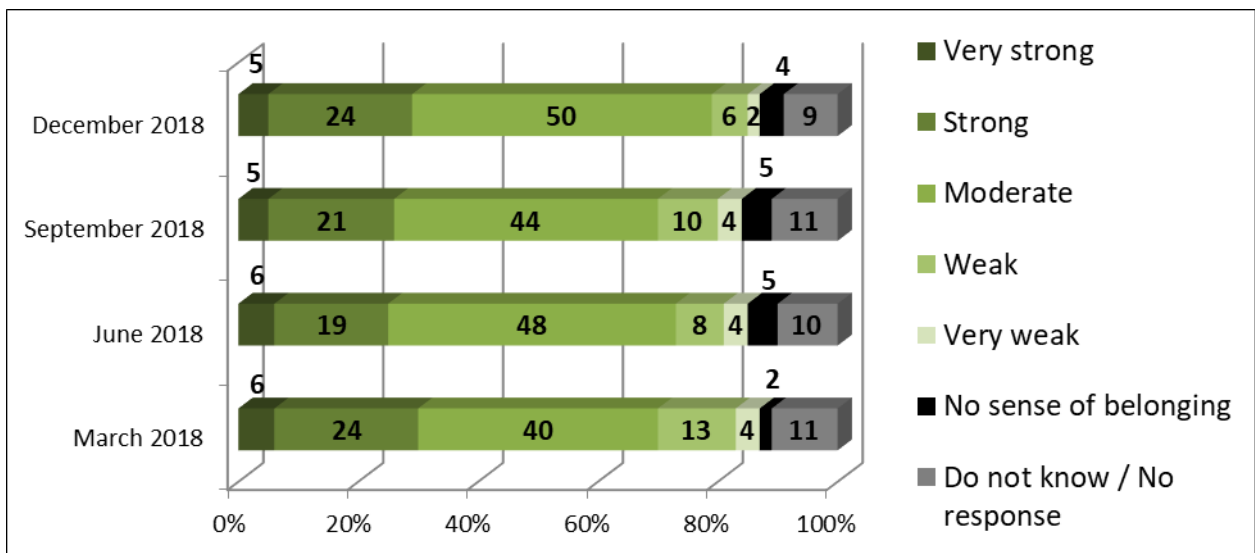
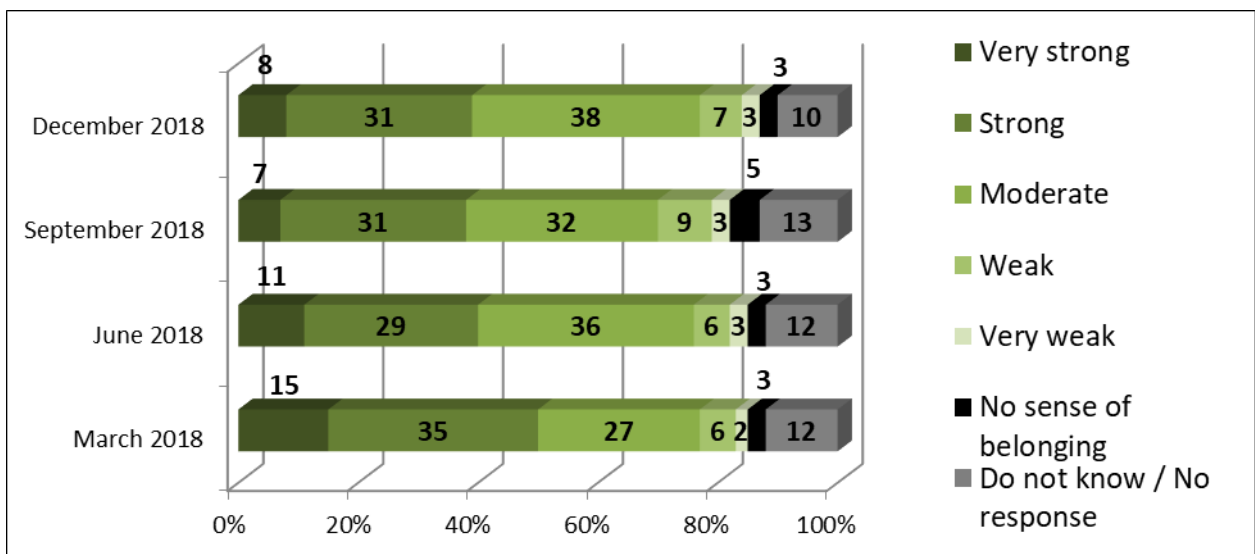


Fig. 8. Frequency of IDPs' reliance on locals for everyday favours, in the past six months (compiled by [8,12,16,17])



A. Community in your **current** place of residence



B. Community in your **former** place of residence

Fig. 9. Strength of IDPs' sense of belonging to community in current/former place of residence, % (compiled by [16])

creation of places of compact residence of settlers, that is, specially created settlements, modular towns for internally displaced persons. Living in them through an isolated situation and perceptions by migrants as a temporary residence is an additional integration barrier. We should also pay attention to the problems that arise because of the continued receipt of social assistance benefits. The experience of the countries has shown that receiving more than 10 years of social assistance has made of settlers the inert people [2].

One of the issues in the integration of the internally displaced persons into the territorial communities is to enable them to exercise their electoral rights at local elections held in the territorial communities of their permanent residence [22].

Major obstacle for successful integration of internally displaced persons into local communities is the manifestation of discrimination. According to a regional research "Problems of adaptation and employment of internally displaced persons in Luhansk region", conducted by the Institute of development and social initiatives in January-February 2015, one third respondent noted that they personally encountered with "manifestations of discrimination in employment, rent or other households situations" [41]. In December 2018, 5% of the internally displaced persons reported about discrimination or unfair treatment in relation to their status. This was mainly related to housing (31%), health (31%), employment (30%), interaction with the local population (26%) and receiving administrative services (21%) [16].

Measures of successful integration of internally displaced persons into host communities. To integrate immigrants into host communities, it is necessary to carry out the following measures:

- formation and implementation of organizational and managerial principles of effective integration of internally displaced persons, development of social cohesion, strengthening of socioeconomic security and sustainability of host communities and internally displaced persons;
- ensuring the development of regional (local) programs and plans taking into account the needs of the internally displaced persons;
- monitoring the state of integration of the internally displaced persons in the host communities and assessing their needs;
- creation of favorable conditions for the development of youth from internally displaced persons in host communities;
- providing support from the state budget to local budgets of host communities, taking into account the actual number and needs of internally displaced persons living in these communities;
- establishment and continuous functioning of the mechanism of inter-sectoral interaction

(health, psychological and social support, public order protection, legal assistance) and interaction with the public in order to further strengthen capacity and coordinate activities on responding to gender-based and other forms of violence;

- making changes to the legislation in order to include the internally displaced persons in the registers of the host communities to which they have moved;
- developing a mechanism for the implementation of electoral rights of the internally displaced persons at local elections held in host communities of their permanent residence;
- conducting an information campaign to highlight the positive experience of the integration of internally displaced persons;
- development of a system of psychological and social assistance for solving common issues of host communities and internally displaced persons;
- development of advisory mechanisms to involve local governments and local self-government bodies in decision-making processes, dialogue between them and the internally displaced persons, as well as between the local population and internally displaced persons;
- conducting training in host communities to establish an effective dialogue between internally displaced persons and local executive authorities and local self-government bodies;
- implementation of decentralization projects taking into account the interests of internally displaced persons in host communities to strengthen trust between the state and host communities by strengthening collegial, inclusive and accountable governance processes;
- attracting international technical assistance to increase the capacity of host communities to respond to internal displacement;
- introduction of effective financial and credit mechanisms for supporting the business of internally displaced persons, which will positively influence the economic development of host communities [22].

An important component of the social integration of migrants is their interpersonal communication with local residents of host communities, their inclusion in local customs and traditions, joint cultural and artistic activities, etc. There is a necessity to implement social projects such as the social initiative "New neighbors" to integrate migrants into a new social environment, open points of psychological help, etc. [24].

According to the report of National Monitoring System by socio-economic characteristics of internally displaced persons, their households and the

challenges they faced on, 22% of internally displaced persons are planning to return to their previous residence after conflict, another 21% allows for this opportunity in the future, and 36% do not intend to return. However, only 1% of internally displaced persons surveyed said that they intended to return in the near future, 19% were unable to answer. Among the internally displaced persons who do not plan to return to their places of residence are those who currently reside beyond the territories of Ukraine. Almost half of the displaced persons visited the territory not controlled by Ukraine after their displacement. The reasons by which displaced persons visit uncontrolled territories after moving are visiting and maintaining housing, visiting friends or family, moving property, special events such as weddings and funerals, exploring return, property transactions – sale, rent [14].

Implementation of reintegration measures and the return of internally displaced persons to their places of residence is only possible if the temporarily occupied territories are returned to the control of Ukraine. To do this, the following measures are required: ceasefire, establishment of "regime of silence"; de-occupation; restoration of work of administrations, action of the Ukrainian legislation, return to circulation of the national currency, social protection of the population; activation of information support resources in Donbass; measures for information and psychological orientation among the population, internally displaced persons, servicemen, etc. [4]. In the face of such events and activities the number of internally displaced persons will decline rapidly.

Conclusions. Nowadays, Ukraine, with its 5-year experience of forced internal displacement of huge masses of people, has faced the necessity of making long-term decisions related to social adaptation and integration of internally displaced persons into local societies.

Adaptation and integration of internally displaced persons is a complex process. It combines many aspects that are studied by scientists from different fields – psychologists, sociologists, anthropologists, economists, political scientists, social geographers, and others like that. In this regard, there are many approaches to defining the concepts of "adaptation of internally displaced persons" and "integration of internally displaced persons". At the same time, the main scientific problem is the lack of established criteria for the integration of immigrants into local communities. The socio-geographical approach to the definition of the specifics of the integration of the internally displaced persons is based on statistical data and sociological surveys, takes into account the basic needs and problems of migrants and their families, labor and intellectual po-

tential, which in the end allows developing the directions of the regional migration policy aimed at the consideration of the internally displaced persons as a potential of the development of host communities.

Due to the discussion of the issue the data on the success of the integration of Ukraine's internally displaced persons is very different. Research has shown that the main problems faced by most internally displaced persons are the lack of sufficient livelihoods and the uncertainty of housing prospects. To this should be added difficulties in the implementation and protection of their rights, including property rights, access to normal housing, the restoration of lost documents on the citizenship of Ukraine and the special status of a person, the restoration of livelihoods, the impossibility in many cases to exercise their electoral rights, etc.

Most of the measures taken up to now were immediate response measures that were unsystematic and did not aim to provide long-term solutions for internal displacement. At the same time, long-term solutions aimed at providing housing, employment, social integration of forced migrants, realization of the positive potential of forced domestic migration, taking into account the particularities of individual regions and international experience that will ensure adaptation and socio-economic development, will be a priority area in the policy on internally displaced persons for the near future [22].

We believe that local authorities should consolidate their efforts with government agencies and civic organizations for successful integration of migrants. This concerns identification of the immediate needs of internally displaced persons, search for opportunities for their legal support, attraction of attention to the psychological problems of immigrants, appropriate assistance, the search for a compromise between the internally displaced persons and the local population, creation of opportunities for housing and work. Host communities need to perceive migrants as a resource for their socio-economic development, and internally displaced persons, in turn, should want to become members of a new community.

With the return of temporarily occupied territories under the control of Ukraine, restoration and peacebuilding in the eastern regions, some of the migrants will return to their places of residence, so their numbers will reduce by the displacement of those immigrants who have not been able to integrate successfully in the host communities.

We emphasize the need for further integrated studies of adaptation of internally displaced persons on an interdisciplinary basis. An important task is to identify migrants' problems and ensure their immediate needs. For further research it is necessary to

establish a common terminology base, the concepts of "integration" and "adaptation", as well as integration criteria for immigrants and to identify

Factors, influencing their successful integration.

References

1. Антонюк В. П. Вплив внутрішньо переміщених осіб на розвиток територіальних громад: проблеми та перспективи / В. П. Антонюк // Вісник економічної науки України. – 2016. – № 2. – С. 8-13.
2. Балусєва О. В. Шляхи вирішення проблем внутрішньо переміщених осіб: міжнародний досвід [Електронний ресурс] / О. В. Балусєва, І. О. Аракелова // Державне управління: удосконалення та розвиток. – 2015. – № 12. – Режим доступу : <http://www.dy.nauka.com.ua/?op=1&z=929>
3. Бочі А. Оцінка проблем психологічної, соціально-економічної адаптації та інтеграції жінок з числа ВПО у нові громади (Вінницька, Львівська та Київська області) [Електронний ресурс] / А. Бочі, Л. Кудіна, І. Івашико. – К., 2017. – 39 с. – Режим доступу : <https://www.osce.org/uk/ukraine/303191?download=true>
4. Війна на Донбасі: реалії і перспективи врегулювання [Електронний ресурс] / Центр Разумкова. – 144 с. – Режим доступу: http://razumkov.org.ua/uploads/article/2019_Donbas.pdf
5. Внутрішньо переміщені особи [Електронний ресурс] // Міністерство соціальної політики України. – Режим доступу : <http://www.msp.gov.ua/timeline/Vnutrishno-peremishcheni-osobi.html>
6. Длугопольська Т. І. Роль міжнародних та громадських організацій у соціальній адаптації та інтеграції ВПО у приймаючі громади в Україні [Електронний ресурс] / Т. І. Длугопольська // Економіка та управління національним господарством. – 2018. – Вип. 27. – С. 39-45. – Режим доступу : http://bses.in.ua/journals/2018/27_1_2018/10.pdf
7. Дяченко А. Шляхи забезпечення інтеграції внутрішньо переміщених осіб в Україні [Електронний ресурс] / А. Дяченко // Державне управління та місцеве самоврядування. – 2017. – № 4 (35). – С. 70-76. – Режим доступу : [http://www.dridu.dp.ua/vidavnictvo/2017/2017_04\(35\)/12.pdf](http://www.dridu.dp.ua/vidavnictvo/2017/2017_04(35)/12.pdf)
8. Задорожна С. М. Стан інтеграції внутрішньо переміщених осіб у місцеві громади: соціологічний аспект [Електронний ресурс] / С. М. Задорожна, І. Г. Карпова // Проблеми соціальної роботи: філософія, психологія, соціологія. – 2018. – № 1 (11). – С. 26-35. – Режим доступу : http://journals.stu.cn.ua/problemy_sotsialnoyi_roboty/article/view/133560
9. Закіров М. Внутрішньо переміщені особи в Україні: сучасні реалії. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuviar.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=2205:vnutrishno-peremishcheni-osobi-v-ukrajini-suchasni-realiji&catid=8&Itemid=350
10. Закіров М. Деякі аспекти розв'язання проблем внутрішньо переміщених осіб [Електронний ресурс] / М. Закіров // Резонанс. – 2016. – № 39. – С. 5-10. – Режим доступу: <http://nbuviar.gov.ua/images/rezonans/2016/rez39.pdf>
11. Звіт за результатами дослідження «Проблеми адаптації та працевлаштування ВПО на Луганщині» [Електронний ресурс] // Міжнародний фонд «Відродження». – Режим доступу : http://www.irf.ua/content/files/zvit_monitoring.pdf.
12. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (березень 2018 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_9_ukr_press.pdf
13. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (вересень 2017 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_7_september_2017_ukr_0.pdf.
14. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (вересень 2018 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_11_ukr_press.pdf
15. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (грудень 2017 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_8_december_2017_ukr_press.pdf.
16. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (грудень 2018 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_12_ukr_screen.pdf
17. Звіт Національної системи моніторингу ситуації з внутрішньо переміщеними особами (червень 2018 р.) [Електронний ресурс] // Міжнародна організація з міграції (МОМ) в Україні. – Режим доступу : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_10_ukr_press.pdf
18. Інтеграція ВПО: які міста краще приймають переселенок і переселенців [Електронний ресурс] // Mistosite. – Режим доступу : <https://mistsite.org.ua/articles/intehratsiia-vpo-i-aki-mista-krashche-priymaiut-pereselenok>.
19. Крахмальова Н. А. Інтеграція вимушено переміщених осіб у соціум / А. Н. Крахмальова // Вісник КНУТД Серія: Економічні науки. – 2018. – № 4 (125). – С. 38-48.
20. Леденева В. Ю. Социальная адаптация и интеграция мигрантов в современном российском обществе: автореф. дис. на соискание научной степени д. социол. наук по специальности 22.00.04 – социальная структура, социальные институты и процессы / В. Ю. Леденева. – М., 2014. – 45 с.

21. Політика інтеграції українського суспільства в контексті викликів та загроз подій на Донбасі (національна доповідь) / Е. М. Лібанова, В. П. Горбулін, С. І. Пирожков та ін.; за ред. Е. М. Лібанової. – К. : НАН України, 2015. – 363 с.
22. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії інтеграції внутрішньо переміщених осіб та впровадження довгострокових рішень щодо внутрішнього переміщення на період до 2020 року» від 15. 11. 2017 р. № 909-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/909-2017-%D1%80>
23. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 листопада 2018 р. № 944-р. «Про затвердження плану заходів з реалізації Стратегії інтеграції внутрішньо переміщених осіб та впровадження довгострокових рішень щодо внутрішнього переміщення на період до 2020 року» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/944-2018-p>
24. Смаль В. Внутрішньо переміщені особи: соціальна та економічна інтеграція в приймаючих громадах. За матеріалами Вінницької, Запорізької, Івано-Франківської та Полтавської областей [Електронний ресурс] / В. Смаль, О. Позняк. – К., 2016. – 93 с. – Режим доступу : http://pleddg.org.ua/wp-content/uploads/2016/05/IDP_REPORT_PLEDDG_edited_09.06.2016.pdf
25. Тімар І. О. Поняття та критерії адаптації й інтеграції внутрішньо переміщених осіб і умови скасування статусу переселенця [Електронний ресурс] / І. О. Тімар // Український соціум. – 2016. – № 4 (59). – С. 57-68. – Режим доступу : https://ukr-socium.org.ua/wp-content/uploads/2016/10/57-68_no-4_vol-59_2016_ukr.pdf
26. Управління Верховного комісара ООН у справах біженців [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.unhcr.org/ua/>
27. Філяк М. С. Порівняльний аналіз стану соціально-економічної адаптації переселенців у приймаючих громадах [Електронний ресурс] / С. М. Філяк, Ю. Ю. Завадовська // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. – 2016. – № 8 (1). – С. 71-76. – Режим доступу : http://www.visnyk-ekonom.uzhnu.uz.ua/archive/8_1_2016ua/19.pdf
28. Чисельність населення (за оцінкою) на 1 березня 2019 року та середня чисельність у січні-лютому 2019 року [Електронний ресурс] // Державна служба статистики України. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua/>
29. Чому проблему переселенців виведено з активного суспільного дискурсу [Електронний ресурс] / Кіпень В. // Газета День – 2016. – Режим доступу: <https://day.kyiv.ua/uk/news/110418-mettis-pentagon-gotovyuy-do-viyskovogoscenariyu-v-syriyi>
30. Arowolo O. Return Migration and the Problem of Reintegration / O. Arowolo // *International Migration*. – 2000. – Vol. 38. – No. 5. – P. 59-82.
31. Aysa-Lastra M. Integration of Internally Displaced Persons in Urban Labour Markets: A Case Study of the IDP Population in Soacha, Colombia / M. Aysa-Lastra // *Journal of Refugee Studies*. – Vol. 24. – № 2. – P. 277-302.
32. Bernard W. S. The Integration of Immigrants in the United States / W. S. Bernard // *International Migration Review*. – 1967. – Vol. 1. – № 2. – P. 23-33.
33. Crisp J. The local integration and local settlement of refugees: a conceptual and historical analysis [Електронний ресурс] / J. Crisp // *New Issues in Refugee Research*. – 2004. – № 102. – Режим доступу : <http://www.unhcr.org/407d3b762.pdf>
34. Depetris-Chauvin E. The Impacts of Internal Displacement Inflows on Host Communities in Colombia [Електронний ресурс] / E. Depetris-Chauvin, R. J. Santos // *Knomad working paper*. – 27 August 2017. – Режим доступу : <https://www.knomad.org/publication/impacts-internal-displacement-inflows-host-communities-colombia>
35. Fransen S. Who reintegrates? The constituents of reintegration of displaced populations / S. Fransen, Ö. Bilgili // *Population, Space and Place*. – 2018. – № 24 (6). – P. 2140.
36. Grono M. Displacement in Georgia IDP attitudes to conflict, return and justice [Електронний ресурс] / M. Grono. – February 2011. – 24 p. – Режим доступу : <https://reliefweb.int/report/georgia/displacement-georgia-idp-attitudes-conflict-return-and-justice>
37. Harrell-Bond B. *Imposing Aid: Emergency Assistance to Refugees* / B. Harrell-Bond. – New York : Oxford University Press, 1986.
38. Niemets L. Forced internal displacement in Ukraine: realities, socio-economic problems, perspectives / L. Niemets, N. Husieva, K. Sehida, O. Kraynukov, M. Lohvinova, O. Suptelo // *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional expansion to Global Growth // The International Business Information Management Conference (33rd IBIMA) (Granada, Spain 10-11 April, 2019) / Editor Khalid S. Soliman*.
39. Niemets L. *Migration Challenges of the 21st Century: The Experience of Ukraine* / L. Niemets, N. Husieva, O. Suptelo, K. Sehida, P. Kobylin, L. Kliuchko // *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional expansion to Global Growth // The International Business Information Management Conference (32nd IBIMA) (Seville, Spain, 15-16 November, 2018)*. – P. 328-337.
40. Perrucci D. V. *Sustainable Temporary Housing: Global Trends and Outlook* / D. V. Perrucci, B. A. Vazquez, C. B. Aktas // *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction. Procedia Engineering*. – 2016. – № 145. – P. 327- 332.
41. *Report on the results of sociological study: Features of Social Adaptation and Integration of Internally Displaced Persons (IDPs) in the Local Communities of the Territories of Their Present Residence* [Електронний ресурс] //

The Ukrainian Office of IFAK Institute International Research Agency. – October 2017. – Kyiv. – Режим доступу : www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/caritas_-_social_adaptation_integration_of_idps.pdf

42. *Reasons to remain (part 2): determinants of IDP integration into host communities in Iraq*. IOM Iraq Mission. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://iraq.iom.int/publications/reasons-remain-part-2-determinants-idp-integration-host-communities-iraq>
43. Sobolevska M. O. *The problem of social integration of ukrainian society (on the example of researches of internally displaced persons (idp) in Ukraine)* / M. O. Sobolevska // *Актуальні проблеми соціології, психології, педагогіки*. – 2017. – № 1. – С. 14-18.
44. *Social Integration of internally displaced person into the community: The Role of Non governmental organization* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.theseus.fi/handle/10024/145684>
45. Vrečer N. *Living in limbo: integration of forced migrants from Bosnia and Herzegovina in Slovenia* / N. Vrečer // *Journal of refugee studies*. – 2010. – Т. 23. – № 4. – P. 484-502.
46. Young H. *Way Back? Adaptation and Urbanization of IDP Livelihoods in the Darfur Region of Sudan* *Development and Change* / H. Young, K. Jacobsen. – January 2013. – Vol. 44. – Is. 1. – P. 125-145.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work.

UDC 911.3:314.151.3-054.73(477)

Liudmyla Niemets,

Doctor of Sciences (Geography), Professor,
Head of the Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: soc-econom-region@karazin.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9943-384X>;

Nataliia Husieva,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
e-mail: gusewa3110@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3620-1213>;

Taras Pohrebskyi,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Economic and Social Geography,
Faculty of Geography, Lesya Ukrainka Eastern European National University,
9 Potapova St., Lutsk, 43000, Ukraine,
e-mail: taraspogrebskyi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2290-134X>;

Oksana Bartosh,

Associate Faculty, School of Humanitarian Studies, Environment, Sustainability,
2005 Sooke Road, Victoria BC V9B 5Y2, Canada,
e-mail: okasana.bartosh@royalroads.ca

Maryna Lohvynova,

PhD Student, Department of Human Geography and Regional Studies,
Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism, V. N. Karazin Kharkiv National University,
e-mail: logvinova_mari94@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3190-710X>

INTEGRATION OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS OF UKRAINE: REALITIES, PROBLEMS, PERSPECTIVES

Purpose. The article discusses the realities, problems and perspectives of internally displaced persons in Ukraine. The aim of the study is to justify the realities, problems and possible solutions to the problems of integration of Ukrainian IDPs into local communities.

Scientific novelty. The article discusses theoretical and methodological approaches to understanding the adaptation and integration of IDPs, forms of integration, the category of interaction between forced migrants and the local population. The level of integration of IDPs into local communities in Ukraine has been investigated.

Results. Self-assessment of IDPs for their full integration into local communities as of December 2018 is 50%. The self-assessment of IDPs of their integration into local societies by regions of Ukraine has been analyzed. The most integrated are the migrants of the southern, central and northern regions (Mykolaiv, Kherson, Kirovohrad, Poltava, Cherkasy, Sumy) – 70%, the least integrated IDPs in the eastern regions (Luhansk, Donetsk) – 43%.

The dynamics of self-assessment of IDPs of their integration into local societies was analyzed during March 2017 – December in 2018 and it is certain that during 2018 the self-assessment of full integration of IDPs tended to increase (increased from 38% to 50%). An objective assessment of the integration of IDPs into local societies, where the majority of IDPs (63%) are partially integrated, is presented. The dynamics of assessing the integration of IDPs into local societies during 2017-2018 has been studied, and it was found that the level of full integration in 2018 was almost 2 times less than in 2017 (24-27% versus 45-58%).

The conditions for successful adaptation of IDPs are defined, the main ones being housing (87%), permanent income (77%) and employment (48%). The level of trust of IDPs to the local population in the current places of residence of IDPs, the frequency of IDPs' requests to local residents for help in everyday life, the level of belonging of IDPs to the society in their current and past place of residence.

Problems of integration of IDPs are identified. The biggest obstacle to attracting IDPs into the life of the territorial community is the lack of own housing, the problem of obtaining social services and the problem of employment. For successful integration of IDPs into host communities, a number of activities are proposed, among which are the formation and implementation of organizational and management principles for the effective integration of IDPs, the restructuring of social cohesion, the strengthening of socio-economic security and resilience of host societies to IDPs, the development of regional (local) programs and plans, taking into account the needs of IDPs and others.

Practical significance. The results of this study can be used by the Ukrainian authorities at the state and regional levels to solve the problems of IDPs in Ukraine.

Keywords: forced internal migrations, internally displaced persons, host communities, problems, integration, adaptation, reintegration.

References

1. Antoniuk, V. P. (2016). *Vplyv vnutrishno peremishchenykh osib na rozvytok terytorialnykh hromad: problemy ta perspektyvy* [Influence of internally displaced persons on the development of territorial communities: problems and prospects]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy – Bulletin of economic science of Ukraine*, 2, 8-13 [in Ukrainian].
2. Baluieva, O. V., Arakelova, I. O. (2015). *Shliakhy vyrishennia problem vnutrishno peremishchenykh osib: mizhnarodnyi dosvid* [Solutions to the problems of internally displaced persons: international experience]. *Derzhavne upravlinnia: udoskonalennia ta rozvytok – Public administration: improvement and development*, 12. Available at : <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=929> [in Ukrainian].
3. Bochi, A., Kudina, L., Ivashko, I. (2017). *Otsinka problem psykholohichnoi, sotsialno-ekonomichnoi adaptatsii ta intehratsii zhink z chysla VPO u novi hromady (Vynnytska, Lvivska ta Kyivska oblasti)* [Assessment of the problems of psychological, socio-economic adaptation and integration of women among IDPs into new communities (Vinnitsa, Lviv and Kyiv regions)]. Kyiv, 39. Available at : <https://www.osce.org/uk/ukraine/303191?download=true> [in Ukrainian].
4. *Viina na Donbasi: realii i perspektyvy vrehuliuvannia* [The war in the Donbas: realities and prospects for a settlement]. *Tsentr Razumkova*. 144. Available at : http://razumkov.org.ua/uploads/article/2019_Donbas.pdf [in Ukrainian].
5. *Vnutrishno peremishcheni osoby* [Internally displaced persons]. Kyiv : *Ministerstvo sotsialnoi polityky Ukrainy*. Available at : <http://www.msp.gov.ua/timeline/Vnutrishno-peremishcheni-osobi.html> [in Ukrainian].
6. Dluhopolska, T. I. (2018). *Rol mizhnarodnykh ta hromadskykh orhanizatsii u sotsialnii adaptatsii ta intehratsii VPO u pryimaiuchi hromady v Ukraini* [The role of international and public organizations in the social adaptation and integration of IDPs in host societies in Ukraine]. *Ekonomika ta upravlinnia natsionalnym hospodarstvom – Economics and national economy management*, 27, 39-45. Available at : http://bses.in.ua/journals/2018/27_1_2018/10.pdf [in Ukrainian].
7. Diachenko, A. (2017). *Shliakhy zabezpechennia intehratsii vnutrishno peremishchenykh osib v Ukraini* [Ways to ensure the integration of internally displaced persons in Ukraine]. *Derzhavne upravlinnia ta mistseve samovriadvannia – Public administration and local government*, 4 (35), 70-76. Available at : [http://www.dridu.dp.ua/vidavnictvo/2017/2017_04\(35\)/12.pdf](http://www.dridu.dp.ua/vidavnictvo/2017/2017_04(35)/12.pdf) [in Ukrainian].
8. Zadorozhna, S. M., Karpova, I. H. (2018). *Stan intehratsii vnutrishno peremishchenykh osib u mistsevi hromady: sotsiolohichni aspekt* [The status of the integration of internally displaced persons into local communities: a sociological aspect]. *Problemy sotsialnoi roboty: filosofii, psykholohiia, sotsiolohiia – Problems of social work: philosophy, psychology, sociology*, 1 (11), 26-35. – Available at : http://journals.stu.cn.ua/problemy_sotsialnoyi_roboty/article/view/133560 [in Ukrainian].
9. Zakirov, M. *Vnutrishno peremishcheni osoby v Ukraini: suchasni realii* [Internally Displaced Persons in Ukraine: The Realities of Today]. Available at : http://nbuviap.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=2205:vnutrishno-peremishcheni-osobi-v-ukrajini-suchasni-realiji&catid=8&Itemid=350 [in Ukrainian].
10. Zakirov, M. (2016). *Deiaki aspekty rozviazannia problem vnutrishno peremishchenykh osib* [Some Aspects of Addressing Internally Displaced Persons]. *Rezonans*, 39, 5-10. Available at : <http://nbuviap.gov.ua/images/rezonans/2016/rez39.pdf> [in Ukrainian].

11. Zvit za rezultatamy doslidzhennia "Problemy adaptatsii ta pratsevlashtuvannia VPO na Luhanshchyni" [Report on the results of the study "Problems of Adaptation and Employment of IDPs in Luhansk Region"]. Mizhnarodnyi fond «Vidrodzhennia». Available at : http://www.irf.ua/content/files/zvit_monitoring.pdf [in Ukrainian].
12. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (berezhen 2018 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (March 2018)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_9_ukr_press.pdf [in Ukrainian].
13. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (veresen 2017 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (September 2017)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_7_september_2017_ukr_0.pdf [in Ukrainian].
14. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (veresen 2018 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (September 2018)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_11_ukr_press.pdf [in Ukrainian].
15. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (hruden 2017 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (December 2017)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_8_december_2017_ukr_press.pdf [in Ukrainian].
16. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (hruden 2018 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (December 2018)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_12_ukr_screen.pdf [in Ukrainian].
17. Zvit Natsionalnoi systemy monitorynhu sytuatsii z vnutrishno peremishchenymy osobamy (cherven 2018 r.) [Report of the National System for Monitoring the Situation with Internally Displaced Persons (June 2018)]. Kyiv : Mizhnarodna orhanizatsiia z mihratsii (MOM) v Ukraini. Available at : http://iom.org.ua/sites/default/files/nms_round_10_ukr_press.pdf [in Ukrainian].
18. Intehratsiia VPO : yaki mista krashche pryimaiut pereselenok i pereselentsiv [Integration of IDPs: which cities accept migrants and displaced people better]. Available at : <https://mistosite.org.ua/articles/intehratsiia-vpo-iaki-mista-krashche-pryimaiut-pereselenok> [in Ukrainian].
19. Krakhmalova, N. A. (2018). Intehratsiia vymusheno peremishchenykh osib u sotsium [Integration of IDPs into society]. Visnyk KNUVD. Seriia : Ekonomichni nauky – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Series : Economic Sciences, 4(125), 38-48 [in Ukrainian].
20. Ledeneva, V. Yu. (2014). Sotsyalnaia adaptatsiia y yntehratsiia myhrantov v sovremennom rossiiskom obshchestve [Social adaptation and integration of migrants in modern Russian society]. Doctor's thesis. Moscow, 45 [in Russian].
21. Libanova, E. M., Horbulin, V. P., Pyrozhekov S. I. (2015). Polityka intehratsii ukrainskoho suspilstva v konteksti vyklykiv ta zahroz podii na Donbasi (natsionalna dopovid) [Integration policy of the Ukrainian society in the context of challenges and threats of events in the Donbass (national report)]. Kyiv : NAN Ukrainy, 363 [in Ukrainian].
22. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro skhvalennia Stratehii intehratsii vnutrishno peremishchenykh osib ta vprovadzhennia dovhostrokovykh rishen shchodo vnutrishnoho peremishchennia na period do 2020 roku" vid 15. 11. 2017 r. № 909-r [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Strategy for the integration of internally displaced persons and the introduction of long-term decisions regarding internal displacement for the period up to 2020" dated 15 11. 2017 № 909-p]. Available at : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/909-2017-%D1%80> [in Ukrainian].
23. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21 lystopada 2018 r. № 944-r. "Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z realizatsii Stratehii intehratsii vnutrishno peremishchenykh osib ta vprovadzhennia dovhostrokovykh rishen shchodo vnutrishnoho peremishchennia na period do 2020 roku" [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of November 21, 2018 No. 944-p. "On approval of the action plan for the implementation of the Strategy for the integration of internally displaced persons and the implementation of long-term decisions regarding internal displacement for the period up to 2020"]. Available at : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/944-2018-p> [in Ukrainian].
24. Smal, V., Pozniak, O. (2016). Vnutrishno peremishcheni osoby: sotsialna ta ekonomichna intehratsiia v pryimaiuchykh hromadakh. Za materialamy Vinnyskoi, Zaporizkoi, Ivano-Frankivskoi ta Poltavskoi oblasti [Internally Displaced Persons: Social and Economic Integration in Host Communities. Based on materials from Vinnitsa, Zaporizhia, Ivano-Frankivsk and Poltava regions]. Kyiv, 93 p. Available at : http://pleddg.org.ua/wpcontent/uploads/2016/05/IDP_REPORT_PLEDDG_edited_09.06.2016.pdf [in Ukrainian].
25. Titar, I. O. (2016). Poniattia ta kryterii adaptatsii y intehratsii vnutrishno peremishchenykh osib i umovy skasuvannia statusu pereselentsia [The concept and criteria for the adaptation and integration of internally displaced persons and the conditions for the cancellation of the status of a migrant]. Ukrainyskyi sotsium – Ukrainian society, 4 (59), 57-68. Available at : https://ukr-socium.org.ua/wp-content/uploads/2016/10/57-68_no-4_vol-59_2016_ukr.pdf [in Ukrainian].
26. Upravlinnia Verkhovnoho komisara OON u spravakh bizhentsiv [Office of the United Nations High Commissioner for Refugees]. Available at : <https://www.unhcr.org/ua/> [in Ukrainian].

27. Filiak M. S., Zavadovska, Yu. Yu. (2016). Porivnialnyi analiz stanu sotsialno-ekonomichnoi adaptatsii pereselentsiv u pryimaiuchykh hromadakh [Comparative analysis of the socio-economic adaptation of immigrants in host communities]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Serii : Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove gospodarstvo – Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series : International Economic Relations and the World Economy*, 8 (1), 71-76. Available at : http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/8_1_2016ua/19.pdf [in Ukrainian].
28. Chyselnist naseleння (za otsinkoiu) na 1 bereznia 2019 roku ta serednia chyselnist u sichni-liutomu 2019 roku [Population (estimated) as of March 1, 2019 and the average number for January-February 2019]. Kyiv : Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Available at : <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
29. Kipen, V. (2016). Chomu problemu pereselentsiv vyvedeno z aktyvnoho suspilnoho dyskursu [Why the problems of immigrants are derived from actual public discourse]. *Hazeta Den*. Available at : <https://day.kyiv.ua/uk/news/110418-mettis-pentagon-gotovyy-do-viyskovogoscenariyu-v-syriyi> [in Ukrainian].
30. Arowolo, O. (2000). Return Migration and the Problem of Reintegration. *International Migration*. 38(5), 59-82.
31. Aysa-Lastra, M. (2014). Integration of Internally Displaced Persons in Urban Labour Markets: A Case Study of the IDP Population in Soacha, Colombia. *Journal of Refugee Studies*, 24(2), 277-302.
32. Bernard, W. S. (1967). The Integration of Immigrants in the United States. *International Migration Review*, 1, 2, 23-33.
33. Crisp, J. (2004). The local integration and local settlement of refugees: a conceptual and historical analysis. *New Issues in Refugee Research*, Is. 102. Available at : <http://www.unhcr.org/407d3b762.pdf>
34. Depetris-Chauvin, E., Santos, R. J. (2017). The Impacts of Internal Displacement Inflows on Host Communities in Colombia. *Knomad working paper*. Available at : <https://www.knomad.org/publication/impacts-internal-displacement-inflows-host-communities-colombia>
35. Fransén, S., Bilgili, Ö. (2018). Who reintegrates? The constituents of reintegration of displaced populations. *Population, Space and Place*, 24(6), 21-40.
36. Grono, M. (2011). Displacement in Georgia IDP attitudes to conflict, return and justice, 24 p. – Available at : <https://reliefweb.int/report/georgia/displacement-georgia-idp-attitudes-conflict-return-and-justice>
37. Harrell-Bond, B. (1986). *Imposing Aid: Emergency Assistance to Refugees*. New York : Oxford University Press. Available at : <http://www.sussex.ac.uk/Units/SCMR/final/>
38. Niemets, L., Husieva, N., Sehida K., Kraynukov O., Lohvinova, M., Suptelo, O. (2019). Forced internal displacement in Ukraine: realities, socio-economic problems, perspectives. *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional expansion to Global Growth. The International Business Information Management Conference (33rd IBIMA) (Granada, Spain 10-11 April, 2019)*, 3062-3081.
39. Niemets L., Husieva, N., Suptelo, O., Sehida, K., Kobylin, P., Kliuchko, L. (2018). Migration Challenges of the 21st Century: The Experience of Ukraine. *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional expansion to Global Growth. The International Business Information Management Conference (32nd IBIMA) (Seville, Spain, 15-16 November, 2018)*. 328-337.
40. Perrucci, D. V., Vazquez, B. A., Aktas, C. B. (2016). Sustainable Temporary Housing: Global Trends and Outlook. *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction. Procedia Engineering*, 145, 327-332.
41. Report on the results of sociological study: Features of Social Adaptation and Integration of Internally Displaced Persons (IDPs) in the Local Communities of the Territories of Their Present Residence. *The Ukrainian Office of IFAK Institute International Research Agency*. October 2017. Kyiv. Available at : www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/caritas_-_social_adaptation_integration_of_idps.pdf
42. Reasons to remain (part 2): determinants of idp integration into host communities in Iraq. *IOM Iraq Mission*. Available at : <https://iraq.iom.int/publications/reasons-remain-part-2-determinants-idp-integration-host-communities-iraq>
43. Sobolevska, M. O. (2017). The problem of social integration of ukrainian society (on the example of researches of internally displaced persons (idp) in Ukraine). *Aktualni problemy sotsiologii, psykholohii, pedahohiky – Actual problems of sociology, psychology, pedagogy*, 1, 14-18.
44. Social Integration of internally displaced person into the community: The Role of Non governmental organization. Available at : <https://www.theseus.fi/handle/10024/145684>
45. Vrečer, N. (2010). Living in limbo: integration of forced migrants from Bosnia and Herzegovina in Slovenia. *Journal of refugee studies*, 23, 4, 484-502.
46. Young, H., Jacobsen, K. (2013). Way Back? Adaptation and Urbanization of IDP Livelihoods in the Darfur Region of Sudan *Development and Change*, 44, 1, 125-145.

УДК 556.166

Олександр Григорович Ободовський,

д. геогр. н., професор, кафедра гідрології та гідроекології, географічний факультет,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
проспект Академіка Глушкова, 2, м. Київ, 02000, Україна,
e-mail: obodovskiy58@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5475-3222>;

Ольга Іванівна Лук'янець,

к. геогр. н., доцент, кафедра гідрології та гідроекології, географічний факультет,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
e-mail: luko15_06@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8903-130X>;

Станіслав Олексійович Москаленко,

к. геогр. н., асистент, кафедра гідрології та гідроекології, географічний факультет,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
e-mail: stas_univer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0644-5046>;

Вікторія Олександрівна Корнієнко,

аспірант, кафедра гідрології та гідроекології, географічний факультет,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
e-mail: viktoriya.22.kor@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1746-961X>

УЗАГАЛЬНЕННЯ СЕРЕДНЬОГО РІЧНОГО СТОКУ ВОДИ РІЧОК ВІДПОВІДНО ДО ГІДРОГРАФІЧНОГО РАЙОНУВАННЯ УКРАЇНИ

Проведена оцінка та узагальнення середнього річного стоку води річок України, основних статистичних параметрів його багаторічної мінливості, досліджено залежності норм середніх річних витрат води річок від площі їх водозборів в межах річкових басейнів та суббасейнів відповідно до Гідрографічного районування України.

Дослідження ґрунтувалося на обробці середньорічних витрат води з 294 гідрометричних постів на річках України з початку спостережень до 2015 року включно. 83 % постів мають періоди спостереження ≥ 50 років, і тільки 17 % мають ≤ 50 років. Аналіз відносних значень середньої квадратичної похибки у визначенні норм середньорічного стоку річок України показав, що вони в понад 50% випадків змінюються від 2,5% до 5%, приблизно в 43% випадків – від 5% до 10%, тобто, в переважній більшості (93%) не перевищує межі 5-10%. Це свідчить, що ряди спостережень вважаються репрезентативними та розраховані значення норм достатньо стабільні для практичних розрахунків.

Аналіз просторових змін норм середніх річних модулів стоку води річок України показав, що на рівнині їх значення варіюють від $12,6 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ в басейні річки Вісли до $0,1-0,2 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ в басейні річок Чорного моря, тобто спостерігається їх зменшення з північного заходу на південний схід і південь. Найбільший значення ($34-39 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$) фіксуються на невеликих гірських водозборах Карпатських і Кримських гір. Коефіцієнти варіації середнього річного стоку води для річок басейнів та суббасейнів на рівнинній частині України в переважній більшості знаходяться в межах $0,23 \div 0,65$, для гірських басейнів $0,20 \div 0,45$. Коефіцієнти асиметрії мають, в основному, для всієї території України невисокі додатні значення, що свідчить про помірно-асиметричний розподіл у послідовностях середнього річного стоку води досліджуваних річок.

Ключові слова: річки України, гідрографічне районування України, середній річний стік води річок, статистичні параметри розподілу.

А. Г. Ободовский, О. И. Лукьянец, С. А. Москаленко, В. А. Корниенко. ОБОБЩЕНИЕ СРЕДНЕГО ГОДОВОГО СТОКА ВОДЫ РЕК СООТВЕТСТВЕННО С ГИДРОГРАФИЧЕСКИМ РАЙОНИРОВАНИЕМ УКРАИНЫ. Проведена оценка и обобщение среднего годового стока воды рек Украины, основных статистических параметров его многолетней изменчивости, исследованы зависимости норм средних годовых расходов воды рек от площади их водосборов в пределах речных бассейнов и суббассейнов в соответствии с Гидрографическим районированием Украины.

Исследование основывалось на обработке среднегодовых расходов воды с 294 гидрометрических постов на реках Украины с начала наблюдений до 2015 года включительно. 83% постов имеют периоды наблюдения ≥ 50 лет, и только 17% имеют ≤ 50 лет. Анализ относительных значений средней квадратичной ошибки в определении норм среднегодового стока рек Украины показал, что они в более 50% случаев изменяются от 2,5% до 5%, примерно в 43% случаев - от 5% до 10%, то есть, в большинстве (93%) не превышает предела 5-10%. Это свидетельствует, что ряды наблюдений считаются репрезентативными и рассчитанные значения норм достаточно стабильны для практических расчетов.

Анализ пространственных изменений норм средних годовых модулей стока воды рек Украины показал, что на равнине их значения варьируют от $12,6 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ в бассейне реки Вислы до $0,1-0,2 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ в бассейне рек Чорного моря, т.е. наблюдается их уменьшение с северо-запада на юго-восток и юг. Наибольшие значения ($34-39 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$) фиксируются на небольших горных водосборах Карпатских и Крымских гор. Коэффициенты вариации среднего годового стока воды для рек бассейнов и суббассейнов на равнинной части Украины у подавляющем большинстве находятся в пределах $0,23 \div 0,65$, для горных бассейнов $0,20 \div 0,45$. Коэффициенты асимметрии имеют, в основном, для всей территории Украины невысокие положительные значения, что свидетельствует об умеренно-асимметричном распределении в последовательностях среднего годового стока воды исследуемых рек.

Ключевые слова: реки Украины, гидрографическое районирование Украины, средний годового сток воды рек, статистические параметры распределения.

Постановка проблеми. Для гідрологічного режиму річок вагоме значення має водний режим, який визначає ритміку надходження води в річки з поверхні їх басейнів. Водний режим рі-

чок не залишаються постійними, він схильний до помітних змін як в межах окремих років, так й багаторічному розрізі. Середній багаторічний стік (норма річного стоку) води річок є основною і стійкою характеристикою, що визначає загальну водоносність річок та потенційні водні ресурси даного басейну чи певного регіону. В якості основної стокової характеристики приймається витрата води ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$). Для кількісної оцінки річкового стоку води, крім витрат води в залежності від поставлених завдань застосовуються й інші стокові характеристики – об'єм (м^3 , км^3), модуль ($\text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$), шар (мм) стоку. Середній багаторічний стік води річок є своєрідним «гідрологічним еталоном», відносно якого розраховуються статистичні параметри, ймовірнісний розподіл стокових показників різної забезпеченості і має важливе практичне значення при різних видах водогосподарського проектування: стратегії раціонального використання й охорони водних ресурсів, плануванні та реалізації водогосподарських заходів водозабезпечення, оптимального регулювання річкового стоку, протипаводкових заходів тощо.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. З вищезазначеного випливає, що середній річний стік води є однією з основних характеристик річкового стоку, тому дослідженню просторових закономірностей водного стоку річок завжди приділялась увага, особливо, в міру накопичення даних гідрометричних спостережень, що сприяло більш ретельним його дослідженням, обґрунтованим розрахункам та висновкам. Перше узагальнення середнього річного стоку для Європейської частини Радянського Союзу виконано Д. І. Кочеріним у 1927 р. в роботі [1]. У 30-70-х роках минулого століття багато наукових розробок присвячено не тільки просторовим закономірностям середнього річного водного стоку, а й класифікації річок, гідрологічному районуванню СРСР, а також методам вивчення складових водного балансу. Цим займалися М. І. Львович [2, 13], Б. Д. Зайков В.А. [3], В. А. Троїцький [4], П. С. Кузін [5] та ін. Разом з тим, українські гідрологи виконували дослідження окремо й для території України – у 1962 р. за редакцією Г. І. Швеця вийшла книга «Гідрологічні розрахунки для річок України» [7]. Глава цієї книги «Розрахунок річного стоку і розподіл його в році» була підготовлена відомими українськими гідрологами А. Б. Крижанівською, Г. О. Чіп-пінг [6], Й. А. Железняком. У цей же період (протягом 1966-1971 рр.) видаються випуски «Ресурсів поверхневих вод СРСР», в яких наведено детальні характеристики середнього річного стоку річок України [8-12].

В сучасний період щодо дослідження середнього річного стоку води річок України можна відмітити наукові праці В. І. Вишневського., О. О. Косовця [14, 15], монографію В. В. Гребеня [18]. Останні ґрунтовні дослідження характеристик середнього річного стоку річок України та їх багаторічної мінливості наведено у дисертаційній роботі Л. О. Горбачової [23], де проаналізована відповідна інформаційна база даних від початку спостережень до 2010 р. включно. Розглядаються характеристики середнього річного стоку води окремих річок чи окремих річкових басейнів України в низці публікацій останніх років Н. С. Лободи, Є. Д. Гопченка, С. В. Мельника, Ю. В. Божок, [17, 19, 20], О. Г. Ободовського [28, 32, 33], О. І. Лук'янець [22, 24, 29, 30, 33, 34], Ю. О. Чорноморець [24], О. С. Коноваленко [28, 29], В. О. Корнієнко [28, 30, 32], С.О. Москаленко [31], Е. Р. Рахматулліної [32] та ін.

Метою даного дослідження – оцінка середнього багаторічного стоку води річок України в межах річкових басейнів відповідно Гідрографічному районуванню України [25-27].

Для оцінки середнього багаторічного стоку води річок України за матеріалами спостережень Державної гідрометеорологічної служби ДСНС створено базу середніх річних витрат води з 294 гідрометричних постів від початку спостережень по 2015 р. включно. На майже 20% гідрологічних постів в межах України період спостережень за стоком води складає ≥ 70 років, 63% – $50 \div 70$ років, тобто 83% гідрологічних постів мають періоди спостережень ≥ 50 років, а лише 17% мають період спостережень ≤ 50 років.

В основу дослідження просторових закономірностей зміни середнього річного стоку води річок України взята «Схема Гідрографічного районування території України» (розроблена у 2013 р.) [27]. Відповідно до цієї схеми територія України поділяється на гідрографічні одиниці – дев'ять районів річкових басейнів та дев'ять суббасейнів. Гідрографічне районування території України виконано відповідно до вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу з метою розробки планів інтегрованого управління річковими басейнами [25, 26].

Методи та виклад матеріалу дослідження. Зміна багаторічного стоку води річок по території підкоряється певним закономірностям, в основному географічної зональності (широтної чи висотної). При цьому середні багаторічні значення стоку води, що обираються для аналізу (вибіркові сукупності), повинні бути репрезентативними, тобто відповідати характеристикам генеральної сукупності. Такою величиною може бути норма стоку води, яка визначається як:

$$\bar{Q}_n = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

де $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$ – річні значення стоку води річки;

n – кількість років спостережень.

Мірою багаторічної мінливості стокової характеристики річок є параметри її розподілу – коефіцієнти варіації C_V і асиметрії C_S , які розраховуються за наступними формулами:

$$C_V = \sqrt{n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}, \quad (2)$$

$$C_S = n^{-1} \cdot C_V^{-3} \cdot \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3, \quad (3)$$

де $k_i = Q_i / \bar{Q}$ – модульні коефіцієнти значень змінної величини.

Для порівняння точності визначення норми стоку води річок різної водності використовується

ся відносно значення середньої квадратичної похибки σ_n , виражене у відсотках:

$$\sigma_n = \pm 100 \cdot C_V \cdot (\sqrt{n})^{-1}. \quad (4)$$

Ряд спостережень за середньорічним стоком води вважається репрезентативним для визначення його норми, тобто достатньо стійким для практичних розрахунків, якщо величина σ_n не перевищує 5-10% (до 5% - для зони достатнього зволоження, до 10% - для зони недостатнього зволоження). З формули (4) бачимо, чим більше коефіцієнт варіації C_V , тим довше повинен бути ряд спостережень для визначення норми стоку заданої точності.

В таблиці 1 подано діапазони кількості років гідрометричних спостережень, площ водозборів та відносних значень середньоквадратичної похибки σ_n (%), яка розрахована за формулою (4), в межах річкових басейнів та суббасейнів відповідно до Гідрографічного районування України [27].

Таблиця 1

Характеристики кількості років гідрометричних спостережень, площ водозборів та відносного значення середньої квадратичної похибки визначення середнього річного стоку води річок України (від їх початку по 2015 р. включно)

Річкові басейни та суббасейни відповідно Гідрографічному районуванню України [27]	Діапазони		
	кількості років спостережень	площ водозборів F , км ²	відносної квадратичної похибки визначення норми стоку σ_n , %
I. Річковий басейн Вісли (Західного Бугу та Сяну)			
	36÷70	98,6÷6740	3,0÷6,0
II. Річковий басейн Дунаю			
Суббасейн Тиси	53÷70	25,4÷9140	2,5÷5,0
Суббасейн Пруту і Сірету	28÷71	18,1÷6890	3,2÷8,1
III. Річковий Басейн Дністра			
лівобережжя	44÷71	70,0÷3240	2,7÷8,1
правобережжя	32÷71	76,3÷43000	2,7÷10,4
IV. Річковий басейн Південного Бугу			
	31÷73	92,5÷46200	3,8÷7,7
V. Річковий басейн Дніпра			
суббасейн Прип'яті	29÷76	90÷13300	2,7÷8,8
суббасейн Десни	43÷120	29,5÷88500	2,6÷4,2
суббасейн Середнього Дніпра	31÷74	126÷21800	3,4÷15,2
суббасейн Нижнього Дніпра	49÷70	309÷19800	5,4÷11,0
VI. Басейн Річок Причорномор'я			
	30÷63	1840÷3170	16,3
VII. Річковий басейн Дону			
	45÷90	189÷73200	3,5÷8,0
VIII. Басейн річок Приазов'я			
	33÷69	142÷3700	3,4÷9,4
IX. Басейн річок Криму			
	32÷66	0,32÷3540	5,3÷17,8

Аналіз ряду відносних значень середніх квадратичних похибок розрахунку норм стоку води σ_n для річок України показав, що вони в понад 50% випадків змінюються від 2,5% до 5%, приблизно в 43% випадків – від 5% до 10%, тобто, в переважній більшості (93%) σ_n не перевищує межі 5-10%, отже, ряди спостережень за середньорічним стоком води на річках вважаються репрезентативними для визначення норми стоку та їх величини достатньо стійкими для практичних розрахунків (табл. 1).

Значення відносних середніх квадратичних похибок розрахунку норм стоку води $\sigma_n \leq 10\%$ характерно для річкових басейнів Вісли (Західного Бугу та Сяну), Дунаю (суббасейнів Тиси, Пруту і Сирету), Дністра (як для лівобережжя, так й для правобережжя), Південного Бугу, Дніпра (суббасейнів Прип'яті та Десни), Дону, Приазов'я (табл. 1). Значення $\sigma_n \geq 10\%$ притаманні для гідрологічних постів на річках, які або мають досить короткий ряд спостережень за стоком води, або, навіть при достатній їх кількості – високі значення коефіцієнта варіації. Найбільша кількість гідрологічних постів, де значення значно перевищують межі 10% розташовано в басейні річок Криму і від загальної кількості гідрологічних постів в цьому басейні приблизно 45% можна вважати нерепрезентативними для визначення норми стоку води.

Середнє значення відносної середньоквадратичної похибки розрахунку норм середньорічного стоку σ_n для всієї території України становить 5,9%.

Аналіз стокових характеристик річок в межах досліджуваної території, що поданий у табл. 2, виявив відомі закономірності про те, що модулі стоку (\bar{M} , л · с⁻¹ · км⁻²) мають тенденцію до зменшення зі збільшенням площі водозборів, а витрати води (\bar{Q} , м³ · с⁻¹) в створах річки за течією збільшуються зі збільшенням площі водозборів.

Найбільші норми середніх річних витрати води в межах рівнинної території України спостерігаються в басейні Дніпра в суббасейнах Десни (р. Десна – с. Розльоти, $\bar{Q} = 173$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 36300$ км²); м. Чернігів, $\bar{Q} = 327$ м³ · с⁻¹ (81400 км²); с. Літки, $\bar{Q} = 345$ м³ · с⁻¹ (88500 км²); р. Сейм – с. Мутин, $\bar{Q} = 94,8$ м³ · с⁻¹ (25600 км²) та Прип'яті (р. Стир - с. Млинок, $\bar{Q} = 42,9$ м³ · с⁻¹ (10900 км²); р. Горинь - с. Деражне, $\bar{Q} = 40,7$ м³ · с⁻¹ (9160 км²); р.

Случ – м. Сарни, $\bar{Q} = 53,0$ м³ · с⁻¹ (13300 км²)), де зі значних площ їх басейнів формуються середні річні витрати води від 53 до 345 м³ · с⁻¹ (табл. 2). Великі витрати води формуються й в рівнинній частині басейну Дністра, в основному, завдяки припливу води з його гірської правобережної частини – р. Дністер – м. Заліщики, $\bar{Q} = 222$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 24600$ км²); м. Могилів-Подільський, $\bar{Q} = 256$ м³ · с⁻¹ (43000 км²).

Але вже на південь та на південний схід при тих же площах басейнів норми середніх річних витрат води зменшуються. Так, на р. Рось - м. Корсунь-Шевченківський вона складає 21,3 м³ · с⁻¹ при площі водозбору 10300 км², а на р. Інгулець – м. Кривий Ріг при площі басейну 8600 км² середня річна витрата води становить лише 6,95 м³ · с⁻¹. Значно менше норми середніх річних витрат води й в замикальних створах річкових басейнів Південного Бугу (р. Південний Буг - м. Первомайськ, $\bar{Q} = 69,7$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 44000$ км²); смт Олександрівка, $\bar{Q} = 88,4$ м³ · с⁻¹ (46200 км²)) та Сіверського Дінця в межах України (р. Сіверський Донець - м. Лисичанськ, $\bar{Q} = 97,1$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 52400$ км²); с. Кружилівка, $\bar{Q} = 130$ м³ · с⁻¹ (73200 км²)) (табл. 2).

Для гірських водозборів України найбільші норми середніх річних витрат води – в басейні Дунаю в суббасейні Тиси (р. Тиса - смт Вилоч, $\bar{Q} = 204$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 9140$ км²); суббасейні Пруту та Сирету (р. Прут - м. Чернівці, $\bar{Q} = 67,2$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 6890$ км²), а також в басейні Дністра (р. Дністер - смт Журавно, $\bar{Q} = 95,1$ м³ · с⁻¹ (площа водозбору $F = 9910$ км²); м. Галич, $\bar{Q} = 160$ м³ · с⁻¹ (14700 км²)) (табл. 2).

Зазначені тенденції спостерігається й для річок з іншими діапазонами розмірів площ водозборів, що добре прослідковується за графіками залежності норм середніх річних витрат води річок в від площі їх водозборів, побудованих окремо для річкових басейнів відповідно до Гідрографічного районування України (рис. 1-3).

Такі залежності виявилися з досить високою апроксимацією, кореляційні відношення цих зв'язків змінюються в переважній більшості від 0,76 до 0,99, що дає підстави для використання їх в практичних розрахунках в межах річкових басейнів та суббасейнів (табл. 3).

