

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index Research Bib и Google Scholar. Категория А Министерства образования и науки Украины.

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	С.А. Вижва, д-р геол. наук, проф. І.М. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб. (заст. головн. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З.О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В.М. Гулій, д-р геол. наук, проф.; О.В. Дубина, д-р геол. наук, В.М. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В.І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О.М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О.М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; М.М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О.Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В.Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б.П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.; Г.П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В.А. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В.В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М.І. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О.Л. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В.В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С.Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т.В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т.А. Мірончук, канд. філол. наук, доц. Іноземні члени редакційної колегії: А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет, Китай; О. Івахненко, Казахстансько-Британський технічний університет, Казахстан; А. Коронеос, Університет Арістотеля в Салоніках, Греція; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаша Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна ☎ (38044) 431 04 40; електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net; http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua
Затверджено	Вченою радою ННІ "Інститут геології" 15 грудня 2021 року (протокол № 7)
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 1–05/6 від 12.06.02
Зареєстровано	Міністерством юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23534-13374 від 08.08.18
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	6-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28

© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2021

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index Research Bib и Google Scholar. Категория А Министерства образования и науки Украины.

Chief publication manager O. Menshov

**EDITOR-IN-CHIEF
EDITORIAL BOARD**

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

Ukrainian Members:

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

Foreign members:

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

Address

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

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
December 15, 2021 (Minutes # 7)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

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

Address

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

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Митрохин О., Бахмутов В., Алексєєнко А., Митрохина Т., Марущенко О. Інтрузивно-магматичні утворення архіпелагу Вільгельма Західної Антарктики (частина 1 – інтрузиви габроїдів, діоритів та гранітоїдів)	6
Дернов В. Найдавніші ендоефітні яйцекладки комах (ранній пенсильваній, Східна Україна)	16

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Орлюк М., Онищук І., Рева М., Шабатура О. Електричні та пружні параметри ущільнених теригенних порід карбону східної частини північної прибортової зони ДДЗ	25
Бурахович Т., Кушнір А., Ільєнко В. Інтерпретація 3D геоелектричної моделі надр степового Криму. Євпаторійський та Сакський профілі	34
Мухтарова Х., Насибова Г., Ісмаїлова М. Перспективи нафтогазоносності та вивчення колекторських властивостей крейдових відкладів Євлах-Агджабединського прогину	40
Шумлянська Л., Дубовенко Ю., Пігулевський П. Про можливість створення синтетичної S-швидкісної моделі шляхом перерахунку P-швидкісної моделі	46
Портнов В., Юров В., Рева М., Маусимбаєва А., Іманбаєва С. Наноструктури в поверхневих шарах вугільної речовини	54
Краснікова О., Лісний Г., Вижва С. Сучасний стан застосування методів мікросейсмічного контролю за проведенням та якістю ГРП	64

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Тунік О. Дослідження вторинних перетворень глинистих порід нижнього карбону центральної частини Дніпровсько-Донецької западини	72
---	----

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Аубакірова Г., Рудько Г., Вижва С., Портнов В., Ісатаєва Ф., Зимановська Н. Досягнення стійкості в країнах з перехідною економікою: нові можливості та перспективи	80
--	----

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Мекті З., Бутемеджет А., Секіу О., Бердуді С., Шайб А., Куйдер Ф., Рахмані А., Бенселгуб А. Забруднення аерозольними частинками, що пов'язане з експортом фосфату в порту Аннаба	90
Чомко Д., Чомко Ф., Черкашина Н., Таранов В., Г.Х. Сейфельдін Дослідження методами багатовимірної статистичної аналізу набрякаючих ґрунтів як основи фундаментів інженерних споруд у Судані	97
Бортник С., Ободовський О., Гершевський П., Шманьда Я., Луц М., Хабель М., Вітковський К., Погорільчук Н. Реакція багаторукавних річкових систем на функціонування гідроелектростанцій	105

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Mytrokhyn O., Bakhmutov V., Aleksieienko A., Mytrokhina T., Marushchenko O. Intrusive-magmatic complexes of Wilhelm Archipelago, West Antarctica (part 1 – intrusions of gabbroids, diorites and granitoids)	6
Dernov V. The earliest insect endophytic oviposition (Early Pennsylvanian, Eastern Ukraine)	16

GEOPHYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Orlyuk M., Onyshchuk I., Reva M., Shabaturo O. Electric and elastic parameters of Carbonic Period terrigenous rocks of the Eastern part of the Northern edge of the Dnieper-Donets Depression	25
Burakhovich T., Kushnir A., Iliencko V. Interpretation of the 3D geoelectrical model of the Steppe Crimea bowels. Eupatoria and Saki profiles	34
Mukhtarova Kh., Nasibova G., Ismayilova M. Oil and gas potential and study of reservoir properties of the cretaceous deposits of the Yevlakh-Agdjabedi depression	40
Shumlianska L., Dubovenko Yu., Pigulevskiy P. The possibility of creating a synthetic S-velocity model by recalculating the P-velocity model	46
Portnov V., Yurov V., Reva N., Mausymbaeva A., Imanbaeva S. Nanostructures in the surface layers of coal matter	54
Krasnikova O., Lisny G., Vyzhva S. Current state of application of hydraulic fracturing microseismic monitoring methods	64

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Tunik O. Investigation of secondary transformations within lower carboniferous rocks of the Central part of the Dnieper-Donets Depression	72
--	----

MINERAL RESOURCES

Aubakirova G., Rudko G., Vyzhva S., Portnov V., Isatayeva F., Zimanovskaya N. Achieving sustainability in countries with economies in transition: new opportunities and prospects	80
---	----

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Mekti Z., Boutemedjet A., Sekiou O., Berdoudi S., Chaib A., Kouider F., Rahmani A., Benselhouf A. Airborne particulate matter pollution generated by phosphate export at the port of Annaba	90
Chomko D., Chomko F., Cherkashyna N., Taranov V., Seifeldin G. Studying swelling soils by multidimensional statistical analysis methods as the basis for engineering structures foundations in Sudan	97
Bortnyk S., Obodovskyi O., Gerszewski P., Szmanda J., Luc M., Habel M., Witkowski K., Pohorilchuk N. The reaction of anastomosing river fluvial systems to the operation of a hydroelectric power plant	105

СОДЕРЖАНИЕ

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Митрохин А., Бахмутов В., Алексеенко А., Митрохина Т., Марущенко А. Интрузивно-магматические образования архипелага Вильгельма Западной Антарктики (часть 1 – интрузивы габброидов, диоритов и гранитоидов)	6
Дернов В. Древнейшие эндофитные яйцекладки насекомых (ранний пенсильваний, Восточная Украина)	16

ГЕОФИЗИКА

Выжва С., Онищук В., Орлюк М., Онищук И., Рева Н., Шабатура А. Электрические и упругие параметры уплотненных терригенных пород карбона восточной части северной прибортовой зоны ДДВ	25
Бурахович Т., Кушнир А., Ильенко В. Интерпретация 3d геоэлектрической модели недр степного Крыма. Евпаторийский и Сакский профили	34
Мухтарова Х., Насибова Г., Исмаилова М. Перспективы нефтегазоносности и изучение коллекторских свойств меловых отложений Евлах-Агджабединского прогиба	40
Шумлянская Л., Дубовенко Ю., Пигулевский П. О возможности создания синтетической S-скоростной модели путем пересчета P-скоростной модели	46
Портнов В., Юров В., Рева М., Маусымбаева А., Иманбаева С. Наноструктуры в поверхностных слоях угольного вещества	54
Красникова Е., Лесной Г., Выжва С. Современное состояние применения методов микросейсмического контроля за проведением и качеством ГРП	64

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Туник О. Исследование вторичных преобразований глинистых пород нижнего карбона центральной части Днепровско-Донецкой впадины	72
---	----

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Аубакирова Г., Рудько Г., Выжва С., Портнов В., Исатаева Ф., Зимановская Н. Достижение устойчивости в странах с транзитной экономикой: новые возможности и перспективы	80
--	----

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Мекти З., Бутемеджет А., Секиу О., Бердуди С., Шайб А., Куйдер Ф., Рахмани А., Бенселгуб А. Загрязнение аэрозольными частицами, связанное с экспортом фосфата в порту Аннаба	90
Чомко Д., Чомко Ф., Черкашина Н., Таранов В., Сейфельдин Г. Исследование методами многомерного статистического анализа набухающих грунтов как основания фундаментов инженерных сооружений в Судане	97
Бортник С., Ободовский О., Гершевский П., Шманьда Я., Луц М., Хабель М., Витковский К., Погорильчук Н. Реакция многорукавных речных систем на функционирование гидроэлектростанций	105