Треба відмітити, що залежності норм середніх річних витрат води річок в від площі їх водо-

Характеристики середнього річного стоку води річок України та параметрів його мінливості за даними гідрометричних спостережень (від їх початку по 2015 р. включно)

Річкові басейни та суббасейни відповідно Гідрографічному районуванню України [27]	Діапазони норм середніх річних		Діапазони коефіцієнтів	
	витрат води \bar{Q} , м ³ · с ⁻¹	модулів стоку \bar{M} , л · с ⁻¹ · км ⁻²	варіації C_v	асиметрії C_s
I. Річковий басейн Вісли (Західного Бугу та Сяну)				
	0,4÷33,6	3,5÷12,6	0,23÷0,45	0,31÷1,67
II. Річковий басейн Дунаю				
Суббасейн Тиси	0,6÷204	9,8÷37,5	0,21÷0,40	0,01÷0,88
Суббасейн Пруту і Сірету	0,35÷67,2	4,8÷39,4	0,26÷0,43	-0,26÷1,14
III. Річковий Басейн Дністра				
лівобережжя	0,2÷14,3	2,6÷6,2	0,22÷0,59	0,15÷2,19
правобережжя	1,8÷256	5,4÷33,5	0,19÷0,87	-0,16÷1,91
IV. Річковий басейн Південного Бугу				
	0,26÷88,4	0,8÷4,4	0,26÷0,65	-0,08÷1,89
V. Річковий басейн Дніпра				
суббасейн Прип'яті	0,6÷53	2,1÷6,0	0,23÷0,65	-1,28÷2,39
суббасейн Десни	3,8÷345	3,2÷4,8	0,23÷0,34	-0,09÷1,09
суббасейн Середнього Дніпра	0,3÷49,4	1,2÷3,6	0,28÷1,11	0,13÷3,61
суббасейн Нижнього Дніпра	0,6÷15,6	0,4÷2,6	0,42÷0,8	0,83÷1,96
VI. Басейн Річок Причорномор'я				
	0,1÷0,7	0,1-0,2	1,3÷2,9	2,3÷4,6
VII. Річковий басейн Дону				
	0,6÷130	1,2-4,9	0,28÷0,58	-0,24÷2,07
VIII. Басейн річок Приазов'я				
	0,4÷11,0	1,1-6,5	0,26÷0,66	-0,73÷1,49
IX. Басейн річок Криму				
	0,03-2,1	0,6-34,0	0,29÷2,26	0,52÷5,47

зборів для річкового басейну Дністра розглядаються окремо для правобережної гірської та лівобережної рівнинної його частин (рис. 1, табл. 3) – при одних й тих ж площах водозборів норми середніх річних витрат води річок правобережжя Дністра майже в 2 рази більше їх значень, які спостерігаються на річках лівобережжя.

Лише для басейну річок Криму кореляційне відношення зв'язку норм середнього річного стоку води річок від площі їх водозборів дорівнює 0,59, тобто, ця залежність пояснює лише 35% розкиду відносно норми (табл. 3). Для басейну річок Причорномор'я залежність не отримана через недостатню кількість спостережень.

Аналіз просторових змін середнього багаторічного модуля стоку річок по території України показав, що найбільші їх значення 34–39 л · с⁻¹ · км⁻² фіксуються на невеликих гірських водозборах Карпатських річок – суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету, правобережної частині річкового басейн Дністра та басейну річок Криму. Найменшу мінливість середньорічного стоку води ($C_v=0,18\div0,30$) тут мають річки з високими модулями стоку води – від 20 до 39 л · с⁻¹ · км⁻²,

найбільшу ($C_v=0,30\div0,52$) – зі стоком від 5 л · с⁻¹ · км⁻² до 20 л · с⁻¹ · км⁻² (рис. 4). Такі просторові зміни й модулів стоку води, й коефіцієнтів їх варіації пов'язано з висотним положенням водозборів, їх похилом [29, 34].

Залежності норм середніх річних модулів стоку води Карпатських річок від середньої висоти їх водозборів та між середньою висотою і середнім їх похилом деталізовано – для річок суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету в межах України, а також правобережних гірських приток басейну Дністра (рис. 5-6).

Коефіцієнти апроксимації зв'язків високі та відносяться до значимої області (рис. 5-6). Відповідно коефіцієнти кореляції змінюються $r = 0,78\div0,92$. Загалом спостерігається чітке зростання модулів середньорічного стоку води річок зі зростанням середніх висот їх водозборів (рис. 5) і, чим вище розташовані водозбори, тим більше їх середні похили (рис. 6).

Кожний басейн (суббасейни Тиси, Пруту і Сірету, правобережна частина річкового басейну Дністра) має свої особливості [28, 29, 34]. При одній і тій же середній висоті водозборів в

суббасейні Тиси утворюються найбільші модулі стоку води, а в суббасейні Пруту та Сірету – найменші. Водозбори правобережжя Дністра займають середнє положення на залежності

(рис. 5). Різницї між модулями стоку води на певній висоті для досліджуваних басейнів становлять $\approx 5 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$.

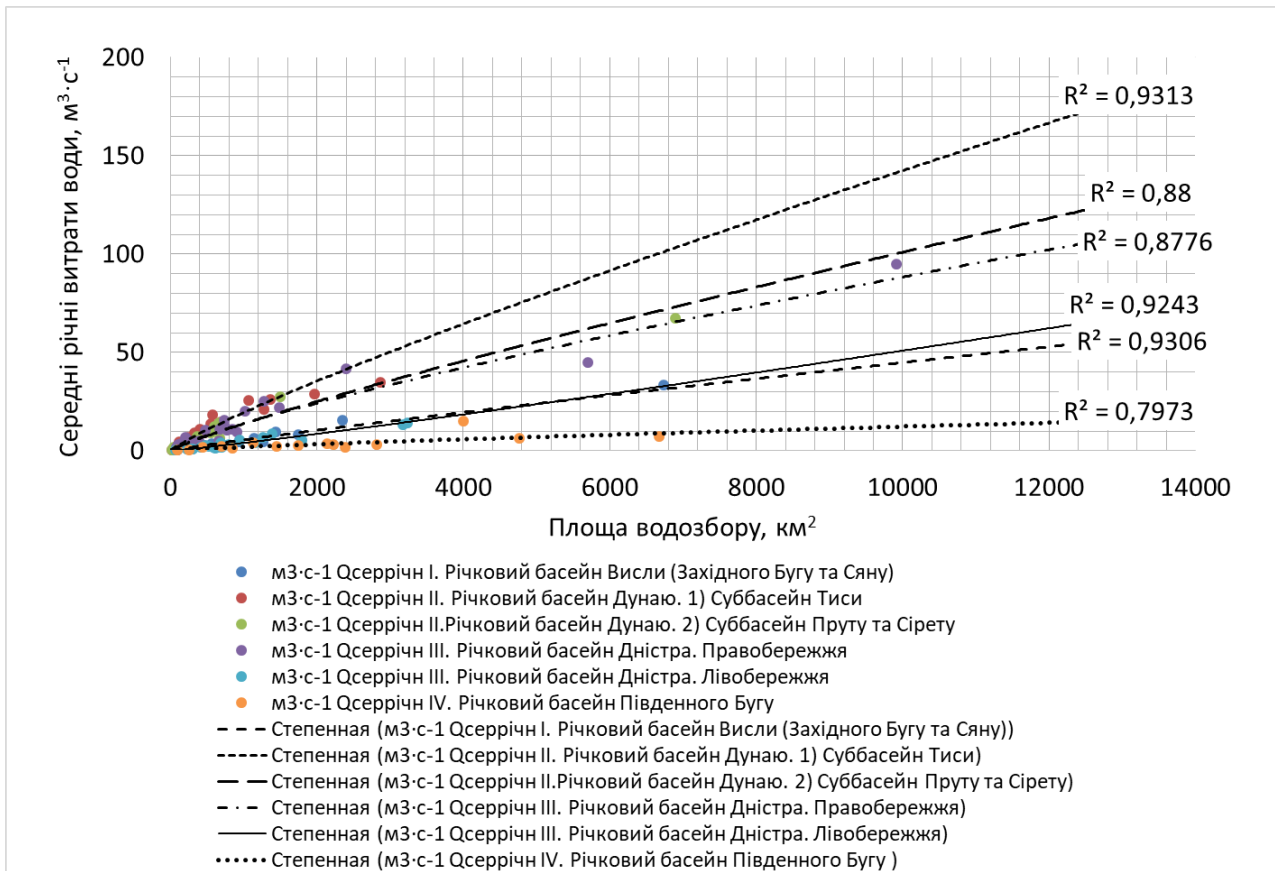


Рис. 1. Залежність норм середніх річних витрат води річок в від площі їх водозборів річкових басейнах Висли, Дунаю (суббасейни Тиси, Пруту і Сірету), Дністра, Південного Бугу

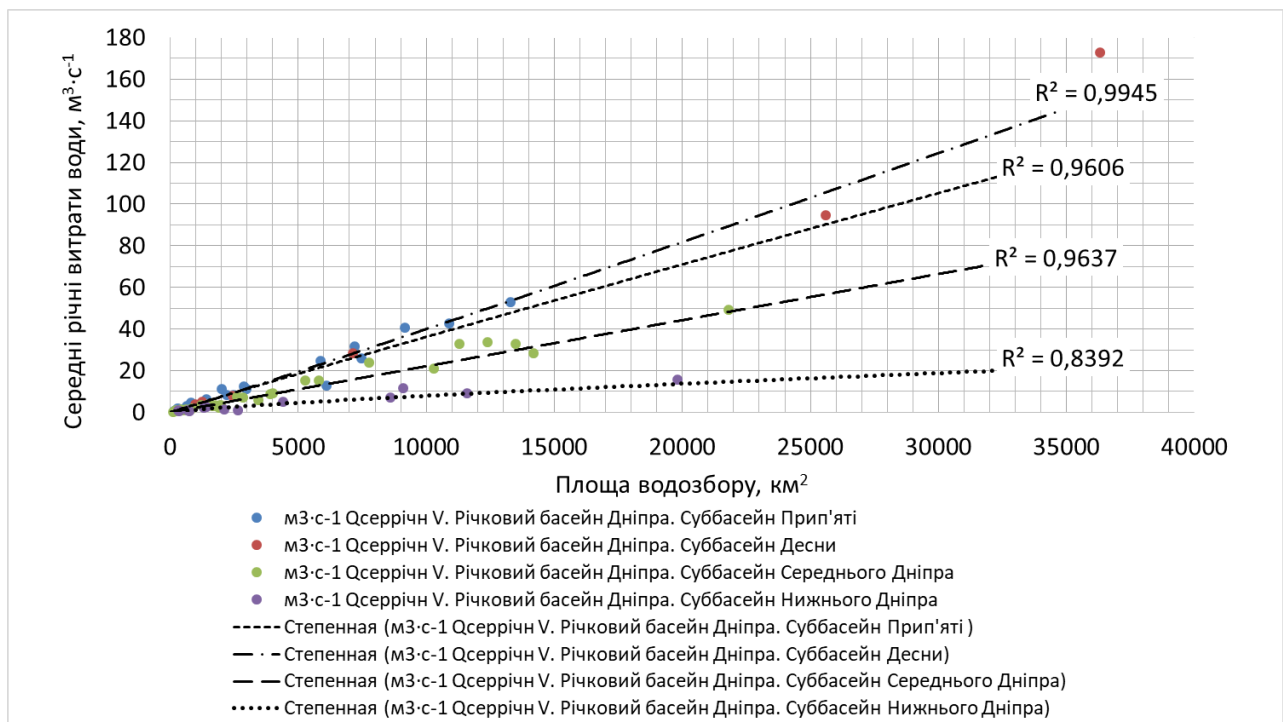


Рис. 2. Залежність норм середніх річних витрат води річок від площі їх водозборів в річкових басейнах Дніпра (суббасейни Прип'яті, Десни, Середнього та Нижнього Дніпра)

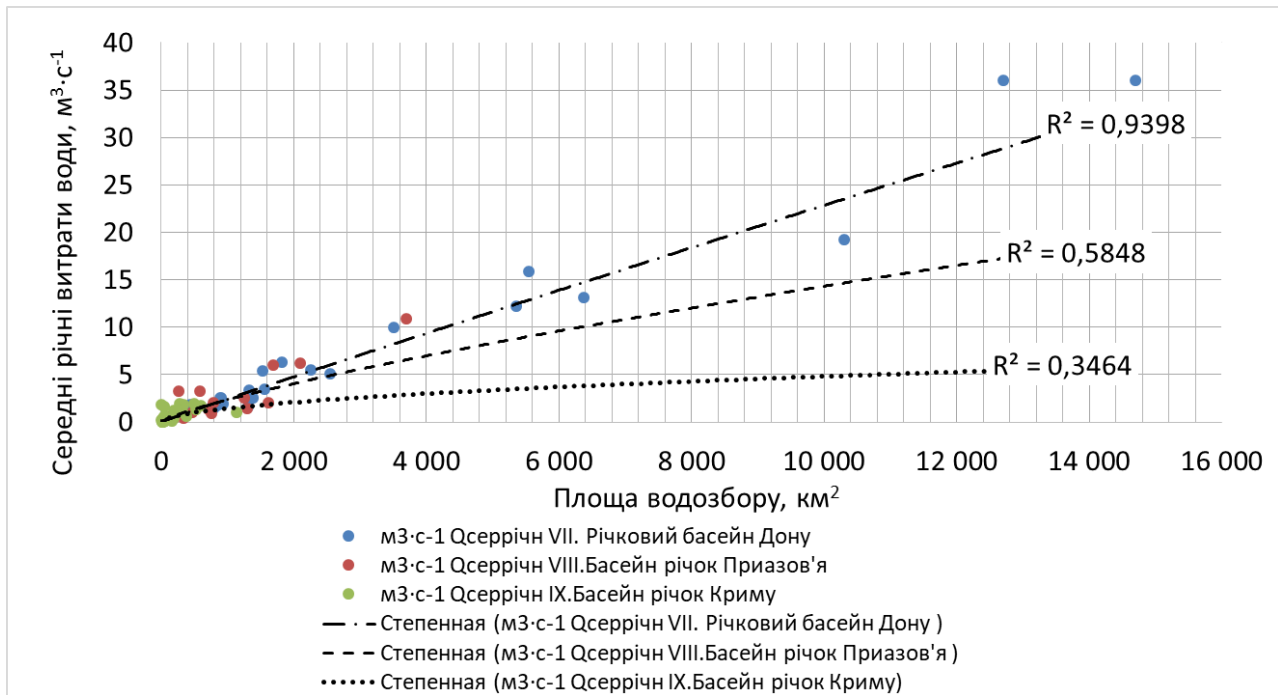


Рис. 3. Залежність норм середніх річних витрат води річок від площі їх водозборів в річкових басейнах Дону, Приазов'я та Криму

Щодо зв'язку між середньою висотою водозборів Карпатських річок та середнім їх похилом, то в суббасейні Тиси на всіх висотах спостерігаються найбільші середні похили водозборів у порівнянні з суббасейнами Пруту і Сірету та правобережних приток Дністра.

На рівнинній Україні середні річні модулі стоку води річок змінюються від $12,6 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ в річковому басейні Вісли (р. Західний Буг - смт Сасів) до $0,1-0,2 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ у басейні річок Причорномор'я (табл. 2). Загальна тенденція таких змін – їх зменшення з північного заходу на південний схід та південь. Це обумовлено фізико-географічним розташування річкових басейнів та суббасейнів, де в зазначеному напрямку зменшується зволоження територій, збільшується випаровування, що й визначає водність їх річок [30-32].

Коефіцієнти варіації середнього річного стоку води для річок басейнів на рівнинній частині України в переважній більшості знаходяться в межах $C_V = 0,23 \div 0,65$ (рис. 7). Середнє значення складає $C_V = 0,40 \div 0,42$, що показує мінливість з року в рік середнього річного стоку води на досліджуваних річках в межах приблизно $\pm 40-42\%$ від норми водного стоку.

Найменші значення C_V від 0,2 до 0,4 характерно для річок з середніми річними модулями стоку води більшими за $2-3 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, а найбільша мінливість притаманна для річок з середніми річними модулями стоку води меншими за

$2 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, що добре прослідковується на рис. 7.

Коефіцієнти асиметрії C_S мають, в основному, для всієї території України невисокі додатні значення, тобто, для середнього річного стоку води характерна незначна асиметричність у їх багаторічному розподілі з переважанням значень в рядах стокових характеристик річок менше їх норми. Для C_S характерним є схожий з C_V розподіл по території, однак змінюється він в значно більших межах. Узагальнене співвідношення C_S/C_V знаходиться в межах $2 \div 2,5$, що свідчить про помірно-асиметричний розподіл у послідовностях середніх річних витрат води досліджуваних річок.

Висновки. Аналіз відносних значень середніх квадратичних похибок розрахунку норм стоку води річок України показав, що ряди спостережень за середньорічним стоком води вважаються репрезентативними та розраховані величини норм є достатньо стійкими для практичних розрахунків. Зміна багаторічного стоку води річок України підкоряється закономірностям географічної зональності – на рівнинній території широтної, в гірських регіонах висотної. В межах України прослідковуються чіткі закономірності – модулі середнього річного стоку води річок мають тенденцію до зменшення зі збільшенням площі водозборів, а витрати води збільшуються зі збільшенням площі водозборів. Залежності норм середніх річних витрат води річок в від площі їх водозборів для річкових басейнів та су-

Рівняння залежності норм середніх річних витрат води річок \bar{Q} від площі їх водозборів F в річкових басейнах та суббасейнів відповідно до Гідрографічного районування України

Річкові басейни та суббасейни згідно Гідрографічного районування України	Рівняння залежності $\bar{Q} = f(F)$	Апроксимація R^2 зв'язків $\bar{Q} = f(F)$	Кореляційне відношення
I. Річковий басейн Вісли (Західного Бугу та Сяну)			
	$\bar{Q} = 0,0106 \cdot F^{0,9067}$	0,9306	0,96
II. Річковий басейн Дунаю			
Суббасейн Тиси	$\bar{Q} = 0,0495 \cdot F^{0,8646}$	0,9313	0,97
Суббасейн Пруту і Сірету	$\bar{Q} = 0,0349 \cdot F^{0,8654}$	0,8883	0,94
III. Річковий Басейн Дністра			
лівобережжя	$\bar{Q} = 0,0019 \cdot F^{1,1068}$	0,9243	0,96
правобережжя	$\bar{Q} = 0,0538 \cdot F^{0,8037}$	0,8776	0,94
IV. Річковий басейн Південного Бугу			
	$\bar{Q} = 0,007 \cdot F^{0,8112}$	0,7973	0,89
V. Річковий басейн Дніпра			
суббасейн Прип'яті	$\bar{Q} = 0,0047 \cdot F^{0,9708}$	0,9606	0,98
суббасейн Десни	$\bar{Q} = 0,0029 \cdot F^{1,0341}$	0,9945	0,99
суббасейн Середнього Дніпра	$\bar{Q} = 0,0022 \cdot F^{1,0007}$	0,9637	0,98
суббасейн Нижнього Дніпра	$\bar{Q} = 0,0056 \cdot F^{0,7872}$	0,8392	0,92
VI. Басейн Річок Причорномор'я			
	---	---	---
VII. Річковий басейн Дону			
	$\bar{Q} = 0,0029 \cdot F^{0,9738}$	0,9398	0,97
VIII. Басейн річок Приазов'я			
	$\bar{Q} = 0,0105 \cdot F^{0,7837}$	0,5848	0,76
IX. Басейн річок Криму			
	$\bar{Q} = 0,0407 \cdot F^{0,5183}$	0,3464	0,59

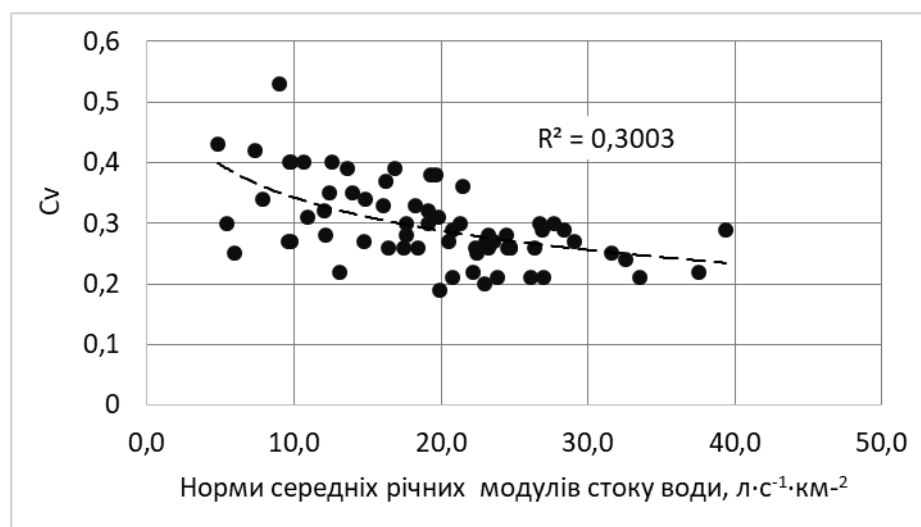


Рис. 4. Залежність коефіцієнта варіації C_v від норм середніх річних модулів стоку води Карпатських річок (суббасейни Тиси, Пруту і Сірету, правобережна частина річкового басейну Дністра)

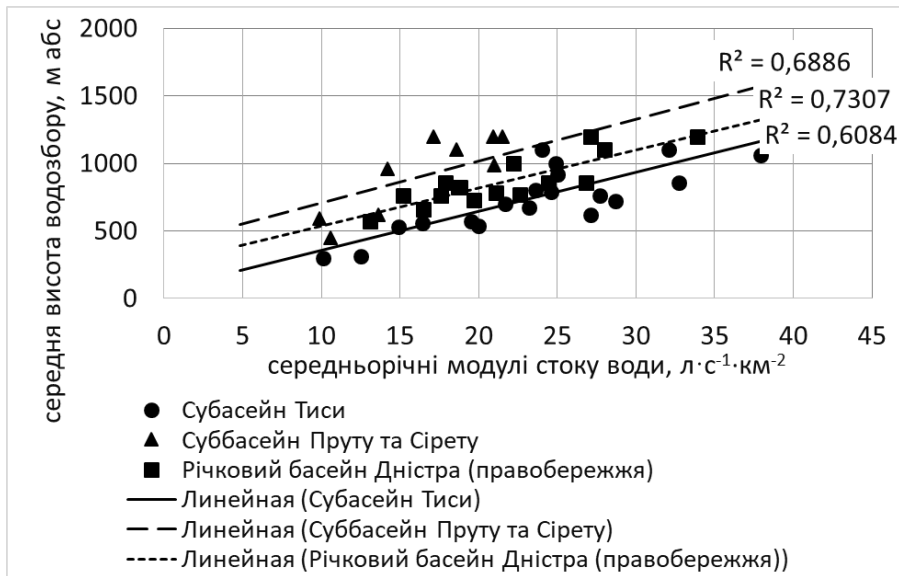


Рис. 5. Залежність норм середніх річних модулів стоку води Карпатських річок (суббасейни Тиси, Пруту і Сірету, правобережна частина річкового басейну Дністра) від середньої висоти їх водозборів

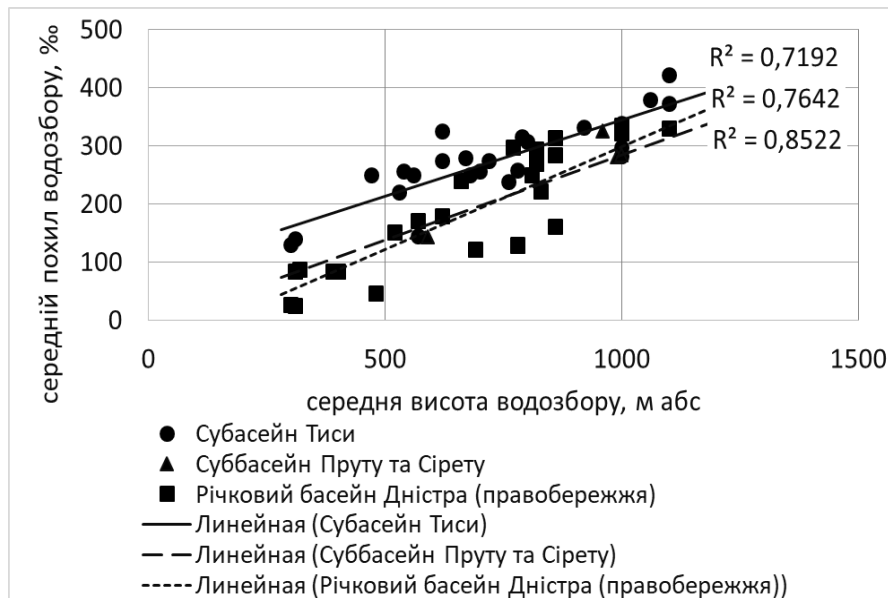


Рис. 6. Залежність між середньою висотою водозборів Карпатських річок (суббасейни Тиси, Пруту і Сірету, правобережна частина річкового басейну Дністра) та середнім їх похилом

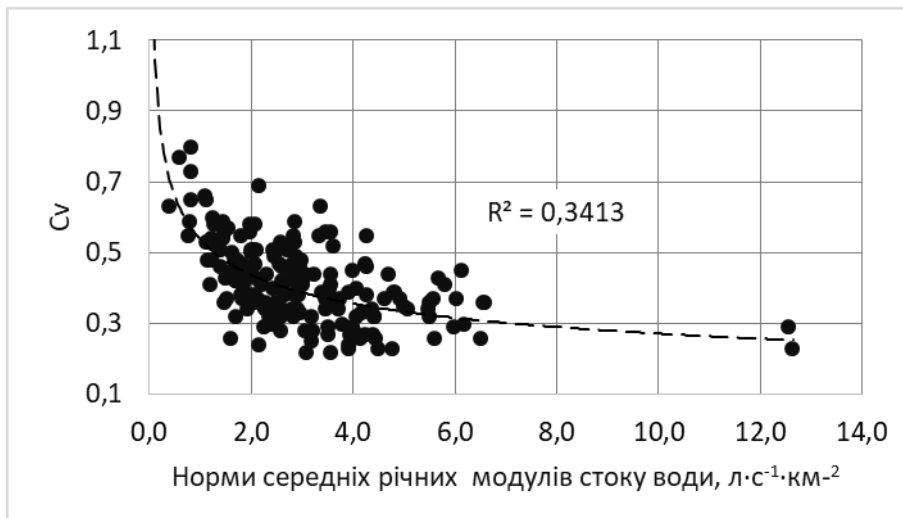


Рис. 7. Залежність коефіцієнта варіації C_v від норм середніх річних модулів стоку води для річкових басейнів рівнинної території України

ббасейнів відповідно до Гідрографічного районування України виявилися з досить високою апроксимацією, кореляційні відношення цих зв'язків змінюються в переважній більшості від 0,76 до 0,99, що дає підстави для використання їх в практичних розрахунках в межах досліджуваних річкових басейнів та суббасейнів. Аналіз просторових змін середнього багаторічного модуля стоку річок по території України створює

передумови для їх картування. Коефіцієнти варіації середнього річного стоку води для річок басейнів та суббасейнів рівнинної частини України в переважній більшості знаходяться в межах $0,23 \div 0,65$, для гірських басейнів $0,20 \div 0,45$. Коефіцієнти асиметрії мають, в основному, для всієї території України невисокі додатні значення. Узагальнене співвідношення C_S / C_V знаходиться в межах $2 \div 2,5$.

Література

1. Кочерин Д. И. Средний многолетний годовой и месячный сток в Европейской части Союза / Д. И. Кочерин // Труды Московского института инженеров транспорта. – Москва, 1927. – Вып. VI.
2. Львович М. И. Опыт классификации рек СССР / М. И. Львович // Труды ГГИ, 1938. – Вып. 6. – С. 58-104.
3. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР / Б. Д. Зайков // Труды НИУ ГУ-ГМС, 1946. – Серия IV. – Вып. 24. – С. 67-95.
4. Троицкий В. А. Гидрологическое районирование СССР / В. А. Троицкий – Труды комиссии по естественно-историческому районированию СССР, 1948. – Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1948.
5. Кузин П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР / П. С. Кузин – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 455 с.
6. Чиппинг Г. О. Річний та мінімальний стік на території України / Г. О. Чиппинг, К. А. Лисенко // К.: Вид-во АН УРСР, 1959.
7. Гідрологічні розрахунки для річок України // За ред. Г. І. Швеця – К.: Вид-во АН УРСР, 1962. – 390 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 5. Белоруссия и верхнее Поднепровье. Вып. 1 // Под ред. В. В. Куприянова – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 721 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия // Под ред. М.С. Каганера – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 884 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 2. Среднее и нижнее Поднепровье // Под ред. М. С. Каганера – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 656 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 3. Басейн Северского Донца и реки Приазовья // Под ред. М. С. Каганера. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 492 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым // Под ред. М. М. Айзенберга, М. С. Каганера – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 344 с.
13. Львович М. И. Метод комплексного изучения водного баланса территории / Водный баланс СССР и его преобразование: Сборник статей. Международное гидрологическое десятилетие // Под ред. М. И. Львовича – М.: Наука, 1969. – С. 15-23.
14. Вишневський В. І. Річки і водойми України. Стан і використання / В. І. Вишневський – Київ: Віпол, 2000. – 376 с.
15. Вишневський В. І. Гідрологічні характеристики річок України / В. І. Вишневський, О. О. Косовець – Київ: Ніка-центр, 2003. – 324 с.
16. Гребінь В. В. Гідролого-гідрохімічне районування: історія та сучасний стан / В. В. Гребінь // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2001. – Т. 2. – С. 83-93.
17. Лобода Н. С. Нормування характеристик природного річного стоку України / Н. С. Лобода, Є. Д. Гопченко // Наук. пр. УкрНДГМІ, 2003. – Вып. 252. – С. 5-10.
18. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтногідрологічний аналіз) / В. В. Гребінь – К.: Ніка-Центр, 2010. – 316 с.
19. Мельник С. В. Изменения в характере колебаний стока рек Верхнего Днестра в современных климатических условиях / С. В. Мельник, Н. С. Лобода // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія", 2010. – № 909. – С. 117-127.
20. Лобода Н. С. Мінливість клімату та водних ресурсів Закарпаття / Н. С. Лобода, Ю. В. Божок // Вісник Одеського державного екологічного університету, 2011. – Вып. 12. – С. 161-167.
21. Горбачова Л. О. Сучасний внутрішньорічний розподіл водного стоку річок України / Л. О. Горбачова // Український географічний журнал, 2015. – № 3. – С. 16-23.
22. Лук'янець О. І. Закономірності та просторова синхронність багаторічних циклічних коливань водного стоку річок Українських Карпат / О. І. Лук'янець, Т. П. Камінська // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць. Чернівці: Чернівецький національний університет – Вып. 744-745: Географія, 2015. – С. 18-24.
23. Горбачова Л. О. Гідролого-генетичний аналіз просторово-часових закономірностей водного стоку річок України: методологія, тенденції, прогноз: автореф. дис ... докт. геогр. наук: 11.00.07 / Людмила Олександрівна Горбачова. – Київ, 2017. – 400 с.
24. Чорноморець Ю. О. Відновлення середнього річного стоку води річки Дніпро / Ю. О. Чорноморець, П. О. Павленко, О. І. Лук'янець // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2017. – № 4 (47). – С.36-47.
25. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: вид. офіційне. Київ: Твій формат, 2006. – 240 с.

26. Хільчевський В.К., Гідрографічне та водогосподарське районування території України, затверджене у 2016 р. – реалізація положень ВРД ЄС / В. К. Хільчевський, В. В. Гребінь // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2017. – Т. 1(41). – С.8-20.
27. Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу / В. В. Гребінь, В. Б. Мокін, В. А. Сташук, В. К. Хільчевський, М. В. Яцюк, О. В. Чунарьов, С. М. Крижановський, В. С. Бабчук, О. Є. Ярошевич – Київ : Інтерпрес ЛТД, 2013. – 55 с.
28. Ободовський О. Г. Середній річний водний стік річок Українських Карпат та особливості його територіального розподілу / О. Г. Ободовський, О. І. Лук'янець, О. С. Коноваленко, В.О. Корнієнко // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2016. – Т. 4(43). – С. 25-32.
29. Лук'янець О. І. Аналіз просторового розподілу та мінливості середнього річного стоку води річок Українських Карпат / О. І. Лук'янець, О. С. Коноваленко // Збірник праць XII з'їзду Українського географічного товариства «Українська географія: сучасні виклики» – К: Принт-Сервіс, 2016. – Том II. – С. 175-177.
30. Лук'янець О. І. Расчетные характеристики среднего годового стока воды рек правобережной части Припяти / О. И. Лукьянец, В. А. Корниенко // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды». БрГУ имени А.С. Пушкина, 2017. – Часть 1. – С. 180-183.
31. Лук'янець О. І. Закономерности многолетней изменчивости водного стока рек бассейна р. Припять (в пределах Украины) и прогнозные оценки их водности / О. И. Лукьянец, С. А. Москаленко // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды». БрГУ имени А.С. Пушкина, 2017. – Часть 1. – С. 184-188.
32. Ободовський О. Г. Розподіл та узагальнення середнього річного стоку води річок правобережної частини Дніпра в межах України / О. Г. Ободовський, О. І. Лук'янець, Е. Р. Рахматулліна, В. О. Корнієнко // Тези доповідей Першого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду. – ОДЕКУ. – Одеса: ТЕС, 2017. – С. 158-159.
33. Oleksandr Obodovskyi Patterns and Forecast of Long-term Cyclical Fluctuations of the Water Runoff of Ukrainian Carpathians Rivers / Oleksandr Obodovskyi, Olga Lukianets // Scientific Journal of Environmental Research, Engineering and Management. Kaunas University of Technology, 2017. – Vol. 73. – No. 1. – P. 33-47.
34. Olga Lukianets Stochastic regularities of long-term fluctuation of average annual runoff of rivers of Tisza river basin (within the Ukraine) / Olga Lukianets // Electronic Book with full papers from XXVII Conference of Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, 2017. – Golden Sands, Bulgaria. – P. 280-290.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 556.166

Alexander Obodovsky,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Department of Hydrology and Hydroecology,
Faculty of Geography, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
2 Academician Glushkov Av., Kyiv, 02000, Ukraine,
e-mail: obodovskiy58@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5475-3222>;

Olga Lukyanets,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Hydrology and Hydroecology,
Faculty of Geography, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: luko15_06@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8903-130X>;

Stanislav Moskalenko,

PhD (Geography), Assistant, Department of Hydrology and Hydroecology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Geography,
Academician Glushkov Avenue, 2, Kyiv, 02000, Ukraine,
e-mail: stas_univer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-5046>;

Victoria Kornienko,

PhD Student, Department of Hydrology and Hydroecology, Faculty of Geography,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: viktoriya.22.kor@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9503-3275>

GENERALIZATION OF THE AVERAGE ANNUAL WATER RUNOFF OF THE RIVERS ACCORDING TO THE HYDROGRAPHIC ZONING OF UKRAINE

Aim of the research is to estimate average annual water runoff of rivers of Ukraine within river basins and sub-basins respectively to the Hydrographic zoning of Ukraine. The territory of Ukraine is divided into hydrographic units - nine areas of river basins and nine sub-basins.

Methods of the research - methods of mathematical statistics and statistical analysis of the relations between hydrological variables.

Scientific novelty of the research is to process the base of mean annual water discharge of rivers of Ukraine from 294 hydrometric posts from the beginning of observations until 2015 inclusive. 83 % of the posts have observation periods ≥ 50 years, and only 17 % have ≤ 50 years. Also, for the first time, the generalization of the mean annual water runoff in the rivers was carried out according to the scheme of Hydrographic zoning of Ukraine.

Practical value is determined by further development of studies of the average annual runoff of the rivers in Ukraine and its generalization according to modern observation data.

Research results. Analysis of the relative values of the mean standard deviation in the calculations of the mean annual runoff of the rivers of Ukraine has shown that the series of its observations are considered representative.

Dependences of the average annual discharges of water in the rivers from the area of their catchments for river basins and sub-basins proved to be of rather high approximation. Correlations is from 0,76 to 0,99, which gives grounds for using them in practical calculations within the studied river basins and sub-basins.

Analysis of the spatial changes of the specific discharge of rivers in the territory of Ukraine showed that their largest values are ($34-39 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) fixed on small mountain catchments of the Carpathian and Crimea. In plains they vary from $12,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ in the river basin of the Vistula River to $0,1-0,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ in the rivers basin of the Black Sea. The general tendency is their decrease from the northwest to the southeast and south.

The variation coefficients of the the mean annual runoff for rivers in the flat part of Ukraine are within the range of $0,23 \div 0,65$, for the mountain basins $0,20 \div 0,45$. Coefficients of asymmetry have a low positive value for the entire territory of Ukraine. The generalized ratio between coefficients of asymmetry and variation is $2 \div 2,5$.

Keywords: rivers of Ukraine; hydrographic zoning of Ukraine; mean annual runoff for rivers; statistical parameters of distribution.

References

1. Kocherin, D. I. (1927). *Average annual and monthly runoff in the European part of the Union. Proceedings of the Moscow Institute of Transportation Engineers. Moscow, VI [in Russian].*
2. Lvovich, M. I. (1938). *Experience in the classification of rivers of the USSR. Proceedings of the State Hydrological Institute, 6, 58-104 [in Russian].*
3. Zaikov, B.D. (1946). *Average runoff and its distribution per year on the territory of the USSR. Proceedings of the National Research University of the Main Department of the Hydrometeorological Service of the USSR, IV, 24, 67-95 [in Russian].*
4. Troitsky, V. A. (1948). *Hydrological zoning of the USSR. Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [in Russian].*
5. Kuzin, P. S. (1960). *Classification of rivers and hydrological zoning of the USSR. Leningrad, 455 [in Russian].*
6. Chipping, G. O., Lysenko, K. A. (1959). *Annual and minimum runoff in the territory of Ukraine. Kyiv, Publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR [in Ukrainian].*
7. Shvets, G. I. (Ed.). (1962). *Hydrological calculations for rivers of Ukraine. Kyiv, 390 [in Ukrainian].*
8. Kupriyanov, V. V. (Ed.). (1966). *Surface water resources of the USSR. 5. Belarus and the Upper Dnieper. 1. Leningrad, 721 [in Russian].*
9. Kaganer, M. S. (Ed.). (1969). *Surface water resources of the USSR. 6. Ukraine and Moldova. 1. Western Ukraine and Moldova. Leningrad, 884 [in Russian].*
10. Kaganer, M. S. (Ed.). (1971). *Surface water resources of the USSR. 6. Ukraine and Moldova. 2. Middle and lower Dnieper. Leningrad, 656 [in Russian].*
11. Kaganer, M. S. (Ed.). (1967). *Surface water resources of the USSR. 6. Ukraine and Moldova. 3. Rivers basin of the Seversky Donets and the of Azov rivers. Leningrad, 492 [in Russian].*
12. Eisenberg, M. M., Kaganer, M. S. (Ed.). (1966). *Surface water resources of the USSR. 6. Ukraine and Moldova. 4. Crimea. Leningrad, 344 [in Russian].*
13. Lvovich, M. I. (Ed.). (1969). *Method for Integrated Study of the Territorial Water Balance. Water Balance of the USSR and its Transformation: Collected papers. International Hydrological Decade, Moscow, 15-23 [in Russian].*
14. Vishnevsky, V. I. (2000) *Rivers and reservoirs of Ukraine. Condition and use. Kyiv, 376 [in Ukrainian].*
15. Vishnevsky, V. I., Kosovets, O. O. (2003). *Hydrological characteristics of rivers of Ukraine. Kyiv, 324 [in Ukrainian].*
16. Grebin, V.V. (2001). *Hydro-hydrochemical zoning: history and modern state. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, 2, 83-93 [in Ukrainian].*
17. Loboda, N. S., Hopchenko, Ye. D. (2003). *Rationing of characteristics of natural annual runoff of Ukraine. Scientific papers of UkrRHMI, 252, 5-10 [in Ukrainian].*

18. Grebin, V. V. (2010). *Modern water regime of the rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis)*. Kyiv, 316 [in Ukrainian].
19. Melnik, S. V., Loboda, N. S. (2010). *Changes in the nature of fluctuations in the rivers flow of the Upper Dniester in modern climatic conditions*. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology, Geography, Ecology"*, 909, 117-127 [in Russian].
20. Loboda, N. S., Bozhok, Yu. V. (2011). *Variability of the climate and water resources of Transcarpathia*. *Bulletin of Odessa State Ecological University*, 12, 161-167 [in Ukrainian].
21. Gorbacheva, L. O. (2015). *Modern internal distribution of water flow of rivers of Ukraine*. *Ukrainian Geographic Journal*, 3, 16-23 [in Ukrainian].
22. Lukianets, O. I., Kaminsky, T. P. (2015). *Regularities and spatial synchronicity of multi-year cyclical fluctuations of the water flow of the Ukrainian Carpathians*. *Scientific Bulletin of the Chernivtsi University: a collection of scientific works*, 744-745: *Geography*, 18-24 [in Ukrainian].
23. Gorbacheva, L. O. (2017). *Hydrological and genetic analysis of spatial-temporal regularities of water flow of rivers of Ukraine: methodology, trends, forecast: the dissertation author's abstract ... Doctor of Geographical Sciences: 11.00.07 / Lyudmila Gorbacheva*. Kyiv, 400 [in Ukrainian].
24. Chornomorets, Yu. O., Pavlenko, P. A., Lukianets, O. I. (2017). *Recovering the average annual drainage of the Dnipro River*. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 4 (47), 36-47 [in Ukrainian].
25. *EU Water Framework Directive 2000/60/EC. (2006). Basic terms and their definitions: the official publishing house*. Kyiv, 240 [in Ukrainian].
26. Khilchevsky, V.K., Grebin, V.V. (2017). *Zoning of Hydrographic and water management of the territory of Ukraine, approved in 2016- Implementation of the provisions of the EU's WFD*. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1 (41), 8-20 [in Ukrainian].
27. Grebin, V. V., Mokin, V. B., Stashuk V. A., etc. (2013). *Methods of hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine in accordance with the requirements of the Water Framework Directive of the European Union*. Kyiv, 55 [in Ukrainian].
28. Obodovsky, O. G., Lukianets, O. I., Konovalenko, O. S., Kornienko, V. O. (2016). *Average annual water flow of rivers of the Ukrainian Carpathians and peculiarities of its territorial division*. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 4 (43), 25-32 [in Ukrainian].
29. Lukianets, O. I., Konovalenko, O. S. (2016). *Analysis of spatial distribution and variability of annual average runoff of rivers of the Ukrainian Carpathians*. *Collected Works of the XII Congress of the Ukrainian Geographical Society "Ukrainian Geography: Modern Challenges"*, Kyiv, II, 175-177 [in Russian].
30. Lukianets, O. I., Kornienko, V. A. (2017). *Estimated characteristics of the average annual drainage of rivers of the right bank of the Pripjat*. *Compilation of materials of the International scientific and practical conference "Actual problems of the Earth sciences: use of natural resources and preservation of the environment"*, Brest, 1, 180-183 [in Russian].
31. Lukianets, O. I., Moskalenko, S. A. (2017). *The laws of long-term variability of the water flow of rivers in the Pripjat river basin (within Ukraine) and predictive estimates of their water content*. *Compilation of materials of the International scientific and practical conference "Actual problems of the Earth sciences: use of natural resources and preservation of the environment"*, Brest, 1, 184-188.
32. Obodovsky, O. G., Lukianets, O. I., Rahmatullina, E. R., Kornienko, V. O. (2017). *Distribution and generalization of the average annual runoff of rivers of the right-bank part of the Dnieper within Ukraine*. *Abstracts of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress, Odessa*, 158-159 [in Ukrainian].
33. Oleksandr Obodovskiy, Olga Lukianets (2017). *Patterns and Forecast of Long-term Cyclical Fluctuations of the Water Runoff of Ukrainian Carpathians Rivers*. *Scientific Journal of Environmental Research, Engineering and Management, Kaunas University of Technology*, 73, 1, 33-47.
34. Olga Lukianets (2017). *Stochastic regularities of long-term fluctuation of average annual runoff of rivers of Tisza river basin (within the Ukraine)*. *Electronic Book with full papers from XXVII Conference of Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Golden Sands, Bulgaria*, 280-290.

UDC 911.9:553.04(477)

Myroslav Yakovych Syvyj,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geography and its Teaching Methods, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, 2 Maxyma Kryvonosa St., 46027, Ternopil, Ukraine, e-mail: syvyjm@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-3150-4848>;

Nataliia Olehivna Lisova,

PhD (Biology), Associate Professor, Department of Geoecology and Methods of Teaching Environmental Sciences, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, e-mail: nlisova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4053-9612>;

Bohdan Borysovych Havryshok,

PhD (Geography), Lecturer, Department of Geography and its Teaching Methods, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, e-mail: gavryshok_b@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8746-956X>

THE REGIONALIZATION OF TERRITORIAL COMBINATIONS OF MINERAL DEPOSITS AND MINING TERRITORIES OF UKRAINE

М. Я. Сивий, Н. О. Лісова, Б. Б. Гавришок. ПРО РЕГІОНАЛІЗАЦІЮ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ПОЄДНАНЬ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН ТА ГІРНИЧОПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ. В статті зроблено спробу взаємоув'язки геологічної, економіко-географічної та промислової регіоналізації поєднань розвіданих родовищ корисних копалин України та сформованих на їх основі територіально-виробничих комплексів з мінерально-сировинною орієнтацією. Запропоновано власний варіант економіко-географічної регіоналізації територіальних поєднань родовищ корисних копалин, яка ґрунтується на даних Геоінформ про сучасний стан мінерально-сировинної бази країни. Для районування території України за мінерально-сировинними ресурсами взято за основу економіко-географічні форми зосередження родовищ корисних копалин, які виділялись з допомогою методів картографії і генералізації, а також форми гірничопромислової регіоналізації. Стосовно останніх, через розбіжності в означеннях окремих термінів серед наукового загалу, запропоновано власну класифікацію гірничопромислових територій за масштабами виробництва та площами, на яких воно зосереджене. Розкрито закономірності територіальної локалізації угруповань родовищ корисних копалин та сформованих на їх основі мінерально-сировинних комплексів України. В територіальній структурі мінерально-сировинних ресурсів України виділено чотири економіко-географічні зони: Придніпровсько-Приазовську, Східно-Українську, Донецько-Слов'янську та Прикарпатську, яким відповідають однойменні гірничопромислові зони. У межах економіко-географічних зон виокремлено й охарактеризовано дрібніші таксони: макрорайони, райони, макрокущі та кущі; відповідно, у межах гірничопромислових зон виділяються гірничопромислові райони, вузли і центри. Охарактеризовано мінеральну специфіку зазначених угруповань та їх складових частин, зазначено їх економіко-географічні особливості, сучасний стан освоєності ресурсів мінерально-сировинної бази, що дозволяє визначати перспективи подальшого розвитку сформованих територіально-виробничих комплексів мінерально-сировинної спрямованості, оптимізувати їх структуру та пропонувати об'єкти для першочергового інвестування.

Ключові слова: мінерально-сировинні ресурси, економіко-географічна регіоналізація, гірничопромислова регіоналізація, гірничопромислові центри, вузли, райони.

М. Я. Сивий, Н. О. Лісова, Б. Б. Гавришок. О РЕГИОНАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УКРАИНЫ. В статье сделана попытка взаимодействия геологической, экономико-географической и промышленной регионализации объединенных разведанных месторождений полезных ископаемых Украины и сформированных на их базе территориально-производственных комплексов с минерально-сырьевой ориентированностью. Для районирования территории Украины за минерально-сырьевыми ресурсами взяты за основание экономико-географические формы сосредоточения месторождений полезных ископаемых, выделяемые с помощью методов картографии и генерализации, а также формы горнопромышленной регионализации. Из-за расхождений в определениях отдельных терминов, предложена собственная классификация горнопромышленных территорий за масштабами производства и площадями его развития. Определены закономерности территориальной локализации группировок месторождений полезных ископаемых и сформированных на их базе минерально-сырьевых комплексов Украины. В территориальной структуре минерально-сырьевых ресурсов Украины выделены четыре экономико-географические зоны: Приднепровско-Приазовская, Восточно-Украинская, Донецко-Славянская и Прикарпатская, которым соответствуют одноименные горнопромышленные зоны. В пределах экономико-географических зон выделены и охарактеризованы более мелкие таксоны: макрорайоны, районы, макрокусты, кусты; соответственно, в пределах горнопромышленных территорий выделяются горнопромышленные районы, узлы, центры. Охарактеризована минеральная специфика означенных группировок и их составных частей, определены их экономико-географические особенности, современное состояние освоенности ресурсов минерально-сырьевой базы, что позволяет определять перспективы дальнейшего развития сформированных территориально-производственных комплексов минерально-сырьевой направленности, оптимизировать их структуру и предлагать объекты для первоочередного инвестирования.

Ключевые слова: минерально-сырьевые ресурсы, экономико-географическая регионализация, горнопромышленная регионализация, горнопромышленные центры, узлы, районы.

Problem formulation. Our studies conducted over the past two decades have made an attempt to combine geological and geographical approaches to define and characterise an extensive and still not

properly developed problem as *geography of Ukraine's mineral resources* [21, 22, 23, 24, 25]. The research has investigated the constructive and geographical basis for the mineral resource study,

the historical peculiarities of the exploration and development of Ukrainian mineral and resource potential, the conditions of the mineral resources formation. In addition, it provides the description of the main groups of mineral raw materials, sets the problem of their efficient use and environmental protection in mining regions. In this context, it is necessary to summarize the information about the principles of mineral deposit distribution, about the formation of industrial raw material complexes based on their combination in order to optimize the structure of such associations and to resolve the issues of the efficient use of mineral raw resources.

The aim of the study is to zone the country's area on the basis of combining explored mineral deposits with industrial complexes of mineral resource orientation, to characterize the peculiarities of the mineral specialization of the defined economic and geographic structures where mineral raw material are situated; to determine their potential and industrial prospects.

Analysis of the latest research and publications. Researches concerning the geography of mineral resources are conducted mainly in several inter-related and interdependent directions: natural geography, economic geography, and geoecology. The natural geography direction is represented mainly by works where paleogeomorphological and paleolandscape criteria for search and exploration of mineral deposits [3, 16] and landscape research of mining areas are considered [6, 17, 18, 20, 27, 28]. The economic direction is represented by the following works [2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31]. The geoecological (environmentally oriented) direction has developed mainly due to the needs to study the processes accompanying the exploration, extraction and primary processing of minerals [1, 6, 17, 18, 19, 20, 27, 28]. We have been developing the constructively geographical approach to the study of mineral resources focused on a comprehensive analysis and synthesis of the state and development of the mineral and raw material potential of the regions. Zoning of the territory of Ukraine basing on mineral resources was carried out by I. Horlenko [4] and other researchers [13, 15], however, since then, there have been significant changes in the area and component structure of the country's mineral resources, dozens of new deposits have been explored, priorities in the use of mineral resources have changed, etc. Consequently, we suggest zoning the territory of Ukraine on the basis of the combination of mineral deposits according to the latest data of Ukraine State Geological Information Fund (Geoinform) concerning the state of its mineral resources base [9] which will enable us to optimize the structure of the mining industry, will ensure the effective use of mineral raw materials and

will determine the prospects and directions of Ukrainian mineral resource complex development.

Presenting main material. Economic, geographical and mining regionalization of the complex mineral deposits is laid on the basis of mineral resource zoning of Ukraine territory (Fig. 1). The figure shows their corelation with geological regionalization.

Economic and geographical forms of the mineral deposit concentration are distinguished by means of cartography and generalization methods in order to create scientific foundation for efficient location and territorial organization of the industrial production. They are characterized in following works [4, 15, 21, 24]. Such forms may coincide with geostructural elements of different scales, but this is not a prerequisite for their selection.

In order to determine the role of deposit location in industry development, industrial complexes of mineral resource orientation which include centers, hubs, agglomerations, regions, zones (mining regionalization) are defined. Though there is a certain consensus among the scientific community on the geological, economic and geographical regionalization of complex mineral deposits, industrial or mining regionalization causes continuous disagreements in the interpretation of certain terms [25]. For example, the terms "mining territory", "ore mining territory", "mining region", "ore mining region" and others are found. Their interpretation is ambiguous in both geographic and geological literature.

In our opinion, the term "*mining territory*" means territories of different size where mining, enrichment and processing of minerals of any status - international, state or local - is done. These may be areas where only large-scale mining is carried out without enriching or processing them, though these processes almost always accompany each other. For instance, brick factories produce bricks from the materials extracted from the deposits nearby; in quarries with limestone, sandstone or granite extraction, crushed stones are produced; sand quarries are used to enrich sands; in the quarries of the facing stone, the process of cutting blocks and grinding them is done. At the same time, the term "*ore mining territories*" is a synonym, it can either be abandoned or used in parallel.

On the one hand, "mining regions" may mean various territories in the Ukrainian geological and geographic literature. Y. Ivanov [6] considers "a mining region" as a part of a mining basin (for example, in Lviv-Volyn basin there are Chervonograd and Volyn mining regions) and mining areas of the local level (Rozdil sulfur deposit, Stebnyk salt deposit).

On the other hand, the "mining region" has a completely different content, for example, there are

well-known names of the mining regions such as Krivyi Rih Mining Region, Donetsk Mining Region, Nikopol Mining Region, Africa's largest mining regions (Zimbabwe, Botswana and South Africa), large mining regions: Silesia, Kuzbass; mining areas of Donbas and others. Thus, mining regions mean areas different in size, in density of industrial (mining) distribution and in mineral resources. There-

fore, mining regions may mean both areas small in size and with small amount of mining enterprises (Boryslav, Stebnyk mining regions) and the whole industrial agglomerations such as Krivyi Rih Basin, Kursk Magnetic Anomaly, etc. In addition, geologists use the term "ore mining area", meaning, in fact, "mining region " or "mining area" (for example: Irshansk titanium-apatite ore mining area).

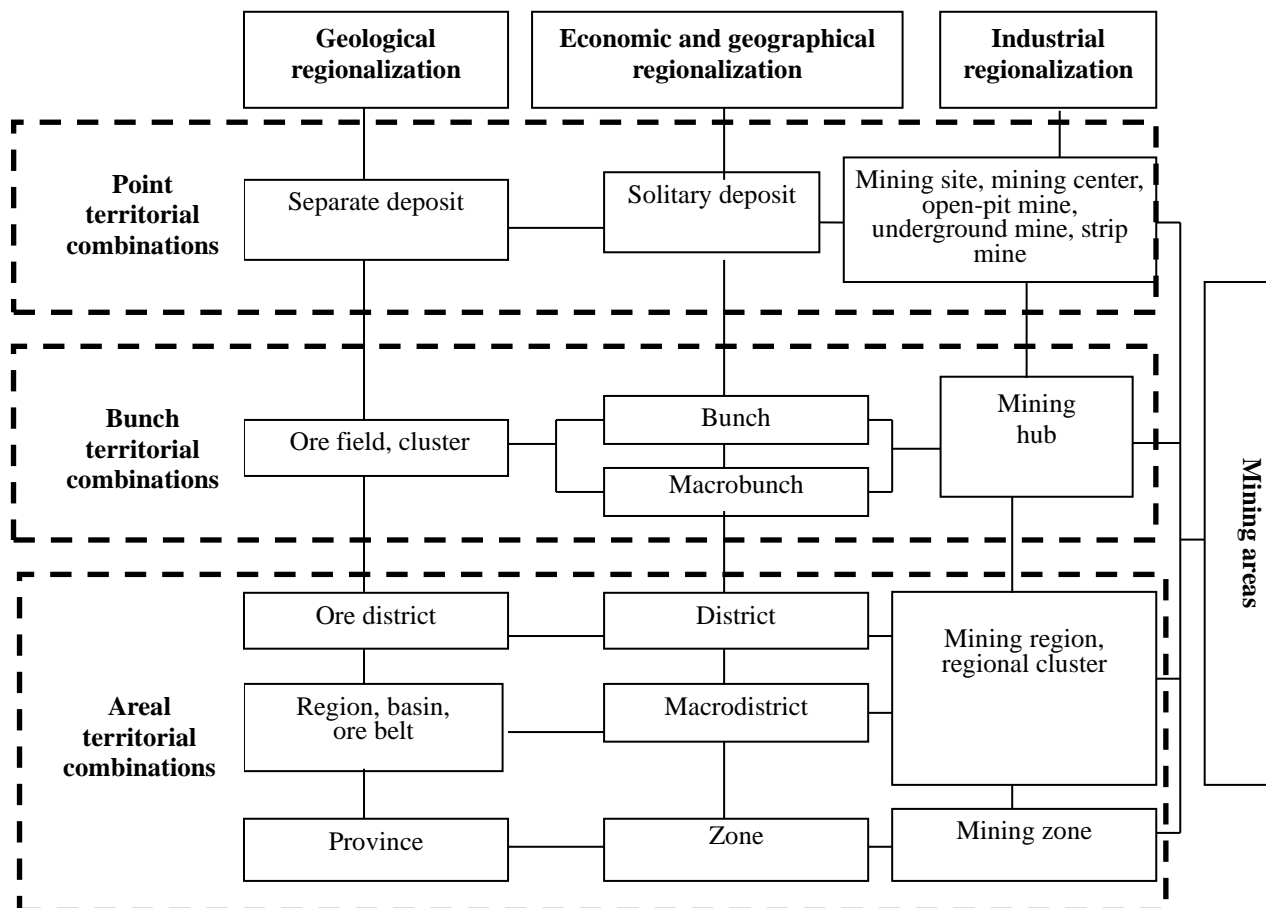


Fig. 1. Territorial combinations of mineral resources

As a result, we suggest distinguishing all mining areas by the scale of mining production and the size of area on which it is situated, and, accordingly, they should be defined as mining sites, mining centers, mining hubs, mining regions, and mining zones (Fig.1). Mining agglomerations should be considered as specific mining areas.

A typical *mining site* can be considered a separate mining enterprise (open-pit mine, underground mine, strip mine) which exploits the mineral deposit, the slope mine. *Mining centers* are usually places with several quarries or mines developing a single deposit and compactly situated in a small area.

Mining hubs are formed on the basis of the contiguous mineral deposits that make up a bunch or macrobunch. An example of such formations can be Hlukhivtsi-Turbiv mining hub the basis of which is kaolin deposits and the facing granite deposits of Koziatyn-Illintsi macrobunch which are exploited

and enriched by Hlukhivtsi mining and processing plant, Turbiv kaolin factory, Zhezheliv quarry. The term 'mining hubs' (and not regions, despite the traditionally established name), in our opinion, should be used to define the concentration of several mining companies (mines) that develop individual slope mines within one coal deposit (coal deposits, unlike ore deposits, occupy comparatively significant areas). The examples of these are Chervonograd mining hub, within which the coal deposits of Mezhyrichia and, partly, of Zabuzhia are exploited, and Novovolynsk mining hub mines of which develop Volyn deposit. Consequently, a mining area of about 180 square kilometres (Chervonograd mining hub) where the mines develop virtually only one deposit, cannot be called a 'mining region' as the region occupies more than 3000 square kilometres, according to the generally accepted economic and geographical regionalization [25]. It would be quite

logical to correlate the mining regionalization with the economic and geographical one (Fig.1) what is suggested by our research.

Mining regions are regarded to be formed on the basis of mining of mineral deposits combined into regions and macroregions (or basins, areas, according to geological regionalization). The examples of these can be Kryvyi Rih mining region formed on the basis of iron-ore deposits of Kryvyi Rih macroregion (Kryvyi Rih basin) and Sloviansk-Artemivsk mining region where deposits of rock salt, coal, refractory materials, etc. are developed.

The *mining zones* are considered to be vast mining areas which coincide with zones, the largest taxon of economic-geographical regionalization. They can cover several industrially developed mineral basins (coal, brown coal, salt, sulfur, etc.) or mining regions. In Ukraine, the mining zones are Donetsk-Sloviansk, Pre-Carpathian (Prykarpaty), Eastern Ukrainian, and Pre-Dnieper-Pre-Azov (Prydniprovsk-Pryazovsk).

Mining agglomerations are part of the mining regions or coincide with them and represent the territorial concentration of industrial mining centers and bunches in a relatively small area [7, 10, 14]. According to M. Enright [26], regional cluster is close to the agglomeration and means a spatial cluster of interrelated enterprises that are similar in their specialization (“geographical agglomeration of firms engaged in one or several related industries”). Basically, the examples of such mining agglomerations can be Horlivka-Yenakiieve, Lysychansk-Rubizhne, Torez-Snizhne [10] and others in Donetsk and Sloviansk-Artemivsk mining regions. Kryvyi Rih agglomeration is formed in Kryvyi Rih mining region.

Therefore, the structure of mineral resources of Ukraine has been defined to include four economic and geographical zones: Donetsk-Sloviansk, Pre-Carpathian (Prykarpaty), Eastern Ukrainian, and Pre-Dnieper-Pre-Azov (Prydniprovsk-Pryazovsk) (Fig. 2, 3). The location of zones, a brief description of their mineral specialization and formed on their basis mineral complexes is provided below.

Pre-Dnieper-Pre-Azov polycomponent zone.

The zone stretches along the right bank of the Dnieper River, near Zaporizhia city, continues on the left bank and reaches the Azov coast. It is located within Ukrainian Shield, this fact determined the peculiarities of the mineral deposits explored here. According to the predominance and significance of the leading mineral resources, the zone can be considered the ore one. It is located on the territory of four oblasts: Cherkasy, Kirovograd, Dnipropetrovsk and Zaporizhia and is characterized by a combination of numerous mineral raw materials the leading of which are iron and manganese ores. Their deposits

are of state importance occupying the first places by the level of industrial development. In the component structure of the zone, the following deposits are of great importance: brown coal, rare and non-ferrous metals, graphite, kaolin, non-metallic raw materials for metallurgy, and building materials.

We have singled out Kryvyi Rih, Nikopol-Tokmak, Zvenyhorodka-Dnieper macroregions and Pre-Azov region in the area of Pre-Dnieper-Pre-Azov zone (Fig. 2, 3).

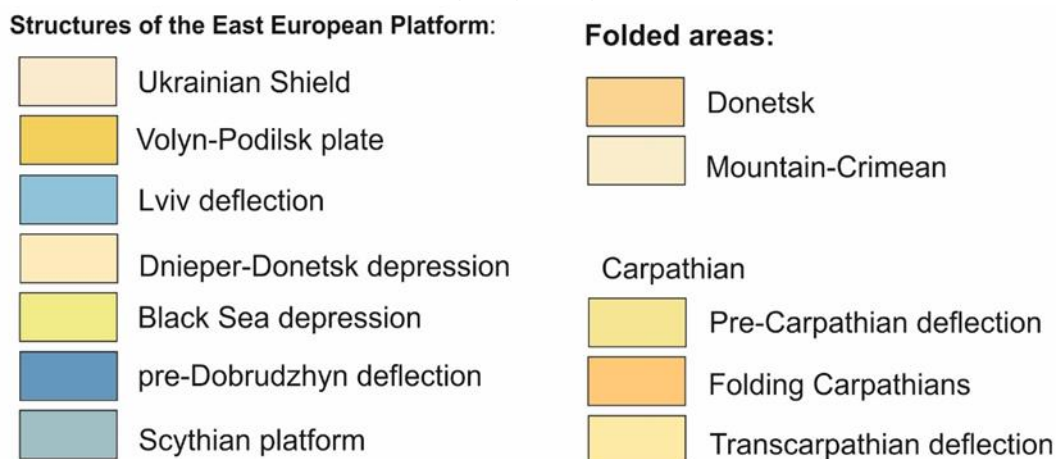
Kryvyi Rih macroregion (over 450 square kilometres) covers Kryvyi Rih iron ore basin and Kremenchuh iron-ore region (according to geological regionalization) and is the main region of iron ore stock and mining in Ukraine. The macroregion is multicomponent with the significant predominance of iron deposits. Ore mining and processing is done at 5 mining and processing plants: Central, Inhulets, Southern, Novokryvorizh, Northern and two mine groups. In terms of mine concentration, quarries and mining and processing plants, no other mining area of the world can compete with this region. Kryvyi Rih mining agglomeration was formed on the basis of the mining enterprises of Kryvyi Rih basin (Fig. 3). The industrial complex of Kryvyi Rih basin can extract more than 190 million tons of raw ore per year and produce about 70 million tons of marketable mineral products.

In the area of the macroregion there are also deposits of uranium (Zhovtorichensk deposit), nickel (Devladove deposit) and aluminum (Vysokopillia deposit), non-metallic raw materials: indurated talc (Valiavkynske, Inhulets deposits), mineral pigments (saturnine red, sienna, colcothar), decorative stone (jaspilites, crocodylite, dolomite marbles), refractory clay (Saksahan deposit), dolomite for metallurgy (Frunze deposit), graphite, building and glass sand, granite, etc. The development of non-metallic raw materials is regarded as insufficient.

Kremenchuh monocomponent bunch is located within Poltava oblast and is the northern extension of Kryvyi Rih iron ore basin. In the bunch area, six iron ore deposits are compactly located (from south to north): Horishni Plavni, Lavrykiv, Yerystovo, Bilanovo, Nova Haleshchyna and Manuilivka. There are Poltava mining and processing plant and Kremenchuh mining hub which operate on the basis of the first two deposits (Fig. 4).

Nikopol-Tokmak monocomponent macroregion covers Nikopol manganese ore basin located in Dnipropetrovsk and Zaporizhzhia oblasts in the area of more than 5 thousand square kilometres. The ore area is divided into separate reserves combined into deposits: Zelenodolsk, Nikopol, Ordzhonikidze, Marhanets, Velykyi Tokmak. Only Nikopol deposit is being developed. The eastern part of the deposit is developed by Marganets mining-and-processing

Legend for Fig. 2:

**The numbers on the map indicate:**

I – Pre-Carpathian zone; II – Pre-Dnieper-Pre-Azov zone: 1- Kryvyi Rih macroregion, 2- Nikopol-Tokmak macroregion, 3- Zvenyhorodka-Dnieper macroregion, 4- Oleksandriia region, 5- Pry-Azov region; *III – Eastern Ukrainian zone:* 6- Shebelynka-Okhtyrka macroregion, 7- Romny-Pryluky macroregion; *IV – Donetsk-Sloviansk zone:* 8- Donetsk macroregion, 9- Sloviansk-Bakhmut macroregion; *separate territorial combinations:* 10. Trans-Carpathian macroregion, 11- Lviv-Volyn macroregion, 12- Podillia macroregion, 13- Crimea macroregion, 14- Kerch macroregion, 15- Zhytomyr region, 16- Pobuzhia region

plant, the western part is done by Ordzhonikidze plant. Generally, mining is carried out at 7 mines and 8 strip mines. Ore beneficiation is carried out at four concentration mills, namely at Hrushivka I, II, Chkalovske, Oleksandrivka.

Manganese ore reserves of this macroregion are internationally significant as raw materials are exported to Russia, Czech Republic and Slovakia. On the basis of manganese deposits, Nikopol mining hub was formed. The macroregion future belongs to further development of the world's largest manganese reserves in Velykyi Tokmak deposit. Other mineral resources of the macroregion (construction materials) are of local importance.

Zvenyhorodka-Dnieper polycomponent macroregion covers the main area of distribution of brown coal deposits of the Dnieper basin within Cherkasy, Kirovograd and Dnipropetrovsk oblasts. The leading minerals of the macroregion are brown coal, titanium, nickel-cobalt, uranium, gold, terres rares, graphite, bentonite clays, kaolins, nonmetallic raw materials for metallurgy, building materials.

Within the macroregion, Oleksandriia polycomponent region, Verkhniy (Upper) Dnieper and Synelnykove macrobunches have been singled out.

Brown coal deposits, not being developed currently, dominate in the *Oleksandriia region*. The Eastern Mining and Processing Plant exploits four uranium deposits, namely Vatutine (Smolinska mine), Michurine and Central (Inhulsk mine) and Novokostiantynivka (Novokostiantynivka mine); Dashukivka Bentonite Company “Dashukivka Bentonite” develops a large Cherkasy bentonite clay deposit of state importance; Vatutine refractory clay

plant develops Murzynske deposit; numerous deposits of building materials are exploited, in particular, facing granites (Kapustyn, Bohuslav), silicious raw materials (Konoplianske, etc.). Balakhivka graphite deposit has been prepared for exploitation. On the basis of the deposits of the economic and geographical region, mining region of the same name has been singled out. In its area, there is Kropyvnytskyi mining hub where uranium, secondary kaolin, marl, granite, sand and loam deposits are developed (Fig. 4).

Verhniy (Upper) Dnieper macrobunch unites a group of brown coal deposits (not developed), titanium, nickel, talc-magnesite, refractory clays, moulding sand, etc. Vilnohirsk mining and metallurgical combine operates on the basis of the unique by its reserves Malyshevsk compound deposit of titanium-zirconium ores. The plant supplies raw materials for Zaporizhia Titanium Magnesium Combine and, in addition, it develops high-alumina raw materials (disthen-sillimanite ore) and moulding sands. Explored within the macrobunch industrial deposits of nickel-cobalt ores (Sukhyi Khutir, Devladove deposits), talc-magnesite (Pravdyne deposit) are currently not developed. Deposits of facing granites such as Kudashivka, Bovtyshka are being developed. The industrial development of the deposits of macrobunch became the base for the development of the mining hub with the same name.

Synelnykove macrobunch is located to the south-east of the city Dnipro within Middle-Dnieper megablock of Ukrainian Shield and has more than a dozen mineral deposits, three of which are gold deposits (Serhiivka, Balka Zolota, Pivdenne), uranium

(Surske), brown coal (Pavlivske, Synelnykove), primary kaolin (Biliaivka), fluxing limestone (Dnipropetrovsk), refractory clay (Pervozvanivka), moulding sand (Khoroshe, Sukhachivka, Taromske deposits), facing granites (Yantsivske), etc. Almost all the deposits listed above are not currently developed, except for the deposits of facing stone and kaolin (Biliaivka Mineral Beneficiation Plant develops reserves of Biliaivka kaolin deposit).

Pre-Azov region genetically belongs to Pre-Azov megablock of Ukrainian Shield which determined the specificity of the mineral deposits formed here. The leading minerals are ores of iron, uranium, terres rares, graphite, kaolin, refractory clays. Within the region, Polohy-Huliaipole macrobunch and Bilozerske hub are relatively clear distinguished (Fig. 3).

Polohy-Huliaipole macrobunch, located to the south-east of Zaporizhia city, has more than a dozen deposits of the main minerals such as iron (Vasynivske, Huliaipole deposit), secondary kaolins (Polohy-2), molding sand (Polohy, Orikhiv), refractory clay (Polohy-1), brown coal (Orikhiv-1), apatite and rare-earth metals (Novopoltavka), feldspar (Balka Velykoho Taboru), gaize (Novosemenivka), glass sand. Mining company "Polohy chemical plant Coagulant" develops deposits of kaolin, refractory clays and molding sands and provides metallurgical enterprises of Pre-Dnieper and Donbas regions with raw materials. Orikhiv open-pit mine develops a deposit of molding sands.

Bilozerske monocomponent bunch is situated to the south, a little apart from the rest of the region. The main mineral raw materials of the bunch are iron ores of three deposits, namely North Bilozerske (Pivnichnobilozerske), South Bilozerske (Pivdennobilozerske) and Pereverzivske only the second of which is developed. Zaporizhia Iron Ore Plant, which operates on the basis of the deposit, annually extracts up to 3 million tons of high-grade iron ores that do not require beneficiation. Bilozerske bunch is one of the most promising areas in Ukraine (after Kryvyi Rih basin) by its industrial potential. Deposits of other minerals explored within the bunch include the deposits of building sand and brick-tiled raw materials.

Donetsk-Sloviansk polycomponent zone is located within Donetsk, Luhansk and, partially, Dnipropetrovsk oblasts and belongs to the Hercynides of Donetsk folding structures and sediments of the Dnieper-Donetsk depression. We have divided the zone into two macroregions: Donetsk and Sloviansk-Bakhmut (Fig. 2, 3).

In general, a large number of complex forming mineral deposits of international and national importance are very densely concentrated within the zone, some minerals (coal, rock salt) are character-

ized by a basin type of distribution. The unique combination of various types of raw materials (fuel, chemical, technological, non-metallic for metallurgy and building) has resulted in setting up a complex of mining, concentration and processing enterprises for fuel, energetic, metallurgical, chemical and construction industries. As a result, industrial agglomerations and industrial hubs were formed within Donbas (Fig. 4).

Donetsk macroregion. The deposits of the macroregion are concentrated within Donetsk and Dnipropetrovsk oblasts. The main minerals of international and national importance are coal, refractory materials, flux and cement raw materials.

Pavlohrad-Petropavlivka monocomponent bunch, located in the western part of the macroregion, includes coal deposits of Western Donbas and the hub with the same name of national importance formed on its base.

In the southern part of Donetsk macroregion, **Dokuchaievsk multicomponent macrobunch** is clearly defined. It includes compactly located deposits (except for coal) of fluxing limestone, dolomites and refractory materials. In the area, Illich Iron and Steel Works (Mariupol Metallurgical Plant) develops rich deposits of fluxed limestone (four deposits), Dokuchaievsk Flux and Dolomite Plant develops dolomites from Olenivka, Stylske and Novotroitske deposits, Velykoanadolsky Refractory Materials Plant and Donbaskeramika Company develop deposits of primary and secondary kaolin. In addition, within the macrobunch there are deposits of refractory clays (Zatyshok), alumina raw materials (Kalinino-Shevchenkivske), rare metals (Mazurivske), all of which currently are not developed, and numerous deposits of building materials (glass sands, gaize etc.).

The small monocomponent **Amvrosiivka bunch** includes mainly compactly located deposits of cement raw materials (totally, 5 deposits of marl, chalk, clay), which are developed by the open joint-stock company "Doncement". On the basis of the deposits of Dokuchaievsk macrobunch and Amvrosiivka bunch, the corresponding mining hubs have been formed.

Sloviansk-Bakhmut macroregion is located in the north-western part of Donbas within Donetsk (partly), Luhansk and Kharkiv oblasts. The macroregion is characterized by a unique combination of many complex minerals of international and national importance. Most of them serve as the foundation for forming various combinations of industrial enterprises: mining, processing, mining and chemical, industrial complexes of mineral resource orientation. First of all, these are deposits of coal, rock salt, refractory materials, cement raw materials, the level of development of which is quite high. In

addition, rich deposits of mercury, uranium, gypsum, phosphorites, molding sands, dolomites, chalk, ochre, brown coal (all deposits are not fully developed) are compactly located here.

A number of mining enterprises such as Vesco private joint-stock company, Chasovyi Yar Refractory Materials Plant, Kurdiurmivka Acid Product Factory, Druzhkivka Mine Group, Companies: "Vohnetryvnerud", "Pivdenno-Okhtiabrsk Clays", "Donbas Clays", Krasnohorivka and Kindrativka Refractories Plants function on the basis of the refractory clays of *Chasovyi Yar macrobunch* (14 deposits, 10 of which are developed). Raw materials are supplied to the enterprises of Ukraine, Great Britain, Italy and others.

Raw materials (chalk, clay) of Kramatorsk complex deposit are used by Kramatorsk Cement Plant-Pushka.

Deposits of molding sands (totally 5 deposits, for example, Husarivka, Bantyshevsk, Chasovyi-Yar) are developed by Husarivka Mining and Processing Plant, Chasovyi Yar Refractory Materials Plant, Druzhkivka Mine Goup.

Gypsum deposits (11 deposits) are mainly developed by the German construction company "Knauf" and the French company "Lafarge" which produce construction mix, gypsum crushed stone, packaged gypsum and other products, as well as provide Ukrainian construction, ceramic, porcelain, slate and cement plants with raw materials. The further improvement includes investment projects of the development of mining and industrial complexes which means industrial exploitation of East-Vidradne and Zaitseve-2 gypsum deposits. The large Artemivsk rock salt deposit is developed by 5 mines of the State Enterprise "Artemsil".

Mykytivka mercury field (7 deposits) was intensively developed until 1995 by Mykytivka mercury plant. The field is now suspended.

The deposits of uranium (Krasnooskolske deposit), brown coal (large Novodmytrivka deposit), phosphorites, dolomites, ochre and some others can be regarded as insufficiently developed. *Rubizhne polycomponent macrobunch* and *Rovenky mono-component bunch* [19] are singled out in the area. The first one includes deposits of coal, natural gas and building materials of local importance while the second one contains deposits of coal.

On the basis of the characterized territorial combinations of mineral raw materials, the following mining hubs have been formed: Kramatorsk-Kostiantynivka, Bakhmut, Lysychansk-Rubizhne, Rovenky (Fig. 4).

We also distinguish *Luhansk polycomponent bunch* stretching straight to the north of Luhansk, along the Russian Federation border to the north-

west almost to Lysychansk. It is comprised of coal deposits, explored gas and gas condensate deposits (15 deposits).

Eastern Ukrainian polycomponent zone is located on the left bank of the Dnieper River and extends over the territory of five oblasts: Chernihiv, Sumy, Poltava, Kharkiv and partly Dnipropetrovsk. The zone belongs to Dnieper-Donetsk depression and is characterized by the predominance of oil and gas deposits over non-metallic mineral deposits. Its area is 78 thousand square kilometres, the total number of oil and gas deposits includes more than 430. Still, there are certain principles of their territorial concentration, particularly, in the northern part of the zone (Chernihiv oblast) a significant amount of oil deposits with a high content of dissolved gas has been investigated, in the south-east, oil deposits are replaced by gas condensate and gas deposits. The development of oil and gas deposits in the zone is very high as they have been exploited for a long time and many of them have already exhausted their reserves. Public joint-stock company "Ukrnafta" processes gas at Hnidyntsi and Kachanivka gas processing plants. JSC "UkrGasVydobuvannia exploits Shebelynka gas processing plant, Yabluniv gas processing department, process shop of condensate stabilization "Bazylivshchyna". Oil refining is carried out at Kremenchuh oil refinery of Transnational financial and industrial oil company "Ukratnafta".

Within the zone, we distinguish two macroregions: Shebelynka-Okhtyrka and Romny-Pryluky, the latter one includes several bunches (Fig. 2, 3).

Shebelynka-Okhtyrka polycomponent macroregion is located in the south of the zone within Kharkiv, Dnipropetrovsk, Poltava and, partly, Sumy oblasts. The bunches that form it are predominantly monocomponent and are represented by gas and gas condensate deposits and by small amount of oil deposits in the north. Thus, in Kharkiv oblast 45 oil deposits and 45 gas deposits are explored, in Poltava oblast 30 oil deposits and 70 gas deposits are explored. The main gas deposits are Shebelynka, Yefremivka, Western-Khrestyshche, Medvedivka, Melykhivka etc. Other minerals found in the macroregion are rich deposits of rock salt (Yefremivka), chalk (Shebelynka deposit), glass sands (Berestovenka, Novoselkivske deposit), bischofite (Poltava), mineral pigments, building materials (construction sand, brick and tile, expanded clay raw materials, etc.). On the basis of the bunch exploitation, the oil and gas industrial hubs are formed (Fig. 4). Myrhorod resort of the national level functions on the basis of mineral waters of Myrhorod deposit.

Pereshchepyno bunch, located at somewhat isolated position, occupies Novomoskovsk district of Dnepropetrovsk oblast and is composed mainly of

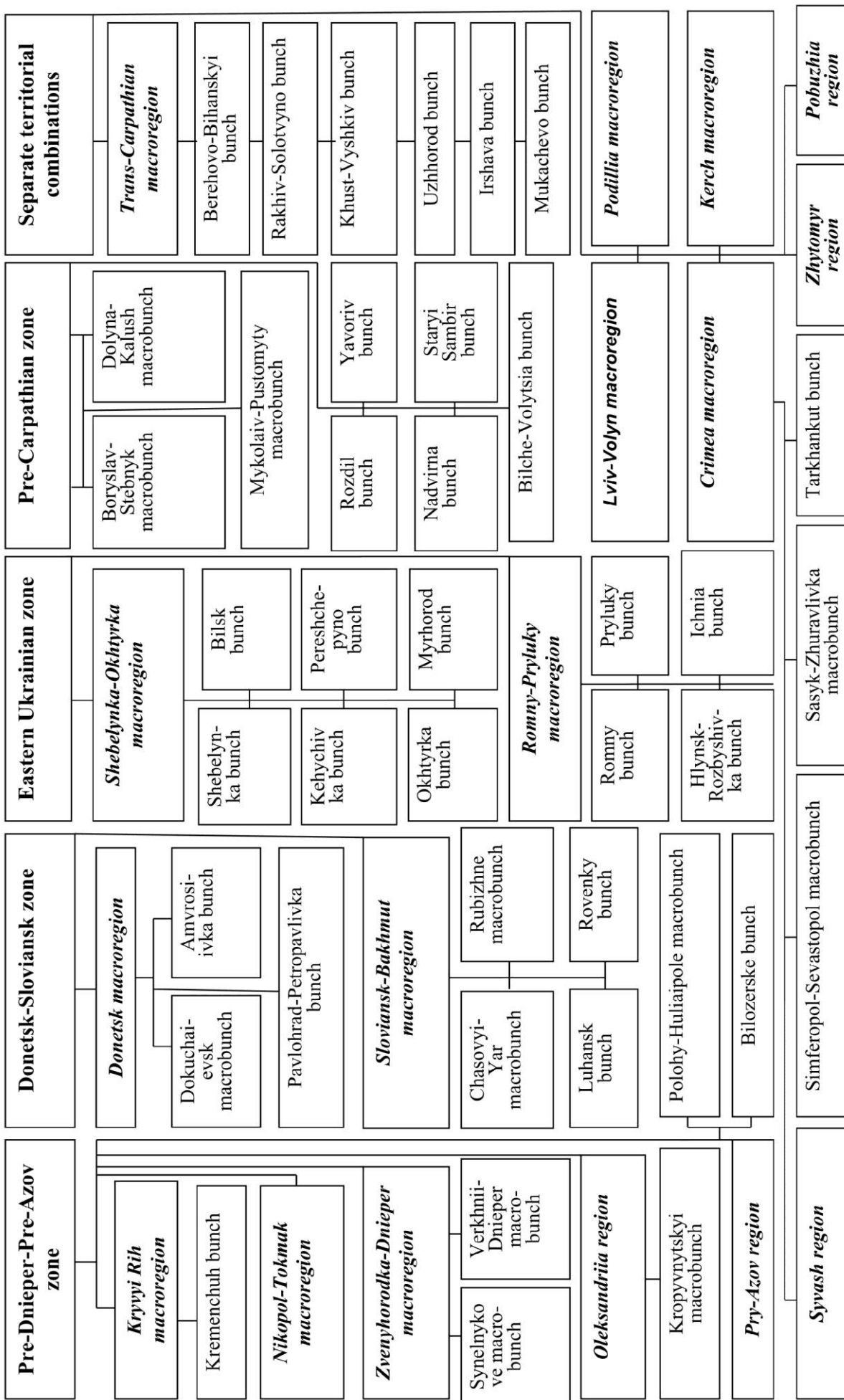


Fig. 3. Economic and geographical regionalization of mineral deposit combinations of Ukraine

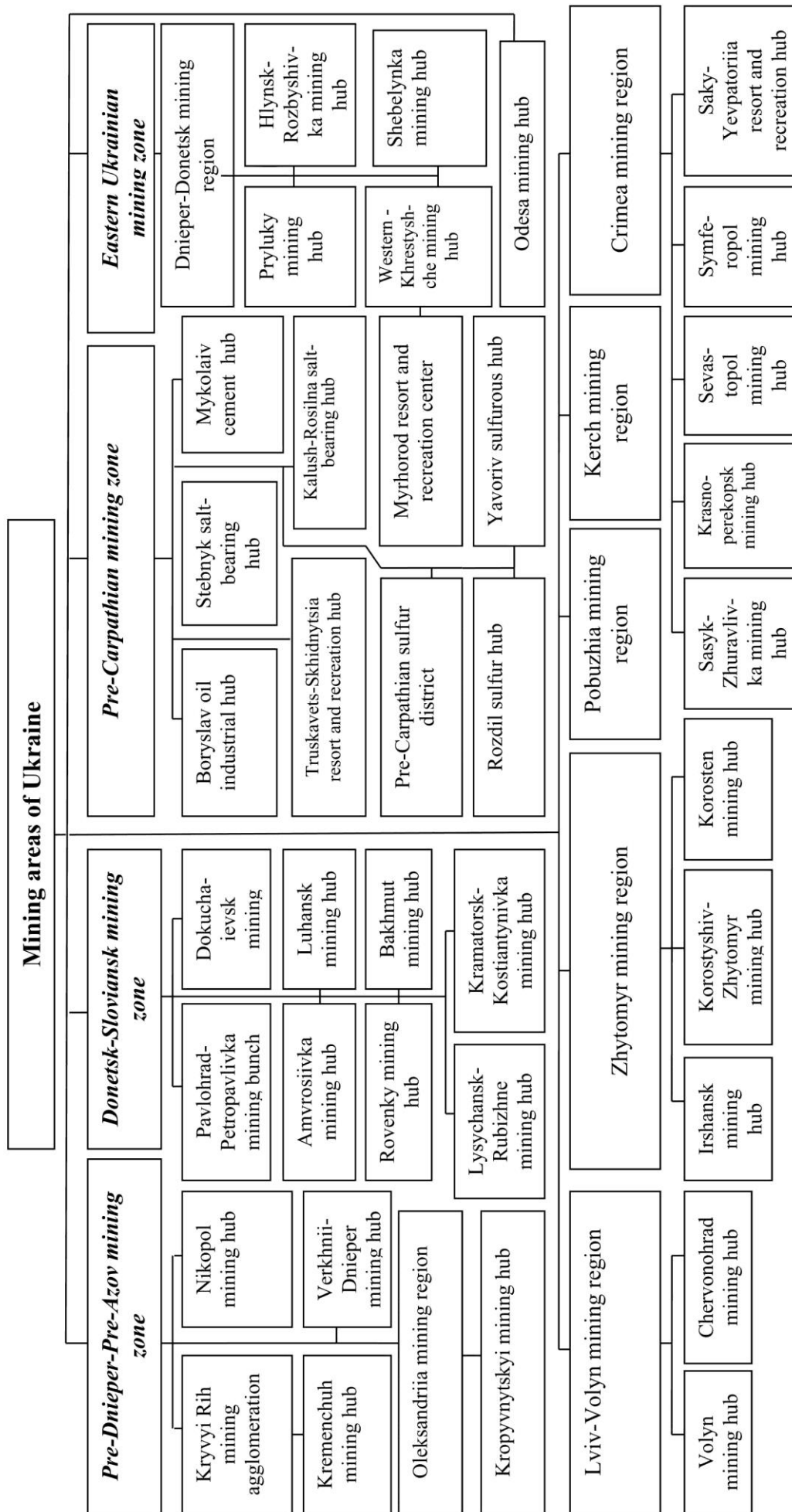


Fig. 4. Mining regionalization of mineral deposit combinations of Ukraine

gas and gas condensate deposits (totally, above 2 dozen deposits) the development of which will have an impact on the fuel balance in Pre-Dnieper area. Deposits of refractory raw materials, currently not developed, also belong to the bunch.

Romny-Pryluky macroregion occupies the northern part of the zone (the territory of Chernihiv, Sumy and Poltava oblasts) and has 30 oil and condensate deposits and 40 gas deposits in Chernihiv oblast alone. A significant amount of deposits is concentrated in the south-western part of Sumy oblast and north-western Poltava oblast (*Romny and Hlynsk-Rozbyshivka bunches*). The most significant oil extraction is done at Leliaky, Hnidyntsi, Anastasivka, Hlynsk-Rozbyshivka, Kachanivka deposits which form the foundation for the oil industry development in Ukraine. In the northern bunches (*Pryluky, Ichnia*), oil and oil and gas condensate deposits strongly predominate.

In addition to oil and gas deposits, the macroregion contains deposits of brown coal (Sula-Udai deposit), rock salt (Romny), bischofite (Novopodilske), and building materials.

The development of oil and gas deposits has entailed the formation of Pryluky and Hlynsk-Rozbyshivka mining hubs, which specializes mainly in oil extraction.

Pre-Carpathian zone is located within Lviv and Ivano-Frankivsk oblasts and is geographically connected with Pre-Carpathian foredeep and nearby areas of East European Platform. The zone contains several large territorial mineral deposit concentrations (according to the geological regionalization): the Pre-Carpathian oil and gas region, the Pre-Carpathian sulfur-bearing basin, the Pre-Carpathian salt-bearing basin, the Dniester gypsum-bearing area, etc. Thus, the zone is multicomponent with a high level of deposit concentration and development of mainly international and national importance. A bunch form of deposit distribution is typical of this zone (Fig. 2, 3).

As a result of intensive mining and processing activities, the following mining hubs are formed on the basis of the bunches: Yavoriv sulfurous, Rozdil sulfurous, Boryslav oil industrial, Mykolaiv cement, Stebnyk salt-bearing

Dolyna-Kalush polycomponent macrobunch includes rock salt and oil deposits (more than 14), most of which have already been exhausted and are not developed now. Currently, the production is suspended. The development of two groups of contiguous deposits of potassium and potassium-magnesium salts has also been suspended: Kalush-Holyn and Markova-Rosilna. The deposits of ozokerite (2 deposits) are singled out, but they are not developed either.

On the basis of the macrobunch deposits, a

powerful industrial complexes of mineral resource orientation used to work. Now Dolyna gas processing plant, Dolyna salt plant, "Karpatnaftokhim" LTD in Kalush are supplied with local raw materials.

Boryslav-Stebnyk macrobunch is similar in mineral raw materials component composition and the specialization of the mining industry to the previous one. The macrobunch is located on the territory of Lviv oblast. The area contains oil and gas condensate deposits such as Boryslav, Skhidnytsia (both are developed), Oriv-Ulychne, Yankivske (totally 14 deposits) which have formed Boryslav oil industrial hub. At the turn of the nineteenth and twentieth centuries, there were plenty of different oil refineries, as well as ozokerite deposits. Since 1996, ozokerite extraction has been stopped, oil extraction continues today.

Most oil and gas deposits are associated with salt-bearing deposits which overlap oil-bearing rocks. Stebnyk salt-bearing hub with Stebnyk, Dobrohostiv, Drohobych deposits of potassium and sodium salts was formed on the basis of 15 salt deposits in Lviv oblast, as a result Stebnyk mining and chemical enterprise "Polyminerall" functioned here (mines, mineries, beneficiation plants). Now the production in Stebnyk have been suspended.

A number of mineral water deposits have been explored within the area of the macrobunch (Truskavets, Skhidnytsia), on the basis of which some well-known resorts and even Truskavets-Skhidnytsia recreation hub have been formed.

Two bunches of mineral deposits - Rozdil and Yavoriv - are located within Pre-Carpathian sulfur-bearing basin. *Rozdil bunch* includes Rozdil, Podorozhnie, Liubyni and Teisariv sulfur deposits. Until recently, State Enterprise Rozdil Mining and Chemical Enterprise "Sirka" functioned on the basis of the first two deposits (mining operations were ceased in 2000), consequently, Rozdil sulfur hub was formed here. *Yavoriv bunch* located in the north-west of the basin includes Yazivske and Nemyriv sulfur deposits, oil deposits (Kokhanivske), natural gas (Svydnytsia, Retychynske, Kokhanivske, Vyshnia), construction materials. Until 2001, State Enterprise Yavoriv Mining and Chemical Enterprise "Sirka" and the corresponding sulfur mining hub functioned on the basis of sulfur deposits. Both hubs are part of the Pre-Carpathian sulfur region.

Mykolaiv-Pustomyty macrobunch with the area of more than 1000 square kilometres is located on the territory of the corresponding districts of Lviv oblast. Here there is a dense concentration of construction raw material deposits: cement (Dobriany, Rozvadiy, Kahuiv, Piskiv which have limestone, gaize, clay), sand (Velyki Hlibovychi), gypsum (Dniester gypsum region), brick and tile, quar-

rystone and rubble, limestone, peat (totally, more than 2 dozen deposits). On the basis of these deposits, Mykolaivcement PAT (CRH Ukraine) functions. There are numerous quarries of construction materials. Mining and processing enterprises of the bunch can be included into Mykolaiv cement hub (Fig. 4).

Bilche-Volytsia bunch belongs to Bilche-Volytsia oil and gas region and is located in Lviv oblast. It contains mainly gas and gas condensate deposits (about 3 dozens) some of which are developed. It also includes deposits of peat, brick and tile raw materials.

Saryi Sambir bunch (Lviv oblast) contains oil deposits: Strilbychi, Saryi Sambir, South Monastyrrets etc. (totally 5 deposits) and deposits of construction raw material.

Nadvirna bunch is located in Ivano-Frankivsk oblast. It is based on oil, oil and gas condensate, gas condensate deposits which occupy the southern part of Boryslav-Pokuty oil and gas region with 10 deposits totally: Pniv, Hvizdets, Monastyrchany, Bytkiv-Babchynske. In the territory of the bunch, there are deposits of ozokerite (Starunia and Dzvyniach) and menilitic shale. Nadvirna oil and gas production division works on the raw materials of the mentioned deposits.

The development of mineral deposits of Pre-Carpathian zone resulted in the formation of a large industrial complexes of mineral resource orientation called Pre-carpathian mining zone.

The description of the other areas of Ukraine with mineral resource, which are not included in the characterized zones and which occupy a little isolated position, is not provided here due to the limited size of the article. It is described in [24].

Conclusions. 1. Three approaches to zoning areas with combined mineral deposits are analyzed

and applied: geological, economic and geographical, and industrial which enables us to correlate them for defining the structure of mineral resource complexes of certain regions.

2. We have suggested the variants of economic-geographical and mining regionalization of industrial complexes of mineral resource orientation basing on the data of the Ukraine State Geological Information Fund (Geoinform) concerning the current state of mineral resources in Ukraine.

3. Our own interpretation of the main definitions of mining regionalization is provided what serves as clarifying the existing differences in their understanding.

4. The principles of Ukrainian localization of mineral deposit combination and the mineral resource complexes formed on their basis are singled out. Four mineral resource zones are identified: Pre-Dnieper–Pre-Azov, Eastern Ukrainian, Donetsk-Sloviansk and Pre-Carpathian which correspond to four mining zones and several territorially separated structures: Trans-Carpathian, Lviv-Volyn, Podillia, Kerch, Zhytomyr, Crimea macroregion, and Pobuzhia region. Within the zones, economic-geographical substructures are distinguished: macroregions, regions, macrobunches, bunches, centers and mining structures – regions, hubs, centers.

5. The mineral peculiarities of the mentioned zones and their constituent parts are characterized; their economic and geographical features and the current state of resource development are indicated, which enables us to determine the prospects for further development of the existing mineral resource complexes, optimize their structure and suggest objects of prior investment.

Література

1. Адаменко О. М. Екологічна геологія: підручник [Текст] / О. М. Адаменко, Г. І. Рудько. – К.: Манускрипт, 1998. – 349 с.
2. Бурка В. Й. Географічні особливості мінерально-ресурсної бази будівельно-індустріального комплексу Північно-Західного економічного району [Текст] // Науковий вісник Чернівецького університету імені Ю.Федьковича. Вип. 762 – 763. Географія. – 2015. – С. 117 – 126.
3. Веклич М. Ф. Про палеогеографічний прогноз розширення мінеральних ресурсів [Текст] / М. Ф. Веклич // Фіз. географія та геоморф. – Вип. 14. – К.: 1975. – С. 3–8.
4. Горленко І. О. Мінеральні ресурси та формування промислового комплексу економічного району [Текст] / І. О. Горленко // Розміщення продуктивних сил УРСР. – Вип. 10. – К.: Наукова думка, 1969. – С. 36–44.
5. Горленко І. А. Економіко-географічний аналіз мінерально-сировинних ресурсів [Текст] / І. А. Горленко // Конструктивно-географіческие основы рационального природопользования в Украинской ССР. – К.: Наук. думка, 1990. – С. 89–92.
6. Іванов Є. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій [Текст] / Є. Іванов. – Львів: Видав. центр Львів. ун-ту, 2009. – 371 с.
7. Іщук С. І. Територіально-виробничі комплекси і економічне районування (методологія, теорія) [Текст] / С. І. Іщук. – К.: Укр. фін. інститут менеджменту і бізнесу, 1996. – 244 с.
8. Кілінська К. Й. Сучасні тенденції використання мінерально-сировинних ресурсів Чернівецької області [Текст] / К. Й. Кілінська, В. І. Костащук // Історія Української географії всеукраїнський науково-теоретичний часопис. Вип. 22. – Тернопіль, 2010. – С. 128–134.

9. Корпан Н.В. та ін. Мінеральні ресурси України. Щорічник [Текст]. – К.: ДНВП Геоінформ України, 2018. – 268 с.
10. Литвиненко Р. И. Промышленные агломерации УССР и перспективы их комплексного развития [Текст] / Р. И. Литвиненко // Основные направления комплексного развития регионов. – К.: Наукова думка, 1980. – С. 13–21.
11. Мищенко В. С. Економічні пріоритети розвитку й освоєння мінерально–сировинної бази України [Текст] / В. С. Мищенко. – К.: Наук. думка, 2007. – 360 с.
12. Мищенко В. С. Програмне планування розвитку мінерально–сировинної бази України: методологія і практика [Текст] / В. С. Мищенко. – К.: ДУ ІЕПСР НАН України, 2011. – 156 с.
13. Паламарчук М. М. Минеральные ресурсы и формирование промышленных территориальных комплексов [Текст] / М. М. Паламарчук, И. А. Горленко, Т. Е. Яснок. – К.: Наук. думка, 1978. – 220 с.
14. Паламарчук М. М. Промышленный комплекс Киевского Приднепровья (экономико–географическое исследование) [Текст] / М. М. Паламарчук, И. И. Горленко, Л. Г. Руденко и др. – К.: Наукова думка, 1988. – 252 с.
15. Паламарчук М. М. Економічна і соціальна географія України з основами теорії [Текст] / М. М. Паламарчук, О. М. Паламарчук. – К.: Знання, 1998. – 416 с.
16. Палієнко В.П., Барцевський М.С., Спиця Р.О. та ін. Морфоструктурно–неотектонічний аналіз території України (концептуальні засади, методи та реалізація) [Текст] / В.П. Палієнко, М.С. Барцевський, Р.О. Спиця та ін. – К.: «Наукова думка», 2013. – 263с.
17. Руденко Л. Г. Конструктивно–географічні напрями регіонального природокористування у зв'язку з розвитком мінерально–сировинної бази України (концептуальний аспект) [Текст] / Л. Г. Руденко, В. П. Палієнко, Л. М. Шевченко та ін. // Український географічний журнал. – 2003. – № 4. – С. 11–18.
18. Руденко Л. Г. Підходи, принципи та методи конструктивно–географічних досліджень регіонального природокористування у зв'язку з розвитком мінерально–сировинної бази України [Текст] / Л.Г. Руденко, В. П. Палієнко, В. Д. Байтала та ін. // Український географічний журнал. – 2004. – № 3.– С. 13 – 19.
19. Рудько Г. І. Екологічна безпека та раціональне природокористування в межах гірничо–промислових і нафтогазових комплексів [Текст] / Г. І. Рудько, Л. Є. Шкіца. – Ів.–Фр.: ЗАТ Нічлава, 2001. – 525 с.
20. Рудько Г.І. Гірничопромислові геосистеми Західного регіону України. Т. 1,2. [Текст] / Г.І. Рудько, Є.А. Іванов, І.П. Ковальчук. – К.–Черн.: Букрек, 2019. – 838 с.
21. Сивий М. Мінеральні ресурси Поділля: конструктивно–географічний аналіз і синтез [Текст] / М. Сивий. – Т.: Підручники і посібники, 2004. – 654 с.
22. Сивий М. Я. Конструктивно–географічні засади дослідження мінерально–сировинних ресурсів регіону [Текст] / М. Я. Сивий // Укр. географ. журн. – 2005. – № 1. – С. 38–46.
23. Сивий М. Економіко–географічна типізація мінерально–сировинних ресурсів України [Текст] / М. Сивий // Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Серія: географія. – 2011. – № 1. – С. 40–44.
24. Сивий М. Географія мінеральних ресурсів України: монографія [Текст] / М. Сивий, І. Паранько, Є. Іванов. – Львів: Простір М, 2013. – 682 с.
25. Сивий М.Я. Про гірничопромислову регіоналізацію поєднань родовищ корисних копалин / М.Я. Сивий // Збірник праць XII з'їзду Українського географічного товариства. Т. 1. – К.: 2016. – С. 99–101.
26. Enright M.J. Why Clusters are the Way to Win the Game? [Текст] // Word Link. –1992. – No 5. – P. 24–25.
27. Larondelle N. Valuing post–mining landscapes using an ecosystem services approach – An example from Germany [Текст] / N. Larondelle, D. Haase // Ecological Indicators. – 2012. – № 18. – P. 567–574.
28. Lunch M. Mining in World History [Текст] / M. Lunch – London, Reaction Books, 2004. – 350 p.
29. Mineral Commodity Summaries 2019 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70202434>.
30. Virta R. Industrial minerals and rocks. Classification of end uses [Текст] / R. Virta, W. Lorenz, M. Regueiro // Industrial Minerals. – 1994. – № 319. – P. 65–68.
31. U.S. Geological Survey Mineral Resources Program—Mineral resource science supporting informed decisionmaking [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20163034>.

Authors Contribution: All authors have made an equal contribution to this work.

UDC 911.9:553.04(477)

Myroslav Syvyj,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of the Department of Geography and its Teaching Methods, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, 2 Maxyma Kryvonosa St., 46027, Ternopil, Ukraine, e-mail: syvyjm@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-3150-4848>;

Nataliia Lisova,

PhD (Biology), Associate Professor, Department of Geoecology and Methods of Teaching Environmental Sciences, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, e-mail: nlisova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4053-9612>;

Bohdan Havryshok,

PhD (Geography), Lecturer, Department of Geography and its Teaching Methods, Ternopil National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University, e-mail: gavrishok_b@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8746-956X>

THE REGIONALIZATION OF TERRITORIAL COMBINATIONS OF MINERAL DEPOSITS AND MINING TERRITORIES OF UKRAINE

The purpose of the article is using the data of Geoinform of Ukraine on the current state of the mineral resource base of the country, to regionalize its territory by combining explored mineral deposits and production-territorial complexes formed on their basis with a mineral raw material orientation.

Research results. The article is written in the context of the constructive-geographical direction of studying the geography of mineral resources, which has been developing in the last decades in Ukraine. In particular, three approaches to regionalization of territorial combinations of mineral deposits are compared and analyzed: geological, economic-geographical and mining, which will contribute to their interconnection in characterizing the mineral-raw materials complexes of individual regions. The authors' own interpretations of discussion definitions of mining terminology are proposed.

Based on the results of previous studies and taking into account the current state of the mineral resource base, economic-geographical and mining zoning of the territory of Ukraine has been carried out for groups of explored mineral deposits. Within Ukraine, four mineral resource zones are allocated: Prydniprovsko-Pryazovska, Eastern Ukrainian, Donetsko-Slovianska and Prykarpatska, as well as several territorially separate structures: Zakarpatskyi, Lvivsko-Volynskyi, Podilskyi, Kerchenskyi, Krymskyi macrodistricts, Zhytomirskyi and Pobuzkyi districts.

A detailed description of the mineral and raw material specifications of these structures and their constituent parts, the features and prospects of their exploitation, the formation of territorial-production complexes of mineral and raw materials orientation are submitted.

Scientific novelty. For the first time, various approaches to the regionalization of territorial groupings of mineral deposits and mining territories are compared, the basic definitions of mining regionalization are presented, and on this basis their own variant of zoning the territory of Ukraine on mineral resources is proposed.

Practical value. The economic, geographical and mining zoning of the territory of Ukraine according to the forms of concentration of mineral deposits and mining areas will help create the scientific basis for optimizing the structure of the mining industry, ensuring the effective use of mineral raw materials, and developing the country's raw material complex.

Keywords: mineral resources, economic and geographical regionalization, mining regionalization, mining centers, hubs, districts.

References

1. Adamenko, O. M., Rudko, H. I. (1998). *Ecological geology. Manuskrypt*, Kyiv, 349.
2. Veklych, M. F. (1975). *About the paleogeographic forecast of the expansion of mineral resources. Physical geography and geomorphology*, 14, 3-8.
3. Burka, V. Y. (2015). *Geographical features of the mineral resource base of the construction-industrial complex of the North-West economic region. Scientific Herald of Chernivtsy University, Geography*, 762, 763, 117-126.
4. Horlenko, I. O. (1969). *Mineral resources and the formation of the industrial complex of an economic region. Location of the productive forces of the Ukrainian SSR. Naukova dumka*, Kyiv, 36-44.
5. Horlenko, I. O. (1990). *Economic-geographical analysis of mineral resources. Constructive-geographical foundations of environmental management in the Ukrainian SSR. Naukova dumka*, Kyiv, 89-92.
6. Ivanov, Ye. (2009). *Geocadastr researches of mining territories. Publishing Center of Lviv University*, Lviv, 371.

7. Ishchuk, S. I. (1996). *Territorial-industrial complexes and economic regionalization (methodology, theory)*. Ukrainian Financial Institute of Management and Business, Kyiv, 244.
8. Kilinska, K.I., Kostashchuk, V.I. (2010). *Modern trends in the use of mineral resources of the Chernivtsi region. The history of Ukrainian geography is an all-Ukrainian scientific theoretical journal*, 22, 128-134.
9. Korpan, N.W. et. all. (2018). *Mineral resources of Ukraine. Yearbook. Geoinform of Ukraine*, Kyiv, 268.
10. Lytvynenko, R. Y. (1980). *Industrial agglomerations of the Ukrainian SSR and the prospects for their integrated development. The main directions of the integrated development of regions. Naukova dumka*, Kyiv, 13–21.
11. Mishchenko, V.S. (2007). *Economic priorities for the development of the mineral resource base of Ukraine. Naukova dumka*, Kyiv, 360.
12. Mishchenko, V.S., (2011). *Program planning of the development of the mineral and raw material base of Ukraine. methodology and practice. NAN Ukraine*, Kyiv, 156.
13. Palamarchuk, M. M., Horlenko, Y. A., Yasniuk, T. E. (1978). *Mineral resources and the formation of industrial territorial complexes. Naukova dumka*, Kyiv, 220.
14. Palamarchuk, M. M., Horlenko, Y. Y., Rudenko, L. H. (1988). *Industrial complex of Kiev Pre-Dnieper (economic and geographical research). Naukova dumka*, Kyiv, 252.
15. Palamarchuk, M. M., Palamarchuk, O. M. (1998). *Economic and social geography of Ukraine with the basics of the theory. Znannia*, Kyiv, 416.
16. Paliienko, V.P., Barshchevskiy, M.Ie., Spytisia, R.O. et. all. (2013). *Morphostructural-neotectonic analysis of the territory of Ukraine (conceptual framework, methods and implementation). Naukova dumka*, Kyiv, 263.
17. Rudenko, L. H., Paliienko, V. P., Shevchenko, L. M. (2003). *Constructive-geographical areas of regional environmental management in connection with the development of the mineral resource base of Ukraine (conceptual aspect). Ukrainian Geographical Journal*, 4, 11–18.
18. Rudenko, L. H. et. all. (2004). *Approaches, principles and methods of constructive-geographical studies of regional nature management in connection with the development of the mineral and raw materials base of Ukraine. Ukrainian Geographical Journal*, 3, 13–19.
19. Rudko, H. I., Shkitsa, L. Ye. (2001). *Ecological safety and rational nature management within the mining-industrial and oil and gas complexes. ZAT Nichlava, Ivano-Frankivsk*, 525.
20. Rudko, H.I., Ivanov, Ye.A., Kovalchuk, I.P. (2019). *Mining geosystems of the Western region of Ukraine. T. 1.2. Bukrek*, Kyiv – Chernivtsi, 838.
21. Syvyj, M. Ya. (2004). *Mineral resources of Podillya. constructive-geographical analysis and synthesis. Pidruchnyky i posibnyky, Ternopil*, 654.
22. Syvyj, M. Ya. (2005). *Constructive-geographical basis for the study of the region's mineral resources. Ukrainian Geographical Journal*, 1, 38–46.
23. Syvyj, M. Ya. (2011). *Economic-geographical typification of mineral resources of Ukraine. The scientific issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Geography*, 1, 40–44.
24. Syvyj, M. Ya., Paranko, I. S., Ivanov, Ye. V. (2013). *Geography of mineral resources of Ukraine. monograph. Prostir*, Lviv, 683.
25. Syvyj, M. Ya. (2016). *On the mining regionalization of combinations of mineral deposits. Collection of works of the XII Congress of the Ukrainian Geographical Society*, 1, 99–101.
26. Enright, M.J. (1992). *Why Clusters are the Way to Win the Game? Word Link*, 5, 24–25.
27. Larondelle, N., Haase, D. (2012). *Valuing post-mining landscapes using an ecosystem services approach – An example from Germany. Ecological Indicators*, 18, 567-574.
28. Lunch, M. (2004). *Mining in World History. Reaction Books, London*, 350.
29. *Mineral Commodity Summaries (2019)*, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70202434> (28.02.2019).
30. Virta, R., Lorenz, W., Regueiro, M. (1994). *Industrial minerals and rocks. Classification of end uses. Industrial Minerals*, 319, 65-68.
31. *U.S. Geological Survey Mineral Resources Program – Mineral resource science supporting informed decisionmaking*, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20163034> (1.09.2016).

UDC 551.586

Olga Hrygorivna Shevchenko,

PhD (Geography), Associate Professor, Meteorology and Climatology Department,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
64/13, Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine,

e-mail: olga.s.meteo@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3915-427X>;

Sergiy Ivanovych Snizhko,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of Department of Meteorology and Climatology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,

e-mail: tempo2007@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2696-687X>;

Mariia Olegivna Matviienko,

PhD Student, Department of Meteorology and Climatology,

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

e-mail: matviyenkomaria@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6897-8422>

SIMULATION OF THE THERMAL COMFORT CONDITIONS OF URBAN AREAS: A CASE STUDY IN KYIV

О. Г. Шевченко, С. І. Сніжко, М. О. Матвієнко. МОДЕЛЮВАННЯ БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА (НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЄВА). Дослідження біокліматичних умов урбанізованих територій в теплий період є дуже актуальними, адже, достовірні результати оцінки інтенсивності теплового стресу є підґрунтям для розробки та впровадження заходів адаптації до спеки. Крім того, моделювання біоклімату важливо застосовувати на етапі проектування міської забудови для підбору оптимальної структури, що допоможе підвищити комфортність міських районів. Метою даного дослідження є моделювання біоклімату урбанізованого середовища для визначення теплового навантаження на людський організм в літній період з використанням сучасних біокліматичних індексів та програмних продуктів. Для реалізації мети дослідження було обрано частину території житлового масиву Осокорки (м. Київ). Значення основних метеорологічних параметрів на досліджуваній ділянці отримані з використанням прогностичної тривимірної моделі «ENVI-met», а фізіологічно-еквівалентної температури (ФЕТ) – за допомогою моделі «RayMan». Аналіз результатів моделювання свідчить, що значення температури та вологості повітря, характеристик вітру та ФЕТ характеризується значною просторово-часовою мінливістю навіть на незначних за розмірами ділянках в межах міської забудови. Амплітуди значень ФЕТ були максимальними в денні години і становили 12°–15°C. Найсильнішого теплового стресу мешканці урбанізованих територій зазнають перебуваючи на відкритих заасфальтованих ділянках в денні години. Зменшення амплітуди температури повітря на досліджуваних ділянках у вечірні та нічні години призвело до помітного зниження амплітуди ФЕТ на обраній території – до 2°–3°C. Порівняння змодельованих значень ФЕТ для досліджуваної території та для АМСЦ «Київ» показало, що значення ФЕТ, змодельовані за даними метеорологічної станції, не відображають реальних біокліматичних умов в межах складної міської забудови.

Ключові слова: урбанізоване середовище, біоклімат, тепловий комфорт, фізіологічно-еквівалентна температура, модель «ENVI-met», модель «RayMan».

О. Г. Шевченко, С. И. Снежко, М. О. Матвиенко. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КИЕВА). Исследование биоклиматических условий урбанизированной среды в теплый период является очень актуальными, ведь, достоверные результаты оценки интенсивности теплового стресса являются основой для разработки и внедрения мероприятий адаптации к жаре. Кроме того, моделирование биоклимата важно применять на этапе проектирования городской застройки с целью подбора оптимальной структуры, которая поможет повысить комфортность городских районов. Целью данного исследования является моделирование биоклимата урбанизированной среды для определения тепловой нагрузки на организм человека в летний период с использованием современных биоклиматических индексов и программных продуктов. Для реализации поставленной цели была выбрана часть территории жилого массива Осокорки (г. Киев). Значения основных метеорологических параметров на исследуемом участке получены с использованием прогностической трехмерной модели «ENVI-met», а физиологически-эквивалентной температуры (ФЭТ) – с помощью модели «RayMan». Анализ результатов моделирования показывает, что значение температуры и влажности воздуха, характеристик ветра и ФЭТ характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью даже на незначительных по размерам участках городской застройки. Амплитуды значений ФЭТ были максимальными в дневные часы и составили 12°–15°C. Самый сильный тепловой стресс жители урбанизированных территорий испытывают находясь на открытых заасфальтированных участках в дневное время. Уменьшение амплитуды температуры воздуха на исследуемом участке в вечерние и ночные часы приводит к заметному снижению амплитуды ФЭТ на выбранной территории – до 2°–3°C. Сравнение смоделированных значений ФЭТ для исследуемой территории и для АМСЦ «Киев» показало, что значение ФЭТ, рассчитанные по данным метеорологической станции, не отражают реальных биоклиматических условий в пределах сложной городской застройки.

Ключевые слова: урбанизированная среда, биоклимат, тепловой комфорт, физиологически-эквивалентная температура, модель «ENVI-met», модель «RayMan».

Introduction. The climatic conditions of a territory affect human health and well-being, recreational activity and rest. This influence is caused by the effects of weather and climate on the human body and the conditions of its heat exchange with

the environment. Studies of bioclimate of a territory are aimed at determining the favourable and adverse impacts of various climatic factors and their aggregates on the human body.

According to the United Nations Department of Economic and Social Affairs, more than half of the world's population lives in cities today, and by 2050 the share of urban residents will increase and exceed 66%. Rapid urbanization will exacerbate urban environmental problems.

Complex urban morphology has a significant impact on microclimate and, accordingly, on thermal comfort conditions. Housing development parameters such as the height of buildings, street orientation, and distance between buildings alter the solar energy inlet, affect thermal conditions, have distinct modifying effects on wind speed and direction at the street level. Central parts of cities are normally characterized by higher air temperature – occurrence of an urban heat island (UHI) phenomenon is their characteristic feature. An impact the high intensity of UHI on the human is especially dangerous during summertime. The adverse effects of this urban phenomenon have been documented in many studies – they are associated with increased blood circulation and cause higher mortality rates in the cities [1, 2]. Most notable is the adverse impact of UHI on urban ecosystem and urban residents during heat wave cases in summer. Such a complex impact can significantly increase the heat load on urban residents and reduce the human comfort in the city.

Studies of the bioclimatic conditions of urban areas during the warm season are highly relevant as they provide an opportunity to evaluate human thermal sensations in the city, as well as the potential effectiveness of adaptation measures to heat stress (especially, architectural measures and measures based on the use of green areas and water bodies).

Analysis of recent research and publications.

In recent years, increasing attention has been paid to the study of heat stress, as it can pose a significant health risk [3–4]. Over the last decade, a series of studies at bioclimatic assessment of urban areas has been carried out: K.S. Ahmed [5] explored the bioclimate of the tropical city of Dhaka, Bangladesh; R. Emmanuel and E. Johansson conducted research for the city of Colombo, Sri Lanka [6]; N. Gaitan et al. [7] studied outdoor thermal comfort of the Athens region. M. Fahmy and S. Sharples [8] investigated the effect of city morphology on thermal comfort with the case of Cairo, Egypt, [9–10] analyzed the effect of green spaces and street orientation on air temperature and wind speed decrease. A. Carfan, E. Galvani, and J. Nery compared thermal comfort in two areas varying in building densities and in number of green spaces in the city of Sao Paulo [11]. Studies conducted in Freiburg, Germany focused on the study of street parameters effect of on thermal comfort conditions [12–13]. In

their work, F. Ali-Toudert and H. Mayer studied the influence of street design, i.e. aspect ratio (or height-width ratio) and axis orientation, towards the development of a comfortable microclimate at street level for pedestrians in the city of Ghardaia, Algeria [14].

Bioclimatic studies conducted by Ukrainian scientists, although initiated relatively long ago (for example, the assessment of Kyiv bioclimate was carried out by B.A. Ayzenshtat and L.I. Sakali back in the late 1970s – in the 1980s), unfortunately, they have not developed to the same level as in the European countries and the United States of America. The simplest bioclimatic indices (BI) (effective temperature, equivalent and effective temperature, radiation equivalent and effective temperature, normal equivalent and effective temperature, biologically active temperature, etc.) are used for the bioclimate assessment in Ukraine nowadays. Most of these indices are quite old, some of them were developed over fifty years ago. These indices are very simple to calculate, but mainly take into account the impact on human thermal sensation of meteorological parameters only, while the indices based on human energy balance have been used globally for bioclimatic assessment throughout the last decades. In addition, bioclimatic studies in Ukraine are mostly limited to the use of data obtained at meteorological stations (i.e., in open space areas with natural vegetation). It is natural that the BI obtained with the use of such input data can not reflect objective thermal sensation of a person within a complex urban environment.

Formulating the purpose of the article. The aim of this research is to simulate the bioclimate of an urban environment to determine the human thermal load in summer months based on modern bioclimatic indices and software.

Materials and methods of the research. For the purpose of this study, a part of the territory of the Osokorky residential area of Kyiv was selected. Osokorky residential area is located in Darnytskyi district, between the Dnipro river, Mykoly Bazhana avenue and lake Vyrlytsya. This paper studies the 9th residential district located in the north of this area, between the streets of Larysty Rudenko, Solomiya Krushelnytskoyi, Oleksandra Mishugy and the avenue of Petra Hryhorenka. The simulation area includes the territory of the residential area near the Poznyaky metro station. The site selected for the simulation is located in the “dormitory area” of the city, characterized by developed infrastructure, high-rise buildings and relatively small areas of green space.

To get values of the main meteorological parameters of the researched area, a three-dimensional, prognostic, microscale model ENVI-met (version 4.3.2 Summer 18) was used. The model was down-

loaded (following the sign-up, free of charge) from the official site: <https://www.envi-met.com/>. ENVI-met, which is a CFD model (*computation fluid dynamics model*), was developed by M. Bruce at Ruhr-University Bochum, Germany, and is one of the few microscale models that meet the criteria for an accurate simulation of physical processes and resulting micro-meteorological phenomena within the urban canopy and boundary layer [15–17].

The model is widely used to address scientific and practical issues in countries with various climates – from tropics to polar regions (Egypt [8], Sri Lanka [6], Brazil [11], England [18], Italy [19], Germany [20], the Netherlands [21]). In total, over three thousand studies have been carried out to date in more than 145 countries. ENVI-Met is designed for microscales with a horizontal resolution from 0.5 to 10 m and a time step of 10 seconds maximum. Physical basis of the model is explained in detail in [14, 17, 22–23]. Maximum simulation period is 48 hours.

Simulations in ENVI-met require two sets of input data: IN-file (input file) and CF-file (main configuration file). The IN-file contains information on dimensional properties of the area, such as geographical location, construction materials of the buildings, height of the buildings and types of vegetation. For this study, the dimensions of the research area were set to be 370×400 m.

The CF file contains meteorological inputs – air temperature and humidity, wind speed, as well as the measurement date and time. Data obtained from the Civil Aviation Weather Station “Kyiv” (CAWS Kyiv) located at Kyiv Sikorsky International Airport, 8 km southwest of the city center, were used to create the CF file.

The PET calculation was performed using the RayMan model [24], which was downloaded (following the sign-up, free of charge) from <https://www.urbanclimate.net/rayman/index.htm>.

This model uses the following data groups to obtain PET values: date and time for which the calculation will be made; geographical data (geographical coordinates, time zone and altitude); meteorological data (air temperature (°C), water vapour pressure (hPa) or relative humidity (%), wind speed (m/s) and degree of cloud cover); human personal data and parameters that can affect the thermal sensation (clothing and activity). In this study the simulations were referred to a standard parameters of the person which use for such type of the researches: 35-year-old man, 1.75 m high, 75 kg weight, wearing clothing with a heat resistance of 0.9 clo, sedentary, with heat producing is equivalent to 80 W.

Research results. In the context of considering the impact of climate on the human body, the key term is “bioclimate”, which is a set of climate characteristics that determine its complex impact on the human body in a certain territory [25]. To evaluate the bioclimatic features of a territory, comprehensive indicators called bioclimatic indices are used most often. Among European scientists, one of the most popular BI is currently the Physiologically Equivalent Temperature (PET), which is based on the energy balance of the human body. PET is defined as the air temperature at which, in a typical indoor setting (without wind and solar radiation), the heat budget of the human body is balanced with the same core and skin temperature as under the complex outdoor conditions to be assessed. The typical indoor setting is an indoor room, with wind speed is 0.1 m/s, vapour pressure is 12 hPa (approximately equal to 50% relative humidity at 20.0°C) and mean radiant temperature equal to the air temperature [13, 26]. The basis for the PET calculation is «The Munich energy balance model for individuals» (MEMI). The PET units are °C, which makes this index very easy to use. Comfortable conditions correspond to PET values within the range of 18.1–23.0°C (Table 1).

Table 1

Ranges of the physiologically equivalent temperature (PET) for different grades of thermal perception by human beings and physiological stress on human beings [27]

PET, °C	Thermal perception	Grade of physiological stress
<4	Very cold	Extreme cold stress
4.1–8.0	Cold	Strong cold stress
8.1–13.0	Cool	Moderate cold stress
13.1–18.0	Slightly cool	Slight cold stress
18.1–23.0	Comfortable	No thermal stress
23.1–29.0	Slightly warm	Slight heat stress
29.1–35.0	Warm	Moderate heat stress
35.1–41.0	Hot	Strong heat stress
>41.1	Very hot	Extreme heat stress

H. Lee et al. [13] note that bioclimate in different parts of our planet has been assessed using PET. Having carried out an analytical review of BI,

S. Tkachuk [28] also came to the conclusion that PET is a very appropriate universal bioclimatic index, because it takes into account the complete en-

ergy balance equation, core temperature, sweat rate, skin wetness and meteorological parameters. In our previous studies [25], we presented the results of a comparative analysis of the BI most used in the former Soviet Union (equivalent and effective temperature, normal equivalent and effective temperature, radiation equivalent and effective temperature, biologically active temperature) and the PET and showed the significant advantages of the latter for bioclimatic assessment of the urban environment during the warm period.

Human thermal perception in a complex urban environment is determined by the combined influence of weather conditions at the regional level and the microclimatic features that are formed under the influence of a number of factors [29]. Characteristics of urban geometry (street direction, height of buildings and width of streets) do not only contribute to the formation of UHI, but also directly affect the thermal perceptions of city residents. F. Ali-Toudert and H. Mayer [14] note that urban canyon geometry affects strongly magnitude of energy regime of its individual surfaces. The main descriptors of the canyon include the height/width ratio, the canyon axis orientation and the sky view factor (SVF), which is a proportion of the sky dome that is “seen” by a surface, either from an observation point on that surface or integrated over its area [31]. The above descriptors can be in fact applied not only to the canyon, but also to other types of urban space. Increased shading through change in the ratio between the height of the buildings and the distance

between them leads to a significant decrease in PET (or other bioclimatic indices) values, which, accordingly, reflects an increase in thermal comfort [32]. A. Matzarakis and H. Mayer [33] note that the closure of the horizon within an urban structure (which in urban meteorology is expressed through the SVF) is the most important factor that determines the formation of differences in the bioclimate within a complex urban environment. The lower the SVF value for a certain point, the lower the thermal stress for a person there, since the main effect from the tree crowns or tall buildings during the daytime is the reduction of direct solar radiation. In addition to urban geometry, thermal comfort conditions are influenced by facing materials of the walls, and the type and characteristics of the underlying surface [34–35].

The complex urban geometry and the multitude of factors that can influence the values of air temperature and PET define the significant differences in thermal comfort conditions, even within small sites of the urban environment [5, 7–14, 29–35].

To assess the heat load on a human in an urban environment, 7 points were selected within the researched area. The points were selected in a manner that they differed in microclimatic conditions, the parameters of the surrounding buildings and the underlying surface. For instance, point number 1 is located on an open paved area (on the parking lot), point number 4 – in the area covered in lawn grass, point number 5 – inside the well courtyard of High School for International Affairs, etc. (Fig. 1).

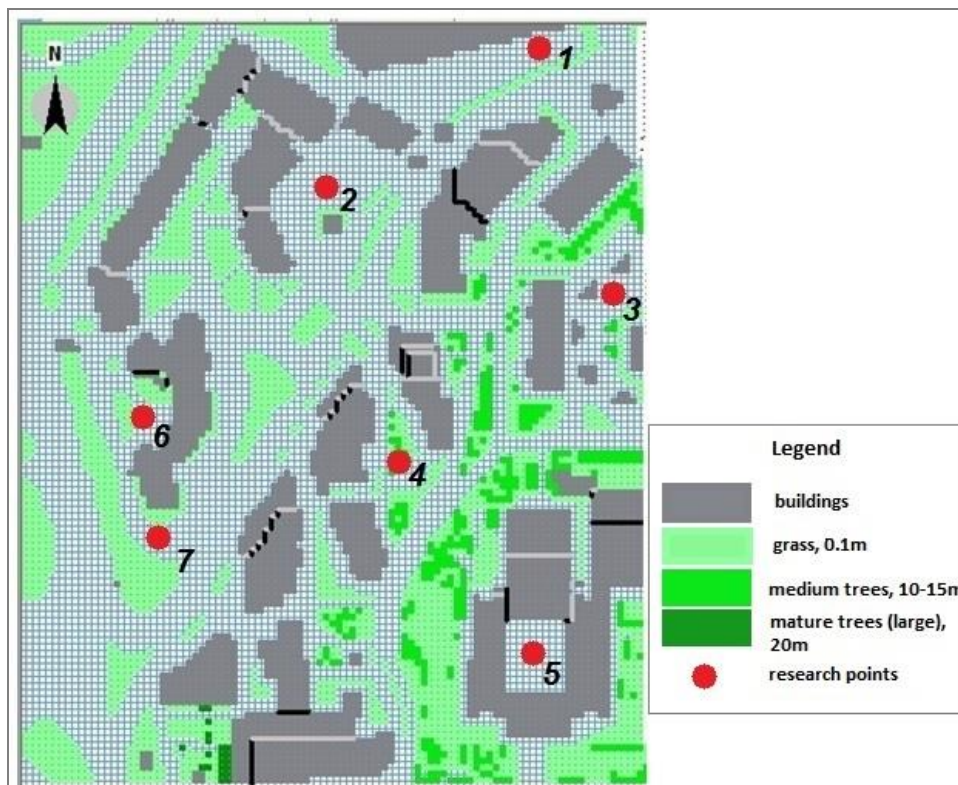


Fig. 1. Simulation domain and locations of research points

Most studies of the microclimate and thermal comfort conditions of an urban areas are based on simulations for short time periods of 5–6 to 24 hours. Since cloudiness significantly affects the formation of a temperature field in the city, and the maximum differences in meteorological parameter and thermal indexes values across the area are observed during clear hot weather, for the simulation purpose, most often selection is a summer day with high air temperature and the simulation hours are selected in a manner to capture the period with the highest daily air temperature, as well as several hours before and after the maximum [14, 36]. Thus, the simulation results enable setting both maximum amplitudes within the territory, and the maximum thermal load on the human body within the researched area.

C. S. Gusson and D. H. S. Duarte [37], and F. Ali-Toudert [38] indicate that simulations using ENVI-met is best started at predawn hours, around 6 am, because at that time the earth's surface receives a much smaller amount of solar radiation and the intensity of some atmospheric processes in the urban canopy layer is lower than in the afternoon. This helps to reduce the inaccuracy of the obtained results that can occur if the simulation starts at high Sun altitudes. Therefore, a lot of simulations start at 5 am to 7 am [17, 38–39].

In this study, a clear hot day was chosen for the simulation (04 August 2017). According to the

CAWS Kyiv, the maximum air temperature of +34.0°C was recorded at 16:00 EEST this day. During the day, the wind speed ranged from 2 m/s to 7 m/s. The simulation was carried out from 6:00 Eastern European Summer Time (EEST) (EEST=UTC+3) on 4 August till 6:00 EEST the next day (interval of the results output – 1 hour).

The results of the air temperature simulation for the selected area showed that the daytime temperature within the urban areas may vary significantly on a clear summer day. For example, at 12:00 EEST the value of the amplitude was 5.0°C. The highest air temperature was over the open asphalt-paved sections of the researched area. The results of the microclimate studies in other cities also show that there are major differences in air temperature over small areas during daytime. For example, the air temperature amplitude in the central part of the city of Teramo, Italy can reach 8.0°C in the daytime, 4.0°C in the night [40]. For Colombo, the air temperature difference recorded between the areas of the city having complex geometry made 7.0°C [6], for Sao Paulo (Brazil) – 6.0°C [41].

In the evening and night hours (Fig. 2), the amplitude of temperature values within the researched area decreased and at midnight the temperature differences did not exceed 3.0°C. The highest air temperatures were naturally recorded above the asphalted parking areas and in the well courtyard, the lowest – above the areas with dense vegetation.

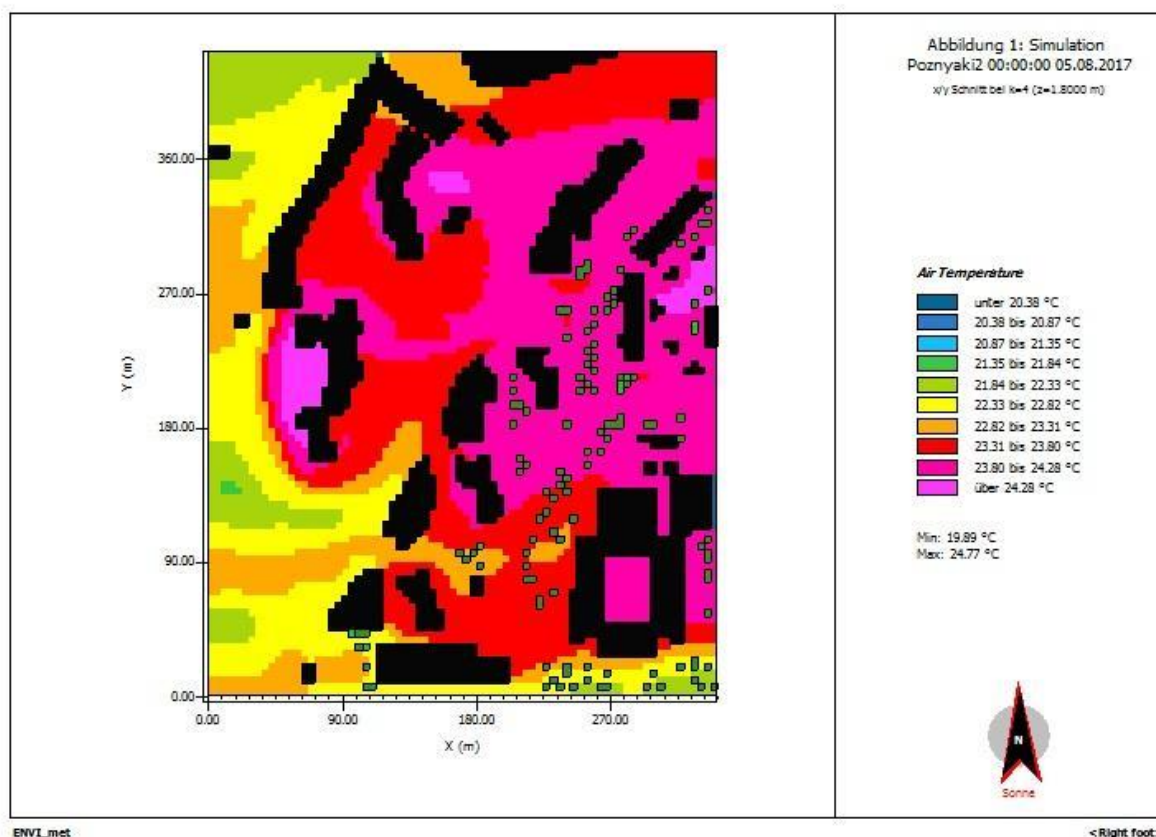


Fig. 2. The results of air temperature simulation at 00:00 EEST of 5 August 2017

Changing the properties of the underlying surface in cities (prevalence of roofs and asphalt roads, which are waterproof and facilitate the most rapid removal of runoff and discharge of precipitation into sewers) is one of the reasons for the change in the relative humidity in the city and the transformation of the humidity field across its territory [38–39]. The simulation results show that notable differences in relative humidity are observed even over a small part of urban area on a clear day. The lowest values are observed over the paved territories, the highest – over the areas with vegetation, i.e. the influence of the underlying surface on the formation of the humidity field within the urban development is observed, as well as a clear inverse relationship between air temperature and humidity.

The results of the wind field simulation showed that low wind speed are observed in enclosed courts and tall vegetation areas, while the space between some buildings are characterized by a local increase in wind speed (Fig. 3), which is caused by the Venturi effect.

Thus, the analysis of the simulation results has confirmed once again that the values of the main meteorological parameters (air temperature and humidity, wind characteristics) differ significantly within the complex urban structures, even in small areas.

In this study, a bioclimatic index of physiologically equivalent temperature is used to evaluate the thermal load on the human. Simulation of PET val-

ues was performed utilizing the RayMan model with 1-hour interval (Table 2).

The simulation results show that on 4 August, residents of the researched area experienced slight heat stress at all research points already since 6:00 EEST (at the air temperature of 21.5°C, measured on the meteorological station). At 9:00 EEST, points 1, 3, 4, 5 record intense heat stress, while at other points it is moderate because they are still in the shade. Extreme heat stress was observed at points 2–6 from 10:00 EEST to 15:00 EEST, however, the highest PET values were recorded at 11:00 EEST at points 4 and 5 (48.7° and 49.9°C). Before noon, the open paved areas are exposed to more heat than the rest of the territory. In the afternoon, the decrease in PET values is observed first in points 4 and 3, and after 15:00 EEST – in the rest of the territory. From 18:00 EEST, the residents experience slight heat stress. Comfortable conditions across the area last from 22:00 EEST through midnight. At night, a person in the area would experience slight cold stress and moderate cold stress. Starting as early as at 5:00 EEST the following day, comfortable conditions were observed for points 1–2 and 6–7, and from 6:00 EEST (for points 2 and 6) such conditions would change to moderate heat stress. The highest amplitude of PET values in the researched area was recorded at 11:00 EEST and made 15.6°C. At night, when comfortable conditions and cold stress are observed, the amplitudes are much lower – from 1.8°C (at 23:00 EEST) to 4.5°C (4:00 EEST on 5

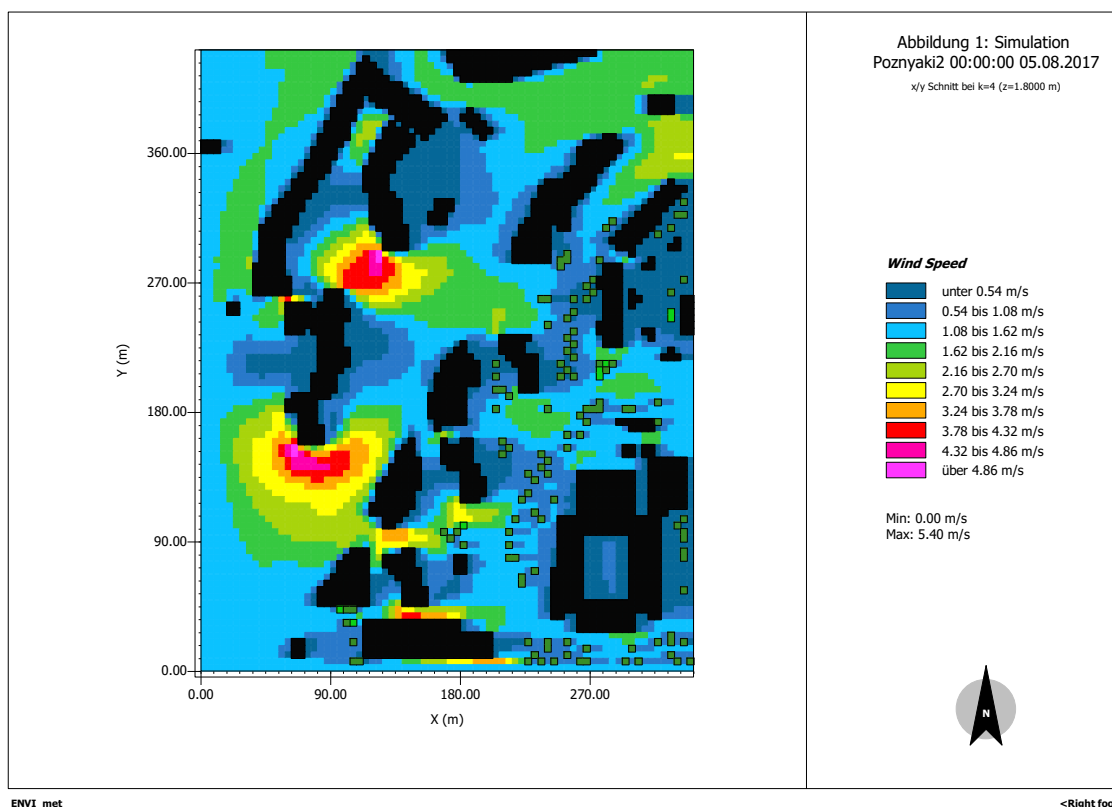


Fig. 3. The results of wind regime simulation for 00:00 EEST on 5 August 2017

PET values (°C) in different research points for 4–5 August 2017

Number of study point	1	2	3	4	5	6	7	Amplitude of the territory	CAWS Kyiv
Time (EEST)	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET
6:00	24,8	24,2	25,5	26,9	26,9	27,4	24,1	3,3	27,0
7:00	24,9	28,4	28,0	30,4	29,0	32,1	27,6	7,2	31,2
8:00	32,4	28,4	32,0	34,4	34,2	33,5	31,4	6,0	31,0
9:00	35,5	33,5	36,5	39,6	39,0	37,9	32,9	6,7	30,9
10:00	36,3	34,7	38,8	42,6	42,6	37,6	32,2	10,4	32,4
11:00	38,9	37,9	44,0	48,7	49,9	41,8	34,3	15,6	34,2
12:00	36,6	42,8	41,9	38,5	41,8	43,5	31,4	12,1	34,1
13:00	34,6	44,8	45,0	38,6	40,8	40,7	30,6	14,4	37,8
14:00	37,1	44,9	40,7	38,1	41,5	40,6	33,4	11,5	37,6
15:00	30,4	42,8	39,3	37,9	40,2	40,3	33,3	12,4	36,8
16:00	32,1	37,9	35,3	33,7	35,3	36,5	29,6	8,3	36,7
17:00	30,1	32,7	31,1	30,4	31,5	32,1	27,8	4,9	34,6
18:00	26,0	26,3	25,8	25,7	26,0	26,5	24,6	1,9	30,4
19:00	25,4	25,5	25,4	25,5	25,7	25,8	24,8	1,0	28,5
20:00	25,0	25,1	25,0	25,1	25,1	25,2	24,4	0,8	25,5
21:00	24,5	24,8	24,5	24,7	24,7	24,9	23,8	1,1	23,2
22:00	18,0	20,2	19,6	19,2	19,2	20,2	17,4	2,8	20,6
23:00	18,0	20,2	19,6	19,1	19,2	20,1	17,4	1,8	18,5
0:00	17,9	20,1	19,6	18,9	19,4	20,0	17,4	2,7	17,4
1:00	14,8	15,7	14,3	14,8	14,5	16,8	16,5	2,5	16,4
2:00	14,1	14,1	13,6	14,1	13,7	16,7	15,8	3,1	16,4
3:00	13,7	15,5	13,1	13,6	13,3	16,7	14,9	3,6	18,5
4:00	13,7	15,6	12,7	13,2	13,0	17,2	15,7	4,5	18,7
5:00	17,0	19,7	12,7	13,1	12,8	22,9	19,7	10,2	20,9
6:00	21,4	23,5	13,7	14,6	14,1	28,3	22,8	14,6	24,3

*the red color corresponds to the values of heat stress of different grades; green – to comfortable conditions; blue – cold stress of different grades.

August). This is obviously due to the decrease in the air temperature amplitude in the evening and night hours, which is defined by the decrease (evening hours) and the absence (night time) of the solar radiation (due to which temperature contrasts are formed within the complex geometry of urban areas).

In order to study the differences in thermal comfort conditions within the complex urban structures and meteorological station (in an open area with natural vegetation), PET values for CAWS Kyiv were also simulated using the RayMan model. This weather station was chosen for comparison because of the appropriate time of the observations. Meteorological elements measured hourly on this station, whereas the Joint Hydrometeorological Sta-

tion “Kyiv” located at Nauky avenue the observations are carried out once every three hours, at air pollution observation posts (which also measure meteorological parameters) – once every 6 hours. On the CAWS Kyiv air temperature and relative humidity are measured using Viasala HUMICAP HMP 155 sensor, wind speed – using Vaisala WAA252 sensor. This make possible to get the values of meteorological parameters with the required frequency.

The analysis of the simulated PET values for the weather station shows that from 6:00 EEST until 20:00 EEST the values of this BI at the weather station also correspond to the heat stress. Starting at 22:00 EEST, the PET values at the weather station correspond to comfortable conditions, same as in the

researched urban area. However, cold stress at the weather station occurs an hour earlier than in the researched area, which confirms the well-known fact that the natural surfaces after the sunset cool down faster and the air temperature above them decreases also, while the artificial ones (asphalt, con-

crete) continue to emit heat (Fig. 4).

The amplitude of the time course of PET values at the CAWS Kyiv was 21.4°C, at different points of the researched area it ranged from 19.4° (at point No. 7) to 37.1°C (at point No. 5, located in the well courtyard).

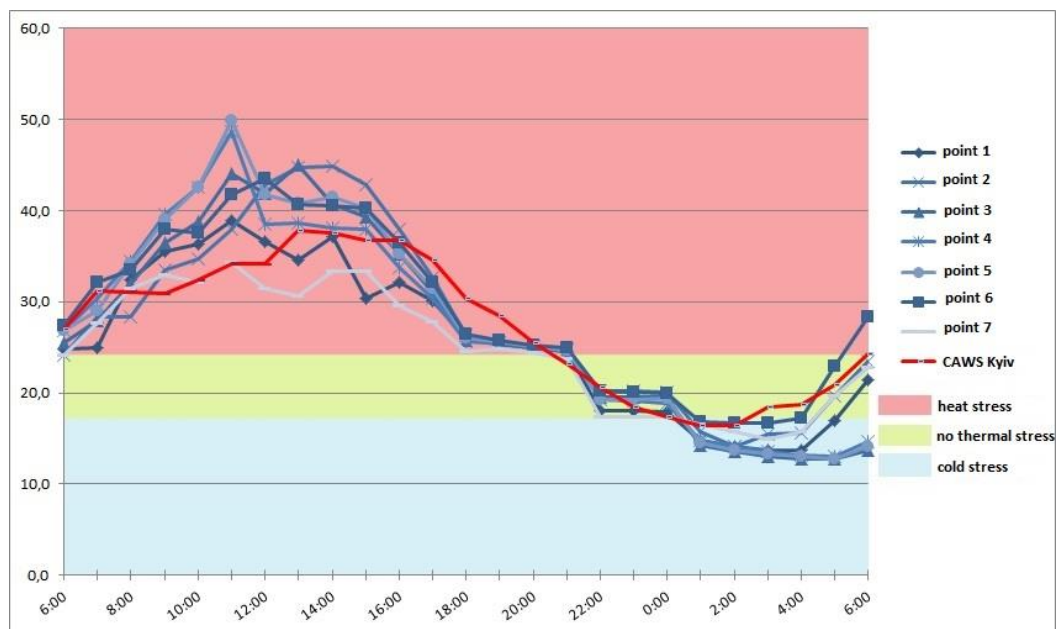


Fig. 4. Time course of PET values (°C) within the researched area and at the CAWS Kyiv

Conclusions. Thus, the article shows modern methods and approaches of bioclimatic studies of an urbanized environment. On the example of an area located within the Osokorky residential area, Kyiv, it is shown that the values of the basic meteorological parameters (air temperature and humidity, wind characteristics) and physiologically equivalent temperature differ significantly within the urban spaces, even across small areas. The amplitudes of PET value were maximum in the daytime and made 12°–15°C. The decrease in the amplitude of the air temperature in the researched areas in the evening and night hours led to a notable decrease in the PET amplitude at the selected area – up to 2°–3°C. Analysis of the simulated PET values for the researched area confirmed that residents of urban areas face the most severe heat stress while staying in the open asphalt-paved areas during the daytime. The duration of the period with comfortable conditions during the day was very short – from 22:00 EEST through midnight.

Based on the PET values simulated for the researched area and for CAWS Kyiv was found the

significant differences between thermal comfort conditions within the complex urban spaces and at the weather station. The PET values at different times of the day at different points of the researched area significantly exceeded the value of this BI for the weather station (maximum – by 15.7°C) or was significantly lower (maximum – by 10.6°C). Therefore, the values of bioclimatic indices simulated based on the weather station data can not be applied with any approximation to solve scientific and applied tasks that require information on the bioclimate at particular points in the urbanized environment. To solve such tasks, it is recommended to apply modern methods – ENVI-met and RayMan models.

Acknowledgments

The authors would like to express their thanks to Prof. Michael Bruse for providing the ENVI-met model and also to Prof. Andreas Matzarakis for permission to use the RayMan model and advising on human-biometeorological simulation questions.

References

1. Basu, R. Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence [Text] / R. Basu, J. M. Samet, // *Epidemiologic Reviews*. – 2002. – Vol. 24. – P. 190-202. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>.
2. Vandentorren, S. Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave [Text] / S. Vandentorren, F. Suzan [et. al.] // *American Journal of Public Health*. – 2004. – Vol. 94. – P. 1518–1520.

- <https://doi.org/10.2105/ajph.94.9.1518>.
3. Jamei, E. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort [Text] / E. Jamei, P. Rajagopalan, M. Seyedmahmoudian, Y. Jamei // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 54. – P. 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>.
 4. Johansson, E. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization [Text] / E. Johansson, S. Thorsson, R. Emmanuel, E. Krüger // *Urban Climate*. – 2014. – Vol.10. P. 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>.
 5. Ahmed, K. S. Comfort in urban spaces: Defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments [Text] / K. S. Ahmed // *Energy and Buildings*. – 2005. – Vol. 35. – P. 103–110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00085-3).
 6. Emmanuel, R. Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka [Text] / R. Emmanuel, E. Johansson // *Climate Research*. – 2006. – Vol. 30. – P. 189–200. <https://doi.org/10.3354/cr030189>.
 7. Gaitani, N. Thermal comfort conditions in outdoor spaces [Text] / N. Gaitani, M. Santamouris, G. Mihalakakou // *Environment*. – 2005. – Vol. 1995. – P. 761–765.
 8. Fahmy, M. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt [Text] / M. Fahmy S. Sharples // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1907–1916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>.
 9. Giannopoulou, K. The Impact of Canyon Geometry on Intra Urban and Urban: Suburban Night Temperature Differences Under Warm Weather Conditions [Text] / K. Giannopoulou, M. Santamouris, I. Livada, C Georgakis, Y. Caouris // *Pure and Applied Geophysics*. – 2010. – Vol. 167. – P.1433–1449. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0099-8>.
 10. Perini, K.(2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort [Text] / K. Perini, A. Magliocco // *Urban Forestry and Urban Greening*. – 2014. – Vol.13. – P. 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>.
 11. Carfan, A. C., Galvani, E., & Nery, J. T. (2012). Study of thermal comfort in the city of são paulo using ENVI-met model [Text] / A. C. Carfan, E. Galvani, J. T. Nery // *Investigaciones Geograficas*. – 2012. – Vol. 78. – P. 34–47.
 12. Holst J. Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables [Text] / J. Holst, H. Mayer // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2011. – Vol. 20. – P. 541–552.
 13. Lee H. Modification of Human-Biometeorologically Significant Radiant Flux Densities by Shading as Local Method to Mitigate Heat Stress in Summer within Urban Street Canyons [Text] / H. Lee, J. Holst, H. Mayer // *Advances Meteorology*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–13.
 14. Ali-Toudert F., Mayer H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate [Text] / F. Ali-Toudert, H. Mayer // *Build. Environ*. – 2006. – Vol. 41. – P. 94–108.
 15. Lee, H. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany [Text] / H. Lee, H. Mayer, L. Chen // *Landscape and Urban Planning*. – 2016. – Vol. 148. – P. 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>.
 16. Errell, E. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons [Text] / E. Errell, D. Pearlmutter, D. Boneh, P. B. Kutiel // *Urban Climate*. – 2014. – Vol.10. – P. 367–386. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>.
 17. Huttner, S. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met [Text] // PhD thesis, Johannes Gutenberg University Mainz. – 2012. – 147p. Retrieved from <http://ubm.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/3112/>.
 18. Skelhorn, C. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK [Text] / C. Skelhorn, S. Lindley, G. Levermore, G. // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – Vol. 121. P. 129–140.
 19. Noro M. Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies [Text] / M. Noro, R. Lazarin // *Urban Clim*. – 2015. – Vol. 14. – P. 187–196. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.20>.
 20. Ketterer, C. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany [Text] / C. Ketterer, A. Matzarakis // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – Vol. 122. – P. 78–88. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.11.00>.
 21. Taleghani, M. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands [Text] / M. Taleghani, L. Kleerekoper, M. Tenpierik, A. van den Dobbelaars // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 83. – P. 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.
 22. Bruse, M. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [Text] / M. Bruse, H. Fleer // *Environmental Modelling and Software*. – 1998. – Vol. 13. Is. 3–4. – P. 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5).
 23. Samaali, M. Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements [Text] / M. Samaali, D. Courault, M. Bruse, A. Olioso, R. Occelli // *Atmospheric Research*. – 2007. – Vol. 85. Is. 2. – P. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.005>.
 24. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model [Text] / A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer // *International Journal of Biometeorology*. – 2010. – Vol.

- 54, Is. 2. – P. 131–139.
25. Шевченко О.Г. Порівняльний аналіз біокліматичних індексів для оцінки комфортності урбанізованого середовища в теплий період [Текст] / О. Г. Шевченко // Гідрологія гідрохімія і гідроекологія. – 2016. – № 42, Т. 3. С. 105–115.
26. Höppe P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment [Text] / P. Höppe // *International Journal of Biometeorology*. – 1999. – Vol. 43. – P. 71–75.
27. Matzarakis A. Another kind of environmental stress: thermal stress [text] / A. Matzarakis, H. Mayer // *WHO Newsletter*. – 1996. – Vol. 18. – P. 7-10.
28. Ткачук С. В. Обзор индексов степени комфортности погодных условий и их связь с показателями смертности [Текст] / С. В. Ткачук // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Гидрометеорологические прогнозы. – 2012. В. 347. С. 194–214 с.
29. Mayer H. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe [Text] / H. Mayer, J. Holst, P. Dostal, F. Imbery, D. Schindler // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2008. – Vol. 17, Is. 3. – P. 241–250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>.
30. Vieira De Abreu-Harbich. Influence of different urban configuration on human thermal conditions in a Typical Subtropical Coast City-Case of Santos, São Paulo / L. Vieira De Abreu-Harbich, L.C. Labaki, A. Matzarakis // *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Retrieved from http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/poster_2-9-7721603_a.pdf.
31. Erell E., Pearlmutter D., Williamson T. *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. – London, Washington, DC, 2012– 452 P.
32. Lin, T.-P. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort [Text] / T.-P. Lin, A. Matzarakis, R.-L. Hwang // *Building and Environment*. – 2010. – Vol. 45, Is. 1. –P. 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002>.
33. Matzarakis. A and Mayer. H. Human-Biometeorological assessment of urban structures. *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate. 1-5 September 2003, Lodz, Poland*. P.83-86.
34. Nunez, M. The Energy Balance of an Urban Canyon [Text] / M. Nunez, T. R. Oke // *Journal of Applied Meteorology*. – 1977. – Vol. 16. – P. 11–19. <https://doi.org/10.2307/26177588>.
35. Santamouris, M. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions [Text] / M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Koronakis, I. Livada, D. Asimakopoulos // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 3. Is.27. – P. 4503–4521. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00187-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00187-9).
36. Yahia, M. W. Influence of urban planning regulations on the microclimate in a hot dry climate: The example of Damascus, Syria [Text] / M. W. Yahia, E. Johansson // *Journal of Housing and the Built Environment*. – 2013. – Vol. 21, Is.1. – P. 51–65. <https://doi.org/10.1007/s10901-012-9280-y>.
37. Gusson, C. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil [Text] / C. S. Gusson, D. H. S. Duarte // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 169. – P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.10.001>.
38. Ali Toudert, F. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate [Text] // PhD thesis, *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*. – 2005. – 224p. Retrieved from file:///C:/Users/hp/1/Downloads/Diss_Freidok_Ali_Toudert_Fazia.pdf.
39. Winston, T. L. C. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts [Text] / T. L. C. Winston, P. Ronald, A. M. Chris, J. B. Anthony // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2010. – Vol. 103. – P. 197–211. <https://doi.org/DOI: 10.1007/s00704-010-0293-8>.
40. Ambrosini D. Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met Climate Model [Text] / D. Ambrosini, G. Galli, B. Mancini, I Nardi, S. Sfarra // *Sustainability*. – 2014. – Vol. 6, Is. 10. – P. 7013–7029.
41. Spangenberg J. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo [Text] / J. Spangenberg, P. Shinzato, E Johansson, D. Duarte // *Rev. da Soc. Bras. Arborização Urbana*. – 2008. – Vol. 3. Is. 2. – P.1-19.
42. Chandler, T. J. Absolute and relative humidities in towns [Text] / T. J. Chandler // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1967. – Vol. 48, Is.6. – P. 394–399.
43. Landsberg H. E. *The Urban Climate* [Text] / H. E. Landsberg. – N. Y., 1981.

Author's contribution: all authors made an equal contribution to this work.

UDC 551.586

Olga Shevchenko,

PhD (Geography), Associate Professor, Meteorology and Climatology Department,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
64/13, Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine,

e-mail: olga.s.meteo@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3915-427X>;

Sergiy Snizhko,

Doctor of Sciences (Geography), Professor, Head of Department of Meteorology and Climatology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,

e-mail: tempo2007@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2696-687X>;

Mariia Matviienko,

PhD Student, Department of Meteorology and Climatology,

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

e-mail: matviyenkomaria@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6897-8422>

SIMULATION OF THE THERMAL COMFORT CONDITIONS OF URBAN AREAS: A CASE STUDY IN KYIV

Formulation of the problem. Studies of bioclimate of a territory are aimed at determining the favorable and adverse impacts of various climatic factors and their combinations on the human body. Complex urban morphology has a significant impact on microclimate and, accordingly, on thermal comfort of a person in such an environment. The height of buildings, street orientation, and distance between buildings alter the solar energy inlet, affect thermal regime, transform the wind speed and direction at the street level. Studies of the bioclimatic conditions of urban areas during the warm season are highly relevant as they provide an opportunity to evaluate human thermal sensations in the city, as well as the potential effectiveness of adaptation measures to heat stress (architectural measures and measures based on the use of green areas and water bodies).

The purpose of the article. The aim of this research is to simulate the bioclimate of an urban environment to determine the human thermal load in summer months based on modern bioclimatic indices and software.

Methods. For the purpose of this study, a part of the territory of the Osokorky residential area of Kyiv was selected. To get values of the main meteorological parameters of the researched area, a three-dimensional, prognostic, microscale model ENVI-met was used. ENVI-met pertains to the CFD-models (computation fluid dynamics model) and is designed for microscales with a horizontal resolution from 0.5 to 10 m and with a time step of 10 seconds as maximum. The PET calculation was performed using the RayMan model.

Results. A clear hot summer day (04 August 2017) was chosen for the simulation. The simulation was performed from 6:00 EEST on 4 August till 6:00 EEST the next day (output interval – 1 hour). The simulation results show that the values of the main meteorological parameters (air temperature and humidity, wind characteristics) and physiologically equivalent temperature differ significantly within urban spaces, even across small areas. The amplitudes of PET value were maximum in the daytime and made 12°–15°C. The decrease in the amplitude of the air temperature within the researched area in the evening and night hours led to a notable decrease in the PET amplitude to 2°–3°C. The analysis of the simulated PET values for the researched area confirmed that the residents of the urban areas experience the most intense heat stress while staying in the open asphalted areas during the daytime. The duration of the period with comfortable conditions during the researched day was very short – from 22:00 EEST through midnight. The range of the daily course of PET values at different points of the researched area varied from 19.4° (at point No. 7) to 37.1°C (at point No. 5 located in the well courtyard).

Based on the PET values simulated for the researched area and for CAWS Kyiv was found the significant differences between thermal comfort conditions within the complex urban spaces and at the weather station. Therefore, the values of bioclimatic indices simulated based on the weather station data can not be applied with any approximation to solve scientific and applied tasks that require information on the bioclimate at particular points in the urbanized environment. To solve such tasks, it is recommended to apply modern methods – ENVI-met and RayMan models.

Scientific novelty and practical significance. For the first time in Ukraine, microclimate and thermal comfort conditions within the complex urban environment has been simulated using ENVI-met and RayMan models. The results of such simulation can be used to choose heat adaptation measures which would help to increase the

comfort of the urban areas. The simulation of microclimate and thermal comfort conditions of some parts of the city territory is important stage of design of the buildings, in order to choose the optimal location for buildings and trees and to create the most comfortable conditions for people.

Keywords: urban area, thermal bioclimate, thermal comfort, physiologically equivalent temperature, «ENVI-met» model, «RayMan» model.

References

1. Basu, R., & Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews*, 24, 190–202. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>.
2. Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J.-C., & Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health*, 94(9), 1518–1520. <https://doi.org/10.2105/ajph.94.9.1518>.
3. Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>.
4. Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. *Urban Climate*, 10(P2), 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>.
5. Ahmed, K. S. (2003). Comfort in urban spaces: Defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, 35(1), 103–110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00085-3).
6. Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, 30, 189–200. <https://doi.org/10.3354/cr030189>.
7. Gaitani, N., Santamouris, M., & Mihalakakou, G. (2005). Thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Environment*, 1995(May), 761–765.
8. Fahmy, M., & Sharples, S. (2009). On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 44(9), 1907–1916.
9. Giannopoulou, K., Santamouris, M., Livada, I., Georgakis, C., & Caouris, Y. (2010). The Impact of Canyon Geometry on Intra Urban and Urban: Suburban Night Temperature Differences Under Warm Weather Conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 167(11), 1433–1449. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0099-8>.
10. Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(3), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>.
11. Carfan, A. C., Galvani, E., & Nery, J. T. (2012). Study of thermal comfort in the city of São Paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geograficas*, 78(August), 34–47.
12. Holst, J., & Mayer, H. (2011). Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5), 541–552. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0254>.
13. Lee, H., Holst, J., & Mayer, H. (2013b). Modification of Human-Biometeorologically Significant Radiant Flux Densities by Shading as Local Method to Mitigate Heat Stress in Summer within Urban Street Canyons. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–13.
14. Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.01.013>.
15. Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>.
16. Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D., & Kutiel, P. B. (2014). Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10(P2), 367–386. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>.
17. Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 147. Retrieved from <http://ubm.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/3112/>.
18. Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129–140. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.09.012>.
19. Noro, M., & Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 14, 187–196. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.20>.
20. Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 78–88. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.11.00>.
21. Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.
22. Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 13(3–4), 373–384.

- [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5).
23. Samaali, M., Courault, D., Bruse, M., Olioso, A., & Occelli, R. (2007). Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research*, 85(2), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.005>.
 24. Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>.
 25. Shevchenko O. G. (2016). Comparative analysis of bioclimatic indices for estimation of comfort in urban areas in warm period. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia*, 3(42), 105–115.
 26. Höppe Peter. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. https://inspectapedia.com/Appliances/Hoppe_1999_Pet.pdf.
 27. Matzarakis A. (1996). Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO Newsletter*, 18, 7-10.
 28. Tkachuk, S.V., (2012). Review of weather comfort indexes and their connection with mortality rates. *Gidrometeorologicheskii nauchno-issledovatel'skii tsentr Rossiiskoi Federatsii Publ., Moscow*.
 29. Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., & Schindler, D. (2008). Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(3), 241–250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>.
 30. Vieira De Abreu-Harbach, L., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (n.d.). Influence of different urban configuration on human thermal conditions in a Typical Subtropical Coast City-Case of Santos, São Paulo. Retrieved from http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/poster_2-9-7721603_a.pdf.
 31. Erell E., Pearlmutter D., Williamson T. *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. – London, Washington, DC, 2012, 452.
 32. Lin, T.-P., Matzarakis, A., & Hwang, R.-L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002>.
 33. Matzarakis, A and Mayer, H. (2003). Human-Biometeorological assessment of urban structures, *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 September 2003, Lodz, Poland*, 83-86.
 34. Nunez, M., & Oke, T. R. (1977). The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 11–19. <https://doi.org/10.2307/26177588>.
 35. Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I., & Asimakopoulos, D. (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33(27), 4503–4521. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00187-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00187-9).
 36. Yahia, M. W., & Johansson, E. (2013). Influence of urban planning regulations on the microclimate in a hot dry climate: The example of Damascus, Syria. *Journal of Housing and the Built Environment*, 28(1), 51–65. <https://doi.org/10.1007/s10901-012-9280-y>.
 37. Gusson, C. S., & Duarte, D. H. S. (2016). Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Engineering*, 169, 2–10. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.10.001>.
 38. Ali Toudert, F. (2005). *Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*. Retrieved from file:///C:/Users/hp1/Downloads/Diss_Freidok_Ali_Toudert_Fazia.pdf.
 39. Winston, T. L. C., Ronald, P., Chris A., M., & Anthony J, B. (2010). Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology*, 103, 197–211. <https://doi.org/DOI:10.1007/s00704-010-0293-8>.
 40. Ambrosini, D., Galli, G., Mancini, B., Nardi, I., & Sfarra, S. (2014). Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met® Climate Model. *Sustainability*, 6(10), 7013–7029. <https://doi.org/10.3390/su6107013>.
 41. Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E., & Duarte, D. (2008). Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. *Revista Da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana (REVSBAU)*; 3(2), Pp 1-19 (2008), 3(2), 1–19. Retrieved from <https://lup.lub.lu.se/search/publication/5ed25573-9929-4e43-871a-d9d3fc594aae>.
 42. Chandler, T. J. Absolute and relative. Retrieved from <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477-48.6.394>.
 43. Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic Press, 275.

ЕКОЛОГІЯ

УДК 911.8:504.054.05:556.531

Олексій Миколайович Крайнюков,

д. геогр. н., професор, кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти, факультет екології,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,
e-mail: alkraynukov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>;

Анастасія Вікторівна Якушева,

аспірант, НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
вул. Бакуліна, 6, м. Харків, 61166, Україна,
e-mail: yakusheva.nastasya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1950-735X>

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ *CERIODAPHNIA AFFINIS LILLJEBORG* (CRUSTACEA) У КОРОТКОСТРОКОВОМУ ВИПРОБУВАННІ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ СТАНДАРТІВ ЯКОСТІ ВОДИ В УКРАЇНІ

Аналіз функціонуючих в різних країнах систем нормування якості поверхневих вод показав, що існує тенденція використання таких нормативів, дотримання яких дозволяє захищати водну екосистему та задовольняти потреби суспільства й галузей економіки. В основу таких нормативів покладено отримання екотоксикологічної інформації небезпечної хімічної речовини на представниках водної екосистеми. Серед них одними із найбільш чутливих тест-організмів є ракоподібні з родини *Daphniidae*, які використовуються не тільки для встановлення норм якості води хімічних речовин, а й для оцінки якості стічних та поверхневих вод за токсикологічним показником. Для встановлення екологічних стандартів якості води в країнах ЄС рекомендується використовувати стандартизовану міжнародну методику з визначення токсичності хімічних речовин на *Daphnia magna* Straus (ОЕСР №202), однак в Україні у водоохоронній практиці найбільш популярним тест-організмом є *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (*Daphnia* sp.).

Робота спрямована на дослідження можливості використання *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (*Daphnia* sp.) у короткостроковому випробуванні при встановленні екологічних стандартів води в Україні. У результаті проведених експериментальних досліджень на культурі ракоподібних з колекції культур лабораторії еколого-токсикологічних досліджень ХНУ імені В. Н. Каразіна за умов використання методики ОЕСР №202 було встановлено метрологічні характеристики: діапазон реагування тест-організмів *Ceriodaphnia affinis* наступний – $1,45 < EC_{50-24} < 2,91$ (мг/дм³); похибка результатів визначення токсичності хімічної речовини – 0,34 мг/дм³ (31,6 %); відтворюваність результатів визначення токсичності хімічної речовини – 0,18 мг/дм³ (16,1 %); норматив оперативного контролю – 0,49 мг/дм³. Коефіцієнт варіації визначених на *Ceriodaphnia affinis* EC_{50-24} та EC_{50-48} для $K_2Cr_2O_7$ склав 16,8 % та 15,9 % відповідно. Отримані результати свідчать про можливість використання культури ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* у короткостроковому випробуванні при встановленні екологічних стандартів якості води в Україні.

Ключові слова: поверхневі води, токсичність, хімічні речовини, ефективна концентрація, *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, метрологічні характеристики.

А. Н. Крайнюков, А. В. Якушева. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *CERIODAPHNIA AFFINIS LILLJEBORG* (CRUSTACEA) В КРАТКОСРОЧНОМ ЕКСПЕРИМЕНТЕ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ В УКРАИНЕ. Анализ функционирующих в разных странах систем нормирования качества поверхностных вод показал, что существует тенденция использования таких нормативов, при соблюдении которых обеспечивается защита водной экосистемы и удовлетворяются потребности общества и отраслей экономики. В основу таких нормативов положено получение экотоксикологической информации опасных химических веществ на представителях водной экосистемы. Среди них одними из наиболее чувствительных тест-организмов являются ракообразные из семейства *Daphniidae*, которые используются не только для установления норм качества воды химических веществ, а и для оценки качества сточных и поверхностных вод по токсикологическим показателям. Для установления экологических стандартов качества воды в странах ЕС рекомендуется использовать стандартизованную международную методику определения токсичности химических веществ на *Daphnia magna* Straus (ОЭСР № 202). Однако в Украине в водоохранной практике наиболее популярным тест-организмом является *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (*Daphnia* sp.).

Робота направлена на исследование возможности использования *Ceriodaphnia affinis* в краткосрочном испытании при установлении экологических стандартов качества воды в Украине. В результате проведенных экспериментальных исследований на культуре ракообразных из коллекции культур лаборатории эколого-токсикологических исследований ХНУ имени В. Н. Каразина при использовании методики ОЭСР № 202 было установлено метрологические характеристики: диапазон реагирования тест-организмов *Ceriodaphnia affinis* следующий – $1,45 < EC_{50-24} < 2,91$ (мг/дм³); погрешность определения токсичности химического вещества – 0,34 мг/дм³ (31,6 %); воспроизводимость результатов определения токсичности хи-

мического вещества – 0,18 мг/дм³ (16,1 %); норматив оперативного контроля – 0,49 мг/дм³. Коэффициент вариации определенных на *Ceriodaphnia affinis* EC₅₀₋₂₄ и EC₅₀₋₄₈ для K₂Cr₂O₇ составил 16,8 % и 15,9 % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования культуры ракообразных *Ceriodaphnia affinis* в краткосрочном испытании при установлении экологических стандартов качества воды в Украине.

Ключевые слова: поверхностные воды, токсичность, химические вещества, эффективная концентрация, *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, метрологические характеристики.

Постановка проблеми. На сьогоднішня та у найближчі десятиліття за даними ЮНЕСКО [1] існують тенденції підвищення попиту на воду та зниження її якості в світі. Збільшення попиту на воду прогнозується в промисловості та енергетиці, в сільському та житлово-комунальному господарстві. У свою чергу, це стане причиною збільшення антропогенного навантаження, зокрема хімічного забруднення на поверхневі води, що знизить їхню якість та обмежить їхню придатність для задоволення різних потреб суспільства в подальшому.

Проблема збереження якості поверхневих вод від забруднення небезпечними хімічними речовинами є актуальною для України. Серед підприємств, що функціонують на території країни, найбільш небезпечними для водної екосистеми є підприємства хімічної, гірничорудної та нафтопереробної промисловості, великі тваринницькі комплекси та целюлозно-паперові комбінати. При надходженні до поверхневих вод небезпечних хімічних речовин разом зі стічними водами цих підприємств порушуються процеси життєдіяльності та відтворення водних організмів, кругообіг речовин, процеси самоочищення та біопродуктивності, що призводить до змін у структурно-функціональній організації водної екосистеми [2]. Таким чином обмежується придатність поверхневих вод для задоволення різних потреб суспільства та галузей економіки в подальшому.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій.

Одним із методів оцінки й контролю за надходженням хімічних речовин до водної екосистеми є їхнє нормування відповідно до встановлених норм якості води. Аналіз функціонуючих в різних країнах систем нормування якості поверхневих вод показав, що існує тенденція використання таких нормативів, дотримання яких дозволяє захищати водну екосистему та задовольняти потреби суспільства й галузей економіки. Оскільки їхня особливість полягає в комплексному екосистемному підході до нормування якості поверхневих вод та захисті здоров'я людини, такі нормативи в країнах ЄС та Канаді мають статус екологічних [3-8].

В основу таких нормативів покладено отримання екотоксикологічної інформації небезпечної хімічної речовини на представниках водної екосистеми. Стандартизованими тест-організма-

ми для встановлення екологічних нормативів є мікродорості (*Pseudokirchneriella subcapitata* (Korshikov) Hindak, *Scenedesmus subspicatus* Chodat, *Chlorella vulgaris* Beyerinck (Beijerinck)), ціанобактерії (*Anabaena flos-aquae* Brébisson ex Bornet & Flauhault), ракоподібні (*Daphnia magna* Straus, *Ceriodaphnia dubia* Richard, *Hyalella azteca* Saussure), риби (*Danio rerio* Hamilton-Buchanan, *Oncorhynchus mykiss* Walbaum) [3-9].

Питанню встановлення норм якості води хімічних речовин присвячена робота [10]. Авторами розглянуто три підходи для встановлення нормативів: коефіцієнт безпеки, розподіл видів за чутливістю, моделювання екосистеми AQUATOX. У результаті проведеного дослідження було визначено, що найбільший захист екосистеми забезпечується нормативом, який встановлено на основі коефіцієнту безпеки. Також зазначається, що при використанні тільки результатів визначення хронічної токсичності для встановлення норм якості води недооцінюється небезпечність короткострокового гострого токсичного впливу хімічної речовини, що нормується.

Необхідність удосконалення оцінки впливу хімічних речовин на навколишнє середовище, зокрема на водну екосистему, при проведенні екотоксикологічних досліджень хімічної речовини, що нормується, представлена в роботі [11]. Авторами розглянуто останні тенденції інтерпретації екотоксикологічних досліджень для встановлення нормативів і запропоновано дев'ять рекомендацій, завдяки яким результати випробувань будуть більш обґрунтованими і публічно визнаними.

У роботі [12] підіймається питання нормування надходження фармацевтичних препаратів до навколишнього середовища, зокрема до водної екосистеми, та актуальність встановлених нормативів. За результатами проведеного дослідження було встановлено, що для 88 % (975 речовин) фармацевтичних препаратів екотоксикологічна інформація щодо небезпечності речовин для навколишнього середовища та здоров'я людини недостатньо висвітлена. Авторами запропоновано провести додаткові випробування цих речовин з використанням окрім стандартних тест-реакцій (імобілізація, репродуктивність тощо), тест-реакцію зміни в поведінці тест-організмів.

Сучасна швидкість промислового виробництва наноматеріалів випереджає можливість проведення широкого спектру токсикологічних досліджень для оцінювання їхньої безпечності для навколишнього середовища. У зв'язку з цим авторами роботи [13] запропоновано використовувати набір короткострокових випробувань за допомогою методів *in vitro* та *in vivo* на клітинах риб, гемоцитах мідій, на ракоподібних та мікроводоростях.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.

Серед представників водної екосистеми одними із найбільш чутливих тест-організмів до небезпечних хімічних речовин є ракоподібні з родини Daphniidae, які використовуються не тільки для встановлення норм якості води хімічних речовин, а й для оцінки якості стічних та поверхневих вод за токсикологічним показником.

Для можливості отримання відтворюваних результатів при проведенні процедур з визначення екотоксикологічної інформації хімічної речовини, що нормується, в лабораторіях різних країн світу, в країнах ЄС керівництвом [6] пропонується використовувати стандартизовані міжнародні методики ОЕСР для встановлення екологічних стандартів якості.

Однією з рекомендованих методик для встановлення екологічних стандартів якості є методика визначення токсичності хімічних речовин за показником іммобілізації ракоподібних з родини Daphniidae за 48 годин [14]. Бажаним видом є *Daphnia magna*, однак зазначається про можливість використання інших видів за умов дотримання критеріїв вірогідності, вказаних у методиці. В Україні для біотестування хімічних речовин, стічних та поверхневих вод на ракоподібних використовуються національні методики ДСТУ 4173:2003 [15], ДСТУ 4174:2003 [16] та КНД 211.1.4.055-97 [17], КНД 211.1.4.046-95 [18]. Стандартними тест-організмами, які пропонується використовувати окрім *Daphnia magna*, є *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg.

Формулювання мети роботи. Метою роботи є апробація методики [14] на тест-організмі *Ceriodaphnia affinis* зі встановленням для неї метрологічних характеристик, що дозволить отримувати достовірну екотоксикологічну інформацію на відповідному тест-організмі при встановленні екологічних стандартів якості води хімічних речовин в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення дослідження було використано культуру ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* з колекції культур лабораторії еколого-токсиколо-

гічних досліджень Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Авторами було здійснено встановлення метрологічних характеристик для методики з визначення ефективної концентрації, що призводить до 50 % іммобілізації ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* (EC₅₀) за 24 та 48 годин [14] відповідно до керівного документа [19, 20]. При проведенні процедур з визначення ефективної концентрації EC₅₀ еталонної хімічної речовини K₂Cr₂O₇ на тест-організмах були витримані умови, які свідчать про достовірність отриманих даних: концентрація розчиненого кисню наприкінці випробування була ≥ 3 мг/дм³; у контролі відсоток іммобілізованих тест-організмів наприкінці випробування становив не більше ніж 10 % [14].

До отриманих експериментальних даних токсичності для знаходження концентрації, що призводить до 50 % іммобілізації тест-організмів, застосовували метод нелінійної регресії. Для цього використовували програмне забезпечення Graph Pad Prism 8 [20].

Результати експериментальних досліджень із визначення EC₅₀₋₂₄ K₂Cr₂O₇ на *Ceriodaphnia affinis* представлені на рис. 1.

Отримані значення EC₅₀ еталонної хімічної речовини K₂Cr₂O₇ для тест-організмів *Ceriodaphnia affinis* за 24 години наведені в таблиці 1.

Усі подальші розрахунки, які необхідні для встановлення метрологічних характеристик, здійснювали за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office 2016 в середовищі Excel. Отримані значення EC₅₀₋₂₄ для *Ceriodaphnia affinis* (табл. 1) перевіряли на наявність надмірної похибки за β-критерієм:

$$\beta = \frac{|X_n - \bar{X}|}{S}, \quad (1)$$

де S – середньо квадратичне відхилення;

X_n – результат дослідження з визначення EC₅₀₋₂₄;

\bar{X} – середнє арифметичне значення.

Результати експериментальних досліджень з визначення EC₅₀₋₂₄ K₂Cr₂O₇ на *Ceriodaphnia affinis* використовували при встановленні діапазону чутливості культури, який розраховують за формулою:

$$\bar{X} - 1,96 \times \sigma < X_k < \bar{X} + 1,96 \times \sigma, \quad (2)$$

де X_k – концентрація, за якої досягається критерій токсичності (EC₅₀₋₂₄);

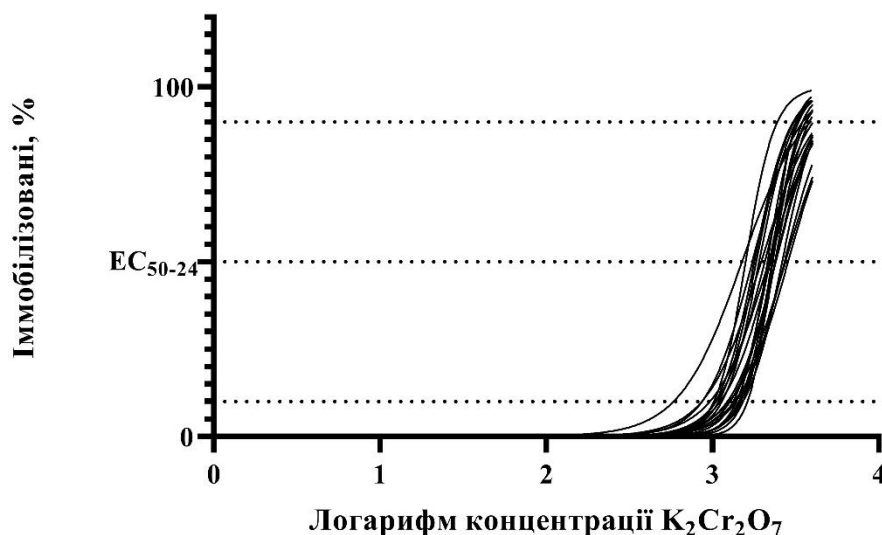
\bar{X} – середнє арифметичне значення;

σ – значення внутрішньолабораторної відтворюваності.

Для знаходження значення внутрішньолабораторної відтворюваності σ результатів визначення токсичності хімічної речовини використовували наступну формулу:

$$\sigma = S \times \gamma(f), \quad (3)$$

де S – середньо квадратичне відхилення;

Рис. 1. Результати експериментальних досліджень з визначення $EC_{50-24} K_2Cr_2O_7$ на *Ceriodaphnia affinis*

Таблиця 1

Отримані значення EC_{50} еталонної хімічної речовини $K_2Cr_2O_7$ за 24 год.
на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis*

Номер досліджу	EC_{50-24} , мг/дм ³	Сер. арифм	Коефіцієнт варіації, %	Середньо-квадратичне відхилення Si
1	2,306	2,19	16,8 %	0,37
2	2,404			
3	2,745			
4	2,395			
5	1,505			
6	1,736			
7	2,181			
8	2,623			
9	1,964			
10	2,235			
11	2,062			
12	2,711			
13	2,849			
14	2,279			
15	1,907			
16	1,582			
17	1,835			
18	2,289			
19	2,142			
20	1,786			
21	2,204			
22	2,377			

$\gamma (f)$ – коефіцієнт, який враховує зміщеність значення середньоквадратичного відхилення, $\gamma (f)$ для $f=21$ становить 1,013.

Середнє квадратичне відхилення розраховували за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{X})^2}{N-1}}, \quad (4)$$

де X_n – результат досліджу з визначення EC_{50-24} ;

\bar{X} – середнє арифметичне значення;

N – кількість проведених дослідів.

Встановлений діапазон чутливості тест-організмів *Ceriodaphnia affinis* наступний:

$$2,19 - 1,96 \times 0,18 < EC_{50-24} < 2,19 + 1,96 \times 0,18;$$

$$1,46 < EC_{50-24} < 2,92 \text{ (мг/дм}^3\text{)}.$$

Для встановлення значення відтворюваності методики з визначення ефективної концентрації, що призводить до 50% іммобілізації ракоподіб-

них *Ceriodaphnia affinis* (EC₅₀) за 48 годин, використовували формули (5), (6):

$$\sigma = S \times \gamma(f), \quad (5)$$

$$\sigma (\%) = \frac{S \times \gamma(f)}{\bar{x}} \times 100, \quad (6)$$

де S – середньо квадратичне відхилення;

$\gamma(f)$ – коефіцієнт, який враховує зміщеність значення середньоквадратичного відхилення, $\gamma(f)$ для $f=21$ становить 1,013;

\bar{X} – середнє арифметичне значення.

Результати експериментальних досліджень з визначення EC₅₀₋₄₈ K₂Cr₂O₇ на *Ceriodaphnia affinis* представлені на рис. 2 та в таблиці 2.

Перед використанням формул (5) та (6) отримані значення EC₅₀₋₄₈ для *Ceriodaphnia affinis* (табл. 2) перевіряли на наявність надмірної похибки за β -критерієм за формулою (1).

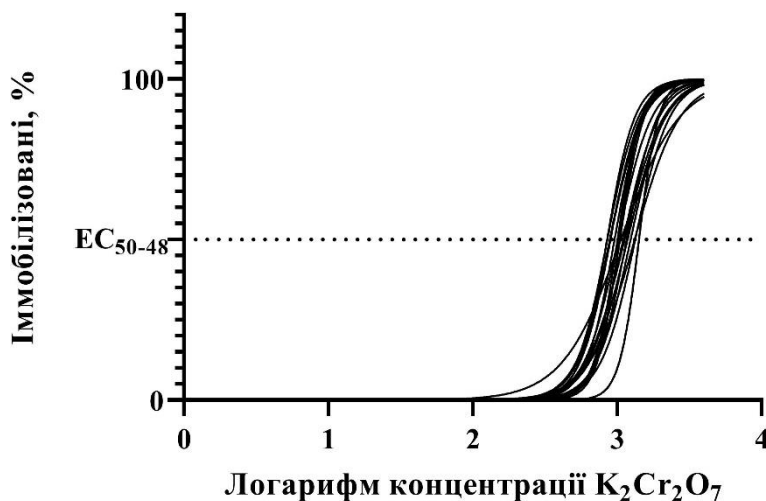


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень з визначення EC₅₀₋₄₈ K₂Cr₂O₇ на *Ceriodaphnia affinis*

Таблиця 2

Отримані значення EC₅₀ еталонної хімічної речовини K₂Cr₂O₇ за 48 год. на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis*

Номер дослідіду	EC ₅₀₋₄₈ , мг/дм ³	Сер. арифм.	Коефіцієнт варіації, %	Середньо-квадратичне відхилення S
1	1,318	1,086	15,9 %	0,17
2	1,057			
3	1,011			
4	0,957			
5	1,033			
6	0,896			
7	0,887			
8	1,33			
9	0,89			
10	1,16			
11	1,004			
12	1,413			
13	1,413			
14	1,178			
15	1,1			
16	1,043			
17	1,033			
18	0,853			
19	1,236			
20	0,849			
21	1,1			
22	1,123			

Таким чином, відтворюваність результатів визначення токсичності хімічної речовини випробуваної методики:

$$\sigma = 0,18 \text{ (мг/дм}^3\text{)} \text{ та } \sigma (\%) = 16,1 \%;$$

Для розрахунку похибки результатів визначення токсичності хімічної речовини випробуваної методики використовували формули (7), (8):

$$\Delta = 1,96 \times \sigma, \quad (7)$$

$$\Delta (\%) = 1,96 \times \sigma (\%), \quad (8)$$

де σ та $\sigma (\%)$ – відтворюваність результатів визначення токсичності хімічної речовини випробуваної методики.

Отже похибка результатів визначення ефективної концентрації $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, що призводить до 50% іммобілізації ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* (EC_{50}) за 48 годин, за умов використання методики [14] наступна:

$$\Delta = 1,96 \times 0,18 = 0,34 \text{ (мг/дм}^3\text{)}$$

$$\Delta (\%) = 1,96 \times 14,19 (\%) = 31,6 (\%).$$

З метою оперативної перевірки значення EC_{50-48} , отриманого за відповідною методикою, було встановлено норматив оперативного контролю за наступною формулою (9):

$$D = 2,77 \times \sigma, \quad (9)$$

де σ – відтворюваність результатів визначення токсичності хімічної речовини випробуваної методики.

Звідси норматив оперативного контролю результатів визначення ефективної концентрації $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, що призводить до 50% іммобілізації ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* (EC_{50}) за 48 го-

дин, для визначеної методики [14] складає 0,49 мг/дм³.

Висновки. Отже у результаті проведених експериментальних досліджень на культурі ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* з колекції культур лабораторії еколого-токсикологічних досліджень ХНУ імені В. Н. Каразіна авторами було апробовано методику ОЕСР № 202 [14], яку рекомендовано до використання при встановленні екологічних стандартів якості води. Коефіцієнт варіації визначених на *Ceriodaphnia affinis* EC_{50-24} та EC_{50-48} для $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ склав 16,8 % та 15,9 %, відповідно. На основі отриманих даних було встановлено метрологічні характеристики випробуваної методики: діапазон чутливості тест-організмів *Ceriodaphnia affinis* наступний – 1,45 < EC_{50-24} < 2,91 (мг/дм³); похибка результатів визначення токсичності хімічної речовини – 0,34 мг/дм³ (31,6 %); відтворюваність результатів визначення токсичності хімічної речовини – 0,18 мг/дм³ (16,1 %), норматив оперативного контролю – 0,49 мг/дм³.

Таким чином, у короткостроковому випробуванні при встановленні екологічних стандартів якості води в Україні можливо використовувати культуру ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* з колекції культур лабораторії еколого-токсикологічних досліджень ХНУ імені В.Н. Каразіна. Встановлені метрологічні характеристики це підтверджують.

Література

1. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water [Електронний ресурс]. – Paris: UNESCO. – Режим доступу: <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261424e.pdf>
2. Брагінський, Л. П. Гідроекологічна токсикометрія та біоіндикація забруднень: Теорія, методи, практика використання [Текст] / Л. П. Брагінський. – Львів: Світ, 1995. – 440 с.
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of establishing a framework for Community action in the field of water policy (2000). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0060>
4. Водний Кодекс України від 06.06.1985 р. № 213/95-ВР [Електронний ресурс] // База даних «Законодавство України» / ВР України. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>
5. Методические указания по установлению эколого – рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение [Текст] // ред. О. Ф. Филенко, С. А. Соколова. – М.: ВНИРО, 1998. – 145 с.
6. Guidance Document № 27: Technical guidance for deriving environmental quality standards [Електронний ресурс]. – Brussels: Directorate General Environment of the European Commission. – Режим доступу: <https://circabc.europa.eu/sd/a/0cc3581b-5f65-4b6f-91c6-433a1e947838/TGD-EQS%20CIS-WFD%2027%20EC%202011.pdf>.
7. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life 2007 [Електронний ресурс]. – Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg. – Режим доступу: <http://ceqg-rce.ca/download/en/220>.
8. Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection Of Aquatic Organisms and Their Uses [Електронний ресурс]. – U.S. Environmental Protection Agency. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/guidelines-water-quality-criteria.pdf>.
9. Об утверждении Методических указаний по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 22 декабря 2016 года) [Електронний ресурс]. – Росрыболовство. – Режим доступу: <http://docs.cntd.ru/document/902172637>.
10. Gredelj A. Deriving predicted no-effect concentrations (PNECs) for emerging contaminants in the river Po, Italy, using three approaches: Assessment factor, species sensitivity distribution and AQUATOX ecosystem modelling /

- Gredelj A., Barausse A., Grechi L., Palmeri L. // *Environment International*. – Volume 119, 2018. – P. 66-78 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.017>].
11. Improving environmental risk assessments of chemicals: Steps towards evidence-based ecotoxicology [Martin O. V., Adams J., Beasley A., Belangers S and other]// *Environment International*. – Volume 128, 2019. – P. 210-217 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.053>].
 12. Pharmacology beyond the patient – The environmental risks of human drugs [Gunnarsson L., Snape J. R., Verbruggen B., Owen S. F. and other] // *Environment International*. – Volume 129, 2019. – P. 320-332 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.075>].
 13. Investigating the Impact of Manufacturing Processes on the Ecotoxicity of Carbon Nanofibers: A Multi-Aquatic Species Comparison [Barrick A., Châtel A., Manier N., Kalman J. and other]// *Environmental toxicology and chemistry*. 2019. [<https://doi.org/10.1002/etc.4537>].
 14. OECD 2004. *Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, OECD Guideline for the testing of chemicals, Guideline 202* [<https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>].
 15. ДСТУ 4173-2003. Якість води. Визначення гострої летальної токсичності на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD).
 16. ДСТУ 4174-2003. Якість води. Визначення сублетальної та хронічної токсичності хімічних речовин та води на *Daphnia magna* Straus і *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 1076:2000, MOD).
 17. КНД 211.1.4.055-97. Методика визначення гострої летальної токсичності води на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Затв. наказом Мінприроди України від 21.05.97 № 68.
 18. КНД 211.1.4.046-95. Біотестування та визначення рівнів гострої летальної токсичності зворотних вод, які відводяться у водні об'єкти. Методика. Затв. наказом Мінекобезпеки України від 30.05.95 № 47.
 19. КНД 211.1.0.051-96. Атестація методик біотестування. Затв. наказом Мінекобезпеки України від 22.01.97 р. – №9. – 33 с.
 20. *Current Approaches in the Statistical Analysis of Ecotoxicity Data*. – OECD, 2014. – P. 114 [<https://dx.doi.org/10.1787/9789264085275-en>].

Внесок авторіє: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 911.8:504.054.05:556.531

Oleksii Krainiukov,

Doctor of Sciences (Geography), Professor,

Department of Environmental Monitoring and Nature Management, School of Ecology,
V.N. Karazin Kharkiv National University, 6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: alkraynukov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>;

Anastasiia Yakusheva,

PhD Student, Ukrainian Scientific and Research Institute of Ecological Problems,
6 Bakulina St., Kharkiv, 61166, Ukraine,
e-mail: yakusheva.nastasya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1950-735X>

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING CERIODAPHNIA AFFINIS LILLJEBORG (CRUSTACEA) IN A SHORT-TERM TEST WHILE SETTING ECOLOGICAL QUALITY STANDARDS IN UKRAINE

Formulation of the problem. Regulation of hazardous chemicals admission to surface water is carried out by means of appropriate water quality standards. Researching the systems of surface water quality regulation in different countries, it has been determined that there is a tendency to use standards for the protection of the aquatic ecosystem and for meeting the needs of society and industries - environmental quality standards. Such standards are based on obtaining ecotoxicological information of a dangerous chemical substance on the representatives of the aquatic ecosystem. Among them, some of the most sensitive test organisms are crustaceans from the Daphniidae family. They are used to establish water quality standards for chemicals, to assess the quality of wastewater and surface water using a toxicological indicator. It is recommended to use a standardized international methodology to assess effects of chemicals on *Daphnia magna* Straus (OECD No. 202) to establish environmental water quality standards in EU countries. However, in Ukraine, in water protection practice, the most popular test organism is *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (*Daphnia* sp.).

The purpose of the article. In order to set ecological standards for water quality of chemicals in Ukraine, the authors proposed to test the OECD No. 202 methodology using *Ceriodaphnia affinis* test organisms and to establish metrological characteristics for it.

Presentation of the main research material. The authors tested the OECD methodology No. 202 [21] on the crustacean culture *Ceriodaphnia affinis* from the culture collection of the Laboratory of Ecological and

Toxicological Research, the V. N. Karazin KhNU. The coefficient of variation of EC50-24 and EC50-48 $K_2Cr_2O_7$ was 16,8 % and 15,9 % respectively. Based on the data obtained, the metrological characteristics of the tested method were established: the response range of the test organisms *Ceriodaphnia affinis* is the following – $1,45 < EC_{50-24} < 2,91$ (mg/dm³); reproducibility of the results of determining the toxicity of a chemical substance – 0,18 mg/dm³ (16,1%); the error in the results of determining the toxicity of a chemical substance – 0,34 mg/dm³ (31.6 %); standard of operational control – 0,49 mg/dm³.

Scientific novelty and practical significance. The findings confirm the possibility of using *Ceriodaphnia affinis* in a short-term test in setting environmental water quality standards in Ukraine.

Keywords: surface water, toxicity, chemicals, effective concentration, *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, metrological characteristics.

References

1. UNESCO (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris. UNESCO. <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261424e.pdf>
2. Brahinskyi L. P., Oleksiv I. T. (1995). *Hidroekologichna toksykometriia ta bioindykatsiia zabrudnen: Teoriia, metody, praktyka vykorystannia*. Lviv, Svit, 440.
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of establishing a framework for Community action in the field of water policy (2000). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0060>
4. Vodnyi Kodeks Ukrainy vid 06.06.1985 r. № 213/95-VR. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>
5. Filenko O. F., Sokolova S. A. (1998). *Metodicheskie ukazaniia po ustanovleniu jekologo – rybohozjajstvennykh normativov (PDK i OBUV) zagryzajushchih veshhestv dlja vody vodnykh ob'ektov, imejushchih rybohozjajstvennoe znachenie*. M., VNIRO, 145.
6. Guidance Document № 27: Technical guidance for deriving environmental quality standards (2011). <https://circabc.europa.eu/sd/a/0cc3581b-5f65-4b6f-91c6-433a1e947838/TGD-EQS%20CIS-WFD%2027%20EC%202011.pdf>.
7. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life (2007). Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg. <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/220>.
8. Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection Of Aquatic Organisms and Their Uses. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/guidelines-water-quality-criteria.pdf>.
9. Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybohozjajstvennogo znachenija, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednykh veshhestv v vodah vodnykh ob'ektov rybohozjajstvennogo znachenija, ot 13.01.2017 g. № 45203. <https://minjust.consultant.ru/documents/22231?items=1&page=1>.
10. Gredelj A., Barausse A., Grechi L., Palmeri L. (2018). Deriving predicted no-effect concentrations (PNECs) for emerging contaminants in the river Po, Italy, using three approaches: Assessment factor, species sensitivity distribution and AQUATOX ecosystem modelling. *Environment International*. 119, 66-78 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.017>].
11. Martin O. V., Adams J., Beasley A., Belangers S and other (2019). Improving environmental risk assessments of chemicals: Steps towards evidence-based ecotoxicology. *Environment International*. 128, 210-217 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.053>].
12. Gunnarsson L., Snape J. R., Verbruggen B., Owen S. F. and other (2019) Pharmacology beyond the patient – The environmental risks of human drugs. *Environment International*. 129, 320-332 [<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.075>].
13. Barrick A., Châtel A., Manier N., Kalman J. and other (2019) Investigating the Impact of Manufacturing Processes on the Ecotoxicity of Carbon Nanofibers: A Multi-Aquatic Species Comparison. *Environmental toxicology and chemistry*. [<https://doi.org/10.1002/etc.4537>].
14. OECD (2004). *Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, OECD Guideline for the testing of chemicals, Guideline 202* [<https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>].
15. DSTU 4173 (2003). *Jakistj vody. Vyznachannja ghostraji letalnoji toksychnosti na Daphnia magna Straus ta Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD)*.
16. DSTU 4174 (2003). *Jakistj vody. Vyznachannja subletalnoji ta khronichnoji toksychnosti khimichnykh rehovyn ta vody na Daphnia magna Straus i Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 1076:2000, MOD)*.
17. KND 211.1.4.055-97 (1997). *Metodyka vyznachennja ghostraji letalnoji toksychnosti vody na rakopodibnykh Ceriodaphnia affinis Lilljeborg. Zatv. nakazom Minpryrody Ukrainy vid 21.05.97 № 68*.
18. KND 211.1.4.046-95 (1995). *Biotestuvannja ta vyznachennja rivniv ghostraji letalnoji toksychnosti zvorotnykh vod, jaki vidvodjatsja u vodni ob'jekty. Metodyka. Zatv. nakazom Minekobepeky Ukrainy vid 30.05.95 № 47*.
19. KND 211.1.0.051-96 (1996). *Atestacija metodyk biotestuvannja. Zatv. nakazom Minekobepeky Ukrainy vid 22.01.97 r. 9, 33*.
20. OECD (2014). *Current Approaches in the Statistical Analysis of Ecotoxicity Data*. 114 [<https://dx.doi.org/10.1787/9789264085275-en>].

Serhii Mikhailovich Levoniuk,

Researcher, Ukrainian Scientific Research Institute for Natural Gases,
20 Himnasiyna Emb., Kharkiv, 61010, Ukraine,

e-mail: sergii.levonyuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4073-8152>;

Vitaliy Viktorovich Samoilo,

PhD (Geology), Head of the Department, Ukrainian Scientific Research Institute for Natural Gases,

e-mail: samoilov_gas@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0650-2808>;

Igor Valerijovich Udalov,

Doctor of Sciences (Geology), Associate Professor, Head of the Department of Hydrogeology,
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,

e-mail: igorudalov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3844-6481>;

Viacheslav Oleksijovich Petik,

PhD (Technics), Senior Lecturer, Department of Hydrogeology,

V.N. Karazin Kharkiv National University,

e-mail: nemuk1310@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4055-0926>

ECOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTORS OF QUALITATIVE COMPOSITION DESTABILIZATION OF DRINKING GROUNDWATER WITHIN THE CENTRAL PART OF DDAB

С. М. Левонюк, В. В. Самойлов, І. В. Удалов, В. О. Петік. ЕКОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЇ ЯКІСНОГО СКЛАДУ ПИТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ДДАБ. Робота присвячується актуальній екологічній темі – дослідженню дестабілізації якості питних підземних вод в умовах сучасного інтенсивного техногенезу геологічного середовища. Авторами обгрунтовані 2 складові даної проблеми: встановлення еколого-гідрогеологічних факторів впливу на якісний склад вод та обгрунтування екологічно безпечного використання цих вод.

На базі раціонального комплексування геологічних, еколого-гідрогеологічних і неотектонічних умов території робіт виявлені фактори впливу на якісний склад підземних вод на бучацько-канівських водозаборах. Завдяки цьому – запропоновані пріоритетні показники якості цих вод для гідрогеохімічного моніторингу в умовах інфільтрації забруднюючих речовин з поверхні та їх підтоку знизу в зонах впливу тектонічних структур. Встановлений зв'язок факторів впливу із якісним складом дозволить розробити еколого-гідрогеологічний підхід до екологічно безпечного використання вод цільового комплексу у межах Східної України. Весь комплекс виконаних досліджень апробовано на мережі водозаборів Полтавської міської агломерації. Встановлено рівні забруднення підземних вод та обгрунтовано оптимальний загальний водовідбір на водозаборах міста. Виявлено і кількісно оцінено прямий позитивний зв'язок зміни вмісту характерних елементів-індикаторів впливу на еколого-гідрогеологічний стан підземних вод від величини водовідбору в зоні безпосереднього впливу тектонічних порушень Східно-Полтавської тектонічної структури.

Ключові слова: водозабори, бучацько-канівський водоносний комплекс, трансформація якості підземних вод, гідрогеохімічний моніторинг, прогностичні ресурси.

С. М. Левонюк, В. В. Самойлов, И. В. Удалов, В. А. Петик. ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ДДАБ. Работа посвящается актуальной экологической теме – исследованию дестабилизации качества питьевых подземных вод в условиях современного интенсивного техногенеза геологической среды. Авторами обоснованы 2 составляющие данной проблемы: определение эколого-гидрогеологических факторов влияния на качественный состав вод и обоснование экологически безопасного использования этих вод.

На базе рационального комплексирования геологических, эколого-гидрогеологических и неотектонических условий территории работ выявлены факторы влияния на качественный состав подземных вод на бучакско-каневских водозаборах. Благодаря этому – предложены приоритетные показатели качества этих вод для гидрогеохимического мониторинга в условиях инфильтрации загрязняющих веществ с поверхности и их подтока снизу в зонах влияния тектонических структур. Установленная связь факторов влияния с качественным составом позволила разработать эколого-гидрогеологический подход к экологически безопасному использованию вод целевого комплекса в пределах Восточной Украины. Весь комплекс выполненных исследований апробирован на сети водозаборов Полтавской городской агломерации. Установлены уровни загрязнения подземных вод и обоснован оптимальный общий водоотбор на водозаборах города. Выявлена и количественно оценена прямая позитивная связь изменения содержания характерных элементов-индикаторов влияния на эколого-гидрогеологическое состояние подземных вод от величины водоотбора в зоне непосредственного влияния тектонических нарушений Восточно-Полтавской тектонической структуры.

Ключевые слова: водозаборы, бучакско-каневский водоносный комплекс, трансформация качества подземных вод, гидрогеохимический мониторинг, прогностические ресурсы.

Introduction. As it is known, the problem of supplying the population with high-quality drinking groundwater is urgent for Ukraine. It is particularly acute within Eastern Ukraine, as there is a significant man-made pressure on the geological environment (GE) and, in particular, the drinking groundwater.

Buchak-kaniv aquifer (ВКА) is one of the main sources of drinking groundwater in the studied area. The water from this aquifer has historically been characterized by high quality and a stable chemical composition. But recently the composition of these waters has undergone significant transformational changes. There are the local elevated values of ele-

ments of both technogenic (surface) and natural (neotectonic) characters [5].

The current measures to control these changes, based on existing methodological recommendations [3, 7, etc.], are: - significantly expensive and resource-intensive; - requiring considerable time to collect, analyze data and develop appropriate recommendations. It is unacceptable in today's economic and environmental context.

Therefore, one of the key tasks of ecologists and hydrogeologists is to develop two components of a methodological approach for solving this problem. First, establishment of the ecological-hydrogeological factors of influence on the qualitative composition of groundwater. Due to improved recommended measures to changes in groundwater quality at the strategically important existing water intakes in the region will be controlled. In comparison with the existing measures, it is necessary to increase their efficiency by reducing costs and time for researches and analysis of the results. This will allow us to increase the speed of management decision-making to stabilize the composition of these waters.

Secondly, a justification of the ecologically safe use of BKA groundwater within the region of work. It is necessary to create a reserve of the high quality waters of target aquifer within the studied area. This problem has not been solved at all, but in the conditions of constant deterioration of these waters' quality it is very relevant.

Literature review. Many scientists have addressed the issues related to a study of the factors of groundwater quality deterioration and, on its basis, a development of measures to control changes in water composition and stabilization of water quality. It was papers both for the existing facilities (an improvement of ecological and geological researches of GE and, in particular, hydrogeochemical monitoring of groundwater), and for perspective ones (justification of areas determination for ecologically safe use of groundwater, creation of new water intake networks, etc.).

The main domestic and foreign studies, which are of great scientific interest to the authors, are given below.

One of the founders of modern methodology of ecological and geological researches of GE of Ukraine is Yakovlev Y. O. In the papers [1, 12], the scientist recommended, among other things, to include the GE zone of initial preservation as the boundaries of research territories. The hydrogeological substantiation of these boundaries was proposed on the basis of two levels of influence on GE – hydrogeofiltration and the hydrogeochemical (hydrogeomigration) levels. Also a study of the pollution levels (including groundwater) on the basis of

chemical elements background values has been further developed.

In the papers of Udalov I. V., Reshetov I. K., Amdzadi A. and others [10, 14] the use of the comprehensive approach in the ecological-geological studies of geological environment on the example of Eastern Donbas were described. It was recommended when assessing the level of GE components contamination (including groundwater) instead of the imperfect and outdated current norms, standards, etc. to use the indicators of geological background of area, which must be determined from the relevant values within the sites, which are distant from the centers of pollution and with minimal technogenic influence. The 4-degree levels of GE contamination have also been developed, from the satisfactory level to the threatening level.

Kononenko A. V., Lurie A. I. and Udalov I. V. in the article [17] developed the criteria to estimate the contamination levels of drinking groundwater for cretaceous water intakes of Eastern Ukraine with systematic hydrogeochemical monitoring at the local level. The basis is the priority indicators of water chemical composition, for which we observe an excess of maximum permissible concentrations (MPC) according to the current norms within the region of work. The authors have determined the following levels of contamination: within acceptable limits – up to 1 MPC, relatively polluted – within 1-2 MPC, contaminated – 2-3 MPC, heavily contaminated – more than 3 MPC.

In the papers of Yakovlev V. V. and Kononenko A. V. [4, 11], a scheme of rational placement of new cretaceous water intakes in the undeveloped areas of sandy river terraces along the Siverskyi Donets river and its tributaries with a possibility of further transportation of drinking high-quality water to the consumers was proposed within some territories of Eastern Ukraine. According to the articles, the active water exchange within the sandy river terraces causes a formation of large reserves of groundwater of high drinking quality. To justify this hypothesis, the prospective groundwater resources within the selected sites were calculated.

Modern papers of foreign scientists on an issue of quality control of drinking groundwater differ in breadth of coverage.

The articles by Molinari A., Guadagnini L., Marcaccio M. [18], Preziosi E., Parrone D., Del Bon A. [20], Dalla Libera N., Fabbri P., Mason L. [16] and others were aimed at developing a methodological approach to determine the most accurate geological background values of elements-indicators of groundwater qualitative composition. It is generally believed that a determination of the geological base content of components is one of the key factors in modeling the changes in the hydrochemical charac-

teristics of groundwater and identifying the causes of these changes. Thus, foreign scientists, when determining the real state of qualitative composition of waters, consider it more appropriate to compare the current content of component with the local geological background instead of the different norms, standards, etc.

The researchers, such as Weiwu Yan, Jialong Li, Xiaohui Bai [22], Abtahi M., Golchinpour N., Yaghmaeian K. [13] and some others developed a methodological approach to the assessment of water quality for standardization of these processes and to increase the efficiency when making management decisions to stabilize the composition of these waters. This was achieved by selecting only the locally important water quality indicators and establishing the relevant weighting factors for each of them.

The problem of operation modes optimization at the water intakes against the background of groundwater quality deterioration in them is urgent for scientists from different territories of the world. A special attention is given to this problem in the large and environmentally unstable agglomerations: Y. Chen, D. Han, J. Szabo, J. Hall in the USA cities [15, 21], S. Nurani Zulkifli, H. Abdul Rahim, W.-J. Lau in Kuala-Lumpur (Malaysia) [19], Y. Weiwu, L. Jialong, B. Xiaohui in Shanghai (China) [22] and others.

At present, the main disadvantage of foreign studies in this area is a lack of the comprehensive approach to solving the problem of assessing the drinking groundwater quality at the operational water intakes and developing the appropriate prompt measures to identify its quality deterioration.

Identification of previous unsolved parts of the general problem. The ecological and hydrogeological conditions that have led to the gradual deterioration of drinking groundwater quality are now present in the central part of DDAB. But the problem of stabilization of its chemical composition is still unresolved. The existing measures are not effective enough against the background of the current economic and environmental realities. According to the authors, it is necessary to solve this problem based on 2 components:

- identification of the destabilization factors of groundwater quality in the existing water intakes;
- development of the ecological-hydrogeological approach to ecologically safe use of drinking groundwater according to the identified factors.

Within the studied area, one of the strategic groundwater reserves is BKA. Therefore, the authors solved the above-mentioned problem by testing the performed researches on the waters of this aquifer.

The purpose of the paper is 2 components of a study of the BKA groundwater quality deterioration: - identification of the ecological and hydrogeological factors of influence on the water qualitative composition; - ensuring environmentally safe use of groundwater.

Tasks of the research: 1) to identify factors of influence on the qualitative composition of groundwater at the existing networks of Buchak-Kaniv water intakes of the investigated area and, on the basis of this, to propose the measures for hydrogeochemical monitoring of this water;

2) to justify a methodological approach for ensuring environmentally safe use of groundwater for the long term;

3) to carry out an approbation of the performed researches on the example of network of water intakes of Poltava city agglomeration.

Research novelty of the obtained results: - the factors of influence on the qualitative composition of groundwater at the Buchak-Kaniv water intakes were revealed for the first time on the basis of the analysis of geological, ecological-hydrogeological and neotectonic conditions of region;

- on the basis of these factors – the priority indicators of BKA water quality for its systematic hydrogeochemical monitoring under the infiltration of pollutants from the surface and their inflow from below in the zones of influence of tectonic structures have been proposed;

- for the first time a direct positive correlation between a change of the content of characteristic indicator elements of influence on the ecological-hydrogeological state of groundwater (mineralization, Cl^- , F^- , Fe_{total} , Br^- , B^{3+} , J^-) and the value of total water withdrawal in the zone of direct influence of tectonic faults of East-Poltava tectonic structure has been found;

- an approach for the ecologically safe use of target aquifer waters within the Buchak-Kaniv water intakes of Eastern Ukraine, based on the established correlation between the factors of influence and the qualitative composition of waters, has been developed.

Practical significance. Due to an approbation of the proposed water quality control system at Poltava water intakes network, which is strategically important within the region of research, an optimization of the total water withdrawal at the water intakes has been justified (the recommended limit is 50-60 thousand m^3/day).

The perspective areas for location of new water intakes within a 40 km radius around Poltava city have been identified (a total area – 750 km^2). The estimated resources of drinking groundwater (54.5 thousand m^3/day) have been calculated. As these resources are in use, it is possible to gradually re-

place the current water supply of urban agglomeration with high-quality groundwater.

Materials and methods of research. The authors' research is based on an analysis of the results of over 700 groundwater chemical analyses of the target aquifer within the region of work. Chemical researches have been carried out during the period of active man-made pressure on the GE of studied territory (1960-2015).

Geological and ecological information has been also used – data about the technogenic pressure on the groundwater of territory (a water withdrawal at the high power water intakes, the level regime of exploited aquifers, a presence of the existing and potential sources of depletion and pollution of groundwater and a character of their location, etc.). The available current data of neotectonic conditions of studied area have been also used. The basis has been tectonic structure along the reflection horizon IVb (T) [2], the tectonic faults can affect the hydrogeological conditions of zone of active water exchange within it.

The following methods of obtaining, processing and interpretation of necessary ecological-hydrogeological data have been used in the work: field, chemical-analytical, comparative and graphical methods. In addition, a number of the common research methods have been used for the information processing – an analysis, a synthesis, a systematization, a classification, a modelling. Mathematical and statistical methods have been also used in the processing of received large data set. The interpolation and analogy methods have been used to simulate changes in the groundwater hydrochemical features using MapInfo Professional 10.0.

Results and discussion. The authors have found that the dominant factors in the formation of groundwater composition of buchak-kaniv aquifer at the present time are natural phenomena, which have been activated by deep hydrogeomigration processes and the anthropogenic component. This is indicated by the transformation of water quality during the period of active man-made pressure on GE of region (1960-2015) towards an increase in the content of characteristic components (Cl^- , F^- , Fe_{total} , Br^- , B^{3+} , J). But also, the increased values of surface pollutants are occasionally found in waters (NO_2^- , NH_4^+ and some others).

According to these influencing factors the quality of groundwater composition, it was necessary to develop the appropriate measures to control changes in the quality of these waters. In doing so, they should: - include these characteristics and reasons for changes in the water composition; - be effective, operative and economically advisable when making the appropriate management decisions.

The recommendations are given for both existing water intakes networks and new ones. To improve the system of hydrogeochemical monitoring was the most advisable for the existing ones. For new ones – a justification of determination of perspective areas for the location of new water intakes networks to solve the problem of shortage of drinking groundwater of acceptable quality within the works territory.

In the paper, the authors have tested the performed research on the example of water intakes network of Poltava city agglomeration that is strategically important within this region. A large number of the evenly located water intakes and the good ecological and hydrogeological study of area indicate a possibility of organizing these works without additional economic cost.

Recommendations for the existing water intakes networks. The authors have identified 2 levels of the required monitoring work – general and special.

1) *General level.* The works are carried out within the area of influence of investigated water intakes network on GE. The boundaries of influence can be determined in 3 options, depending on the available actual data.

First, the hydrogeofiltration level of water intakes impact on GE. In view of the fact that the ecological changes occur with a stable disturbance of the dynamic equilibrium of GE, ecologically significant boundaries of changes in hydrogeofiltration conditions can be attributed to the area of depression funnels with a lowering of the water level that exceeds the natural average long-term fluctuations of groundwater level [1]. That is, the boundaries of local depression funnel that appeared because of the operation of investigated water intakes may be these limits.

Secondly, the hydrogeochemical level of influence on GE. In this case, the boundaries may be the limits of groundwater zone with changed (compared with geological base values) composition.

In the third case, in the absence of other data, it is possible to use the territory of the third zone of sanitary protection that would be calculated for the investigated water intake. The boundaries of this zone are determined according to the hydrodynamic calculations [9]. The initial conditions are if the microbial (unstable) and/or the chemical (stable) pollutants fall into the aquifer outside this zone, they will not reach the water intake or reach the estimated time (at least 25 years).

The recommendations developed by the authors for hydrogeochemical monitoring are based on the following:

- priority groundwater quality indicators with the established elevated values in the waters of tar-

get aquifer have been identified. This significantly reduces time and cost of work in comparison with the full range of hydrogeochemical studies;

- criteria for assessing groundwater pollution levels for these indicators have been proposed. This allows increasing the efficiency when making management decisions to stabilize groundwater quality.

It is known that one of the main characteristics of technogenic geochemical anomaly is its intensity, determined by the degree of chemical elements accumulation in comparison with the geological base content (GBC). Therefore, the proposed criteria for assessing groundwater pollution levels are based on the use of average elements GBC that has been defined by the authors for the waters of the territory.

GBC has been determined from the relevant values within the territories that are far from the sources of pollution and with minimal technogenic influence. In the case of absence of these data, MPC of an element has been used according to the current standards [3].

3 levels of water pollution have been identified (Table 1). The unpolluted water: the content of researched component – if the data of average geological base content are available – up to 1 GBC inclusive, if this data are missing – up to 1 MPC inclusive. The relatively polluted water: from 1 to 1.5-2 GBC or from 1 to 3 MPC respectively. The contaminated water: 1.5-2 GBC and more or 3 MPC and more respectively.

Table 1

The proposed levels of groundwater pollution during general monitoring work

Name of the indicator, units	Groundwater pollution levels			
	unpolluted water		relatively polluted water (a time of making management decisions)	The contaminated water
	Within the average GBC	Within the current standards [3]		
physical and chemical indicators				
Mineralization, mg/dm ³	≤ 1150	≤ 1000	1150-2300	≥ 2300
pH	≤ 7,6	6,5-8,5	7,6-11,4	≥ 11,4
Cl ⁻ , mg/dm ³	≤ 275	≤ 250	275-550	≥ 550
Fe _{total} , mg/dm ³	≤ 0,25	≤ 0,2	0,25-0,5	≥ 0,5
sanitary and toxicological indicators				
Na ⁺ +K ⁺ , mg/dm ³	≤ 300	≤ 200	300-600	≥ 600
F ⁻ , mg/dm ³	≤ 2,0	≤ 1,5	2,0-4,0	≥ 4,0
NH ₄ ⁺ , mg/dm ³	≤ 0,3	≤ 0,5	0,3-0,6	≥ 0,6
NO ₂ ⁻ , mg/dm ³	≤ 0,1	≤ 0,1	0,1-0,2	≥ 0,2
Si, mg/dm ³	no data available	≤ 10	10-30	≥ 30
physical and chemical+Sanitary and toxicological indicators				
Br ⁻ +B ³⁺ +J ⁻ (total), mg/dm ³	≤ 0,5	≤ 0,55	0,5-1,0	≥ 1,0

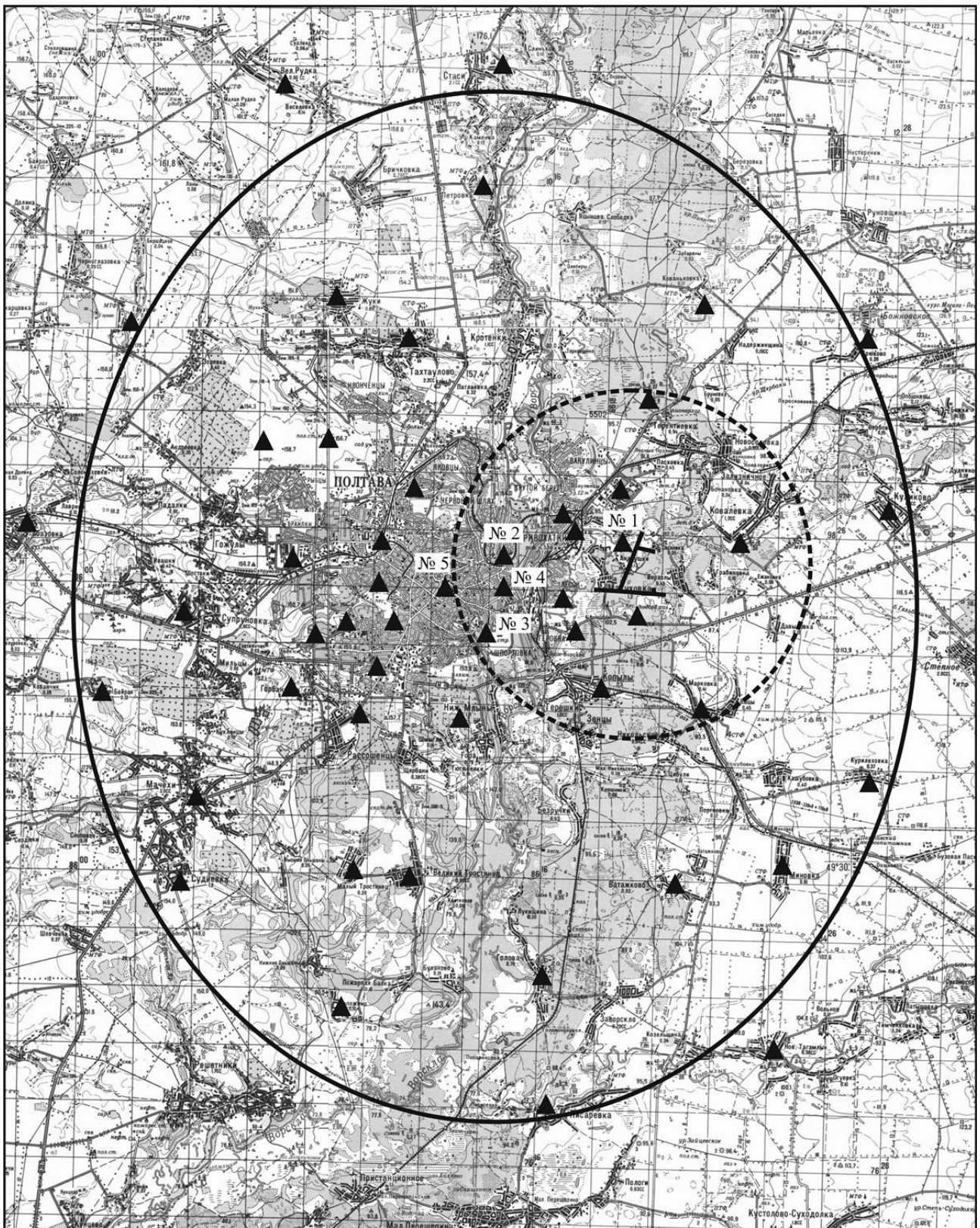
It is also necessary to carry out the hydrogeological observations (control of water withdrawal and level regime) within the whole established territory of influence of the studied water intakes network on GE. The most relevant is information about the edge areas. It allows us to quickly monitor changes in the boundaries of this zone.

General monitoring level in the water intakes network of Poltava city. The territory of distribution of BKA modern local depression funnel, which appeared due to the operation of investigated water intakes, has been proposed as the boundaries of works territory (Figure 1). The boundaries of territory against the background of active technogenesis of area are constantly changing, so the role of hydrogeological data of edge water intakes is increasing.



It is also important to control the depth of depression funnel within the city.

An analysis of the groundwater chemical composition of target aquifer within the researched territory has showed that the waters composition at the water intakes of Poltava city is diverse enough according to the local ecological and hydrogeological conditions (Table 2). Unpolluted, relatively polluted water and even contaminated water is observed (in terms of Fe_{total}, F⁻, Br⁻+B³⁺+J⁻ and periodic increase of NH₄⁺ and NO₂⁻ content).

2) Special level. The monitoring studies should be conducted within the areas with the greatest transformational changes in the groundwater quality. As a result of active influence of neotectonic processes, the processes of deep mineralized groundwater discharge into the drinking waters of a zone of



Legend:

-  The territory of proposed general level ecological-hydrogeological monitoring studies
-  The territory of proposed special level ecological-hydrogeological monitoring studies



-  The tectonic faults within the East Poltava tectonic structure
-  The buchak-kaniv water intakes

Fig. 1. The map-scheme of territories of proposed general and special levels of ecological-hydrogeological (first of all, hydrogeochemical) monitoring studies for the water intakes of Poltava city

Table 2

The levels of groundwater pollution at the water intakes of Poltava city

Name of the indicator, units	Groundwater state in Poltava water intakes, pollution level (indicator content)	
	water intakes in the eastern part of territory	other water intakes
physical and chemical indicators		
Mineralization, mg/dm ³	Relatively polluted (1352-1400)	Unpolluted (700-1100)
pH	Relatively polluted (8,3-9,2)	Relatively polluted+ Unpolluted (6,3-8,9)
Cl ⁻ , mg/dm ³	Relatively polluted (about 550)	Relatively polluted+ Unpolluted (199-348)
Fe _{total} , mg/dm ³	Contaminated (about 1,2)	Contaminated+ Relatively polluted+ Unpolluted (0,1-2,2)
sanitary and toxicological indicators		
Na ⁺ +K ⁺ , mg/dm ³	Relatively polluted (368-449)	Relatively polluted (295-371)
F ⁻ , mg/dm ³	Contaminated (about 7,0)	Contaminated+ Relatively polluted (2,4-4,2)
NH ₄ ⁺ , mg/dm ³	Contaminated+Relatively polluted+Unpolluted (0,0-0,8)	
NO ₂ ⁻ , mg/dm ³	Contaminated+Relatively polluted+Unpolluted (0,0-1,0)	
Si, mg/dm ³	Relatively polluted (12,8-15,4)	
The physical and chemical+Sanitary and toxicological indicators		
Br ⁻ +B ³⁺ +J ⁻ (total), mg/dm ³	Contaminated (about 1,25)	Contaminated+ Relatively polluted (0,55-1,2)

active water exchange are characteristic within the researched region. Numerous faults within the tectonic structures serve as migration zones. As established by the authors [5], gradual change in the chemical composition of waters to the chloride-sodium type and the increase in salt content occur under the influence of neotectonic factor. The groundwater concentration of some macro- and micro-components is also increasing to non-GBC.

The boundaries of a special level of monitoring studies are the territories where the maximum influence of described above natural processes on the quality of groundwater is possible. The authors found that these are the areas of intersection of in-

fluence zones of powerful water intakes and the territories within a 5 km radius around the hydrodynamically active tectonic faults.

Studying hydrogeochemical component in the operational modes of powerful water intakes in the region, the authors determined critical values of specific elements-indicators that revealed the above-mentioned transformation processes. The stages of groundwater quality change were also defined. They formed the basis for the proposed hydrogeochemical monitoring system (Table 3).

Also, at the special research level, the hydrogeological part of monitoring (the observation of water withdrawal and level regime) is important for con-

Table 3

Determined stages of groundwater quality change in the areas of special monitoring researches

Name of the indicator, units	Stages of groundwater quality change		
	I stage – minimum	II stage – indicator (a time of making management decisions)	III stage – critical
Mineralization, mg/dm ³	≤ 1400	1400-1600	≥ 1600
Cl ⁻ , mg/dm ³ / % equivalent	≤ 350 / 30	350-450 / 30-35	≥ 450 / 35
F ⁻ , mg/dm ³	≤ 3,5	3,5-4,0	≥ 4,0
Br ⁻ +B ³⁺ +J ⁻ (total), mg/dm ³	≤ 1,0	1,0-1,5	≥ 1,5
Fe _{total} , mg/dm ³	≤ 0,5	0,5-1,0	≥ 1,0

trolling possible influence of technogenic component on the activation of changes in water composition. The result of these works is to obtain regularities that optimize the operational modes of studied water intakes.

The special level of monitoring in the water intakes network of Poltava city. The area of research is a 5 km radius around the tectonic faults within the East Poltava tectonic structure (Figure 1).

The developed recommendations were tested on the example of water intakes No. 1-5. The integrated studies of hydrogeological and hydrogeochemical components of monitoring were conducted (Figure 2). The results of chemical analyses at the Buchak-Kaniv water intakes and general data of water withdrawal by 2 major operational aquifers of region, which have a close hydraulic connection here (buchak-kaniv and cenomanian-lower cretaceous aquifers), were taken into account.

According to the results of a correlation analysis, data on the water intake No. 1 shows a direct positive correlation between a change of the content of characteristic indicator elements and the value of total water withdrawal in the area of direct influence of tectonic faults (a distance less than 0.5 km). The Pearson correlation coefficients $r = 0.70-0.90$ were calculated. At the same time, for the other water intakes (a distance is about 3.2-5 km) $r = 0.43-0.68$.

As a result, regularities that allowed substantiating optimization of total water withdrawal within the water intake network of Poltava city were obtained. For the content of the studied components within the whole zone of special monitoring not to exceed the established critical values (Table 3), it is necessary to extract r up to 100 thousand m^3/day water. And for the gradual restoration of disturbed constant ecological balance in the solution-rock system and a return of the hydrogeochemical parameters to the geological base content, it is necessary not to increase the modern pressure on the groundwater. That is, the total water withdrawal should be up to 50-60 thousand m^3/day .

Recommendations for new water intakes networks. Determination of perspective areas for the location of new water intakes of different capacity, with a possibility of further transportation of high quality drinking water to the consumers to solve the problem of drinking groundwater shortage of acceptable quality within the territory was justified.

A methodological approach to the allocation of sites is based on a complex system of ranking the territory by the degree of risk of groundwater contamination [6], developed by the authors.

The promising areas are considered according to 3 parameters.

1) The indicator of groundwater protection from technogenic pollution, which comes during the

process of downward vertical filtration and migration from the earth's surface. It was calculated as the sum of 5 indexes that are multiplied by rating (weighting) coefficients:

- index of lithology of the upper (near-surface) part of cross-section (the weighting factor 1.5);
- index of own geological protection of the first inter-layer aquifer (the weighting factor 5);
- sediments permeability index of the first inter-layer aquifer (the weighting factor 1.5);
- permeability index of a separate layer (the weighting factor 10);
- rate index of vertical flow through the separate layer (the weighting factor 10).

2) The indicator of groundwater protection from the possible transformation of composition as a result of the active influence of neotectonic processes. It depends on 2 indexes: the distance to the nearest established tectonic faults; the total amplitudes of neogene-quaternary movements of the Earth's crust as a parameter that maximally influences on the activity of hydrogeomigration processes within these faults.

3) A thickness of the reservoir rocks of target aquifer. This indicator is correlated with the value of water enrichment of aquifer. An use this index makes it possible to design forward-looking water intakes with varied capacity.

In terms of a result of GIS calculations, *the perspective areas for location of new water intakes within a 40 km radius around Poltava city were identified* (Figure 3). The territories are divided into 2 categories:

- perspective for the location of new low and medium power water intakes (an area of about 470 km^2). Concentrated in the southern, western and northwestern parts of region. They are characterized by high and conditional groundwater protection from the possible surface contamination. Also these areas are favorable in view of the neotectonic conditions – a distance to the territories with established tectonic faults and with significant amplitudes of neogene-quaternary movements of the Earth's crust (150 m and more) is more than 5 km;

- perspective for the location of new high power water intakes (about 280 km^2). Located to the south and northwest of city. In addition to the ecological-hydrogeological advantages of previous areas, there are the reservoir sands of Buchak-kaniv aquifer with the highest thickness – more than 30 m. That is, the potential volume of exploitation resources of aquifer within these territories is the maximum.

According to the method of areal differentiation of underground flow module in terms of the papers [4, 11], the authors calculated the projected resources of BKA drinking groundwater within the

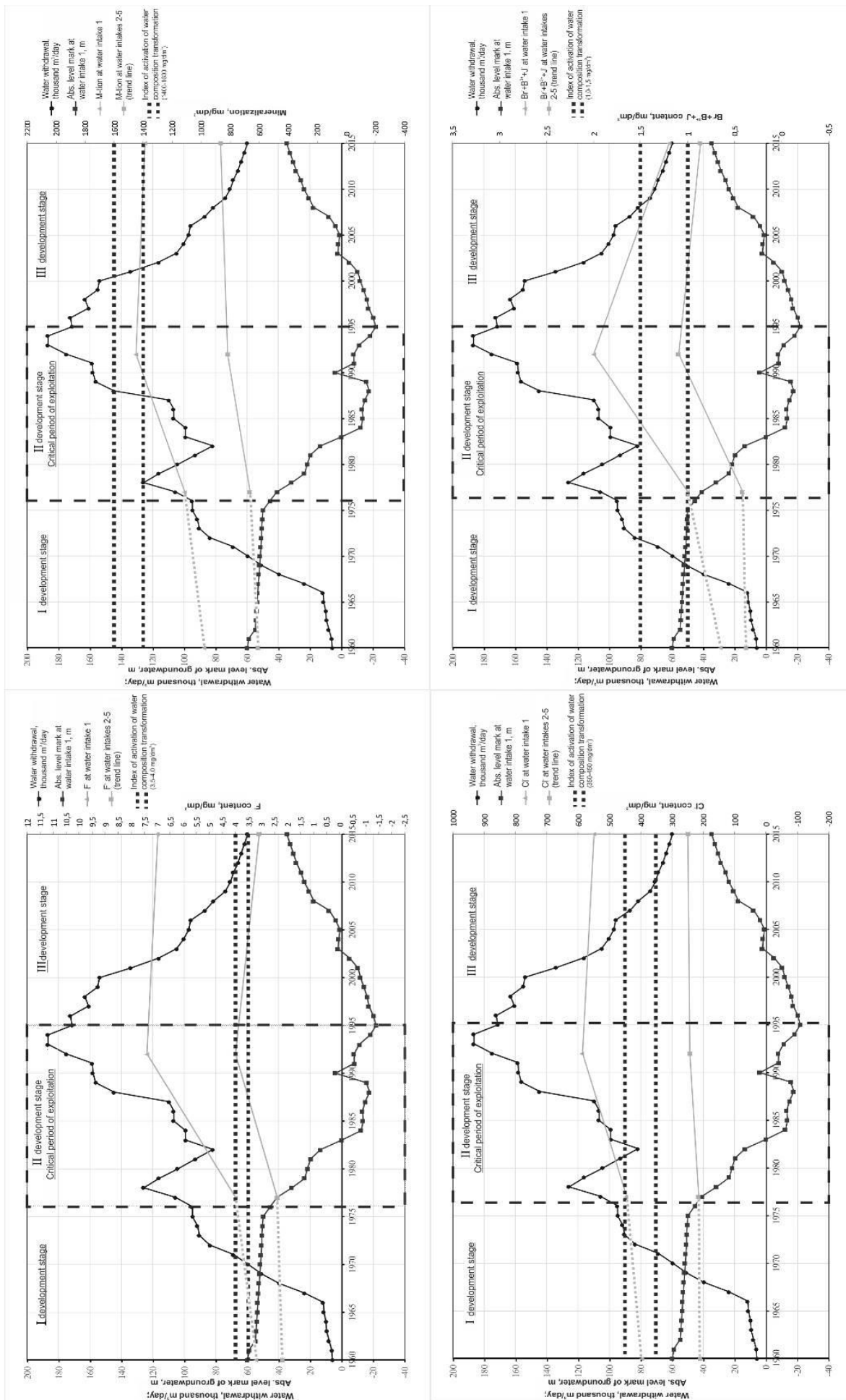


Fig. 2. The results of monitoring studies at the water intakes No. 1-5 of Poltava city

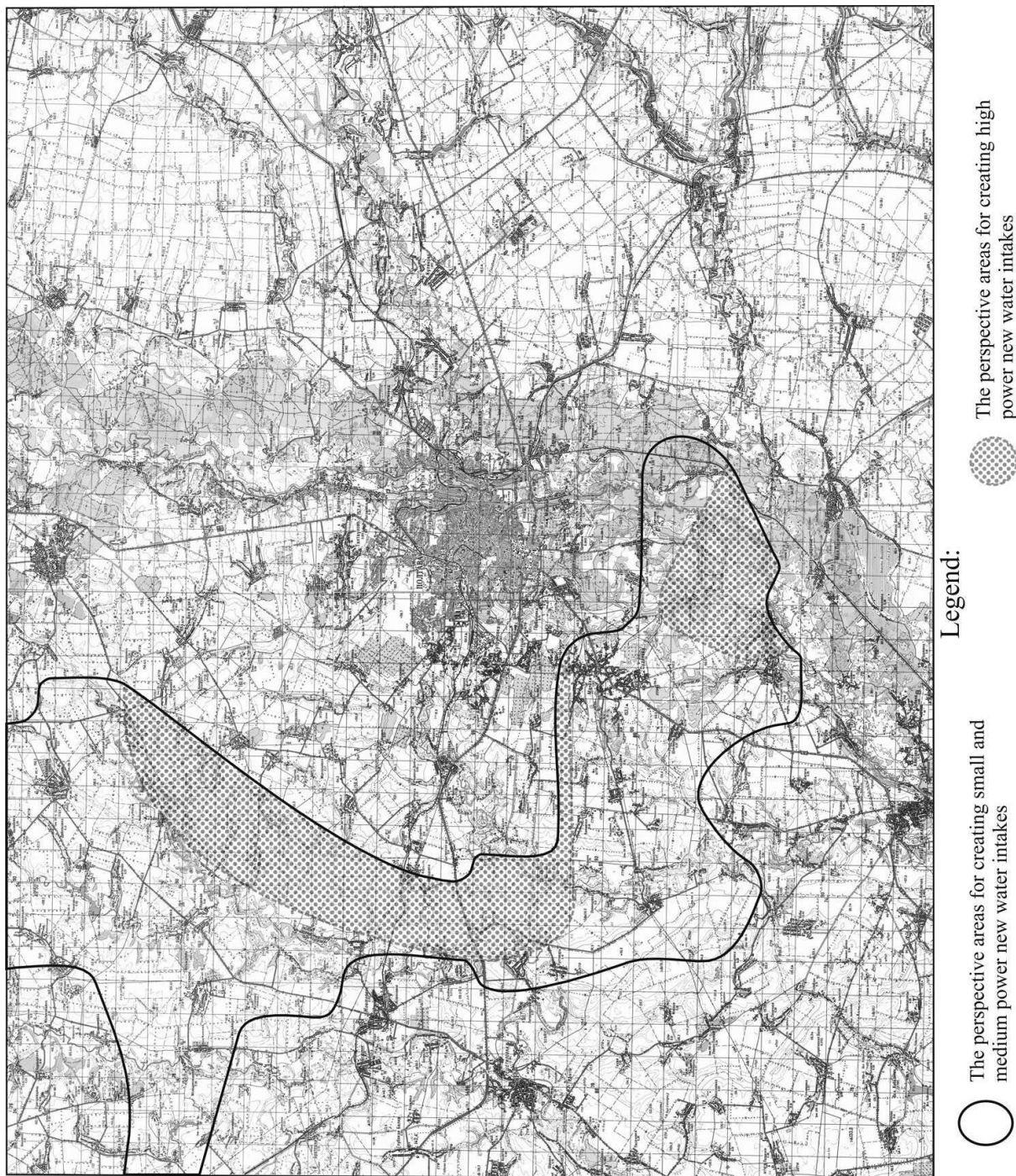


Fig. 3. The map-scheme of perspective areas for creating new water intakes within a 40 km radius around Poltava city

perspective sites by the formulas:

$$1) M_{uf} = M_o F_o / [F_s + (F_o - F_s)(C_s / C_r)],$$

where M_{uf} – the underground flow module for the established sites, $dm^3/s \cdot km^2$; M_o – the average value of underground flow module for the target aquifer of region (0,74 – according to Rudenko, F. A. (1971). Hydrogeology of the USSR, vol. V), $dm^3/s \cdot km^2$; F_o – a total area of the territory within a 40 km radius around Poltava city, km^2 ; F_s – an area of the researched sites, km^2 ; C_s – the indicator of mineralization of target groundwater within the studied sites, mg/dm^3 ; C_r – the indicator of mineralization of target groundwater within another part of the territory with a 40 km radius around Poltava city, mg/dm^3 ;

$$2) Q_{prs} = M_{uf} * F_s.$$

The obtained perspective resources (Q_{prs}) amounted to $630 dm^3/s$ or 54.5 thousand m^3/day , which is approximately equal to the current total water withdrawal of drinking groundwater at the water intakes of Poltava city (50-60 thousand m^3/day). That is, due to the using of these resources it is possible to gradually replace the current water supply of urban agglomeration with high-quality groundwater.

Conclusions. There are 2 science-based components of the research of groundwater quality deterioration of BKA within the central part of DDAB in the paper: - a determination of the ecological-hydrogeological factors of influence on the qualitative

composition of these waters; - a justification of the ecologically safe groundwater use.

Based on the analysis of geological, ecological-hydrogeological and neotectonic conditions of the region, the factors of influence on the groundwater qualitative composition at the Buchak-Kaniv water intakes, which are grouped into the factors of technogenic (surface) and natural (neotectonic) character, have been identified.

The priority indicators of BKA water quality for its systematic hydrogeochemical monitoring under the infiltration of pollutants from the surface and their inflow from below in the zones of influence of tectonic structures have been proposed. It is recommended to control their contents on the basis of 2 levels – general (a control of the whole complex of actual pollutants in the areas of water intakes influence) and special (a control of mineralization, Cl^- , F^- , Fe_{total} , Br^- , B^{3+} , J in the areas of intersection of influence zones of powerful water intakes and the territories within a 5 km radius around the hydrodynamically active tectonic faults).

An approach for the ecologically safe use of target aquifer waters within Eastern Ukraine, based on the established correlation between the factors of influence and the qualitative composition of waters, has been developed. The high-quality groundwater sites for further transportation of these waters to the consumers have been justified.

The whole complex of performed researches was tested on the network of water intakes of Poltava city agglomeration, which is strategically important within the region. The levels of groundwater contamination at the water intakes have been established. The unpolluted, relatively polluted water and even contaminated water were observed (in terms of Fe_{total} , F^- , $\text{Br}^- + \text{B}^{3+} + \text{J}$ and periodic increase of NH_4^+ and NO_2^- content).

According to the results of correlation analysis, a direct positive correlation (the Pearson correlation coefficients $r = 0.70-0.90$) between a change of the content of characteristic indicator elements and the value of total water withdrawal in the area of direct influence of tectonic faults of East-Poltava tectonic structure has been found. As a result, the regularities that allowed substantiating the optimization of total water withdrawal within the water intake network of Poltava city were obtained (the limit of 50-60 thousand m^3/day).

The perspective areas for location of new water intakes within a 40 km radius around Poltava city were identified (total area – 750 km^2). The estimated resources of drinking groundwater (54.5 thousand m^3/day) have been calculated. Due to the using of these resources it is possible to gradually replace the current water supply of urban agglomeration with high-quality groundwater.

References

1. *Временное методическое руководство по проведению комплексных эколого-геологических исследований (на территории Украины) [Text] / под ред. Е. А. Яковлева [и др.]*. – К.: ГПП «Геопрогноз», 1994. – 331 с.
2. Гузік Я. І. Узагальнення та оперативний аналіз геолого-геофізичних матеріалів в центральній частині Дніпровсько-Донецької западини за 2007-2009 рр. [Text] / Я. І. Гузік. – ДГП «Укргеофізика» Східно-Українська геофізична розвідувальна експедиція. – Полтава, 2009. – 85 с.
3. *Державні санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»: ДСанПіН 2.2.4-171-10 [Text]*. – К.: Міністерство охорони здоров'я України, 2010. – № 400. – 45 с.
4. Кононенко А. В. Обґрунтування раціонального розміщення нових водозаборів в мергельно-крейдяному водоносному горизонті на території Східної України [Text] / А. В. Кононенко, В. В. Яковлев // *Hungarian scientific journal (electronic version of the journal)*, 2018. – № 23. – С. 8-14.
5. Левонюк С. М. Еколого-гідрохімічні особливості трансформації якості питних підземних вод під впливом техногенних та неотектонічних факторів (на прикладі бучацько-канівських водозаборів Східної України) [Text] / С. М. Левонюк, І. В. Удалов // *Пошукова та екологічна геохімія*, № 1 (19). – К., 2018. – С. 30-40.
6. Левонюк С. М. Комплексна геоекологічна оцінка захищеності питних підземних вод [Text] / С. М. Левонюк, І. В. Удалов // *Вісник Одеського нац. університету. Серія: «Географічні та геологічні науки»*. – Том 23, випуск 2 (33). – Одеса, 2018. – С. 111-133.
7. *Методические рекомендации по организации и ведению мониторинга подземных вод (изучение режима химического состава подземных вод) [Text]*. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. – 76 с.
8. Огняник Н. С. Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами [Text] / Н. С. Огняник, Н. К. Парамонова, А. Л. Брикс [и др.]. – К.: LAT&K, 2013. – 254 с.
9. *Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2-х и 3-х поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения [Text] / Под ред. Е. М. Бирюковой*. – М.: ВНИИ «ВОДГЕО», 1983. – 102 с.
10. Удалов І. В. Еколого-геологічне картографування та моніторинг геологічного середовища: навчальний посібник [Text] / І. В. Удалов, І. К. Решетов. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. – 152 с.
11. Яковлев В. В. Подземные воды борových террас как источник питьевого водоснабжения [Text] / В. В. Яковлев // *Вісник Харківського нац. університету. Сер. «Геологія – Географія – Екологія»*. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2008. – Вип. 29. – № 824. – С. 43-48.

12. Яковлев С. О. Еколого-геохімічна оцінка забруднення ґрунтів, донних відкладів, ґрунтових вод. Методичні рекомендації [Text] / С. О. Яковлев, І. В. Мельник, А. І. Дубицький. – К.: ДГП «Геоінформ», 1998. – 34 с.
13. Abtahi, M. A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran [Text] / M. Abtahi, N. Golchinpour, K. Yaghmaeian [Eds.] // *Ecological Indicators*, June 2015. – Vol. 53. – P. 283-291.
14. Aziz, A. Rational integration of ecologic-geological studies [Text] / A. Aziz, I. V. Oudalov, N. Rouhollah [Eds.] // *Ecology, Environment and Conservation Paper*, 2015. – Vol. 21, Issue 4. – P. 1625-1631.
15. Chen, Y. Water quality monitoring in smart city: A pilot project [Text] / Y. Chen, D. Han // *Automation in Construction*, May 2018. – Vol. 89. – P. 307-316.
16. Dalla Libera, N. Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater [Text] / N. Dalla Libera, P. Fabbri, L. Mason [Eds.] // *Science of The Total Environment*, November 2017. – Vol. 598. – P. 330-340.
17. Kononenko, A. Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine [Text] / A. Kononenko, A. Lurie, I. Udalov // *Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften): Düsseldorf (Germany): Auris Verlag*, 2018. – № 2. – P. 13–17.
18. Molinari, A. Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies [Text] / A. Molinari, L. Guadagnini, M. Marcaccio [Eds.] // *Water Research*, February 2019. – Vol. 149. – P. 522-532.
19. Nurani Zulkifli, S. Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications [Text] / S. Nurani Zulkifli, H. Abdul Rahim, W.-J. Lau // *Sensors and Actuators B: Chemical*, February 2018. – Vol. 255, Part 3. – P. 2657-2689.
20. Preziosi, E. Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method [Text] / E. Preziosi, D. Parrone, A. Del Bon [Eds.] // *Journal of Geochemical Exploration*, August 2014. – Vol. 143. – P. 43-53.
21. Szabo, J. On-line Water Quality Monitoring for Drinking Water Contamination [Text] / J. Szabo, J. Hall // *Comprehensive Water Quality and Purification*, 2014. – Vol. 2. – P. 266-282.
22. Weiwu, Y. Comprehensive assessment and visualized monitoring of urban drinking water quality [Text] / Y. Weiwu, L. Jialong, B. Xiaohui // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, July 2016. – Vol. 155. – P. 26-35.

Author's contribution: all authors made an equal contribution to this work.

UDC 504.064:556.314

Serhii Levoniuk,

Researcher, Ukrainian Scientific Research Institute for Natural Gases,
20 Himnasiyna Emb., Kharkiv, 61010, Ukraine,
e-mail: sergii.levonyuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4073-8152>;

Vitaliy Samoilov,

PhD (Geology), Head of the Department, Ukrainian Scientific Research Institute for Natural Gases,
e-mail: samoilov_gas@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0650-2808>;

Igor Udalov,

Doctor of Sciences (Geology), Associate Professor, Head of the Department of Hydrogeology,
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: igorudalov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3844-6481>;

Viacheslav Petik,

PhD (Technics), Senior Lecturer, Department of Hydrogeology,
V.N. Karazin Kharkiv National University,
e-mail: nemuk1310@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4055-0926>

THE ECOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTORS OF QUALITATIVE COMPOSITION DESTABILIZATION OF DRINKING GROUNDWATER WITHIN THE CENTRAL PART OF DDAB

Formulation of the problem. The paper is devoted to a topical environmental theme – a study of the destabilization of drinking groundwater quality in the conditions of modern intensive technogenesis of geological environment.

The purpose of the article is 2 components of a study of the groundwater quality deterioration of buchak-kaniv aquifer: - an identification of the ecological and hydrogeological factors of influence on the water qualitative composition; - an ensuring of the environmentally safe use of groundwater.

Materials and methods. The research is based on an analysis of the results of over 700 groundwater chemical analyses of the target aquifer within the region. The chemical researches have been carried out dur-

ing the period of active man-made pressure on the geological environment of studied territory (1960-2015). The available current data of geological, ecological and neotectonic conditions of studied area have been also used.

The following methods of obtaining, processing and interpretation of necessary ecological-hydrogeological data have been used in the paper: field, chemical-analytical, comparative and graphical methods. A number of the common research methods have been used for the information processing – an analysis, a synthesis, a systematization, a classification, a modeling. The mathematical and statistical methods have been also used in the processing of received large data set. The interpolation and analogy methods have been used to simulate changes in the groundwater hydrochemical features using MapInfo Professional 10.0.

Results and scientific novelty. For the first time on the basis of analysis of geological, ecological-hydrogeological and neotectonic conditions of region, the factors of influence on the qualitative composition of groundwater at the buchak-kaniv water intakes were revealed.

On the basis of these factors – the priority indicators of buchak-kaniv aquifer water quality for its systematic hydrogeochemical monitoring under the infiltration of pollutants from the surface and their inflow from below in the zones of influence of tectonic structures have been proposed.

For the first time a direct positive correlation between a change of the content of characteristic indicator elements of influence on the ecological-hydrogeological state of groundwater (mineralization, Cl^- , F^- , Fe_{total} , Br^- , B^{3+} , J) and the value of total water withdrawal in the zone of direct influence of tectonic faults of East-Poltava tectonic structure has been found.

An approach for the ecologically safe use of target aquifer waters within the buchak-kaniv water intakes of Eastern Ukraine, which is based on the established correlation between the factors of influence and the qualitative composition of waters, has been developed.

Practical significance. Due to an approbation of the proposed water quality control system at the Poltava water intakes network, which is strategically important within the region of research, an optimization of the total water withdrawal at the water intakes has been justified (the recommended limit is 50-60 thousand m^3/day).

The perspective areas for location of new water intakes within a 40 km radius around Poltava city have been identified (a total area – 750 km^2). The estimated resources of drinking groundwater (54.5 thousand m^3/day) have been calculated. Due to the using of these resources it is possible to gradually replace the current water supply of urban agglomeration with high-quality groundwater.

Keywords: water intakes, buchak-kaniv aquifer, transformation of drinking groundwater quality, hydrogeochemical monitoring, perspective resources.

References

1. Yakovlev, Ye. A. (Eds.). (1994), *Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu kompleksnykh ekologo-geologicheskikh issledovaniy (na territorii Ukrainy) [Temporary guidelines for the conduct of integrated environmental and geological research (in Ukraine)]*, Kiev: GGP «Geoprognoz», 331.
2. Guzik, Ya. I. (2009), *Uzagal'nennya ta operatyvnyj analiz geologo-geofizychnykh materialiv v central'nij chasty'ni Dniprov's'ko-Donecz'koyi zapady'ny' za 2007-2009 rr. [Generalization and operative analysis of geological and geophysical materials in the central part of Dnieper-Donetsk basin for 2007-2009]*, DGP «Ukrgeophysics» East-Ukrainian geophysical prospecting expedition, Poltava, 85.
3. *Derzhavni sanitarni pravy'la i normy' «Gigiyenichni vy'mogy' do vody' py'tnoyi, pry'znachenoyi dlya spozhyvannya lyudy'noyu»: DSanPiN 2.2.4-171-10 [State sanitary rules and norms "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption": DSanPiN 2.2.4-171-10]*, Kyiv: Ministerstvo oxorony' zdorov'ya Ukrainy', 400, 45.
4. Kononenko, A. V., Yakovlyev, V. V. (2018), *Obg'runtuvannya racional'nogo rozmishhennya novy'x vodozaboriv v mergel'no-krejdyanomu vodonosnomu gory'zonti na tery'toriyi Sxidnoyi Ukrainy' [Substantiation of rational placement of new water intakes in marl-chalk aquifer in the territory of Eastern Ukraine]*, Hungarian scientific journal (electronic version of the journal), 23, 8-14.
5. Levonyuk, S. M., Udalov, I. V. (2018), *Ekologo-gidroximichni osobly'vosti transformaciyi yakosti py'tny'x pidzemny'x vod pid vplyvom texnogenny'x ta neotektonichny'x faktoriv (na pry'kladi buchacz'ko-kanivs'ky'x vodozaboriv Sxidnoyi Ukrainy') [Ecological-hydrochemical features of drinking groundwater quality transformation under the influence of technogenic and neotectonic factors (on the example of buchak-kaniv water intakes in Eastern Ukraine)]*, Search and ecological geochemistry, 1 (19), 30-40.
6. Levonyuk, S. M., Udalov, I. V. (2018), *Kompleksna geoeologichna ocinka zaxy'shhenosti py'tny'x pidzemny'x vod [Comprehensive geo-environmental assessment of drinking groundwater protection]*, Bulletin of Odessa National University. Series: Geographical and geological sciences, 2 (33), 111-133.

7. *Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i vedeniyu monitoringa podzemnykh vod (izuchenie rezhima khimicheskogo sostava podzemnykh vod) [Guidelines for the organization and management of groundwater monitoring (study of the groundwater chemical composition)]*, Moscow: VSYeGINGYeO, 76.
8. Ognyanik, N. S., Paramonova, N. K., Briks, A. L. (Eds.). (2013), *Ekologo-gidrogeologicheskii monitoring territoriy zagryazneniya geologicheskoy srede legkimi nefteproduktami [The ecological and hydrogeological monitoring of territories of geological environment contamination by light oil products]*, Kiev: LAT&K, 254.
9. Biryukova, Ye. M. (1983), *Rekomendatsii po gidrogeologicheskim raschetam dlya opredeleniya granits 2-kh i 3-kh poyasov zon sanitarnoy okhrany podzemnykh istochnikov khozyaystvenno-pitevogo vodosnabzheniya [The recommendations on hydrogeological calculations to determine the boundaries of second and third zones of sanitary protection zones of underground sources of drinking water supply]*, Moscow: VNII «VODGYeO», 102.
10. Udalov, I. V., Reshetov, I. K. (2012), *Ekologo-geologichne kartografuvannya ta monitoryng geologichnogo seredovy`shha: navchal`ny`j posibny`k [Ecological-geological mapping and geological environment monitoring: a textbook]*, Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 152.
11. Yakovlev, V. V. (2008), *Podzemnye vody borovykh terras kak istochnik pitevogo vodosnabzheniya [Groundwater of bor terraces as a source of drinking water]*, Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology-Geography-Ecology", 29, 824, 43-48.
12. Yakovlev, Ye. O., Mel`ny`k, I. V., Duby`cz`ky`j, A. I. (1998), *Ekologo-geoximichna ocinka zabrudnennyya g`runtiv, donny`x vidkladiv, g`runtovy`x vod. Metody`chni rekomendaciyi [Ecological-geochemical assessment of contamination of soil, bottom sediments, groundwater. Guidelines]*, Kyiv: DGP «Geoinform», 34.
13. Abtahi, M., Golchinpour, N., Yaghmaeian, K. (Eds.). (2015), *A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran. – Ecological Indicators*, 53, 283-291.
14. Aziz, A., Oudalov, I. V., Rouhollah, N. (Eds.). (2015), *Rational integration of ecologic-geological studies. – Ecology, Environment and Conservation Paper*. 21, 4, 1625-1631.
15. Chen, Y., Han, D. (2018), *Water quality monitoring in smart city: A pilot project. – Automation in Construction*. 89, 307-316.
16. Dalla Libera, N., Fabbri, P., Mason, L. (Eds.). (2017), *Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater. – Science of The Total Environment*. 598, 330-340.
17. Kononenko, A., Lurie, A., Udalov, I. (2018), *Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine. – Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften): Düsseldorf (Germany): Auris Verlag*, 2, 13–17.
18. Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M. (Eds.). (2019), *Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies. Water Research*. 149, 522-532.
19. Nurani Zulkifli, S., Abdul Rahim, H., Lau, W.-J. (2018), *Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications. – Sensors and Actuators B: Chemical*. 255, Part 3, 2657-2689.
20. Preziosi, E., Parrone, D., Del Bon, A. (Eds.). (2014), *Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method. – Journal of Geochemical Exploration*. 143, 43-53.
21. Szabo, J., Hall, J. (2014), *On-line Water Quality Monitoring for Drinking Water Contamination. – Comprehensive Water Quality and Purification*. 2, 266-282.
22. Weiwu, Y., Jialong, L., Xiaohui, B. (2016), *Comprehensive assessment and visualized monitoring of urban drinking water quality. – Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 155, 26-35.

УДК 551.510.42:551.507.362

Михайло Валерійович Савенець,

к. геогр. н., с. н. с. відділу моніторингу атмосфери,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр-т Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,
e-mail: savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>;

Ірина Віталіївна Дворецька,

к. геогр. н., с. н. с., зав. лабораторії моніторингу атмосферного повітря,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
e-mail: dvoretska@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>;

Людмила Михайлівна Надточій,

н. с. відділу моніторингу атмосфери,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
e-mail: onoslyuda@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3038-5960>

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКА SENTINEL-5P

Робота присвячена аналізу просторово-часових закономірностей розподілу діоксиду азоту, діоксиду сірки, монооксиду вуглецю та формальдегіду над територією України та акваторіями Чорного й Азовського морів за даними супутника Sentinel-5P. Період досліджень охоплює липень 2018 – червень 2019 рр., що дозволило проаналізувати сучасний стан забруднення та актуалізувати інформацію щодо найбільш забруднених міст території України. В середньому загальний вміст NO_2 змінюється в межах від $4 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ до $7 \cdot 10^{-5}$ моль/м³; у Києві та ряді промислових міст на Донбасі перевищує $1 \cdot 10^{-4}$ моль/м³. Виявлено спалахи високого вмісту NO_2 взимку в чистих районах, під час яких концентрації значно перевищують середні показники, що зумовлено надходженням забрудненого повітря з великих міст. Особливості сезонного ходу NO_2 залежать від рівня антропогенної емісії: у промислових містах максимуми спостерігаються взимку, у віддалених від міст районах – в теплий сезон. Встановлено, що CO характеризується однорідним просторовим розподілом (в середньому 0.033 – 0.035 моль/м³) у зв'язку із кількомісячним часом існування в атмосфері. Найбільші перевищення характерні для Маріуполя, Запоріжжя, Дніпра, Кам'янського та берегової лінії Чорного й Азовського морів. За період досліджень виявлено чотири спалахи потужної емісії CO : три з яких спостерігалися у містах, одна пов'язана із лісовими пожежами на території Білорусі та півночі Рівненської області. В Україні завищений вміст SO_2 спостерігається в Донецькій, Запорізькій та Дніпропетровській областях, а також над морськими акваторіями. Виявлено локалізацію з найбільшою емісією SO_2 із загальним вмістом більше $5 \cdot 10^{-4}$ моль/м³, що спостерігається в районі Нового Світу Донецької області. Для HCHO спостерігається різниця у концентраціях між територіями Правобережної та Лівобережної України. Встановлено особливості забруднення морських акваторій. У перехідні сезони завищені концентрації забруднюючих речовин спостерігаються за основними морськими шляхами, у теплий період року – вздовж берегової лінії. За осередненими значеннями усього періоду найбільш забрудненими є саме берегова лінія, що свідчить про значну емісію від каботажних рейсів та рибачьких човнів під час курортного сезону.

Ключові слова: забруднення атмосферного повітря, супутник, домішки, антропогенна емісія, просторовий розподіл, промислові міста, акваторія.

М. В. Савенець, И. В. Дворецкая, Л. М. Надточий. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В УКРАИНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-5P. В работе рассмотрен анализ пространственно-временных закономерностей распределения диоксида азота, диоксида серы, монооксида углерода и формальдегида над территорией Украины и акваториями Черного и Азовского морей за данными спутника Sentinel-5P. Период наблюдения охватывает июль 2018 – июнь 2019 гг., что позволило проанализировать современное состояние загрязнения и актуализировать информацию о наиболее загрязненных городах территории Украины. В среднем общее содержание NO_2 изменяется от $4 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ до $7 \cdot 10^{-5}$ моль/м³; в Киеве и ряде промышленных городов Донбасса превышает $1 \cdot 10^{-4}$ моль/м³. Выявлены всплески высокого содержания NO_2 зимой в чистых районах, во время которых концентрации значительно превышают средние показатели, что обусловлено поступлением загрязненного воздуха из больших городов. Особенности сезонной изменчивости NO_2 зависят от уровня антропогенной эмиссии: в промышленных городах максимумы наблюдаются зимой, в удаленных от городов районах – в теплый сезон. Показано, что для CO характерно однородное распределение (в среднем 0.033 – 0.035 моль/м³) в связи с несколько месячным временем существования в атмосфере. Наибольшие превышения характерны для Мариуполя, Запорожья, Днепра, Каменского и береговой линии Черного и Азовского морей. За период исследования выявлены четыре всплески мощной эмиссии CO : три из них наблюдались в городах, одна связана с лесными пожарами на территории Беларуси и севере Ровенской области. В Украине высокое содержание SO_2 наблюдается в Донецкой, Запорожской и Днепропетровской областях, а также над морскими акваториями. Выявлена локализация с наибольшей эмиссией с общим содержанием выше $5 \cdot 10^{-4}$ моль/м³, которая наблюдается в Новом Свете Донецкой области. Для HCHO характерна разница в концентрациях между территориями Правобережной и Левобережной Украины. Определены особенности загрязнения морских акваторий. В переходные сезоны повышенные концентрации загрязняющих веществ наблюдаются по основным морским путям, в теплое время года – вдоль береговой линии. На основе осредненных значений всего периода исследований наиболее загрязненными является именно береговая линия, что свидетельствует о значительной эмиссии от каботажных рейсов и рыбацких кораблей во время курортного сезона.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, спутник, примеси, антропогенная эмиссия, пространственное распределение, промышленные города, акватория.

Вступ. В умовах розвитку промисловості та постійного збільшення автотранспорту, якість атмосферного повітря в Україні, як і у більшості країн світу, викликає велике занепокоєння. За останні роки з'явилася велика кількість наукових праць, в яких проводиться різнобічний аналіз стану атмосферного повітря та часових змін вмісту забруднюючих речовин на території України [1-7]. Особлива увага приділяється основним та найнебезпечнішим специфічним домішкам, вміст яких у атмосфері, багато у чому, залежить від збільшення антропогенного навантаження у містах та промислових районах: пил, оксиди азоту, монооксид вуглецю, діоксид сірки, формальдегід, важкі метали, тощо.

Системи наземного моніторингу забруднення атмосферного повітря, на основі яких проведено більшу частину сучасних досліджень в Україні, характеризуються надійністю та високою якістю отриманих даних. Проте, неможливість значного просторового охоплення наземними пунктами спостережень часто стає визначальним недоліком під час аналізу та оцінки якості атмосферного повітря. Висока просторово-часова невизначеність розподілу забруднюючих речовин в атмосфері, особливо в умовах значного антропогенного навантаження, практично унеможливає проведення статистичного аналізу забруднення атмосферного повітря на деякій відстані від точки вимірювання [8]. Цей недолік здатні подолати хіміко-метеорологічні та дисперсійні моделі [9-11], проте точність моделювання суттєво залежить від якості вхідної інформації, зокрема, під час опису джерел емісії. Якщо в межах незначних за масштабом територій (напр. місто, район, тощо) моделювання стає незамінним інструментом аналізу якості атмосферного повітря, то на значних просторових масштабах з високою роздільною здатністю стрімко зростає залежність від комп'ютерної потужності, що є лімітуючим фактором для проведення таких досліджень.

Стрімкий розвиток супутникових методів вимірювання вмісту хімічних складових атмосфери багато у чому вирішує проблему аналізу забруднення на значних просторових масштабах [12,13]. У світовій практиці для досліджень вмісту хімічних складових атмосфери використовуються різні супутникові прилади: SCIAMACHY (на супутнику Envisat), OMI (Aura), VSSC (Venus), MODIS та MOPITT (Terra), VIIRS (Suomi-NPP), SAGE (ERBS), GOME-2 (Metop) та ряд інших. Частина супутників дозволяє аналізувати безпосередньо вміст забруднюючих речовин з визначеною просторовою роздільною здатністю. Супутникові технології у згаданих супутниках не дозволяють отримати дані хімічних складових з

високою деталізацією, а розміри пікселів охоплюють десятки квадратних кілометрів. Іншою можливістю аналізувати стан забруднення, більш того з високою просторовою роздільною здатністю, є використання супутників, що зондують підстильну поверхню, зокрема Sentinel-2 чи Landsat. У такому разі діагностується лише перенесення забруднюючих речовин, наприклад за «слідами» диму, в той час як визначити хімічний склад неможливо. 13 жовтня 2017 р. запущено новий супутник Sentinel-5P з інструментом TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) на борту, що здійснив революцію у сфері глобального моніторингу якості атмосферного повітря та суттєво покращив дані хімічних складових попередніх супутникових місій (SCIAMACHY/Envisat та OMI/Aura) [14]. З просторовою роздільною здатністю 7x3.5 км Sentinel-5P дозволяє відстежувати забруднення над промисловими містами та районами [15]. Сьогодні вимірювання на 8 спектральних діапазонах дозволяє отримати дані діоксиду азоту (NO₂), діоксиду сірки (SO₂), монооксиду вуглецю (CO), озону (O₃), формальдегіду (HCHO), метану (CH₄), аерозольного індексу та потоків ультрафіолетового випромінювання [16]. Дані супутника Sentinel-5P, як й інших місій Copernicus, є відкритими для користувачів та представлені на офіційному хабі для попередньої обробки [17]. Незважаючи на усі переваги Sentinel-5P, використовувати інформацію потрібно з обережністю, так як наявність шуму, похибки вимірювальних систем та проведення атмосферної корекції можуть призводити до значних похибок у даних.

Використання детальної супутникової інформації надало можливість проведення досліджень та аналіз сучасного стану забруднення атмосферного повітря над усією територією України за 2018–2019 рр., включаючи міста та регіони, де не проводяться жодних наземних вимірювань; а також актуалізувати інформацію щодо найбільш забруднених міст території України. **Метою даної роботи** є встановлення просторово-часових закономірностей розподілу NO₂, SO₂, CO та HCHO над територією України та акваторіями Чорного й Азовського морів.

Методика досліджень та вихідні дані. Для досліджень обрано 4 забруднюючі домішки (NO₂, SO₂, CO та HCHO), вміст яких у атмосфері сьогодні суттєво залежить від антропогенних джерел емісії. Період досліджень для NO₂ охоплює липень 2018 – червень 2019 рр. включно; для SO₂, CO, HCHO – з листопада 2018 р. до червня 2019 р. Початок періоду обмежений не датою запуску супутника, а датами відповідних релізів даних, після яких стало можливе їх використання. Винятком є дані CO, адже реліз відбу-

вся у липні 2018 р., проте можливість їх опрацювання з'явилася у листопаді 2018 р. Дані концентрацій хімічних складових представлені як продукти другого рівня Sentinel-5P Level 2 (L2) [16]. Ці дані прив'язані за часом, а не за широтою/довготою, тому вирішено вихідну інформацію брати з платформи Google Earth Engine, де вона представлена у вигляді продуктів третього рівня (L3) [18], а конвертація з L2 до L3 здійснена з використанням інструменту "harconvert" [19], що містить операцію "bin_spatial".

Одиничне значення концентрації хімічної складової в атмосфері за несприятливих умов може характеризуватися значними похибками [16]. Тому, в даних дослідженнях надійність отриманих результатів забезпечено двома принциповими процедурами. По-перше, дані L3 відфільтровано за т.з. індексом гарантії якості (quality assurance index) з показником менше 0.5. По-друге, підвищити надійність можливо з використанням осереднення інформації у просторі або у часі. Осереднення інформації у просторі погіршує просторову роздільну здатність, проте зберігає дискретність у часі. Часове осереднення погіршує дискретність, проте зберігає просторову деталізацію. Для даного дослідження просторова деталізація є більш важливою, адже дозволяє проведення аналізу над конкретними промисловими містами. Тому дані забруднюючих речовин осереднювалися за різні проміжки часу з максимально можливою просторовою деталізацією.

Для обробки даних, проведення обчислень та візуалізації результатів використано мову програмування JavaScript у веб-середовищі The Earth Engine Code Editor. Попередня обробка включала у себе вивантаження відповідних продуктів третього рівня L3 для обчислень на віддалені сервери Google. Це забезпечило можливість швидких обчислень великих масивів даних без залучення власних комп'ютерних ресурсів, які, зазвичай, є обмежені. Результатами обчислень, на основі яких проведено дані дослідження, є середні та максимальні концентрації домішок за загальний період, окремі місяці та періоди з виявленим нетиповим просторовим розподілом. Обчислення проведені для кожної точки земної кулі з використанням вбудованих у веб-середовище функцій JavaScript. Візуалізація включала в себе побудову графіків часового ходу домішок у попередньо заданих координатах та картографування просторового розподілу середніх значень для заданої області досліджень. Координати, властивості шкали та кольорова гамма задавалися безпосередньо у The Earth Engine Code Editor.

Результати досліджень. Діоксид азоту (NO_2). Сумісний аналіз тропосферного, стратосферного та загального вмісту NO_2 в атмосфері показав визначальний внесок тропосферних концентрацій, а тому дає чітке уявлення щодо ролі антропогенних джерел емісії. Для виявлення найбільш забруднених міст та найменш забруднених регіонів території України діоксидом азоту обчислено та проаналізовано середні значення за період липень 2018 – червень 2019 рр., що дозволило чітко локалізувати території зі значною антропогенною емісією (рис. 1). В той час, як показники для більшої частини території України знаходяться в межах від $4 \cdot 10^{-5}$ моль/м² до $7 \cdot 10^{-5}$ моль/м², у найзабрудненіших районах вміст перевищує $1 \cdot 10^{-4}$ моль/м².

Найвищі концентрації NO_2 спостерігаються у Києві та у ряді промислових міст на Донбасі: Новому Світі (Старобешівський район, Донецька область), Слов'янську, Краматорську, Костянтинівці, Кураховому та Харцизьку. Деякі із названих міст перебувають за лінією розмежування в зоні ООС, що суттєво ускладнює проведення аналізу через недостатню кількість достовірної інформації про діяльність промислових підприємств та обсяги викидів. Високі концентрації NO_2 у Слов'янську, Краматорську, Костянтинівці та Кураховому, що перебувають на підконтрольній Україні території, найімовірніше обумовлені викидами з підприємств^{1,2,3,4,5} та теплоелектростанцій (ТЕС)^{6,7}, діяльність яких підтверджується зведеннями з офіційних джерел. В свою чергу, Харцизьк та Новий Світ характеризуються високими значеннями загального вмісту NO_2 , що дозволяє припустити про наявність потужної емісії з місцевих підприємств, особливо Старобешівської ТЕС, що розташована у Новому Світі. Проте, надійного підтвердження про об'єми виробницт-

¹ Миська рада м. Слов'янськ. Економіка. URL:

<http://www.slavrada.gov.ua/?view=econom>

² Паспорт міста Слов'янськ, Донецька область. Станом на 1 жовтня 2018 р. URL:

<http://www.slavrada.gov.ua/uploads/File/pasport.pdf>

³ Краматорськ. Інвестиційний паспорт. URL:

http://www.krm.gov.ua/UserFiles/Image/invest/invest_overview_ua.pdf

⁴ Звіт про виконання програми економічного і соціального розвитку міста Краматорська за 2018 рік.

URL: <http://www.krm.gov.ua/article/view/776>

⁵ Костянтинівська міська рада. Економіка і торгівля. URL: <http://konstrada.gov.ua/sotsialno-ekonomichnij-rozvitok/ekonomika-ta-torgivlya>

⁶ Східенерго. Курахівська ТЕС. URL:

<https://energo.dtek.com/business/generation/vostokenergo/>

⁷ Донбасенерго. Слов'янська ТЕС. URL:

<https://de.com.ua/uk/structure-units>

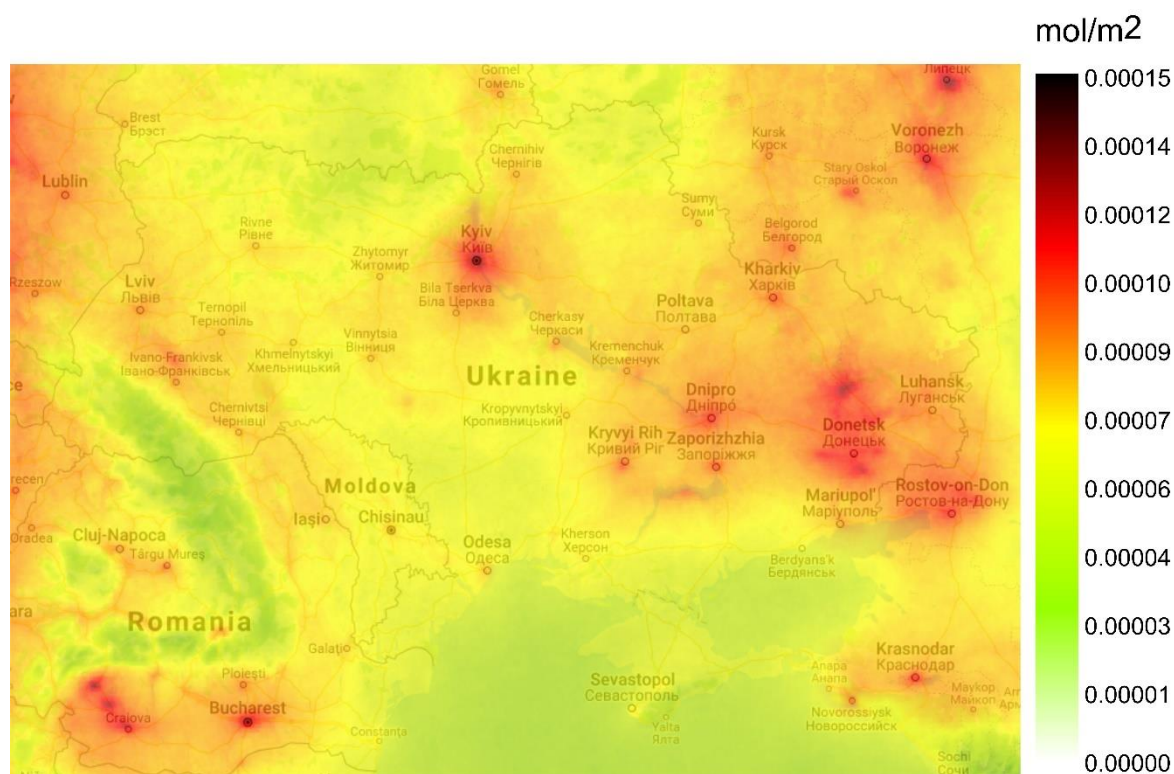


Рис. 1. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту NO_2 (моль/м²) за липень 2018 – червень 2019 рр.

ва відсутні^{8,9,10}.

Таким чином, на відміну від європейських міст, де найвищий вміст NO_2 спостерігається у завантажених автотранспортом містах [20,21], в Україні найбільші перевищення, за винятком Києва, досі спостерігаються у регіонах з потужними промисловими викидами. У ряді міст України, серед яких як завантажені автотранспортом, так і промислові, середні концентрації знаходяться на рівні $9 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ моль/м², зокрема у: Харкові, Львові, Донецьку, Дніпрі, Запоріжжі, Одесі, Черкасах, Енергодарі, Кривому Розі, Горішніх Плавнях, Маріуполі, Кам'янському, Ладизині та Бурштині.

Виявлено регіони з мінімальними концентраціями NO_2 : Кримські та Карпатські гори, територія Полісся на півночі Житомирської, Рівненської, Київської та Чернігівської областей. Найбільша за площею територія із загальним вмістом нижче $4 \cdot 10^{-5}$ моль/м² охоплена Карпатами (рис. 1).

Період спостережень за NO_2 складає один рік, таким чином стає можливим проведення

аналізу сезонного та річного ходу за період 2018–2019 рр. Для усіх регіонів території України в теплий сезон року спостерігаються незначні варіації вмісту NO_2 , тоді як у холодний сезон відбувається різке збільшення розкиду значень (рис. 2).

Період значного розмаху значень NO_2 у районах віддалених від антропогенних джерел емісії спостерігався виключно у зимові місяці з грудня 2018 р. до лютого 2019 р., коли показники змінювалися в межах від $1 \cdot 10^{-5}$ моль/м² до $3 \cdot 10^{-5}$ моль/м² (рис.2а). У промислових містах збільшення варіацій загального вмісту NO_2 почалося з жовтня 2018 р. та тривало до початку березня 2019 р., при цьому розкид значень значно перевищував чисті райони змінюючись в межах від $8 \cdot 10^{-5}$ моль/м² до $1 \cdot 10^{-3}$ моль/м² (рис.2б).

Особливості річного та сезонного ходу залежать від рівня антропогенної емісії. Для чистих районів характерні мінімуми у зимові місяці та максимуми у літній сезон. У промислових містах, по-перше, різниця між сезонами виражена слабо, по-друге, максимальні значення спостерігаються у холодний сезон року, що повністю узгоджується із результатами попередніх досліджень за даними наземних спостережень [7]. Це пояснюється взаємодією метеорологічних умов, зокрема високою частотою інверсій та низькими температурами, з особливостями емісії під час опалювального сезону та використанням транспорту за низьких температур. Саме така взаємо-

⁸ Донбасенерго. Старобешівська ТЕС. URL: <https://de.com.ua/uk/structure-units>

⁹ Энергия Донбасса. Старобешевская ТЭС. URL: <https://don.energy/starobesheshevskaya-tes>

¹⁰ Метінвест. URL: <https://pipe.metinvestholding.com/ua/press/news/show/7394>

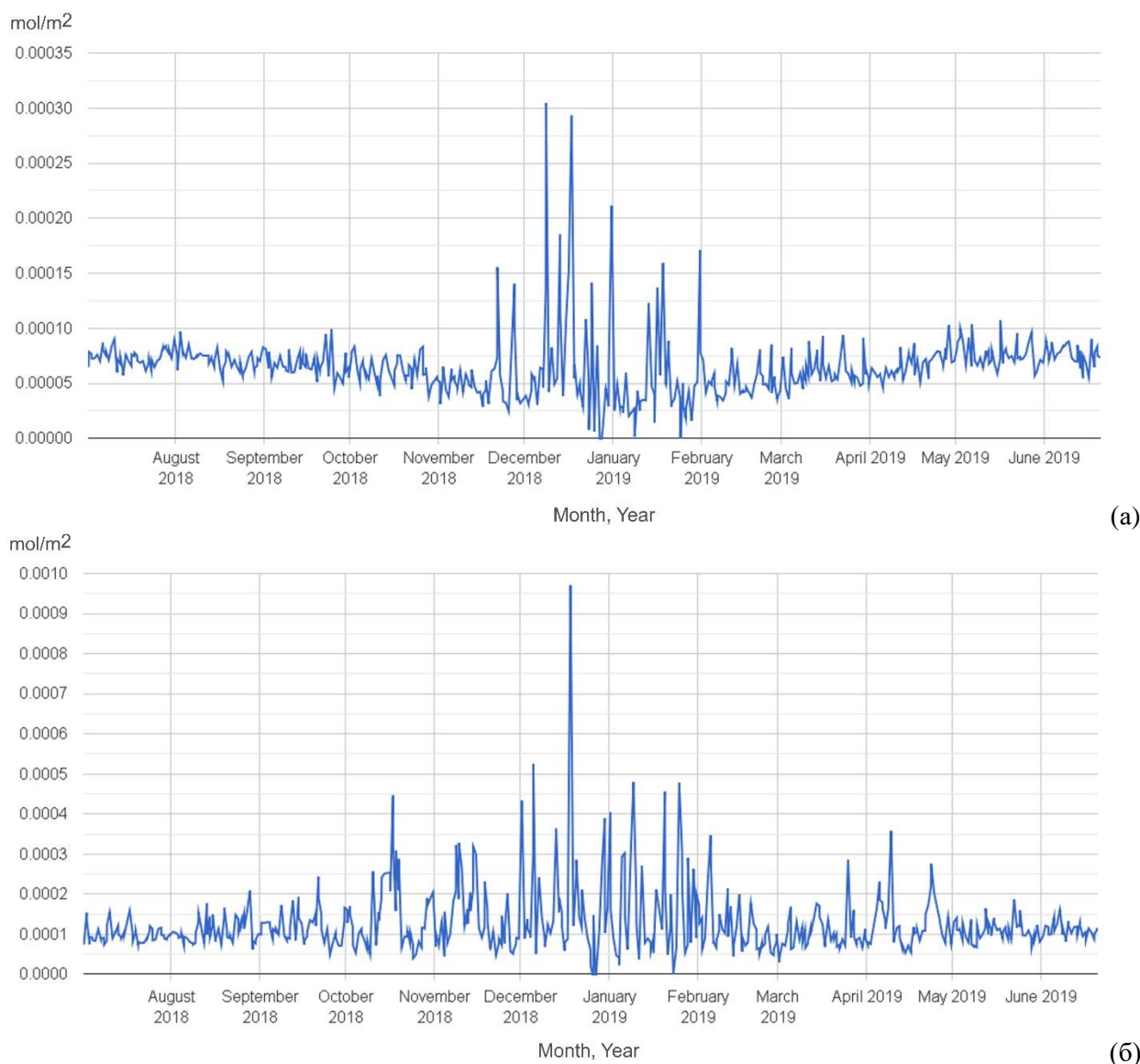


Рис. 2. Зміна середніх значень загального вмісту NO_2 (моль/м²) за липень 2018 – червень 2019 рр. в Українських Карпатах (а) та Києві (б)

дія обумовила значне розповсюдження нехарактерних високих значень загального вмісту NO_2 над усією територією України. Спалахи завищених значень у зимові місяці в чистих районах (рис. 2а) пов'язані із надходженням забрудненого NO_2 повітря із промислових районів. Один із таких випадків зображено на рис. 3, коли NO_2 поширився від районів антропогенної емісії до Карпат в період з 1 до 12 грудня 2018 р.

Моноксид вуглецю (CO). Загальний вміст CO в атмосфері характеризується однорідним просторовим розподілом (рис. 4), що пов'язано із кількомісячним часом існування в атмосфері. Таким чином, домішка встигає розповсюдитися на значну відстань від джерел емісії, що ускладнює ідентифікацію найбільш забруднених регіонів на основі осередненої інформації. В той же час, наявність точкових максимумів у полях концентрацій CO свідчить про потужну антропоген-

ну емісію домішки, що суттєво перевищує фоновий вміст.

В цілому на території України загальний вміст CO в стовпі атмосфери знаходиться в межах 0.033–0.035 моль/м² (рис. 4). Серед найменш забруднених районів вирізняються тільки гірські масиви Українських Карпат та Кримські гори з концентраціями в межах від 0.025 моль/м² до 0.031 моль/м².

Найбільш забрудненими CO в Україні є міста: Маріуполь, Кривий Ріг, Запоріжжя, Дніпро, Кам'янське; а також практично вся берегова лінія Чорного й Азовського морів, де загальний вміст CO в атмосфері перевищує 0.037 моль/м². За листопад 2018 – червень 2019 р. найгірша ситуація склалася у Маріуполі, де загальний вміст CO в атмосфері став одним із найвищих у Європі. Просторове охоплення та роздільна здатність супутника Sentinel-5P дозволяє проаналізувати

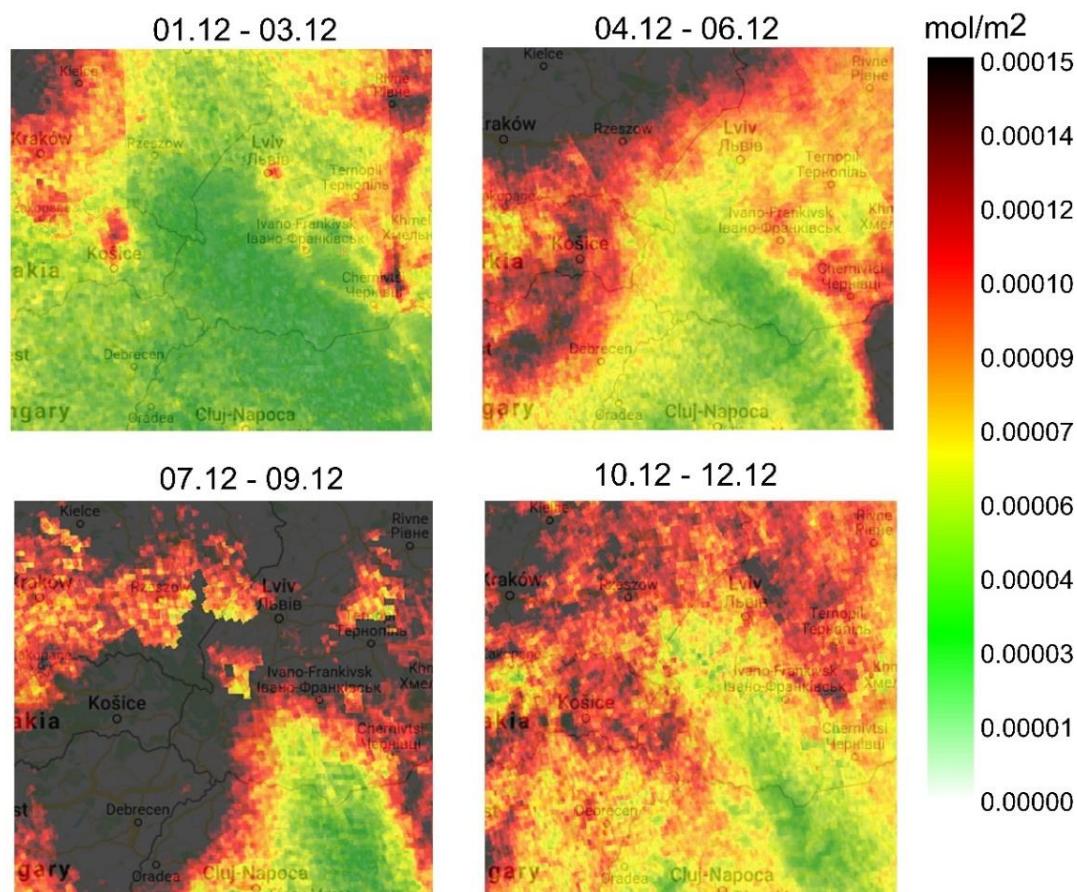


Рис. 3. Поширення високих концентрацій загального вмісту NO₂ (моль/м²) із промислових міст до Українських Карпат протягом 1–12 грудня 2018 р.

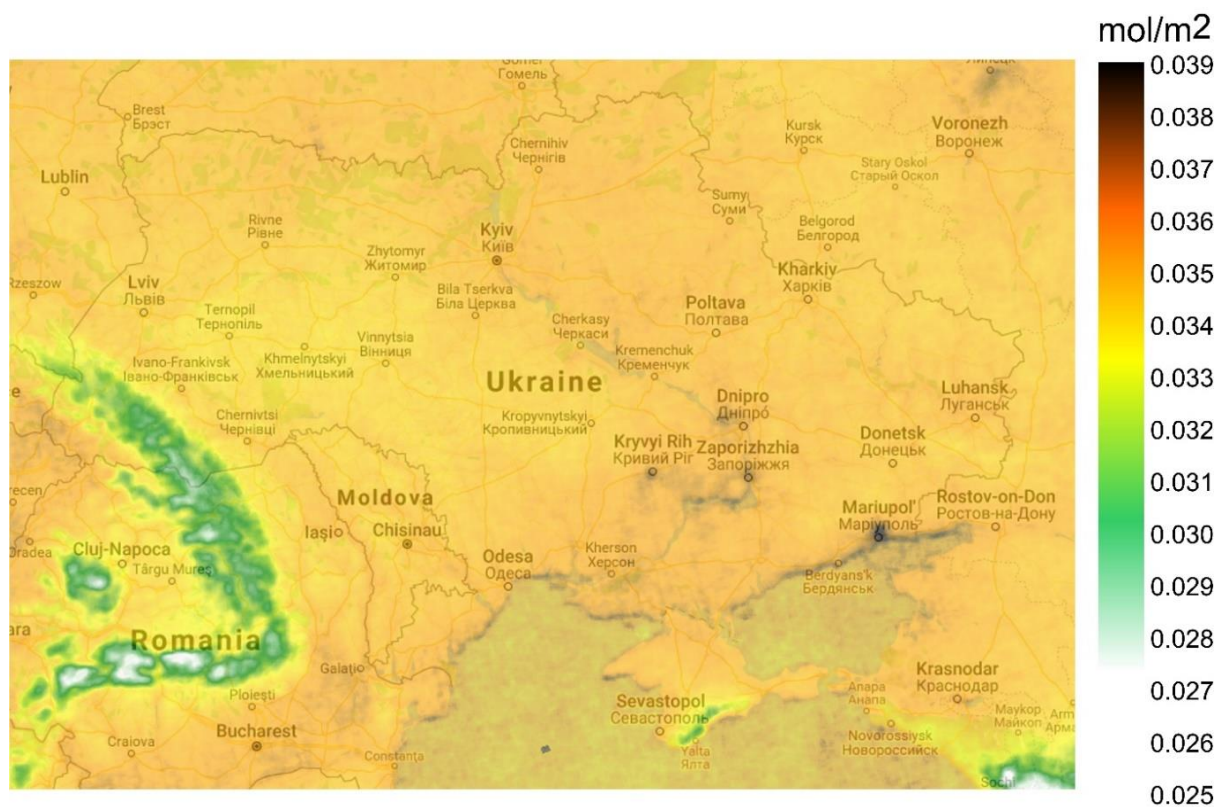


Рис. 4. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту CO (моль/м²) за листопад 2018 – червень 2019 рр.

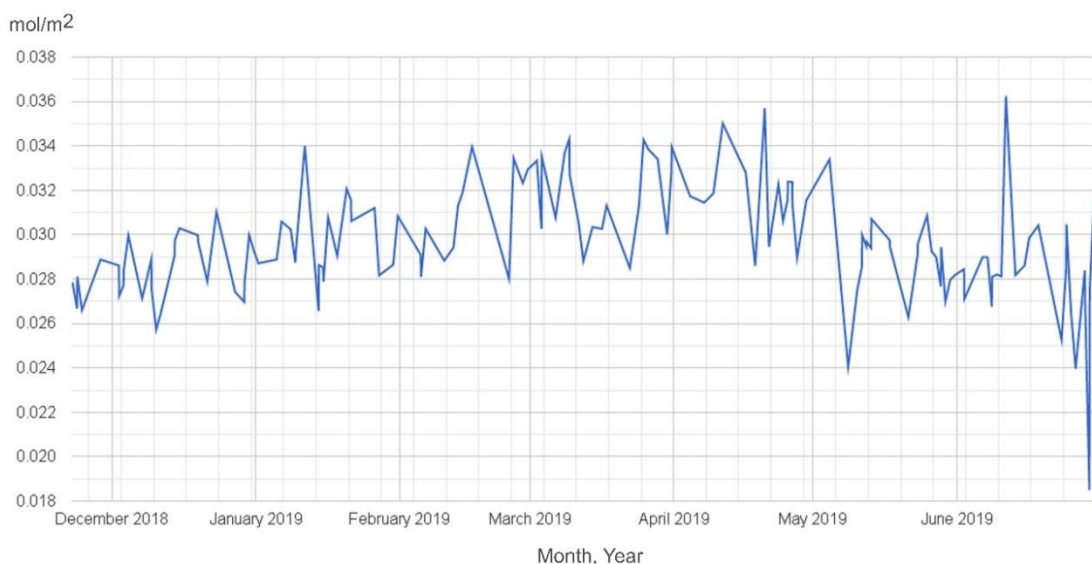
забруднення над морськими акваторіями та отримати уявлення про роль викидів від морського транспорту. Спричинене такими викидами атмосферне забруднення CO поблизу портів та вздовж берегової лінії, зазвичай, перевищує забруднення над материковою частиною України приблизно на 0.01–0.02 моль/м².

Аналіз максимальних значень загального вмісту CO за розглянутий період досліджень дозволив виявити чотири осередки надзвичайно високого надходження домішки в атмосферу, один з яких має природне походження. В період з березня до квітня 2019 р. спостерігалися короткі у часі, проте потужні емісії CO у Кривому Розі, Маріуполі та Запоріжжі, що мають антропогенне походження. Проте, найбільшого розмаху набули емісії CO, спричинені лісовими пожежами на території Білорусі поблизу кордону з Україною, які перекинулися на північну територію Рівненської області у 20-х числах квітня 2019 р.

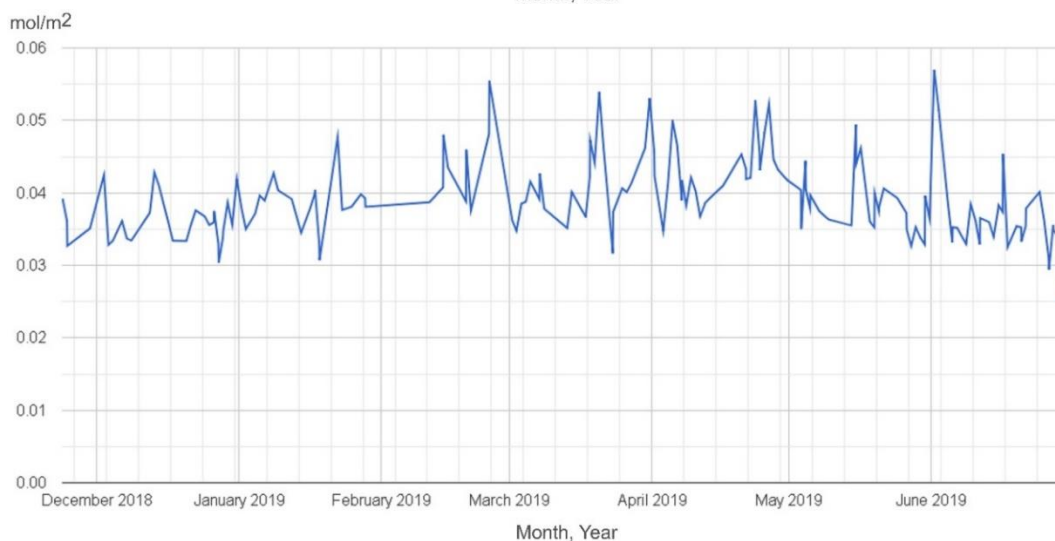
Для часового ходу CO характерні варіації з розмахом від 0.015 моль/м² у чистих районах до

0.035 моль/м² у найбільш забруднених містах. У березні, квітні та травні 2019 р. загальний вміст CO був вищим ніж у інші місяці (рис. 5), проте різниця є несуттєвою та не дозволяє на таких коротких рядах спостережень говорити про сезонні особливості сформованих концентрацій CO.

Діоксид сірки (SO₂) та формальдегід (HCHO). На відміну від NO₂ та CO, де спостерігається доволі однорідний просторовий розподіл з чіткою локалізацією максимальних концентрацій, для SO₂ та HCHO просторовий розподіл вкрай неоднорідний (рис. 6), що ускладнює процес виявлення окремих промислових міст зі значною емісією домішок. Більш того, враховуючи похибки вимірювання SO₂ та HCHO [16], надійну оцінку можна отримати тільки у районах із значним перевищенням концентрацій. Таким чином, під час аналізу осереднених даних існує можливість проведення досліджень тільки в межах окремих регіонів за максимумами у просторовому розподілі SO₂ та HCHO.



(a)



(б)

Рис. 5. Зміна середніх значень загального вмісту CO (моль/м²) за листопад 2018 – червень 2019 рр. в Українських Карпатах (а) та Маріуполі (б)

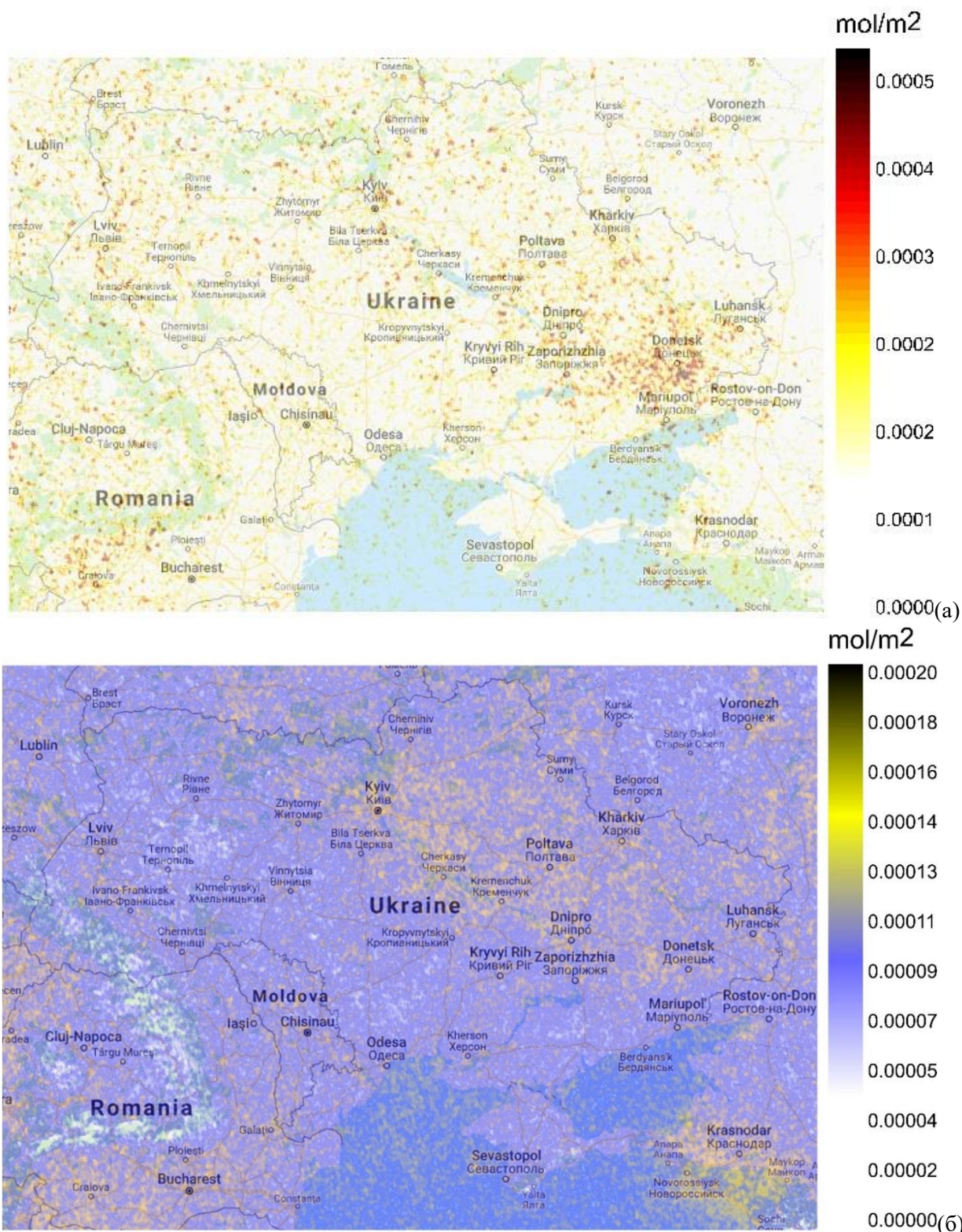


Рис. 6. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту SO_2 (моль/м²) (а) та тропосферного вмісту HCHO (моль/м²) (б) за листопад 2018 – червень 2019 рр.

На території України є одна локалізація з високою емісією SO_2 над селищем Новий Світ Донецької області, де загальний вміст за листопад 2018 – червень 2019 рр. перевищує $5 \cdot 10^{-4}$ моль/м² (рис.6а). Основним джерелом викидів, як було зазначено вище, у цьому районі є Старобешівська ТЕС. Загалом, над територією України підвищений вміст SO_2 спостерігається у Донець-

кій, Запорізькій та Дніпропетровській областях. Осереднені значення також мають перевищення у акваторіях Чорного й Азовського морів поблизу морських портів, що також підтверджує роль емісії від морського транспорту.

Аналіз просторового розподілу тропосферного вмісту HCHO дозволив виділити чіткий регіон з мінімальними значеннями, що спостеріга-

ються в Карпатах (рис. 6б), а також у північно-західній частині Подільської височини. Очікувані просторові мінімуми концентрацій в Поліссі не виявлено незважаючи на відсутність потужного антропогенного навантаження на хімічний склад атмосфери в цьому регіоні. Причиною цього, найімовірніше, є збільшення внеску природної емісії речовин (зокрема, метану), що беруть участь в хімічних реакціях формування формальдегіду внаслідок високої повторюваності лісових пожеж на півночі України та наявності значної площі заболочених територій. Варто відмітити різницю у концентраціях НСНО між Правобережною та Лівобережною Україною. Регіон із завищеними значеннями охоплює Полтавську, Харківську та Донецьку області, а також Лівобережну частину Київської, Черкаської та Дніпропетровської областей, де вміст у тропосфері перевищує $1.4 \cdot 10^{-3}$ моль/м².

Сумісний аналіз забруднюючих речовин дозволив виділити особливості забруднення повітря над морськими акваторіями. За осередненими значеннями усього періоду досліджень найвищі концентрації спостерігаються вздовж берегової лінії, а не за основними морськими шляхами, що свідчить про високу роль емісії з туристичних та рибачьких човнів, які, в основному, курсують поблизу берега. Проте, у різні місяці просторовий розподіл забруднення повітря над морськими акваторіями зазнає змін. Так, у зимові місяці важко виявити будь-які закономірності поширення домішок над Чорним та Азовським морем, що цілком узгоджується зі зменшенням судноплавства протягом холодного сезону. В період з лютого до березня починає вирізнятися центральна та південна частина Чорного моря, де концентрації забруднюючих речовин, зазвичай, більші. У цій частині проходять морські шляхи, що з'єднують Грузію, Туреччину та Болгарію. В період з березня до травня найбільш забрудненим стає акваторія вздовж морських шляхів, що ведуть із Чорноморська (Одеська область) на південь. Починаючи з травня, спостерігається підвищений вміст забруднюючих речовин вздовж берегової лінії, при цьому рівень забруднення у портах та віддалених від великих міст районах однаковий, що свідчить саме про викиди численних туристичних та рибачьких човнів під час курортного сезону. На цьому фоні стає практично неможливим виявити забруднення за основними морськими торговими шляхами. Спроби виявити особливості забруднення річкових акваторій не дали результату, так як на річках розташовуються міста з інтенсивними викидами, що перевищують емісію річкового транспорту, а просторова роздільна здатність супутника Sentinel-5P не дозволяє диференціювати емісію з ок-

ремих лінійних джерел на такому фоні забруднення.

Проведені дослідження на основі даних Sentinel-5P дало можливість отримати повну картину щодо просторового розподілу забруднюючих речовин над територією України та охопити територію, де наземні вимірювання відсутні. За результатами аналізу чотирьох домішок виділено найзабрудненіші міста України на сучасному етапі за 2018–2019 рр. Особливого занепокоєння викликає ситуація у Новому Світі, Маріуполі та Слов'янську; більш того надзвичайно забрудненими є Кривий Ріг, Запоріжжя та Дніпро. Вміст забруднюючих речовин у ряді міст хоч і не досягає настільки високих рівнів, проте суттєво перевищує фонові концентрації. Така ситуація спостерігається у Києві, Харкові, Львові, Одесі, Черкасах, Кам'янському, Енергодарі, Бурштині, Донецьку, Краматорську, Харцизьку, Горішніх Плавнях, Ладизині. Поза увагою, на сьогодні, залишається забруднення вздовж берегової лінії Чорного й Азовського морів спричинене викидами морського транспорту. За супутниковими даними стає зрозуміло, що забруднення повітря над морськими акваторіями в Україні потребує детального вивчення та підвищеної уваги з необхідністю проведення хоча б тимчасових наземних вимірювань.

Обговорення. Результати проведеного дослідження дозволили актуалізувати інформацію по найбільш забрудненим містам та регіонам України. Як було згадано, основною проблемою наземних даних є неможливість охопити усю територію. Таким чином, стає неможливим виявлення стану забруднення атмосферного повітря та появу/припинення викидів у багатьох промислових містах. Це стало причиною відсутності у раніше проведених дослідженнях різних авторів аналізу вмісту забруднюючих речовин у Новому Світі (Старобешівський район, Донецька область). За даними Sentinel-5P якість атмосферного повітря тут можна вважати однією із найгірших в Україні, особливо за вмістом NO₂ та SO₂, що обумовлено викидами потужного стаціонарного джерела у цьому районі – Старобешівської ТЕС. Схожа ситуація спостерігається ще для ряду дуже забруднених промислових міст, серед яких Енергодар, Бурштин, Ладизин та Харцизьк.

Для більшості міст супутникові дані підтверджують проведені раніше дослідження [1-7], зокрема перебування Кривого Рогу, Донецька, Одеси, Львова, Києва, Дніпра, Запоріжжя та ряду інших у списку серед найбільш забруднених міст України.

Проте, порівняння супутникової інформації 2018–2019 рр. у даній роботі з результатами досліджень на основі наземних даних попередніх

років [1,4-7] у містах показало деякі відмінності у результатах, що може свідчити про зміни у джерелах емісії протягом останніх двох років. Так, наприклад, Красноперекопськ та Армянськ, що завжди фігурували як дуже забруднені міста, за 2018–2019 рр. характеризувалися концентраціями близькими до фонових. В той же час, Черкаси можна на сьогодні віднести до списку дуже забруднених міст, хоча до цього місто характеризувалося не настільки високим рівнем забруднення. Наведені відмінності свідчать про необхідність постійних безперервних досліджень та складність довгострокового прогнозування рівнів забруднення на основі історично сформованих вибірок та тенденцій. Подібне прогнозування можливо проводити як ансамблеве за умови залучення різних сценаріїв викидів, серед яких повинні враховуватися умови збільшення, зменшення та відсутності змін у обсягах антропогенної емісії.

Sentinel-5P дозволив поглянути на характер часових змін NO_2 у найвіддаленіших від антропогенного внеску районах, що дозволило оцінити різницю з сезонними змінами вмісту домішок у містах. Зокрема, повністю підтверджені висновки про залежність сезонного ходу NO_2 та зсуви фаз у річному ході від рівнів антропогенного навантаження, зроблені до цього лише на основі наземних даних постів у промислових містах, що розташовуються в межах більш чистих та більш забруднених районів [7].

Висновки. Використання супутникових даних Sentinel-5P за 2018–2019 рр. дозволили детально оцінити просторовий розподіл вмісту деяких забруднюючих речовин в атмосфері та актуалізувати інформацію щодо міст з найбільшими рівнями забруднення.

Вміст NO_2 у найзабрудненіших містах та регіонах на порядок перевищує фонові концентрації, досягаючи $1 \cdot 10^{-4}$ моль/м³. Значна антропогенна емісія там зумовлює відсутність зимових мінімумів у річному ході, які є типовими для чистих регіонів. Більш того, взимку спостерігається висока повторюваність перенесення на великі відстані забрудненого діоксидом азоту повітря із великих міст, зумовлюючи спалахи підвищених концентрацій у віддалених від промисловості районах. Вміст CO , завдяки кількомісячному часу існування у атмосфері, характеризується однорідним просторовим розподілом з середніми концентраціями в межах $0.033\text{--}0.035$ моль/м³. За розглянутий період чітко простежуються потуж-

ні антропогенні емісії у Маріуполі, Запоріжжі та Кривому Розі, що значно перевищують рівні в інших промислових містах; а також природні емісії від лісових пожеж на Поліссі. Виявлено територію дуже високого вмісту SO_2 , локалізованої в районі міста Новий Світ Донецької області, з концентраціями вище $5 \cdot 10^{-4}$ моль/м³.

Встановлено, що акваторії Чорного й Азовського морів характеризуються високим рівнем забруднення атмосферного повітря, особливо поблизу берегових ліній, що є результатом викидів морського транспорту. Враховуючи зосередження високих концентрацій вздовж усієї берегової лінії, включаючи віддалені від портів районах, можна стверджувати про значний внесок у рівні забруднення атмосферного повітря каботажними рейсами та рибачькими човнами. Вміст забруднюючих речовин поблизу берегової лінії перевищують середні фонові концентрації материкової України. В окремі місяці перехідних сезонів вдається розрізнити забруднення вздовж основних морських шляхів: в центральній та південній частині Чорного моря у більш холодні місяці та від Чорноморська на південь у більш теплі місяці.

Перспективи подальших досліджень. Просторове охоплення Sentinel-5P значно розширило горизонти досліджень стану атмосферного повітря та сприяє розвитку нових підходів у дослідженнях забруднюючих речовин. Для цілей моніторингу, за умов правильної фільтрації статистично ненадійних даних, стало можливим діагностувати тимчасові антропогенні (аварії, незаконні викиди та ін.) та природні (лісові пожежі та ін.) викиди, що відбуваються у місцях не охоплених наземними спостереженнями. Більш того, існують перспективи дослідження сезонної мінливості домішок в різних мезо- та макрокліматичних умовах. Забруднення атмосферного повітря в прибережних районах Чорного й Азовського морів повинно якомога швидше стати об'єктом подальших досліджень, враховуючи знайдені перевищення вмісту домішок та активний розвиток подібних досліджень для інших морських акваторій Європи. Абсолютно новим напрямком, що активно почав розвиватися у світі, проте відсутній в Україні, є поєднання деталізованих супутникових даних вмісту забруднюючих речовин з сучасними методами т.з. «штучного інтелекту», що у майбутньому дозволить дистанційно виявляти викиди від індивідуальних джерел емісії.

Література

1. Баштаннік, М.П. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України [Текст] / М.П. Баштаннік, Н.С. Жемера, Є.М. Кіптенко, Т.В. Козленко // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2014. – Вип. 266. – С. 70–93.
2. Лоева, І. Д. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста: методи аналізу, прогнозу, регулювання [Текст] / І.Д. Лоева, О.Г. Владимірова, В.А. Верлан. – К.: КНТ, 2008. – 224 с.

3. Надточій, Л.М. Особливості динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у деяких містах України [Текст] / Л.М. Надточій, М.В. Савенець, М.П. Баитаннік, І.В. Дворецька // Український географічний журнал – 2019. – №1(105). – С. 43–50. [doi.org/10.15407/ugz2019.01.043]
4. Сніжко, С. І. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста [Текст] / С.І. Сніжко, О.Г. Шевченко. – К.: Видавництво географічної літератури "Обрії", 2011. – 297 с.
5. Шевченко, О. Особливості часових змін концентрацій формальдегіду в атмосферному повітрі міст України [Текст] / О. Шевченко, Ю. Яценко, Н. Данілова // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. – 2016. – Вип. 2. – С. 24–29
6. Яценко, Ю. Оцінка сучасного рівня та тенденцій забруднення атмосферного повітря міст України діоксидом азоту [Текст] / Ю. Яценко, О. Шевченко, С. Сніжко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2018. – Вип. 3(82). – С. 87–95. [<https://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>]
7. Savenets, M. NO₂ seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities [Text] / M. Savenets, L. Nadtochii, I. Dvoretzka // *GeoScience Engineering*. – 2018. – Vol. LXIV, No. 4. – P. 29–36. [<https://dx.doi.org/10.2478/gse-2018-0019>]
8. Савенець, М.В. Оцінка невизначеності просторово-часового розподілу забруднюючих речовин міської атмосфери [Текст]: матеріали III міжн. наук.-практ. конф. / М.В. Савенець, Л.М. Надточій // Сучасні проблеми природничих наук: теорія, практика, освітні новації. – Ніжин (Україна), 2018. – С.383–385
9. Baklanov, A. et al. Enviro-HIRLAM online-integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) [Text] / A. Baklanov // *Geosci. Model Dev*. – 2017. – Vol. 10. – P. 2971–2999. [<https://dx.doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>]
10. Berkowicz, R. A simple Model for Urban Background Pollution [Text] / R. Berkowicz // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2000. – Vol. 65. – P. 259-267. [<https://dx.doi.org/10.1023/A:1006466025186>]
11. Gaiotti, D. The Chernobyl nuclear accident ¹³⁷Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system [Text] / D. Gaiotti, D. Oshurok, O. Skrynyk // *Atmospheric Pollution Research*. – 2018. – Vol. 9, Is. 3. – P.502-512. [<https://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>]
12. Su-Yin, Tan. *Meteorological Satellite System* [Text] / Su-Yin Tan – Springer, 2014. – 145 p.
13. Putrenko, V. The use of remote sensing data for modelling air quality in the cities [Електронний ресурс] / V. Putrenko, N. Pashynsk. – Режим доступу: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-5-W1/57/2017/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.pdf> (Дата звернення: 11.09.2019)
14. Sentinel-5P. ESA missions [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p> (Дата звернення: 02.07.2019)
15. Sentinel-5P. First data release [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus_Sentinel-5P_releases_first_data (Дата звернення: 02.07.2019)
16. Sentinel-5P. Products and Algorithms [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms> (Дата звернення: 02.07.2019)
17. Sentinel-5P hub [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Дата звернення: 23.07.2019)
18. Google Earth Engine platform [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://earthengine.google.com> (Режим доступу: 04.07.2019)
19. Harpconvert command line tool [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://cdn.rawgit.com/stcorp/harp/master/doc/html/harpconvert.html> (Дата звернення: 04.07.2019)
20. Kurtenbach, R. Primary NO₂ emissions and their impact on air quality in traffic environments in Germany / R. Kurtenbach, J. Kleffmann, A. Niedojadlo, et al. // *Environ Sci Eur*. – 2012. – Vol. 24. [<https://dx.doi.org/10.1186/2190-4715-24-21>]
21. Brussels Environment. State of the Environment. Report 2011–2014 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.environment.brussels/state-environment/report-2011-2014/air/air-quality-nitrogen-dioxide-concentrations> (Дата звернення: 04.07.2019)

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 551.510.42:551.507.362

Mykhailo Savenets,

PhD (Geography), Senior Researcher, Department of Atmosphere Monitoring,
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU
37 Nauki Av., Kyiv, 03028, Ukraine,

e-mail: savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>;

Iryna Dvoretzka,

PhD (Geography), Senior Researcher, Head of Laboratory of the Atmosphere Air Monitoring,
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,

e-mail: dvoretzka@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>;

Liudmyla Nadtochii,

Researcher, Department of Atmosphere Monitoring,
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,

e-mail: onoslyuda@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3038-5960>

CURRENT STATE OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE BASED ON SENTINEL-5P SATELLITE DATA

Introduction. Industrial development and increasing traffic emissions cause air quality problems. The most accurate for air pollution analysis are ground-based data; however, it is very limited in space. Modeling could solve this problem, but huge amount of input information and limits of computational power make it difficult to analyze big territories with high resolution. Sentinel-5P satellite with TROPOMI instrument nowadays gives opportunities to monitor the air pollution with good spatial resolution. The **purpose of the study** is to analyse nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide and formaldehyde spatial and temporal distribution over Ukraine and Black Sea and Azov Sea.

Methods and raw data. There were selected Sentinel-5P data of NO₂, SO₂, CO and HCHO for the period from first data release in 2018 to June, 2019. Data processing implemented in Google Earth Engine using JavaScript programming in The Earth Engine Code Editor.

Results and discussion. Joint analysis of NO₂ tropospheric, stratospheric and total columns showed the prevailing of tropospheric NO₂ content and therefore crucial role of anthropogenic emission sources. While background NO₂ total column varies from $4 \cdot 10^{-5}$ mol/m² to $7 \cdot 10^{-5}$ mol/m², in the most polluted cities content exceeds $1 \cdot 10^{-4}$ mol/m². The highest values are observed in Kyiv and industrial cities in Donbas region. Some of them are situated in the area of Joint Forces Operation outside the demarcation line. Sentinel-5P data catch the large emissions from the local industries; however, no official confirmations about production volume are available. NO₂ dispersion increase during winter with the values range from $1 \cdot 10^{-5}$ mol/m² to $3 \cdot 10^{-5}$ mol/m² over clean territories and $8 \cdot 10^{-5}$ mol/m² to $1 \cdot 10^{-3}$ mol/m² in industrial cities. Seasonal maximal observed during warm period in unpolluted regions and during winter in the cities. Cold seasonal NO₂ content outbreaks in the mountains are the result of its transportation from industrial cities.

Spatial distribution of CO total column over Ukraine is rather homogeneous because of CO lifetime in the atmosphere up to several months. It could be transported on the long distances, which makes identification of polluted regions difficult. However, several cities with maximal average values of more than 0.037 mol/m² prove the existence of extreme anthropogenic emissions. Overall background CO contents vary within 0.033–0.035 mol/m². Coastal regions of the Black Sea and Azov Sea are more polluted by CO compared to the mainland, which could be the consequences of ships emissions. Temporal analysis of CO total column found 4 powerful emissions: three of them are anthropogenic in industrial cities and one is natural, connected with forest fires in Belarus and northern part of Rivne region in April, 2019.

There is one location with huge SO₂ emission in Ukraine, observed in Novyi Svit (Donetsk region) outside the demarcation line of Joint Forces Operation, which corresponds to Starobeshivska thermal power station. In general, higher SO₂ contents are observed over Donetsk, Zaporizhia and Dnipro regions; also over the Black Sea and Azov Sea. For HCHO spatial distribution minimal values are typical for the Carpathians. It is well seen that SO₂ content are higher in the Southern part of Ukraine than in the Western part.

The research finds regularities in spatial distribution of pollutants over the sea area. During cold season higher concentrations could be observed over the main merchant vessels tracks in the Black Sea. In summer months, which coincide with the main tourist season, most polluted are shoreline area because of emissions from cabotage and fishing vessels.

The study updates information about most polluted cities in Ukraine, especially in the regions with absence of ground-based measurements. Some of them are mentioned for the first time among other research.

Air quality analysis in many industrial cities significantly changed over the last two years. It shows difficulties of long-term pollution forecast and scenarios based on historical data and observed trends. It is recommended to use ensemble modelling for this purpose with scenarios of emission reduction, increasing and temporal stability. Sentinel-5P data confirm the conclusions of previous research about dependence of NO₂ annual cycle and seasonality phases shift from the level of anthropogenic load.

Prospects for further research. Sentinel-5P spatial resolution expands the horizons for air pollution research. The most relevant are monitoring of short-term anthropogenic and natural emissions, pollutants' seasonality changes in different macroclimatic conditions, research of ships emissions in Black Sea and Azov Sea, combination of satellite air pollution data with methods of "artificial intelligence" for individual emissions detection.

Keywords: air pollution, satellite, pollutants, anthropogenic emission, spatial distribution, industrial cities, sea area.

References

1. Bashtannik, M.P., Zhemera, N.S., Kiptenko, E.N., Kozlenko, T.V. (2014). Stan zabrudnennia atmosfernogo povitria nad terytoryeyu Ukrainy. [The state of atmospheric air pollution over Ukraine]. *Naukovi pratsi UkrNDGMI*, 266, 70-93
2. Loyeva, I.D., Vladymyrova, O.G., Verlan, V.A. (2008). Otsinka stanu zabrudnennia atmosfernogo povitria velykogo mista: metody analizu, prognozu, reguliuvannia. [Estimation of the state of air atmosphere pollution of the big city (methods of analysis, forecast, regulations)]. Kyiv, Ukraine: KNT, 220.
3. Nadtochii, L.M., Savenets, M.V., Bashtannik, M.P., Dvoretzka, I.V. (2019). Osoblyvosti dynamiki zabrudnennia atmosfernogo povitria pylom u deyakyh mistah Ukrainy. [The features of dust air-pollution dynamics in certain Ukrainian cities]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1(105), 43-50 [<https://dx.doi.org/10.15407/ugz2019.01.043>]
4. Snizhko, S.I., Shevchenko, O.H. (2011). Urbometeorologichni aspekty zabrudnennia velykogo mista. [Meteorological Aspects of Air Pollution of Urban Areas]. Kyiv, Ukraine: Obrii, 297.
5. Shevchenko, O., Yatsenko, Y., Danilova, N. (2016). Osoblyvosti chasovyh zmin koncentraciy formaldehidu v atmosfernomu povitri mist Ukrainy. [Features of temporal changes of formaldehyde in the air of Ukrainian cities]. *Visnyk Kyivskogo Natsionalnogo Universytetu. Viiskovo-spetsialni nauky*, 2, 24-29.
6. Yatsenko, Y., Shevchenko, O., Snizhko, S. (2018). Otsinka suchasnogo ravnia ta tendencii zabrudnennia atmosfernogo povitria mist Ukrainy dioksidom azotu. [Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine]. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(82), 87-95 [<https://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>]
7. Savenets, M., Nadtochii, L., Dvoretzka, I. (2018). NO₂ seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. *GeoScience Engineering*, LXIV, 4, 29–36. [<https://dx.doi.org/10.2478/gse-2018-0019>]
8. Savenets, M.V., Nadtochii, L.M. (2018). Otsinka neviznachenosti prostorovo-chasovogo rozpodilu zabrudnuyuchykh rehovyn miskoi atmosfery. [The estimation of uncertainties in spatio-temporal distribution of pollutants in the urban atmosphere]. *Proceedings of III International conference. Suchasni problem pryrodnychkh nauk: teoriya, praktyka, osviti novatsii. Nizhyn (Ukraine)*, 383–385
9. Baklanov, A. et al (2017). Enviro-HIRLAM online-integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2971–2999. [<https://dx.doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>]
10. Berkowicz, R. (2000). A simple Model for Urban Background Pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*. 65, 259-267. [<https://dx.doi.org/10.1023/A:1006466025186>]
11. Giaiotti, D., Oshurok, D., Skrynyk, O. (2018). The Chernobyl nuclear accident ¹³⁷Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric Pollution Research*. Vol. 9, Is. 3, 502-512. [<https://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>]
12. Su-Yin, Tan (2014). *Meteorological Satellite System*. Springer, 145.
13. Putrenko, V., Pashynska, N. The use of remote sensing data for modelling air quality in the cities. Available at: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-5-W1/57/2017/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.pdf>
14. Sentinel-5P. ESA missions. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinels/missions/sentinel-5p>
15. Sentinel-5P. First data release. Available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus_Sentinel-5P_releases_first_data
16. Sentinel-5P. Products and Algorithms. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms>
17. Sentinel-5P hub. Available at: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>
18. Google Earth Engine platform. Available at: <https://earthengine.google.com>
19. Harpconvert command line tool. Available at: <https://cdn.rawgit.com/stcorp/harp/master/doc/html/harpconvert.html>
20. Kurtenbach, R., Kleffmann, J., Niedojadlo, A., et al (2012). Primary NO₂ emissions and their impact on air quality in traffic environments in Germany. *Environ Sci Eur*. 24 [<https://dx.doi.org/10.1186/2190-4715-24-21>]
21. Brussels Environment. State of the Environment. Report 2011–2014 Available at: <https://www.environment.brussels/state-environment/report-2011-2014/air/air-quality-nitrogen-dioxide-concentrations>

Anastasiia Olegivna Splodytel,

PhD (Geography), Senior Research,

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,

34 Acad. Palladin Av., Kyiv, 03142, Ukraine,

e-mail: aspodytel@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8109-3944>

LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL CONDITION OF ENVIRONMENTAL PROTECTION TERRITORIES

А. О. Сплодитель. ЛАНДШАФТНО-ГЕОХІМІЧНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕРИТОРІЙ. Здійснено аналіз ландшафтно-геохімічних умов території національного природного парку (НПП) «Нижньосулський», встановлено закономірності розподілу важких металів у сучасному ґрунтовому покриві території НПП «Нижньосулський». Визначено закономірності просторового розподілу потенційно доступних форм важких металів. Встановлена динаміка накопичення Ni, Zn, Cu, V, Pb та інших важких металів в ґрунтовому покриві території протягом 2014-2019 років за рівнями імпаکتного забруднення. Аналіз ландшафтно-геохімічних умов території свідчить, що вони в цілому сприяють як міграції хімічних елементів з поверхневим стоком, так і значному вертикальному їх перерозподілу. Диференціація ландшафтно-геохімічних умов обумовлює фіксацію та акумуляцію значної кількості природних і техногенних хімічних елементів на ландшафтно-геохімічних бар'єрах (механічні, окисно-відновні, кисло-лужні, сорбційні, сорбційно-глейові). Це попереджує інтенсивне забруднення переважної більшості ландшафтних комплексів парку забруднюючими речовинами, які мігрують з сільськогосподарських угідь, що підтверджено результатами аналізу джерел та обсягів забруднення. Аналіз вмісту важких металів у ландшафтних комплексах території НПП «Нижньосулський» засвідчив його залежність від наявних джерел техногенного забруднення, а також високий ступінь відповідності характеру розподілу важких металів загальним закономірностям цих процесів у ґрунтах відповідних типів. Більшість ВМ надходять до Сулинської акваторії переважно під час весняної повені з талими сніговими водами. Було відмічено перевищення Cd^{2+} , Cu^{2+} і Pb^{2+} у воді порівняно з діючими нормами ГДК.

За результатами ландшафтно-геохімічного аналізу НПП «Нижньосулський» можна стверджувати, що територія з екологічної точки зору є слабо забрудненою і може використовуватися для розвитку рекреаційної діяльності з дотриманням низки вимог.

Ключові слова: ландшафтні комплекси, ландшафтно-геохімічні умови, важкі метали.

А. О. Сплодитель. ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ. Осуществлен анализ ландшафтно-геохимических условий территории национального природного парка (НПП) «Нижнесулский», установлены закономерности распределения тяжелых металлов в современном почвенном покрове территории НПП «Нижнесулский». Анализ ландшафтно-геохимических условий территории свидетельствует, что они в целом способствуют как миграции химических элементов с поверхностным стоком, так и значительному вертикальному их перераспределению. Определены закономерности пространственного распределения потенциально доступных форм тяжелых металлов. Установлена динамика накопления Ni, Zn, Cu, V, Pb и других тяжелых металлов в почвенном покрове территории в течение 2015-2019 годов при различных уровнях импаکتного загрязнения. Дифференциация ландшафтно-геохимических условий обуславливает фиксацию и аккумуляцию значительного количества природных и техногенных химических элементов на ландшафтно-геохимических барьерах (механические, окислительно-восстановительные, кисло-щелочные, сорбционные, сорбционно-глинистые). Это предупреждает интенсивное загрязнение подавляющего большинства ландшафтных комплексов парка загрязняющими веществами, которые мигрируют из сельскохозяйственных угодий, что подтверждено результатами анализа источников и объемами загрязнения. Анализ содержания тяжелых металлов в ландшафтных комплексах территории НПП «Нижнесулский» показал его зависимость от имеющихся источников техногенного загрязнения, а также высокую степень соответствия характера распределения тяжелых металлов общим закономерностям этих процессов в почвах соответствующих типов. Большинство ВМ поступают в акваторию Сулы преимущественно с тальми снеговыми водами. Было отмечено превышение Cd^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} в воде по сравнению с действующими нормами ПДК.

По результатам ландшафтно-геохимического анализа НПП «Нижнесулский» можно утверждать, что территория с экологической точки зрения является слабо загрязненной и может использоваться для развития рекреационной деятельности с соблюдением ряда требований.

Ключевые слова: ландшафтные комплексы, ландшафтно-геохимические условия, тяжелые металлы.

Formulation of the problem. The effectiveness of landscape-geochemical monitoring of protected areas largely depends on the rationalization of the system of ecological regulation and control. A reliable indicator of the ecological and geochemical state of the territory is the assessment of the distribution and migration of heavy metals (HMs) in soils and in the soil-plant system. The toxicity of HMs for protected areas, recreational areas as well as areas used as forest and agricultural lands within the NNP, is determined not only by their gross content. An important indicator is the content of moving

metal forms, which determines the expediency of their determination in the most sensitive components of the landscape.

Material and methods of research. The method of the soil-geochemical survey envisaged the sampling of the soil at a depth of 0-20 cm by the method of envelope as well as the profile of the soil in accordance with the current DSTU 4287:2004, DSTU ISO 10381-2:2004. The extraction of the gross forms of heavy metals contained in the soil was carried out with concentrated HNO_3 in accordance with the requirements, while the extraction of

mobile (fixed) forms of heavy metals – $1n \text{HNO}_3$.

Soil sampling was carried out in several stages in the spring-autumn period of 2015-2017. Plant sampling was performed equally from all the examined areas in two diagonal directions. In total, 970 soil samples, 10 varieties of wood and 25 varieties of herbaceous vegetation were selected. The presence of heavy metals in phytomass of plants was determined in their ash solutions by atomic absorption spectrometry. To assess the degree of hazard of the pollutant element, a concentration factor was used, i.e. the correlation between the concentration of the pollutant and its background content (GOST 17.4.3.06-86) and the total contamination index (Z_c) by Yu. E. Saet [8]. The assessment of the ecological condition of the soil according to the presence of moving forms of heavy metals was carried out by comparing their actual presence in soil based on the maximum permissible concentration and geochemical background for each type of soil.

Identification of previously unsolved parts of the general problem. Heavy metals are among the number of microelements that take an active part in the physiological, biochemical and geochemical processes that determine their localization in the soil. In this case, HMs are partially fixed and become stationary, partly – transform into a ground solution, and then are washed or absorbed by plants. Most of the HMs are fixed in the upper part of the soil profile [7-9].

Depending on the content, patterns of distribution and migration in soils, microelements can be essential and toxic. High concentrations of HMs in the landscapes of NNP generate a number of ecological problems. Accumulation of HMs violates the physical and chemical equilibrium and gives impetus to a number of processes that change the soil properties. In particular, the destruction of the soil absorbing complex occurs, the soil structure changes, the humus becomes dehumidifying, etc. [7,9]. Plants grown on contaminated soils usually contain HMs in excessive amounts. With high toxicity, HMs cause a negative change when they enter the human body.

Control over pollution of the territories by HMs provides for the restriction of their content in the components of the landscape in quantities that do not lead to negative environmental consequences [15,16]. The most effective ways to reduce the environmental risk of HMs contamination can be determined through comprehensive research. Informative in such studies is the determination of the forms of metal found in soils and the peculiarities of their physico-chemical migration, which characterize the ability of the elements to cross into adjacent environments, in particular in plants and groundwater. Without knowing the forms of migration of chemi-

cal elements and their behavior in the trophic chain, it is impossible to correctly assess the orientation of the natural process and give an accurate calculation of the accumulation of the element under study in a particular type of landscape.

The purpose of the article. The practice of systematic research of HMs content in the geosystems of the national natural parks of Ukraine is absent, therefore such background monitoring within the NNP is a relevant task.

Presentation of the main research material. The data from the territory of NNP “Nyzhniolsulskyi” were used for the analysis of the behavior of the HMs. The territory is sufficiently studied and there is a significant amount of landscape geochemical data obtained by the author during landscape and geoscience surveys (field as well as analytical), collected from funds and literary sources. The data are organized into the geoinformation system (GIS). Integrated GIS includes several layers of thematic data, in which information on vegetation, hydrography, soil covering, landscapes, land use structure, etc. is organized. The structuring of the available information is performed for the formation of the information module of landscape geochemical GIS. As a result, the following subject sections are determined: information on landscapes and soils of the territory (cartographic information), meteorological section, and soil-geochemical section.

Map information is represented by a landscape, a landscape geochemical map and the map of soils with a scale of 1: 25000 in a vector format [1,2] and the map of soil forming rocks with a scale of 1: 200 000. The meteorological information summarized by the data of Ukrainian Hydrometeorological Center includes the average monthly air temperature and precipitation. It is used for the study of fast soil-geochemical processes that respond to changes in weather conditions and the identification of natural and man-made trends. The soil-geochemical section is represented by the database (DB) with a two-level structure. The first level is a ground cut, which is determined by the number, the date of the description and the geographical coordinates, which allows to transfer information from the database to the map. The description of the section includes information on the factors of soil formation and the name of the soil.

The second level of the database is the morphological properties of the individual soil horizons (color, character of color, humidity, type of structure, granulometric composition, new formations and inclusion, the nature of the transition and the form of the boundary) and tables with relevant analytical data. The first table includes physico-chemical indicators of soil horizons (pH, humus content, physical clay content, moving iron content,

etc.). The second and third tables present the content of moving and gross forms of HMs. The data obtained during field and laboratory work are structured as sets of numerical information.

The landscape-geochemical GIS contains the coordinates and descriptions of more than 280 soil sections, as well as the results of chemical analyses: the content of humus, pH, concentration of gross and moving (in extract of 1n HCl) forms of Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Cr and moving Fe forms in the genetic horizons of the main types of soils common in the studied area.

The mobility of heavy metals was determined as the fraction of the separation of their moving forms contents in the soil by the content of gross forms, multiplied by 100%.

The mapping of the landscape-geochemical research was carried out using GIS-analysis and simulation methods.

The functional module of GIS includes:

- the spatial-temporal analysis of data using the apparatus of mathematical statistics and expert assessments;

- the development of geochemical and mathematical models for the description of migration and transformation of chemical elements in various landscape conditions;

- the construction of electronic maps of individual features and complex soil-geochemical maps of various purposes, content, on various time based on information from the soil-geochemical database on thematic maps (landscape, topography, vegetation);

- the creation of digital models of geochemical fields by the method of landscape-oriented interpolation;

- the construction of maps of dynamics of soil-geochemical indicators on the basis of several time-scale maps.

The structural and functional heterogeneity of the landscapes of the territory of the NNP, the excellent types of interactions and directions of migration flows lead to uneven redistribution of microelements and their compounds in the lateral and radial directions.

Lateral migratory flows contribute to spatial heterogeneity of landscapes. In turn, the radial heterogeneity of the landscapes reflects the nature of the interaction and the relationship between its components such as soil and soil forming rock, soil-surface water, soil-plant, etc. [12,13,21].

For the territory of the NNP "Nyzhniosulskyi", we investigated the laws of lateral and radial redistribution and behavior of HMs in soils as the most sensitive component of the landscape.

To carry out the research, the following tasks were performed: 1) control platforms were established within the NNP and adjacent territories; 2) the

selection of soil and vegetation samples; 3) the physical and chemical parameters of soils were investigated; 4) the content of gross and moving forms of heavy metals in the soil covering was determined; 5) the ecological state of landscapes was estimated on the basis of calculated concentration factors and total pollution index.

The conducted works allowed to determine the distribution of HMs depending on the factors of their migration and to assess the trends in the change of their content. The interpretation of the obtained results revealed the nature of the effect of hydrogenogenic iron, organic matter, mold fraction, Eh and pH of the medium on the maintenance of hydrogen forms of the HMs. The analysis of the mechanisms and processes that determine the picture of the spatial distribution of HMs in the soils of the territory of the NNP allowed to establish their general patterns.

Landscapes of the territory are dominated by the landscape hole of the segment-ruffed and segment-island floodplains. The soil cover of these holes are dominated by alluvial turf, usually salted, sometimes carbonate, glued soils in the lower part of the profile [16-21].

We carefully studied the landscapes of moraine-loess and loess terraced plains of deep humus surface slightly alkaline slightly mid-loamy black soil and with saline meadow- black soil deep mid-loamy salines on the moraine and loess loams, turf underdeveloped sandy soils of varying degrees of gleying on fluvio-glacial sand and alluvial turg gley deep-solar soils on sediments of different granulometric composition.

Anthropogenic impact, besides agricultural activity, is associated here with large enterprises, in particular Poltava Mining and Processing Plant in Komsomolsk, Ukrtatnafta in Kremenchuk, Kremenchuk Steelmaking Plant, Kremenchuk Petroleum Product (petroleum station 55, Chornobaivskyi district), Ukrnafta (gas station number 230/05, Irkliy village, Chornobaivskyi district), NadezhdaRetail (gas station, Chernobay), Ukrtransgas (village Mala Burimka, Chornobaivskyi district), Kremenchuk Petroleum Product Service (storage and sales of oil products), the stock of the poison chemicals of the Chorolskaya Agrochemistry, etc.

Wastes of enterprises include substances of I-IV classes of danger. In particular, spent mercury lamps, oils and motor oils, zinc slag, spent x-rays and lubricating liquids, ferrous metal cuttings, spent electrodes and batteries for lead accumulators, galvanic sludges, non-ferrous metal scrap (aluminum, copper, brass, bronze, nickel, aluminum cuttings), marble carbide, etc.

In soil samples, selected on the territory of the NNP, the gross amount of lead was the highest. The

concentration of Pb is 25-40 mg/kg and exceeds the background and MAC, which are respectively 8-10 mg/kg and 30 mg/kg. The increased content of gross forms of copper, titanium, and chromium was recorded. The excess of the background in virtually all studied soil samples was recorded for V (content reaches 50-60 mg/kg) and Ti (3000-4000 mg/kg). The content of these chemical elements is within the limits of the MAC, but sometimes the values obtained exceed it and equals, respectively, 60-70 mg/kg and 5700 mg/kg [56]. The amounts of Ni (6-8 mg/kg) and Co (3-5 mg/kg) in the soil are close to the background, and a slight excess of their background values was observed at points 101-15, 107-15, 108-15, 129-15. The concentration of Mo and Zn is relatively low (within the limits of 1-2 mg/kg and 50 mg/kg respectively) and is below the background values. However, Zn is characterized by local excesses at monitoring points 32-15, 102-15, 110-15, 113-15, 129-15 (80-100 mg/kg).

The analysis of the data shows that the distribution of HMs in soils is uniformly-accumulative in its nature, but several basic laws may be distinguished, which can be traced within the studied area:

- The distribution of Pb is fundamentally different from the distribution of other studied HMs. Pb compounds are concentrated, mostly in the humus profile, with a gradual permanent migration to lower horizons. The migratory capacity of Pb is on average 10-14%, in the humus horizon the migration capacity is $15 \pm 8\%$, which indicates its exogenous origin. The latter may be due to the use of gasoline fuels for the extraction and processing of petroleum products as well as waste of lead batteries and electrodes;

- Zn and Cu are mostly localized in the upper transition profile, as well as in the humus horizon. The migratory capacity of these HMs in soils is low; for Zn it is 7% practically irrespective of the profile, for Cu it is <4-5%, and for Cr it is 4%, with the highest index in the humus horizon of 8%. An indication of such distribution is the endogenous origin of the above-mentioned HMs due to the transformation of soil-forming rocks;

- Alkaline conditions contribute to the reduction of the content of the moving forms of all investigated pollutants. However, the influence of pH on the behavior of Sr was not detected. In Cu, Pb, Ni in the reducing gluten medium, the concentration of moving forms decreases, in Zn it slightly increases;

- The content of the moving forms Cu, Zn, Pb, Cr, Ni increases according to the content of the moving Fe and usually leads to the accumulation of moving forms of these elements;

- A moving Mn form has a significant effect on the behavior of the HMs. Their concentration in-

creases a number of moving forms of Co, Zn, Pb, Ni and decreases Cu and Cr;

- The moving forms of Mn, Cr, Ni have a direct positive relationship with their gross concentrations. The inverse relationship between these indices is characteristic of Cu, while it is absent in Pb and Zn. The behavior of Cu is distinguished by the greatest individuality, therefore it was not possible to track its laws.

The gross metal concentrations in the soil profile of the alluvial turf sandy soils are reduced by 1.5-2 times compared with the loamy analogues. Most clearly, this pattern is manifested in Cr, V, Ni, Zn, and the concentration of Cu and Pb is less sensitive to the change in the granulometric composition of the horizons. The humus horizons of alluvial sandy soils are characterized by a less contrasting decrease in gross metal concentrations compared to loamy soils. This indicates the convergence of the content of elements in the humus horizons of soils on various soil forming rocks. The content of the mobile forms of Mn, Pb, Cu, Zn in sandy soils is 2-3 times, while Cr, Ni is 10-15 times lower compared with loamy soils.

In typical black earths and turf loamy soils, a soil forming rock is a forest-like loam that is bedrocked with moraine. The content of humus is slightly higher – from 1,5 to 3,3%. The pH value is practically the same for both types of soils, but for turf soils, its variability is significantly higher – from 4 to 6.1. This contributes to the accumulation of heavy metal cations due to the reduction of their migration capacity when consolidated in the soil-absorbing complex. The average content of metals in typical low-humus loamy black earths is 30-40% higher on average than in sod-podzolic loamy soils, which is probably due to inland drainage. The gross content at the sampling points (115-15, 118-15, 124-15) is higher than the background values; in some cases, the excess MAC was recorded: Ni - 60 mg/kg (with background values 22 mg/kg), Ti - 3000 mg/kg (2250 mg/kg), V - 50-60 mg/kg (41 mg/kg), Cr - 50-60 mg/kg (49 mg/kg), Cu - 80-100 mg/kg (12-16 mg/kg), Pb - 40-50 mg/kg (10 mg/kg).

Absolute values of moving metal forms and their mobility in turf soils are close to the corresponding values of alluvial loamy soils, only in Cr content in the humus horizon is almost 2 times lower. The variability of the moving metal forms is also preserved at the previous level in most of the elements, except for Pb and Sr, in which it grows 1.4-2.2 times (Fig. 1, Fig. 2).

Turf sandy soils on fluvioglacial sands with absolute content of gross and moving forms of metals are close to turf-podzolic with similar granulometric composition.

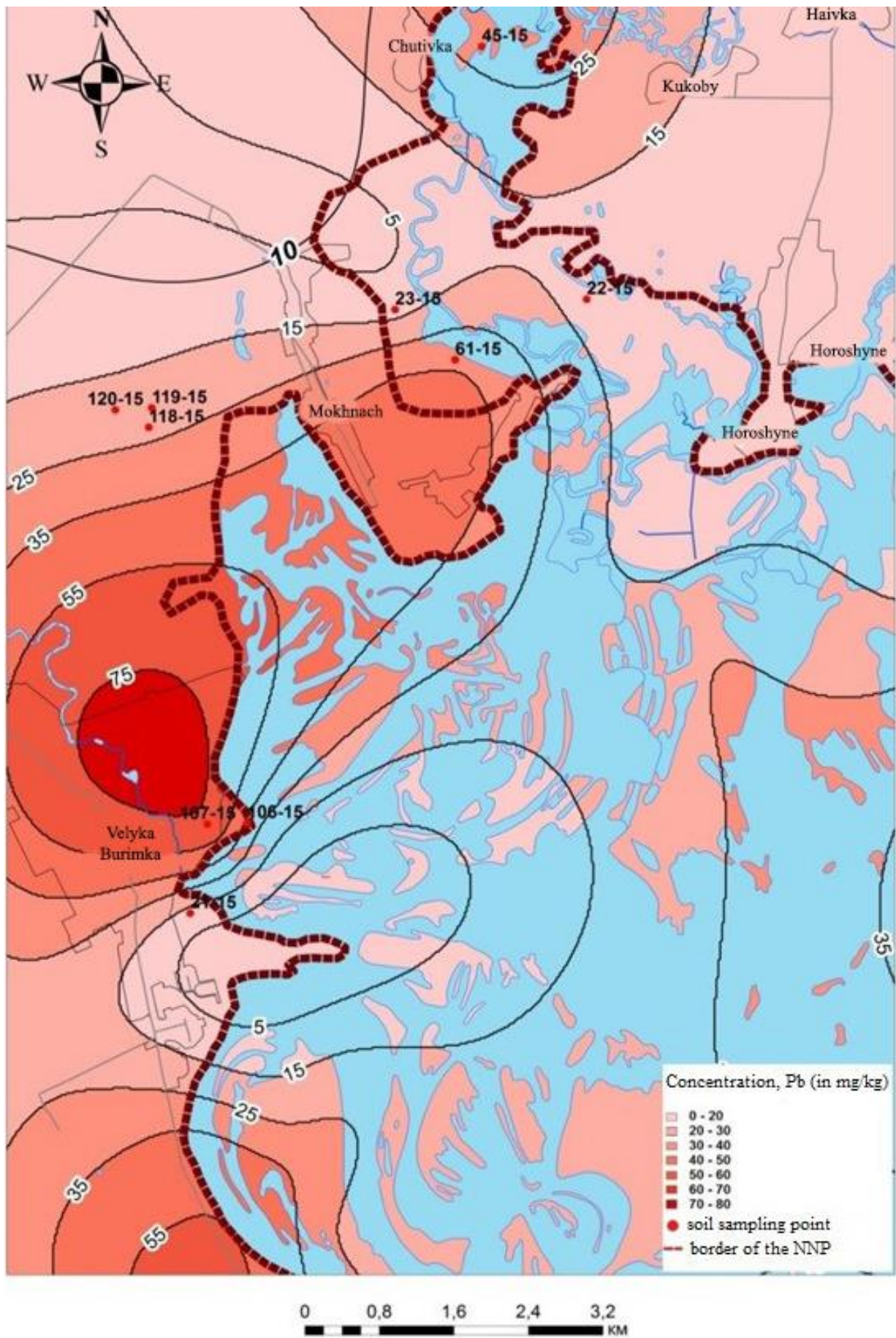


Fig. 1. Distribution of Pb in the modern soil cover of the territory of the NNP "Nyzhniosulskyi"

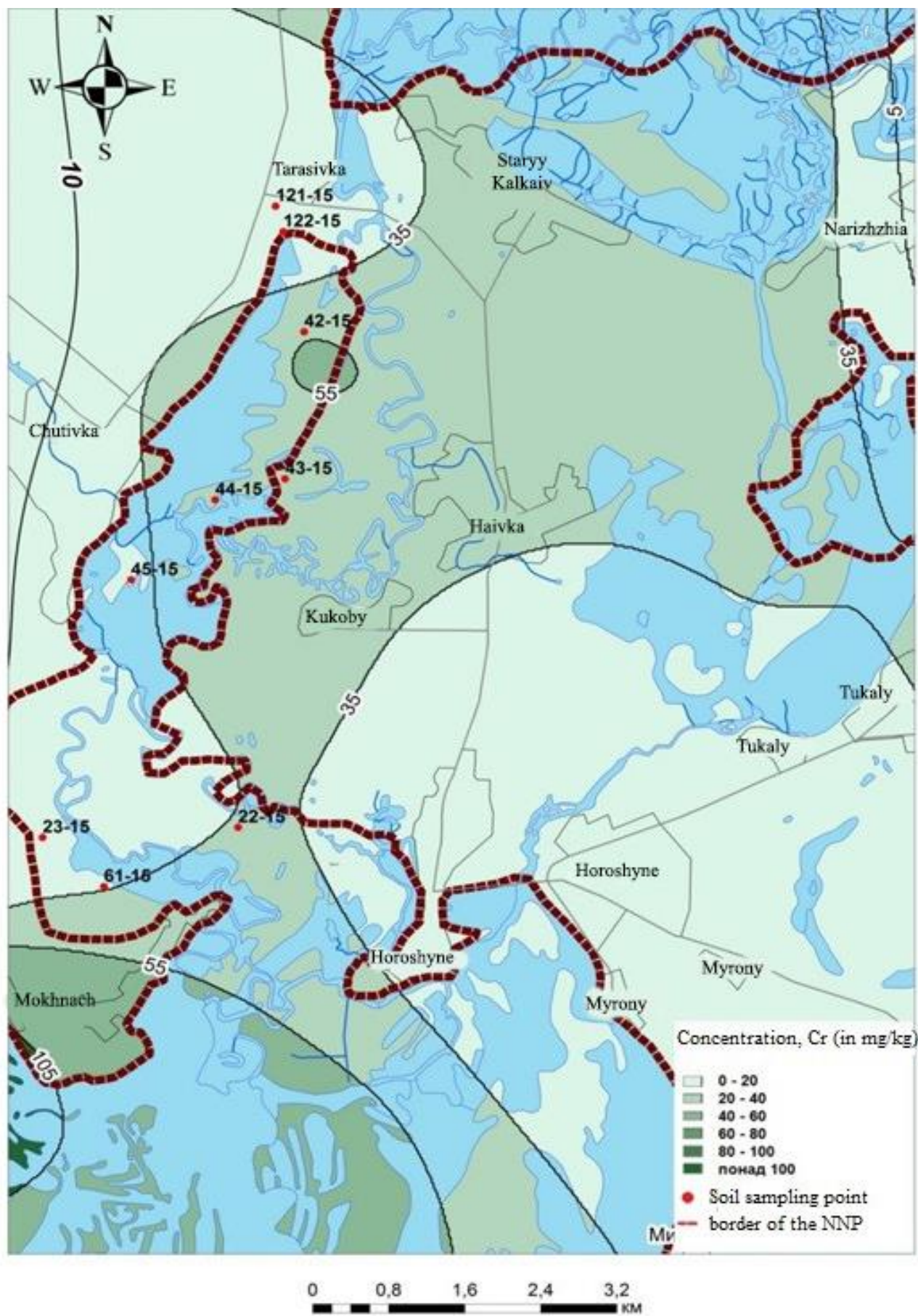


Fig. 2. Distribution of Cr in the modern soil cover of the territory of the NNP "Nyzhniosulskiy"

Alluvial turf glued saline soy sandy soils are characterized by the layering of soil-forming deposits, the presence of buried humus horizons, and high content of humus – 1.9-2.96%. The influence of groundwater is manifested in the gluing either of the lower part or the entire profile, as well as in the alkalinity of the soil solution. Therefore, the lower horizons are characterized by a reducing weak-alkaline (pH > 7) reaction.

Due to the light granulometric composition of soil formation rocks and significant deviation of the bottom of the valley of the Sul River, the moving forms of the HMs are carried out from alluvial soils, that is why they are 1.3-1.5 times frequent there less than in soils of the plain-terraced plains, with the exception of Ni. Alluvial turf gley soils have the highest concentration of HMs, which is explained by the deposition of elements coming from the inland side drain.

Among the marsh soils, turf-gley soils are predominant in lowland marshes in old-age declines. In these soils, besides the ground waters, a specific role is played by the specific marsh vegetation, which determines the acidic reaction of the medium of the upper horizon – pH 4.7-5.4, and the accumulation of organic matter. The content of most metals in marsh soils is almost the same as in turf loamy soils, with the exception of (Cu and Mn). The gross content of Cu (50-100 mg/kg) is 8-10 times, and Mn (660 mg/kg) is 2-3 times higher than the background indices, respectively, 5.3 and 166 mg/kg.

The regularities of the radial redistribution of HMs on the genetic horizons of the characteristic soils of the NNP were studied on the example of the points of the complex description. In the studied soil profiles, similar tendencies of radial redistribution of heavy metals were recorded.

In particular, the content of Pb grows down the profile. Cu is usually accumulated in the upper soil horizon, which is explained by anthropogenic impact, as well as its bioaccumulation [15,17-21]. This is confirmed by our research as well. Chromium compounds are also washed along with downstream moisture streams. The content of nickel practically does not change on the profile of the studied soil sections. The given data on the distribution of pollutants in the soil cover of landscapes of the NPP is an example that illustrates the relevance of this analysis, especially for protected areas.

Conclusions. The analysis of heavy metals in the landscape complexes of the territory of NNP “Nyzhniosulskyi” confirmed its dependence on available sources of technogenic pollution. It also confirms a high degree of compliance of the character of HMs distribution with general laws of these processes in soils of the corresponding types. The main direction of further research should be improvement of the system of landscape and geochemical monitoring of the territories, where there are nature protection objects, and adjacent territories for the purpose of detection of pollution centers and improvement of ways of reducing their concentration to allowable norms.

References

1. Alloway B.J. *Heavy metals in soils* / B.J. Alloway. – 2nd edit., Blackie Acad., London, 1995. – 368 p.
2. Bakker D.J., de Vries W. *Effect-based approaches to assess the risks of persistent organic pollutants to soils. Background document for the workshop on critical limits and effect-based approaches for heavy metals and POP's.* / D.J. Bakker, W.Vries. – Bad Harzburg, Germany, 1997. – 85 pp.
3. Basy A.N. *Fitting of a Markov chain model for daily rainfall data at Calcutta* / A.N. Basy. – *Indian J. Meteorol. Geoph.*, vol.22. – 1971. – P. 67-72.
4. Bril J. *The behaviour of dissolved humic substances in neutral soils* / J. Bril. – DLO Institute for Agrobiological and Soil Fertility Research, Haren, The Netherlands, 1996. – 278 p.
5. Buffle J. *Complexation reactions in aquatic systems* / J. Buffle. – Ellis Horwood. Chichester, 1988. – 83 pp.
6. Bergkvist A., Folkesson L., Berggren D. *Fluxes of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni in temperate forest ecosystems* / A. Bergkvist, L. Folkesson, D. Berggren. – *Water, Air and Soil Pollution*, vol.47, 1989. – P. 217-286.
7. Fiskesjo G. *The Allium-test – an alternative in environmental studies the relative toxicity of metal ions* / G. Fiskesjo, *Mutat. Res.* – N 197, 1988. – P. 243-260.
8. Кабата-Пендиас А. *Микроэлементы в почвах и растениях* / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
9. Lubben S. *The uptake and distribution of heavy metals by spring wheat* / S. Lubben, D.R. Sauerbeck. – *Water, Air and Soil Pollution*, v.57-58. – 1991. – P. 239-247.
10. Samonova O.A. *Mobile forms of Heavy Metals in sodpodzolic soils of Southern taiga landscapes* / O.A. Samonova, N.S. Kasimov, N.E. Kosheleva. – *Proc. of 16th World Soil Congress (on CD-ROM), Montpellier, France. Simp.VI*, 1988. – 6 pp.
11. Sankaran U.K. *Heavy metals uptake and accumulation by Typha angustata from Wetlands around thermal power station* / U.K. Sankaran, S. Phillip. – *Int. J. Ecol and Environ Sci.* – V.16, N2-3. – 1990. – P. 113-144.
12. Sauerbeck D.R. *Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge* / D.R. Sauerbeck. – *Water, Air and Soil Pollutions*, v.57-58. – 1991. – P. 227-237.

13. Sauerbeck D.R. *The nickel uptake from different soil and prediction by chemical extractions* / D.R. Sauerbeck, A. Heir. – *Water, Air and Soil Pollutions*, v.57-58. – 1991. – P. 861-874.
14. Sillanpaa M. *Trace elements in soils and agriculture.* / M. Sillanpaa. – *FAO soils bulletin, Rome.* – Vol.17, 1972. – 67 pp.
15. Verloo M. *Analytical and biological eriteria with regard to soil pollution* / M. Verloo, A.M. Cottenie. – *Landwirtschaftliche Forschung. Kongressband, 1982.* – P. 394-403.
16. Tessier A. *Sequential extraction procedure for the speciation of the particulate trace metals* / A. Tessier, P.G. Campbell, M. Bisson. – *Anal. Chem*, № 51. – 1979. – P. 844-851.
17. Воробьева Л.А. *Тяжелые металлы в окружающей среде* / Л.А. Воробьева, Т.А. Рудакова, Е.А. Лобанова. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – С. 28-34.
18. Виноградов А.П. *Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах* / А.П. Виноградов. – Москва: АН СССР, 1957. – 238 с.
19. Жовинський Е.Я. *Еколого-геохімічні дослідження об'єктів довкілля України* / Е. Я. Жовинський, І. В. Кураєва. – Київ : Альфа-реклама, 2012. – 156 с.
20. Жовинський Е.Я. *Важкі метали у ґрунтах заповідних зон України* / Е.Я. Жовинський, І.В. Кураєва, А.І. Самчук, В.Й. Манічев, Н.О. Крюченко. – *Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України.* – К. : Логос, 2005. – 104 с.
21. Whalley C. *Assessment of the phase selectivity of the European Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment* / C. Whalley, A. Grant. – *Analit. Chem. Acta*, V. 61, 1980. – P. 2211-2221.

UDC 550.424.4

Anastasiia Olegivna Splodytel,

PhD (Geography), Senior Research,

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,

34 Akademik Palladin Prosp, Kyiv, 03142, Ukraine,

e-mail: aspodytel@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8109-3944>

LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL CONDITION OF PROTECTED TERRITORIES

Purpose. The problem of environmental pollution by heavy metals is one of the most important problems of the present and the near future. The compounds of these elements are characterized by high toxicity, mobility and ability to bio-accumulation. The aim of the study was to establish the main regularities of trace elements of the national natural park (NNP), to determine the indicators of their mobility for assessment of state of environment.

Scientific novelty. The article discusses the features of distributing of heavy metals in the components of landscapes of the territory of the national natural park for realization of control and settlement of his concentration in accordance with the set norms.

Results. The analysis of the landscape-geochemical conditions of the territory of the national natural park “Nyzhniosulskyi” has been performed. Consistent patterns of heavy metals distribution in the modern soil of the territory of NNP “Nyzhniosulskyi” have been determined. The analysis of landscape-geochemical conditions of the territory indicates that they generally contribute to the migration of chemical elements with land runoff as well as their significant vertical redistribution. The differentiation of landscape-geochemical conditions causes the fixation and accumulation of a significant number of natural and man-made chemical elements on the landscape-geochemical barriers (mechanical, redox, acid-alkaline, sorption, sorption-gley). This prevents from intense pollution of the vast majority of landscape regions in the park by polluting substances migrating from agricultural lands, which is confirmed by the results of the analysis of pollution sources and volumes.

It was shown, that processes of transformation and migration of heavy metals compounds in the soil profile are determined by physical and chemical properties of soils. The analysis of the content of heavy metals in the soils of NNP “Nyzhniosulskyi” has shown that , the distribution of heavy metals is uniformly dispersive, but the variations in the content of certain heavy metals can range from $\pm 7\%$ to $\pm 25\%$ - 35% . The greatest bioaccumulation capacity is expressed in biogenic microelements – manganese and cuprum.

The analysis of heavy metals content in the landscape regions of NNP “Nyzhniosulskyi” has confirmed its dependence on available sources of technogenic contamination as well as the high degree of compliance of the nature of heavy metals distribution to the general laws of these processes in the soils of the relevant types. Most heavy metals get into the Sulyn aquatorium mainly during spring flood with snow melt water.

The excess of Cd^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} in water has been noted in comparison with the current threshold level value regulations.

According to the results of the landscape-geochemical analysis of the NNP “Nyzhniosulskyi”, it can be stated that the territory from the ecological point of view is poorly contaminated and can be used for the development of recreational activities in compliance with a number of requirements.

Practical significance. The results of this study have been introduced into practice of the NNP “Nyzhniosulskyi” in organizing and conducting research work, for planning tourist and recreational activities, forming tourist routes, and organizing recreational infrastructure.

Keywords: landscape regions, landscape-geochemical conditions, heavy metals.

References

1. Alloway B.J. (1995). *Heavy metals in soils*. 2-nd edit., Blackie Acad., London. 368.
2. Bakker D.J., de Vries W. (1997). *Effect-based approaches to assess the risks of persistent organic pollutants to soils. Background document for the workshop on critical limits and effect-based approaches for heavy metals and POP's. Bad Harzburg, Germany*, 85.
3. Basy A.N. (1971). *Fitting of a Markov chain model for daily rainfall data at Calcutta*. *Indian J. Meteorol. Geoph.*, 22, 67-72.
4. Bril J. (1996). *The behaviour of dissolved humic substances in neutral soils*. DLO Institute for Agrobiological and Soil Fertility Research, Haren, The Netherlands, (report), 278.
5. Buffle J. (1988). *Complexation reactions in aquatic systems*. Ellis Horwood. Chichester, 83.
6. Bergkvist A., Folkesson L., Berggren D. (1989). *Fluxes of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni in temperate forest ecosystems*. *Water, Air and Soil Pollution*, 47, 217-286.
7. Fiskesjo G. (1988). *The Allium-test – an alternative in environmental studies the relative toxicity of metal ions*. *Mutat. Res.*, 197, 243–260.
8. Kabata-Pendias A. (1989). *Microelements in soils and plants*. M., Mir, 439 [in Russian]
9. Lubben S., Sauerbeck D.R. (1991). *The uptake and distribution of heavy metals by spring wheat*. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, 239-247.
10. Samonova O.A., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. (1998). *Mobile forms of Heavy Metals in sodpodzolic soils of Southern taiga landscapes*. *Proc. of 16th World Soil Congress (on CD-ROM), Montpellier, France. Simp. VI*, 6.
11. Sankaran U.K., Phillip S. (1990). *Heavy metals uptake and accumulation by Typha angustata from Wetlands around thermal power station*. *Int. J. Ecol and Environ Sci.*, 16, 2-3, 113-144.
12. Sauerbeck D.R. (1991). *Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge*. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, 227-237.
13. Sauerbeck D.R., Heir A. (1991). *The nikel uptake from different soil and prediction by chemical extractions*. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, 861-874.
14. Sillanpaa M. (1972). *Trace elements in soils and agriculture*. *FAO soils bulletin, Rome*, 17, 67.
15. Verloo, Cottenie A., (1982). *M. Analytical and biological eriteria with regard to soil pollution*. *Landwirtschaftliche Forschung. Kongressband. S.-H.* 39, 394-403.
16. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. (1979). *Sequential extraction procedure for the speciation of the particulate trace metals*. *Anal. Chem*, 51, 844-851.
17. Vorobyova L.A., Rudakova T.A., Lobanova E.A. (1980). *Elements for predicting the concentrations level of heavy metals in soil solutions of aqueous extracts from soils*. *Heavy metals in the environment. M., Moscow State University*, 28-34 [in Russian]
18. Vinogradov A.P. (1957). *Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils*. *Moscow: Academy of Sciences of USSR*, 238 [in Russian]
19. Zhovynskyi E.Ya, Kuraeva I.V. others. (2012). *Ecological and geochemical studies of environmental objects of Ukraine*. K., “Alfa-reklama”, 156 [in Ukrainian]
20. Zhovynskyi E.Ya, Kuraeva I.V., Samchuk A.I. others. (2005). *Heavy metals in soils of preserved areas of Ukraine*. K., Lohos. 104 [in Ukrainian]
21. Whalley C., Grant A. (1994). *Assessment of the phase selectivity of the European Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment*. *Analit. Chem. Acta*, 61, 2211-2221.

UDC 504.064:546.30

Elina Borysivna Khobotova,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Department of TRBM and Chemistry,
Kharkov National Automobile and Highway University,
25 Yaroslav Mudry St., Kharkov, 61002, Ukraine,
e-mail: elinahobotova@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6377-5186>;

Vasyl Ivanovich Larin,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Director of the Research Institute of Chemistry,
V. N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: ndichem@karazin.ua, <http://orcid.org/0000-0002-1136-9626>;

Inna Valeriivna Hraivoronska,

PhD (Technics), Associate Professor, Department of Metrology and Life Safety,
Kharkov National Automobile and Highway University,
e-mail: inna_gra@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-8537-0435>

EVALUATION OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN THE ZONE OF TPP INFLUENCE

Е. Б. Хоботова, В. І. Ларін, І. В. Грайворонська. ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ У ЗОНІ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ. За масштабами впливу на навколишнє середовище теплова енергетика посідає одне з перших місць. Викиди ТЕС в основному осідають на ґрунт. Сполуки ґрунту на тривалий термін зв'язують іони важких металів (ВМ), перешкоджають їх міграції. Буферна ємність ґрунту щодо металів залежить від багатьох факторів: складу ґрунту, кислотності, процесів комплексоутворення, окиснення–відновлення, сорбції–десорбції та ін. Вивчення вмісту ВМ у ґрунтах необхідне для контролю за станом навколишнього середовища, охорони його від забруднення. Одним з найкрупніших забруднювачів навколишнього середовища в Харківській області є Зміївська ТЕС. Мета роботи – визначення особливостей забруднення ВМ ґрунтів поблизу Зміївської ТЕС та розробка рекомендацій щодо покращення ситуації.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі: встановлення особливостей акумулювання окремих ВМ у ґрунтах; визначення залежності між рН ґрунтів та наявністю в них певних хімічних елементів; вивчення залежності між складом забруднення і утворенням малорозчинних сполук у ґрунтах.

Результати роботи. Встановлено, що найбільш забрудненою є територія, розташована від джерела викиду в радіусі 10 км. Найбільш поширеними забруднювачами є Си, Sr, Со, V, Cr. Ґрунти басейна р. Сіверський Донець більшою мірою утримують іони Си, Zn і Pb. Наукова новизна. Метали V, Cr є аніогенами, кислотні залишки утворюються в слабо лужних ґрунтах і з ВМ утворюють нерозчинні або малорозчинні сполуки, що приводить до їх накопичення. У ґрунтах виявлено сполуки SrCrO₄, SrCr₂O₇, Sr(VO₃)₂, Zn₂V₂O₇, Zn₃(VO₄)₂, Zn(VO₃)₂. На підставі визначення коефіцієнтів поліелементного забруднення показано, що в ґрунтах з високою гумусністю, буферністю і здатністю утворювати комплекси з іонами металів вище максимальні концентрації ВМ і ширше розкид концентрацій за винятком Pd, Zn і Cd. Визначені кореляційні залежності між рН і вмістом макро- і мікроелементів в різних ґрунтах. Найбільший коефіцієнт кореляції між концентрацією Al і рН (0,6-0,9). Розроблено рекомендації для зниження рівня забруднення ВМ ґрунтів поблизу Зміївської ТЕС: реконструкція котлоагрегату, встановлення електрофільтра для вловлювання золи, використання золошлакових відходів у виробництві портландцементу, ваннування ґрунтів з метою дискримінації ВМ.

Ключові слова: ґрунти, важкі метали, забруднення, викиди, теплові електростанції, рН ґрунтів.

Э. Б. Хоботова, В. И. Ларин, И. В. Грайворонская. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. По масштабам воздействия на окружающую среду тепловая энергетика занимает одно из первых мест. Выбросы ТЭС в основном оседают на почву. Соединения почвы на длительный срок связывают ионы тяжелых металлов (ТМ), препятствуют их миграции. Буферная емкость почвы по металлам зависит от многих факторов: состава почвы, кислотности, процессов комплексообразования, окисления-восстановления, сорбции-десорбции и др. Изучение содержания ТМ в почвах необходимо для контроля за состоянием окружающей среды, охраны его от загрязнения. Одним из крупнейших загрязнителей окружающей среды в Харьковской области является Змиевская ТЭС. Цель работы – определение особенностей загрязнения ТМ почв вблизи Змиевской ТЭС и разработка рекомендаций по улучшению ситуации. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: установление особенностей аккумуляции отдельных ТМ в почвах; определение зависимости между рН почв и наличием в них определенных химических элементов; изучение зависимости между составом загрязнения и образованием малорастворимых соединений в почвах. Результаты работы. Установлено, что наиболее загрязнена территория, расположенная от источника выброса в радиусе 10 км. Наиболее распространенными загрязнителями являются Си, Sr, Со, V, Cr. Почвы бассейна р. Северский Донец в большей степени удерживают ионы Си, Zn и Pb. Научная новизна. Металлы V, Cr являются аниогенами, кислотные остатки образуются в слабо щелочных почвах и с ТМ образуют нерастворимые или малорастворимые соединения, что приводит к их накоплению. В почвах выявлены соединения SrCrO₄, SrCr₂O₇, Sr(VO₃)₂, Zn₂V₂O₇, Zn₃(VO₄)₂, Zn(VO₃)₂. На основании определения коэффициентов полиэлементного загрязнения показано, что в почвах с высокой гумусностью, буферностью и способностью образовывать комплексы с ионами металлов выше максимальные концентрации ТМ и шире разброс концентраций за исключением Pd, Zn и Cd. Определены корреляционные зависимости между рН и содержанием макро- и микроэлементов в различных почвах. Наибольший коэффициент корреляции между концентрацией Al и рН (0,6–0,9). Разработаны рекомендации для снижения уровня загрязнения ТМ почв вблизи Змиевской ТЭС: реконструкция котлоагрегата, установление электрофильтра для улавливания золы, использование золошлаковых отходов в производстве портландцемента, известкование почв с целью дискриминации ТМ.

Ключевые слова: почвы, тяжелые металлы, загрязнение, выбросы, тепловые электростанции, рН почв.

Formulation of the problem. By the scale of the impact on the environment thermal power engineering takes one of the first places. Hundreds of thermal power plants (TPP) and central heating-and-power plants burn millions of tons of organic fuels. They account for about 25 % of all harmful emissions. Thermal power engineering is also responsible for 12 % of solid industrial wastes. They are mainly ash and slag. Lately, ash has been used for various purposes. However, one of its disadvantages is available heavy metals (HM) in its composition. TPP emissions are predominantly deposited on the soil. Soil in the urboecosystem performs one of the main roles. It is in it that metals are closed as anthropogenic pollution. The compounds of the soil bind ions of metals for a long time, preventing their migration. The soil buffer capacity for metals depends on many factors: type and composition of the soil, humus content, acidity, complexation processes, oxidation–reduction, sorption–desorption, and others.

Recently, numerous studies have been carried out on the comprehensive assessment of HM contamination of soil urboecosystems taking into account environmental safety standards [1–4]. The method of determining the ecological risk at different levels of soil pollution with lead [2] and manganese [3] has been improved. A biological toxicity test of soils was conducted to determine the degree of soil contamination by metal compounds [4].

Analysis of recent research and publications.

The study [5] shows that thermal power station contaminates the surrounding soil with toxic elements: Cr, Fe and Zn, reduced soil fertility and variety of beneficial soil microorganisms. The chemical composition of soils along the profile near Kolaghat thermal power plant (India) was investigated [6]. For soils near the dump of ash, there is observed a maximum contamination with elements Mo, As, Cr, Mn, Cu, Ni, Co, Pb, Be, V, Zn at a depth of 2–5 cm. The soils near Egbin thermal station (Nigeria) was polluted of Cu and Zn [7]. There were positive correlations between concentrations of HM in the soils and in the plants. In the paper [8] maps of spatial contamination of soils with heavy metals from a source – a coal-fired thermal power plant of high power (Serbia) – were compiled. Concentration coefficients in the soil varied in the range of 0.3–15.5. Soil pollution is studied not only when thermal power plants use black and brown coal, but also other types of fuel, for example, lignite. The work [9] determines the level of soils and water pollution near suchlike power plant in Northern Greece, as well as food produced in the region. The pollution of the soils in Montenegro with heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn is mainly due to anthropogenic pol-

lution [10]. The concentrations of lead and cadmium are about twice as high as their background levels.

Studies of Chinese scientists [11–14] are of interest. The authors of [11] showed that a power plant in Guizhou Province contributes to the Hg pollution in nearby soils. The soils in the vicinity of Luohe Power Plant are contaminated by As and Cd. The accumulation index for soil and risk assessment for health were determined [12]. Mercury emission from coal-fired power plants results in the formation of methyl mercury in the environment. The authors [13] discovered its increased content in rice, which is grown on the territory near the coal-fired power station. A number of recommendations have been developed for reducing the emissions of heavy metals from thermal power plants [14].

The source of HM during TPP operation is both fine particles of ash and ash that goes into ash dumps. The highest amount of smoke emissions sedimentates in the area of 2.5–4.0 km from power plants. Ash that is blown from ash dumps can create HM concentrations in the soil several times as high as the emissions from pipes [15]. This is the soil that is in the center of a cross-border transfer, HM migration. Examination of the HM content in the soils is necessary for monitoring the environment, its protection from pollution, the background amount of HM being the starting point [1].

The influx of HM into plant tissues through the root system is influenced by soil pH, redox conditions, competition between cations, hydrolysis, the formation of insoluble salts [16]. Mathematical models that describe the dependence of the yield of vegetable and orchard crops depending on a set of external factors have been created [17].

Identification of previously unsettled parts of the general problem. One of the largest pollutants in Kharkiv region is Zmiiv TPP, situated in the Siverskyi Donetsk Basin. It is included in the system of Production Energy Association "Kharkivenergo" of Ministry of Power Engineering of Ukraine. The share of Zmiiv TPP is about 60 % of the total volume of industrial emissions in Kharkiv region [18]. Zmiiv TPP pollutes the air due to emissions of combustion products. Coal of "ASH" grade is used as the main fuel at TPP, with its average calorific capacity of 4608 kcal/kg, ash content – 31.2 %, humidity level – 8.3 %. For steam generation the power boilers TP–100 are installed. They are equipped with two individual systems of pulverization with an intermediate hopper. The pulverized coal enters the separator where large fractions are separated and returned to the mill. After the separator the pulverized coal enters the cyclone, and then dropped into the furnace. Furnace gas is cleaned from ashes in the blocks of 200 MW in wet ash catchers; in the blocks of 300 MW in electric filters. The efficiency of the

available ash catchers is only 90 %, which does not provide the required degree of purification. The highest non-recurrent concentrations of pollutants in the atmosphere exceed ash maximum permissible concentration (MPC) 5.4 times [18]. Additionally, the air is polluted by the ash dump of the TPP, from the surface of which 104.3 tons of dust, sedimentated in the soil, are blown away per year. HM incoming from the ash dump is also possible with drainage water when leaching HM from slag and washing away fine-grained fractions of ash. The ash dump covers an area of 350 hectares and the volume of the accumulated ash and slag mixture is about 25 million tons. In the ash dump area the slag and ash tank is placed to collect 400 thousand of tons of ash and slag per year [19].

Paper [20] gives field figures and maps of soils contamination by HM in Kharkiv region. But there is a lack of systematized data on HM contamination of soils near Zmiiv TPP, there is almost no data on HM migration in soils, dependence of accumulation of chemical elements on the soil type and acidity and possibility of making compounds of different solubility in water. Obtaining such data may contribute to the development of recommendations for protection of soils against pollution and discrimination of the HM in the ground.

The aim and tasks of the research. The aim of the research is to find out peculiarities of heavy metal contamination of the soil near Zmiiv TTP and to develop recommendations on improving the situation.

To achieve this aim the following tasks have been solved:

- 1) the features of accumulation of various HM in soils have been specified;
- 2) the dependence between the soils pH and presence of certain chemical elements in them has been defined;
- 3) the dependence between the content of contamination and creation of slow soluble compounds in the soil has been studied.

The main principle of control for soil contamination is the checking of concentration compliance with the established MPC and approximate permissible concentration (APC).

Research methodology. HM concentrations in the aqueous extract from the soil were determined by the atomic-emission spectral analysis, atomic absorption analysis and by the method of capillary electrophoresis [21]. To determine the composition of the solid inorganic part of soils X-ray phase analysis was performed. Due to the consistent analysis of soils the following slightly soluble compounds in the samples were identified: $Zn_2V_2O_7$, $Zn_3(VO_4)_2$, $Zn(VO_3)_2$, $Pb(VO_3)_2$, $4PbO \cdot V_2O_5$, $Pb_3(VO_4)_2$,

$PbCrO_4$, $PbCr_2O_7$, $SrCrO_4$, $SrCr_2O_7$, $Sr(VO_3)_2$, $Ni_2V_2O_7$.

Results of research. The content of heavy metals in soils on the territory of TPP emissions.

The area for the study was chosen, taking into account various landscapes, soils and types of their use, as well as the distance from the object of pollution – Zmiiv TPP. As the emissions of TPP which is operated on solid fuel contain various HM, the most harmful of them were chosen for research, which are either biologically active or belong to toxic contaminants of the different hazard class, for example, Pb, Zn, Cd belong to the 1st hazard class [22, 23]. Each element in the certain soil conditions creates specific chemical forms which determine their mobility or accumulation in the soils. Mobile forms facilitate the ingress of contaminants into plants and their further moving along the food chain. Out of the mentioned elements Cr and V are movable as oxygen anions, namely: residuals of chromic acid and dichromate ions, vanadium acids (meta-, ortho- and pyrovanadates) as well as VO^{2+} , which is a form of vanadium ingress into plants [24].

The mobility of metals is defined by the value of pH in any soil, as cationic forms are more mobile in an acidic environment, while anionogenic substances – in soils with a higher pH. Therefore, it is true that in the process of transition from one environment to another during the study of behavior of metals in soils, an important factor is specific chemical properties of the element. Table 1 shows the concentration of certain chemical elements in different areas of the Siverskyi Donets Valley, located within the radius of 10 km from the Zmiiv TPP (Table 1). For the amphoteric metal Al, a direct correlation between the content of the element and the pH is observed, which can be related to the appearance of AlO_2^- anions – in an alkaline medium (Table 1).

The analysis of the received data on HM content in the soils on the territory of impact of emissions from Zmiiv TPP has shown that the most disseminated pollutants in the area are Cu, Br, Co, V, Cr (Table 2). The level of contamination was determined when comparing the obtained results of the chemical elements content with the maximum permissible concentration and clarke content of chemical elements for the soils. Thus, the most polluted areas are located within 10 km from TPP. This coincides with the research of other objects: natural territorial complexes along the river of the Siverskyi Donets, urban landscapes of towns and villages [26, 27].

To determine the degree of contamination there were used the coefficient of the soil pollution concentration [28]:

Content of HM in the soils (mg/kg) with different pH (2017–2019 years)

Number of test section	Place of sampling	pH	Fe	Si	Al	Zr
1	Central floodplains	7.9	3.5	33	7.0	0.20
2	Back marsh	6.6	2.5	30	0.7	0.05
3	Hills of the pine forest terrace	4.97	2.5	28	0.5	0.05
4	Raised sections of the floodplain	7.2	3.5	33	7.0	0.30
5	Low sections of the floodplain	7.8	3.5	33	6.5	0.50
6	Wetlands of the riverbed floodplain	7.6	3.5	33	6.0	0.15
Clarke content of elements in the soils, % [25]			3.8	33	7.13	0.03

$$C_c = \frac{C}{C_f}, \quad (1)$$

and the coefficient of polyelement contamination [4, 28]:

$$C_{el} = \frac{C}{MPC} \quad (2)$$

де C is the actual concentration of the chemical element;

C_f is the background concentration of the chemical element;

MPC is maximum permissible concentration of the chemical element.

According to the obtained results (Table 2) all soils near the TPP can be referred to as very contaminated because, according to classification [27, 28] maximum values of C_{el} are between 1.6–33.3. In the following sequence the spread in values of C_{el} is given, while in brackets there are values of C_{el} within 10 km from Zmiiv TPP: V 0.05–2 (0.13); Co 0.5–6 (1); Cu 2–16.7 (4.7); Ni 1–12.5 (1.5); Pb 0.2–1.6 (0.38); Pb_{mobile} 1–8.3 (2); Cr 1.7–33.3 (0.43); Zn 0.5–6 (0.52). Thus, at the distance of 10 km the soil is heavily polluted by copper and the mobile form of lead. It is average polluted with Co and Ni; the level pollution is even lower with other metals. However, the general level of pollution at the distance of 10 km is very high.

HM concentration depends of the type of soils in the Siverskyi Donets Basin. On the left bank there are soils with high humus content: high buffer soils – ordinary medium-humic black earth, typical medium-humic clayey black earth, deep soil residual salty black earth (on one and two-loess terraces); as well as low buffers – sod, weak and medium podzolic sand and clay sand and sod sand under coniferous forests (on the pine terrace) [29]. Typical black earths are characterized by a high content of organic matter and the degree of humification, low content of free humic acids and high content of acids associated with Ca. In Table 2 test sections 7–14 correspond to the left bank and (15–18) to the right

bank.

On the right bank there are high buffer soils: medium- and heavy-loamy and clayey, dark gray and gray podzolized, ordinary black earth medium-humic (at the watershed), and meadow and meadow-black-earth deep-salted (on the floodplain) [29]. Black-earth-meadow soils differ from typical black-earth by a smaller humus reserve and degree of humification, a higher content of free humic acids and a lower content of humic acids associated with calcium.

The analysis of the obtained data (Table 2) shows that in highly humic soils, able to form complexes with metal ions (test sections 1–8), the maximum values of HM concentrations are higher and the variation of concentrations is wider. This applies to all HM except Pd, Zn and Cd. In the latter case, metal concentrations are very small. Zn is the only metal whose maximum accumulation does not change over the studied territory of the Siverskyi Donets Basin. The maximum concentrations of Pd and Ni depend very little on the soil type.

The patterns of accumulation of chemical elements can be characterized by accumulative series by the maximum values of the element concentration in soil and C_{el} [28, 30]. For the left-bank test sections of the Siverskyi Donets Basin, the accumulative series looks as follows by the maximum metal concentration:

Sr, V > Cr > Zn > Cu, Ni > Pb > Co > Cd;

for the right-bank sections it is:

Zn > Sr > V > Cr > Pb > Ni > Cu > Co > Cd.

Accumulative series by the maximum C_{el} value characterize the ability of soils to deposit metal ions. The coefficient of polyelement contamination can be used not only for HM belonging to hazard class I, but also for HM of hazard classes II and III, since their maximum soil content exceeds the MPC. For the left-bank soils, the accumulative series is as follows:

Cu > Zn, Co > Pb > Ni > Cr > V;

for the right-bank soils it is:

Table 2

HM content in the soils of test sections in the zone of Zmiiv TPP influence, mg/kg (2017–2019 years)

Number of test section	Place of sampling (distance from the source of emission, km)	Cd	Cu	Sr	Co	Zn	V	Ni	Cr	Pb
7	Slobozhanske town (1)	< 5	35	300	8	140	60	4	200	35
8	Section near the TPP (0.3–0.5)	< 3	10	200	30	20	280	30	100	30
9	Gardens around the Slobozhanske town (1.8)	< 3	20	100	30	30	300	40	10	30
10	Field, station of Ovocheva (2)	< 3	20	200	30	30	300	30	80	20
11	Fields, village of Blagodatne (10)	< 3	30	50	30	100	300	50	100	30
12	Fields, farm of Shebelinske (village of Donets) (3.5)	< 3	20	100	30	50	280	30	100	30
13	Resort house (> 8 km):									
	raised sections of the central floodplain	3	14	50	5	12	20	6	14	12
	low sections of the floodplain	4	25	250	16	35	100	30	90	14
14	hills of the pine forest terrace	3	30	100	6	30	50	15	25	10
	village of Hyniivka (> 11km):									
	low sections of the central floodplain	4	30	300	10	27	70	40	100	17
14	levelled section of the central floodplain	4	50	50	8	50	70	30	100	10
	wet oxbow on the riverbed floodplain	4	50	80	7	50	32	27	70	14
15	village of Zidky, (15.5)	< 5	6	30	2,5	90	7	4	10	6
16	village of Taranivka, (30)	< 5	16	100	4	50	30	7	30	50
17	town of Zmiiv, (18)	< 5	20	30	2,5	140	10	6	20	9
18	village of Borova (28)	< 5	20	110	8	50	80	12	70	14
Hazard class by impact of living organisms [22]		1	2	3	2	1	3	2	2	1
Maximum permissible concentration (MPC) in the soil, mg/kg [22]		0.5	3	–	5	23	150	4	6	32
Clarke content of elements in the soils [25], mg/kg		0.5	20	300	8	50	500	40	200	10

$Cu > Zn > Pb > Co > Ni > Cr > V$.

Thus, the soils of the Siverskyi Donets basin retain Cu, Zn and Pb to a large extent.

On the basis of the obtained data, an analysis of the impact of soil pH on the content of macro- and microelements was carried out (Table 3). Depending on the pH (Table 3), the concentration of Al changes the most. There is a steady decrease in its concentration with increasing pH, the correlation coefficient from pH is 0.6–0.9. Previously (Table 1), an increase in the concentration of Al ions in an alkaline medium was determined, assuming the formation of AlO_2^- anions. The apparent contradiction can be explained in terms of Al accumulation in soils of different types and in the form of compounds with different solubility in water. For example, the for-

mation of mixed hydroxides or oxohydroxides of Al and other metals in soils with an alkaline medium will reduce the concentration of ions Al^{3+} .

There is also a tendency of reduced concentration of zink with increased alkalinity of the medium. For the microelements (Sr, Zr, Cr) the correlation was not found. Concentration of Si hardly changes with variable pH.

Decreasing level of soil pollution with heavy metals. There are several approaches to lower the level of soil pollution with HM:

- by reducing amount of emissions;
- by ensuring the use of ash and slag waste;
- by providing HM discrimination in the soil.

Reducing amount of emissions. The biggest amount of HM enters the environment with products

Dynamics of HM concentration in the soils depending on the soil pH change, mg/kg
(Zone of Zmiiv TPP influence, 2017–2019 years)

Number of test section	Place of sampling (distance from the source of emission, km)	pH	Al	Si	Sr	Zr	Cr	Zn
11	Field, the village of Blagodatne (10)	6.06	6.5	32	50	30	100	100
19	Gardens around the Slobozhanske town (2.5)	6.20	2.2	32	100	100	100	30
20	Field, the village of Blagodatne (12)	6.30	6.5	32	50	30	95	100
12	Field, the farm of Shebelinske (3.5)	7.04	3.8	33	100	500	100	50
21	Gardens along the highway near the Slobozhanske town (2)	7.20	2.2	34	200	200	100	20
22	Field, the farm of Shebelinske (3)	7.30	3.8	33	100	30	100	50
10	Field, the station of Ovocheva (2)	7.33	3.8	32	200	300	80	30
23	Field, the station of Ovocheva (3)	7.40	3.8	32	200	300	80	30
24	The centre of the Slobozhanske town (0.8)	7.50	2.2	32	100	100	100	30
8	Area near the TPP (0.3)	7.73	2.2	34	200	200	100	20

of combustion. The planned reconstruction of block number 1 will allow to reduce its environmental impact, increase efficiency and reliability. It is planned to reconstruct the combustion chamber from the open type into the "shoulder" one with gas-tight screens, inflow burners and high-angle cold funnel. In this case the capacity will increase by 14 %, and the steam capacity – by 10 % while ensuring high environmental friendliness of the combustion process. Ash emissions will be reduced 27 times.

Waste gases are cleaned in the Venturi scrubbers, from where they come to the collector of pure gas, exhauster and, finally, to the chimney. This leads to the annual emission of about 84 thousand tons of ash that is ≈ 37 % of the total volume of emissions into the atmosphere. The highest concentration of dust particles in the emissions of the boiler № 1 is 41.8 g/m^3 . To improve the situation it is proposed to replace the Venturi scrubbers by electric filters. Dust particles of combustion products are ionized well and are current-carrying. Efficiency of dusty gas flow purification (η) in the electric filters can be estimated by Deyh formula

$$\eta = 1 - e^{-W_e \cdot F_{\text{specif}}}, \quad (2)$$

where W_e – velocity of particles in the electric field, m/s;

F_{specif} – specific surface of electrodes sedimentation that is equal to the ratio of the surface of the elements sedimentation to the consumption of cleaning gases, $\text{m}^2/\text{s}/\text{m}^3$.

In the general case η of electric filters changes from 95 % to 99 % and for Venturi scrubbers – from 70 % to 99 %. Thus, the electric filter can provide more stable high efficiency of dust particles confinement.

Ensuring the use of ash and slag waste. Ash and slag waste of Zmiiv TPP go to the ash dump, which is filled by 95.8 % to the moment. HM ingress into the soil from the ash dump can be possible with its dust pollution and with the drainage water when leaching of HM from slag and washing away highly refined fractions of ash. The place of ultimate accumulation of HM from ash and slag is the soil.

As the construction of the new ash dump and reconstruction of the old one is not planned in the near future, the problem of waste accumulation should be solved by way of its utilization in other industries. The most appropriate method is ash and slag utilization in production of cement. Ashes of TPP consist mainly of SiO_2 and Al_2O_3 . The content of CaO does not exceed 5 %. Due to similarity of chemical and mineralogical characteristics of the fuel and blast-furnace slag, one should not expect major differences in producing and hardening of the cement which contains ash and slag. Ingredients used in the production of cement slag waste must meet specified requirements [31]. Fuel ash and slag are used as both active additives to cement and as components of the cement raw mixture. Concretes based on ash and slag are characterized by twice reduced cycle of steam curing. Products with the addition of ash are frostproof and resist aggressive environment better. Furnace granulated slag may be considered as a less hygroscopic additive to cement in comparison with the furnace slag. Ash is used as a mineral additive in asphalt and in place of sand in expanded-clay concrete.

Providing HM discrimination in the soil. Discrimination of heavy metals in the soil implies HM inactivating, weakening their attacks on living or-

ganisms, reducing their content in crops. Techniques to detoxify excess of HM in the soil include introduction of lime and application of organic fertilizers.

When liming the soil HM ingress to the plant is reduced. This can be explained by several reasons:

1) due to increasing pH heavy metals sedimentate from interstitial water in the form of hydroxides, carbonates and phosphates;

2) as a result of increasing pH and availability of Ca^{2+} in the soil content, the ability of plant roots to absorb some heavy metals, in particular Pb, decreases;

3) liming promotes the formation of complexes of organic substances of the soil with HM [32].

Conclusions. As a result of studying the level of the soil pollution with heavy metals near Zmiiv TPP it was found that:

– the most polluted area is that within 10 km from the source of emission;

– the most common pollutants are Cu, Sr, Co, V, Cr, which, we think, is quite logical: V, Cr are anionogenics, acid residues are formed in slightly alkaline soils and together with HM they form in-

soluble or slightly soluble compounds, that leads to their accumulation. This concerns Cu, Sr, Co;

– with V and Cr availability in the soil the following compounds are formed: SrCrO_4 , SrCr_2O_7 , $\text{Sr}(\text{VO}_3)_2$, $\text{Zn}_2\text{V}_2\text{O}_7$, $\text{Zn}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Zn}(\text{VO}_3)_2$;

– correlation between pH and the content of macro- and microelements in different soils is determined. The highest correlation coefficient is between pH and Al concentration (0.6–0.9);

– the soils of the Siverskyi Donets Basin contain Cu, Zn and Pb to a greater extent. In the left-bank soils with high humusness and the ability to form complexes with metal ions, the maximum values of HM concentrations are higher and dispersion of concentrations is wider.

To reduce soil pollution with HM near Zmiiv TPP we propose the following: to reconstruct the boiler unit, that will result in reducing ash dust emissions containing HM 27 times; to set the electric filter for retaining ash from exhaust gases; to use ash slag waste in the production of Portland cement; to carry out periodic liming of soils on the areas near Zmiiv TPP with the purpose of HM discrimination.

References

1. Яковичина, Т. Ф. Комплексна оцінка поелементного забруднення важкими металами ґрунтів урбоєкосистем з урахуванням норм екобезпеки [Текст] // *East European Science Journal*. – 2017. – Vol. 11, N 27. – P. 96–103.
2. Яковичина, Т. Ф. Удосконалення методики визначення екологічного ризику за умов різних рівнів забруднення свинцем ґрунтів урбоєкосистем [Текст] // *Scientific Heritage*. – 2018. – Vol. 1, N 24. – P. 66–71.
3. Большаков, В. Экологическая оценка влияния Mn, содержащегося в отвалах шлаков, на почву [Текст] / В. Большаков, С. Щербак, Т. Яковичина, О. Щербак // *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. – 2010. – Vol. 18. – P. 455–458.
4. Яковичина, Т. Ф. Біотестування токсичності ґрунтів для оцінки ступеня небезпеки забруднення урбоєкосистем [Текст] // *Scientific Heritage*. – 2017. – N 17. – P. 66–71.
5. Rind, A. M. Impacts of Jamshoro thermal power station on soil of the surrounding area [Текст] / A. M. Rind, G. M. Mastoi, A. A. Hullio // *Ind. J. Sci. Res. and Tech.* – 2013. – Vol. 1, Is. 2. – P. 65–71. Online Available at: <http://www.indjsrt.com>.
6. Mandal, A. An assessment of soil contamination due to heavy metals around a coal-fired thermal power plant in India [Текст] / A. Mandal, D. Sengupta // *Environmental Geology*. – 2006. – Vol. 51, Is. 3. – C. 409–420. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0336-8>
7. Adesuyi, A. A. Assessment of heavy metals pollution in soils and vegetation around selected industries in Lagos state [Текст] / A.A. Adesuyi, K. L. Njoku, M. O. Akinola // *Nigeria Journal of Geoscience and Environment Protection*. – 2015. – Vol. 3, N 7. – C. 11–19. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.37002>
8. Ćujić, M. Environmental assessment of heavy metals around the largest coal fired power plant in Serbia [Текст] / M. Ćujić, S. Dragović, M. Đorđević, R. Dragović, B. Gajić // *Catena*. – 2016. – Vol. 139. – P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.001>
9. Noli, F. Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant [Текст] / F. Noli, P. Tsamos // *Sci. Total Environ.* – 2016. – N 563–564. – P. 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.098>
10. Mugoša, B. Assessment of ecological risk of heavy metal contamination in coastal municipalities of Montenegro [Текст] / B. Mugoša, D. Đurović, M. Nedović-Vuković, S. Barjaktarović-Labović, M. Vrvić // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2016. – Vol. 13, N 4. – P. 393–401. <https://doi.org/10.3390/ijerph13040393>
11. Huang, X. Heavy metal pollution and ecological assessment around the Jinsha coal-fired power plant (China) [Текст] / X. Huang, J. Hu, F. Qin, W. Quan, R. Cao, M. Fan, X. Wu // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2017. – Vol. 14, Is. 12. – P. 1589–1600. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121589>
12. You, M. Characterization of heavy metals in soil near coal mines and a power plant in Huainan [Текст] / M. You, Y. Huang, J. Lu, C. Li // *China Analytical Letters*. – 2015. – Vol. 48, Is. 4. – P. 726–737. <https://doi.org/10.1080/00032719.2014.940531>

13. Xu, X. The local impact of a coal-fired power plant on inorganic mercury and methyl-mercury distribution in rice (*Oryza sativa* L.) [Текст] / X. Xu, B. Meng, C. Zhang, X. Feng, C. Gu, J. Guo, K. Bishop, Z. Xu, S. Zhang, G. Qiu // *Environ. Pollut.* – 2017. – N 223. – P. 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.042>
14. Zhu, C. Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China [Текст] / C. Zhu, H. Tian, K. Cheng, K. Liu, K. Wang, S. Hua, J. Gao, J. Zhou // *J. Clean. Prod.* – 2015. – N 114. – P. 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.008>
15. Шматков, Г. Г. Система показників комплексної оцінки поліементного забруднення важкими металами ґрунтів урбоєкосистем [Текст] / Г. Г. Шматков, Т. Ф. Яковичина // *Екологічні науки.* – 2018. – Т. 2, вип. 1 (20). – С. 25–29.
16. Щербаченко, О. І. Важкі метали як токсичний фактор забруднення природного середовища. Стійкість і адаптація рослин до їх впливу [Текст] // *Наукові записки Державного природознавчого музею.* – Львів. – 2014. – Вип. 30. – С. 157–182.
17. Shulika, B. Control over grape yield in the North-Eastern region of Ukraine using mathematical modeling [Текст] / B. Shulika, A. Porvan, O. Vysotska, A. Nekos, A. Zhemerov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2017. – Vol. 2, Is. 3 (86). – P. 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97969>
18. Чернявський, Н. В. Основные направления повышения эффективности топливоиспользования на ТЭС Украин [Текст] / Н. В. Чернявський, А. Ю. Провалов, А. В. Косячков // *Сб. научн. статей «Современная наука».* – 2012. – № 3 (11). – С. 114–121.
19. Змиевская ТЭС ПАО «Центрэнерго» / Каталог предприятий Украины [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.rada.com.ua, свободный. – Загл. с экрана.
20. Екологічна ситуація в зоні впливу Зміївської ТЕС [Текст] / С. А. Балюк, А. І. Фатєєв, В. П. Ворона та ін. – Х.: Бровін О. В., 2019. – 90 с.
21. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [Текст]. – Москва. – 1992. – 61 с.
22. ДСанПіН 2.2.7.029-99. Ґрунт, очистка населених місць, побутові та промислові відходи, санітарна охорона ґрунту. Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення [Текст]. – К., 1999. – 31 с.
23. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 34 с.
24. Ашурбекова, Т. Н. Изучение загрязнения почвы тяжелыми металлами и оценка связи этого загрязнения с онкологическими заболеваниями [Текст] / Т. Н. Ашурбекова, Э. М. Мусинова // *Самарский научный вестник.* – 2018. – Т. 7, № 4 (25). – С. 10–14.
25. Алексеенко, В. А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов: монографія [Текст] / В. А. Алексеенко, А. В. Алексеенко. – Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета, 2013. – 380 с.
26. Ачасова, А. О. Ґрунтово-екологічні умови формування просторової неоднорідності вмісту важких металів у ґрунтах Лівобережного Лісостепу України [Текст]: дис. ... канд. с.-г. наук: 03.00.18 / А. О. Ачасова. – Харків, 2003. – 262 с.
27. Гуменюк, Г. В. Особливості накопичення важких металів у гідроекосистемі р. Саксагань (м. Кривий Ріг). [Текст] / Г. В. Гуменюк, І. Б. Чень, Н. Г. Зіньковська // *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія.* – Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2018. – Вип. 2(73). – С. 118–122.
28. Некос, А. Н. Трофогеографія: теорія і практика: монографія [Текст] / А. Н. Некос, Ю. В. Холін. – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2015. – 296 с.
29. Балюк, С. А. Агрохімія і ґрунтознавство: міжвід. темат. наук. зб. [Текст] / С. А. Балюк. – Харків, 2010. – Кн. 1. – 203 с.
30. Дудурич, В. М. Екологічна безпека ґрунтів і виробництва сільськогосподарської продукції в умовах Лівобережного Лісостепу [Текст]: автореферат дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11/ В. М. Дудурич. – Харків, 2007. – 25 с.
31. Абашина, К. О. Утилізація промислових відходів [Текст] / К. О. Абашина, О. В. Хандогіна. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 58 с.
32. Tchounwou, P. B. Heavy metal toxicity and the environment [Текст] / P. B. Tchounwou, C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, D. J. Sutton // *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology.* – 2012. – Vol. 101. – P. 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Author's contribution: all authors made an equal contribution to this work.

UDC 504.064:546.30

Elina Borysivna Khabotova,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Department of TRBM and Chemistry,
Kharkov National Automobile and Highway University,
25 Yaroslav Mudry St., Kharkov, 61002, Ukraine,
e-mail: elinahobotova@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6377-5186>;

Vasyl Ivanovich Larin,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Director of the Research Institute of Chemistry,
V. N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,
e-mail: ndichem@karazin.ua, <http://orcid.org/0000-0002-1136-9626>;

Inna Valeriivna Hraivoronska,

PhD (Technics), Associate Professor, Department of Metrology and Life Safety,
Kharkov National Automobile and Highway University,
e-mail: inna_gra@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-8537-0435>

EVALUATION OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN THE ZONE OF TPP INFLUENCE

Abstract. Thermal power engineering takes one of the first places by the scale of the impact on the environment. Thermal power plant emissions are mainly deposited on the ground. Soil compounds, binding heavy metal ions (HM) for a long time, prevent their migration. The buffer capacity of the soil for metals depends on many factors: soil composition, acidity, complexity, oxidation–reduction, sorption–desorption, etc. Examination of the HM content in the soils is necessary for monitoring the environment, its protection from pollution. One of the largest pollutants in Kharkiv region is Zmiiv TPP.

The goal of the work is to find out peculiarities of heavy metal contamination of the soil near the Zmiiv TTP and develop recommendations on improving the situation.

In order to reach the goal, the following tasks have been solved: features of accumulation of various heavy metals in the soils have been specified, dependence between the soils pH and presence of certain chemical elements in them has been defined, dependence between the content of contamination and development of slow soluble compounds in the soil has been studied.

Research methodology. The main principle of control for soil contamination is checking of concentration compliance with the established maximum permissible concentration (MPC) and approximate permissible concentration (APC). HM concentrations in the aqueous extract from the soil were determined by the atomic-emission spectral analysis, atomic absorption analysis and by the method of capillary electrophoresis. To determine the composition of the solid inorganic part of soils X-ray phase analysis was performed.

Results of research. It is established that the most polluted areas are located within 10 km from TPP. The most disseminated pollutants in the area are Cu, Br, Co, V, Cr. The soils of the Siverskyi Donets Basin retain Cu, Zn and Pb ions to a large extent.

Scientific novelty. Metals V, Cr are anionogenics, acid residues are formed in slightly alkaline soils and together with HM they form insoluble or slightly soluble compounds leading to their accumulation. Compounds SrCrO_4 , SrCr_2O_7 , $\text{Sr}(\text{VO}_3)_2$, $\text{Zn}_2\text{V}_2\text{O}_7$, $\text{Zn}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Zn}(\text{VO}_3)_2$ were found in the soils. Based on the determination of the coefficients of poly-elemental contamination, it is shown that maximum concentrations of HM are higher and variations of concentrations are wider except Pd, Zn and Cd in the soils with high humus, buffering and ability to form complexes with metal ions. The correlation relationships between pH, macro- and microelements in various soils are determined. The highest correlation coefficient is between Al concentration and pH (0.6–0.9).

Practical significance. Recommendations have been developed to reduce the level of soil contamination near Zmiiv TPP: reconstruction of the boiler unit, installation of an electrostatic precipitator to collect ash, using ash and slag waste in the production of Portland cement, liming soil for discrimination of HM.

Keywords: soils, heavy metals, pollution, emissions, thermal power plants, pH soils.

References

1. Yakovishina, T. F. (2017). *Kompleksna otsinka poelementnoho zabrudnennya vazhkymy metalamy gruntiv urboekosystem z urakhuvannyam norm ekobezpeky [Comprehensive evaluation of elemental heavy metal contamination of soil of urban ecosystems taking into account ecological safety standards]. East European Science Journal, 11, 96–103. [in Ukrainian]*
2. Yakovishina, T. F. (2018). *Udoskonalennya metodyky vyznachennya ekolohichnoho ryzyku za umov riznykh rivniv zabrudnennya svyntsem gruntiv urboekosystem [Improvement of the methodology for determining the ecological*

- risk in different levels of lead contamination of soil of urban ecosystems]. *Scientific Heritage*, 1(24), 66–71. [in Ukrainian]
3. Bolshakov, V., Shcherbak, S., Yakovishina, T., Shcherbak, O. (2010). *Ekologicheskaya otsenka vliyaniya Mn, soderzhashchegosya v otval'nykh shlakakh, na pochvu* [Environmental assessment of the effect of Mn contained in the dumps of slag on the soil]. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 18, 455–458. [in Russian]
 4. Yakovishina, T. F. (2017). *Biotestuvannya toksychnosti gruntiv dlya otsinky stupenya nebezpeky zabrudnennya urboekosystem* [Soil toxicity biotesting to assess the degree of contamination of urban ecosystems]. *Scientific Heritage*, 17, 66–71. [in Ukrainian]
 5. Rind, A. M., Mastoi, G. M., Hullio, A. A. (2013). *Impacts of Jamshoro thermal power station on soil of the surrounding area*. *Ind. J. Sci. Res. and Tech.*, 1(2), 65–71. Online Available at: <http://www.indjsrt.com>.
 6. Mandal, A., Sengupta, D. (2006). *Assessment of soil contamination due to heavy metals around a coal-fired thermal power plant in India*. *Environmental Geology*, 51(3), 409–420. <https://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0336-8>
 7. Adesuyi, A. A., Njoku, K. L., Akinola, M. O. (2015). *Assessment of heavy metals pollution in soils and vegetation around selected industries in Lagos state, Nigeria*. *Nigeria Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3(7), 11–19. <https://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.37002>
 8. Čujić, M., Dragović, S., Đorđević, M., Dragović, R., Gajić, B. (2016). *Environmental assessment of heavy metals around the largest coal fired power plant in Serbia*. *Catena*, 139, 44–52. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.001>
 9. Noli, F., Tsamos, P. (2016). *Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant*. *Sci. Total Environ.*, 563–564, 377–385. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.098>
 10. Mugoša, B., Đurović, D., Nedović-Vuković, M., Barjaktarović-Labović, S., Vrvić, M. (2016). *Assessment of ecological risk of heavy metal contamination in coastal municipalities of Montenegro*. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13(4), 393–401. DOI: 10.3390/ijerph13040393.
 11. Huang, X., Hu, J., Qin, F., Quan, W., Cao, R., Fan, M., Wu, X. (2017). *Heavy metal pollution and ecological assessment around the Jinsha coal-fired power plant (China)*. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(12), 1589–1600. <https://dx.doi.org/10.3390/ijerph14121589>
 12. You, M., Huang, Y., Lu, J., Li, C. (2015). *Characterization of heavy metals in soil near coal mines and a power plant in Huainan*. *China Analytical Letters*, 48(4), 726–737. <https://dx.doi.org/10.1080/00032719.2014.940531>
 13. Xu, X., Meng, B., Zhang, C., Feng, X., Gu, C., Guo, J., Bishop, K., Xu, Z., Zhang, S., Qiu, G. (2017). *The local impact of a coal-fired power plant on inorganic mercury and methyl-mercury distribution in rice (Oryza sativa L.)*. *Environ. Pollut.*, 223, 11–18. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.042>
 14. Zhu, C., Tian, H., Cheng, K., Liu, K., Wang, K., Hua, S., Gao, J., Zhou, J. (2015). *Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China*. *J. Clean. Prod.*, 114, 343–351. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.008>
 15. Shmatkov, H. H., Yakovishyna, T. F. (2018). *Systema pokaznykiv kompleksnoyi otsinky poliementnoho zabrudnennya vazhkymy metalamy hruntiv urboekosystem* [System of indicators of complex estimation of elemental heavy metal contamination of soil of urban ecosystems]. *Ekolohichni nauky – Ecological Sciences*, 2(1), 25–29. [in Ukrainian]
 16. Shcherbachenko, O. I. (2014). *Vazhki metaly yak toksychnyy faktor zabrudnennya pryrodnoho seredovyscha. Stiykist' i adaptatsiya roslin do yikh vplyvu* [Heavy metals as a toxic factor of pollution of the natural environment. Resilience and adaptation of plants to their influence]. *Naukovi zapysky Derzhavnoho pryrodnavchoho muzeyu. L'viv – Scientific notes of the State Natural History Museum. Lviv*, 30, 157–182. [in Ukrainian]
 17. Shulika, B., Porvan, A., Vysotska, O., Nekos, A., Zhemerov, A. (2017). *Control over grape yield in the North-Eastern region of Ukraine using mathematical modeling*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3), 51–59. <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97969>
 18. Chernyavskiy, N. V., Provalov, A. YU., Kosyachkov, A. V. (2012). *Osnovnyye napravleniya povysheniya effektivnosti toplivoispol'zovaniya na TES Ukrainy* [The main directions of improving the efficiency of fuel use at TPPs of Ukraine]. *Sb. nauchn. statey «Sovremennaya nauka» – Collection of scientific articles "Modern science"*, 3, 114–121. [in Russian]
 19. *Zmiyevskaya TES PAO «Tsentrenergo» / Katalog predpriyatiy Ukrainy* [Zmievska TPP PC "Centrenergo" / Catalog of Ukrainian Enterprises]. [E-reader version]. www.rada.com.ua. [in Russian]
 20. *Ekolohichna sytuatsiya v zoni vplyvu Zmiyivs'koyi TES* [Ecological situation in the area of influence of the Zmiiv TPP] / edited by S. A. Balyuk, A. I. Fateev, V. P. Voron and others. *Kharkiv: Brovin O. V.* 2019. [in Ukrainian]
 21. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodiy i produktsii ras-teniyevodstva* [Guidelines for the determination of heavy metals in soils of farmland and crop production]. *Moscow (1992)*. [in Russian]
 22. *DSanPiN 2.2.7.029-99. Hrunt, ochystka naselennykh mist', pobutovi ta promyslovi vidkhody, sanitarna okhrona gruntu. "Hihiyenichni vymohy shchodo povodzhennya z promyslovymy vidkhodamy ta vyznachennya yikh klasu nebezpeky dlya zdorov'ya naseleння"*. [Sanitary rules and regulations 2.2.7.029-99. Soil, cleaning of settlements, domestic and industrial waste, sanitary protection of soil. "Hygienic Requirements for the Treatment of Industrial Waste and Determination of their Class of Hazard for the Health of the Population"]. *Kyiv (1999)*. [in Ukrainian]

23. GOST 17.4.1.02-83. Okhrana prirody. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya [State Industry Standard 17.4.1.02-83. Protection of Nature. Soils. Classification of chemicals for pollution control]. (1984). [in Russian]
24. Ashurbekova, T. N., Musinova, E. M. (2018). Izucheniye zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami i otsenka svyazi etogo zagryazneniya s onkologicheskimi zabolevaniyami [Study of soil contamination with heavy metals and assessment of the connection of this contamination with oncological diseases]. Samarskiy nauchnyy vestnik – Samara Scientific Bulletin, 7(4), 10–14. [in Russian]
25. Alekseyenko, V. A., Alekseyenko, A. V. (2013). Khimicheskiye elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov: monografiya [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of the soil of residential landscapes: monograph]. Rostov on/D: Publishing House of the Southern Federal University. [in Russian]
26. Achasova, A. O. (2003). Gruntovo-ekologichni umovy formuvannya prostоровoyi neodnorodnosti vmistu vazhkykh metaliv u gruntakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrayiny [Soil and ecological conditions of spatial heterogeneity of heavy metals content formation in the soils of the Left Bank Forest-steppe of Ukraine]. Extended abstract of candidate thesis. Kharkiv. [in Ukrainian]
27. Humenyuk, H. V., Chen', I. B., Zin'kovs'ka, N. H. (2018). Osoblyvosti nakopychennya vazhkykh metaliv u hidroekosystemi r. Saksahan' (m. Kryvyy Rih) [Features of the accumulation of heavy metals in the hydroecosystem of the Saksagan River (Kryvyy Rih city)]. Naukovi zapysky Ternopil's'koho natsional'noho pedahohichnoho universyitetu. Ser. Biologiya – Scientific notes of the Ternopil National Pedagogical University. Series Biology, 2, 118–122. [in Ukrainian]
28. Nekos, A. N., Kholin, Yu. V. (2015). Trofoheohrafiya: teoriya i praktyka: monografiya [Trophogeography: theory and practice: monograph]. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU. [in Ukrainian]
29. Balyuk, S. A. (2010). Ahrokhimiya i gruntoznavstvo: mizhvid. temat. nauk. zb. Kn. 1 [Agrochemicals and Soil Science: interagency thematic scientific collection. Book 1]. Kharkiv. [in Ukrainian]
30. Dudurych, V. M. (2007). Ekologichna bezpeka gruntiv i vyrobnytstva sil's'kohospodars'koyi produktsiyi v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu [Ecological safety of soils and production of agricultural products in the conditions of the Left Bank Forest-steppe]. Extended abstract of candidate thesis. Kharkiv. [in Ukrainian]
31. Abashyna, K. O., Khandohina, O. V. (2016). Utylizatsiya promyslovykh vidkhodiv [Utilization of industrial waste]. Kharkiv: A. M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy. [in Ukrainian]
32. Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, 101, 133–164. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ»

До „Вісника Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна”, серія „Геологія. Географія. Екологія”, приймаються наукові статті обсягом біля 40 тис. знаків, присвячені дослідженням у галузях геології, геохімії, гідрогеології, географії, економічної та соціальної географії, екології, а також суміжних дисциплін. Матеріали можуть бути представлені українською, російською або англійською мовами. Перевага надається англійським статтям. Рішення про публікацію приймається редакційною колегією „Вісника”, при цьому кожна стаття рецензується двома вченими – фахівцями у даній тематичі.

Матеріали подаються у друкованому або в електронному вигляді та надсилаються на електронну пошту geoeco-series@karazin.ua. Електронна версія оформлюється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 14, міжрядковий інтервал 1,5, всі поля по 2 см, відступ для абзацу – 0,75 см. **Жирним** шрифтом виділяються підзаголовки у статті. Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті, а також подані окремими файлами. Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці. Орієнтація сторінок – книжкова. Вирівнювання слід робити по ширині сторінки.

Згідно вимог ДАК України оригінальна стаття у фаховому виданні має складатися з таких розділів:

1. **Постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання порушеної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.
3. **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**, яким присвячується стаття;
4. **Формулювання мети статті** (постановка завдання).
5. **Виклад основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.
6. **Висновки** з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

Для статей необхідно вказати УДК, подати назву (до 10 слів), анотацію (не менше ніж 1800 знаків) та ключові слова (8-10) українською й російською мовами.

На окремому аркуші надається інформація про авторів (прізвище, ім'я та по-батькові, повна назва організації, посада, вчений ступінь і звання, поштова адреса, телефон, e-mail, ORCID) українською, російською й англійською мовами. Кількість авторів не повинна перевищувати 3 (як виключення – до 5). Перелік посилань оформлюється згідно з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. До переліку обов'язково повинна бути включена література за останні п'ять років, у тому числі закордонна, а сам перелік повинен містити не менше ніж 20 посилань.

Також є необхідним розгорнутий реферат англійською мовою, оформлений згідно міжнародних вимог до наукових видань. Реферат повинен мати:

- обсяг не менше ніж 2500 знаків,
- інформативність (не містити загальних слів),
- оригінальність (не бути калькою російської або української анотації),
- змістовність (відобразити головний зміст статті та результати досліджень),
- структурованість (наявність обов'язкових елементів: *мета, методика, результати, наукова новизна, практична значимість, ключові слова*).

Після реферату необхідно навести **References** – перекладений англійською список використаних джерел, який має бути оформлений згідно міжнародного стандарту APA (American Psychological Association). До списків використаної літератури у статтях необхідно додавати DOI джерел (за наявності).

Рукописи, не оформлені належним чином, не приймаються до публікації.

Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку рукопису.

У разі переробки статті авторами датою надходження рукопису статті в редакцію приймається дата її повторного надсилання. За відмови у публікації роботи рукописи статей авторам не повертаються.

При підтвердженні позитивного рішення на публікацію статті, автор має оформити та надіслати згоду на публікацію та оприлюднення персональних даних.

Зразок оформлення статті :

УДК 551.24.548:242.7:248(477)

Олексій Вацлавович Барташук,

к. геол. н., доцент, зав. відділу газових ресурсів Українського науково-дослідного інституту природних газів, Гімназіяна наб., 20, м. Харків, 61010, Україна,
e-mail: alekseybart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7831-6134>

СИСТЕМНА ОРГАНІЗАЦІЯ ДИЗ'ЮНКТИВНОЇ ТЕКТОНІКИ КОНСОЛІДОВАНОГО ФУНДАМЕНТУ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОГО ПАЛЕОРИФТУ.

Стаття є заключною частиною трилогії, що висвітлює системну організацію розломної тектоніки кристалічного фундаменту Дніпровсько-Донецького палеорифту (ДДП). При регіональних геотектонічних дослідженнях структурних рисунків розломних систем докембрійського фундаменту вперше виявлено ансамблі структур об'ємної тектонічної течії, які зумовлені здвиговими деформаціями кристалічних гірських порід і горизонтальними переміщеннями геомасивів в межах цієї рифтогенної внутрішньоплитної геоструктури Сарматської плити. ...

Ключові слова: деформації горизонтального здвигу, структурний рисунок, механізми тектонічної течії, структурно-кінематичний парагенез.

А.В. Барташук. СИСТЕМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ДИЗ'ЮНКТИВНОЙ ТЕКТониКИ КОНСОЛИДИРОВАННОГО ФУНДАМЕНТА ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОГО ПАЛЕОРИФТА. Статья является заключительной частью трилогии, освещающей системную организацию разломной тектоники кристаллического фундамента Днепровско-Донецкого палеорифта (ДДП). При региональных геотектонических исследованиях структурных рисунков разломных систем докембрийского фундамента впервые выявлены ансамбли структур тектонического течения, которые вызваны сдвиговыми деформациями кристаллических горных пород и горизонтальными перемещениями геомассивов, в пределах этой рифтогенной внутриплитной геоструктуры Сарматской плиты. ...

Ключевые слова: деформации горизонтального сдвига, структурный рисунок, механизмы тектонического течения, структурно-кинематический парагенез.

Вступ. Встановлено, що внутрішня кінематика літосфери проявляється у вертикальних і горизонтальних переміщеннях геомас. Відбитками перших є діапіри та магматичні осередки різного речовинного складу і глибини проникнення. Структурними проявами горизонтальних переміщень гірських порід є деформаційні структури тектонічної течії (СТТ). Тому, при вивченні тектонічної будови геоструктур слід враховувати ймовірність комбінованого ефекту двох головних структуроутворюючих факторів – магматичного та тектонічного, який реалізується за механізмами об'ємної течії гірських порід. ...

Література

1. Пейве, А. Тектоника и магматизм [Текст] / А. Пейве. – М. : Изд. АН СССР. Сер. геол., 1961. – № 3. – С. 36-54.
2. Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения [Текст] / В. Буртман, А. Лукьянов, А. Пейве, С. Руженцев // Разломы и горизонтальные движения земной коры. – М. : Изд. АН СССР, 1963. – С. 5-33.

UDC 551.243.8:550.8(477)

Oleksii Bartashchuk,

PhD (Geology), Associate Professor, Head of Department of natural gas resources, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases, 20 Gimnaziyna Naberejna, Kharkiv, 61010, Ukraine,
e-mail: alekseybart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7831-6134>

SYSTEM ORGANIZATION OF DISJUNCTIVE TECTONICS OF CONSOLIDATED BASEMENT IN DNIPRO-DONETS PALEORIFT

Formulation of the problem. Getting knowledge of the processes and mechanisms of the rocks tectonic flow is important both for geotectonics and for oil and gas geology as horizontal displacements and rotation of geological blocks in creep dislocations form secondary deformation structures. ...

Keywords: horizontal strike-slip deformation, structural pattern, tectonic flow structure, structural kinematic paragenesis.

References

1. Peyve, A. (1961). *Tectonics and magmatism*. M., Academy of Sciences of USSR, Vol. Geol., 36-54.
2. Burtman, V., Luk'yanov, A., Peyve, A., Ruzhentsev, S. (1963). *Horizontal displacements by faults & some methods of study*. M., Academy of Sciences of USSR, 5-33.

Наукове видання

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА

серія
«ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ»

Випуск 51

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Українською, російською та англійською мовами

Редактор К. А. Немець
Технічний редактор О. В. Чуєнко
Комп'ютерне верстання О. В. Чуєнко
Відповідальний за випуск К. А. Немець

Підписано до друку 26.11.2019 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 23,1. Обл.–вид. арк. 26,8.
Наклад 100 пр. Зам. № 1229/8–15. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4,
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09.