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 55+551.22+552.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.01>

О. Митрохин¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: mitrokhin.a.v@ukr.net;

В. Бахмутов^{2,3}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: bakhmutovvg@gmail.com;

А. Алексєєнко¹, канд. геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: scr315@gmail.com;

Т. Митрохина¹, канд. геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: tanussa@ukr.net;

О. Марущенко¹, студ.,
E-mail: lesymarush@gmail.com;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна;

²Інститут геофізики ім. С. І. Субботина НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32, Київ, 03680, Україна;

³Національний антарктичний науковий центр

ІНТРУЗИВНО-МАГМАТИЧНІ УТВОРЕННЯ АРХІПЕЛАГУ ВІЛЬГЕЛЬМА ЗАХІДНОЇ АНТАРКТИКИ (ЧАСТИНА 1 – ІНТРУЗИВИ ГАБРОЇДІВ, ДІОРИТІВ ТА ГРАНІТОЇДІВ)

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

Архіпелаг Вільгельма та прилегле узбережжя Землі Грея є типовими районами розвитку вапняно-лужного магматизму, пов'язаного з тривалою еволюцією магматичного поясу Антарктичного півострова. Автори дослідили інтрузивно-магматичні утворення архіпелагу Вільгельма (АВ) з метою охарактеризувати їх географічну поширеність, умови залягання, геологічний вік та мінералого-петрографічні особливості. У результаті виконаної геологічної зйомки з'ясовано, що на АВ поширені інтрузиви габроїдів, діоритів та гранітоїдів. Завдяки процесам тектонічного підняття та ексумації на одному рівні сучасного ерозійного зрізу можуть відслонюватися як апікальні, так і придонні частини окремих інтрузивних тіл. Новітні геологічні дослідження вказують на те, що різновікові плутони перетинають один одного у складній послідовності. Це дало можливість визначити їх відносний геологічний вік та реконструювати загальну спрямованість розвитку глибинного магматизму від ранньої крейди до раннього палеогену включно. Доведено, що найдавніші масиви габроїдів є частинами значно більших інтрузивних тіл. Вони сформувалися у часовому проміжку між юрським та ранньокрейдяним періодами. Кристалізаційна диференціація базитових магм надала їм розширеної різного масштабу. У донних частинах габроїдних інтрузивів існували умови для формування Fe-Ti-V та Cu-Ni-EPG зруденіння. Діоритові та гранітоїдні інтрузиви займають на АВ набагато більші площі порівняно з габроїдами. Формування діоритових інтрузивів відбулося у часовому проміжку між ранньою крейдою та раннім палеогеном. Хоча найдавніші габроїди утворилися значно раніше діоритів, явища магматичного змішування в останніх вказують на те, що магми базитового та середнього складу могли й синхронно інтродувати у спільні магматичні камери. Гранітоїдний магматизм АВ охоплює пізньокрейдяний та палеогеновий періоди. Більшість гранітоїдних інтрузивів АВ сформувалася у палеоцені після головної фази орогенічних деформацій. Саме із цими інтрузивами може бути пов'язана Cu-Mo мінералізація.

Ключові слова: геологія, вапняно-лужний магматизм, Антарктичний півострів.

Вступ. Архіпелаг Вільгельма та Аргентинські острови, на яких розташовується Українська антарктична станція "Академік Вернадський" (УАС), є частинами периферійно-континентального магматичного поясу Антарктичного півострову (Jourdan et al., 2020). У геологічній будові цієї території значну роль відіграють "неметаморфізовані" магматичні породи інтрузивного походження (Burton-Johnson and Riley, 2015). Численні плутони габроїдів, діоритів та гранітоїдів у складній послідовності інтродують один одного та споріднені з ними вулканогенні товщі, формуючи багатофазний Батоліт Антарктичного півострова (Leat et al., 1995). На відміну від більш доступної північної кінцівки Антарктичного півострова, геологічна вивченість його території між 65° південної широти та південним полярним колом залишається набагато гіршою (Riley et al., 2011). Значна частина цієї території припадає на Берег Грея, півострів Київ та прилеглі острови архіпелагу Вільгельма – район, який наразі досліджують українські геологи. Попередню середньомасштабну геологічну зйомку тут було виконано у 1957–58 рр. (Curtis, 1966). Фрагментарність побудованої геологічної карти та її неоднорідна забезпеченість фактичним матеріалом пояснюється вкрай несприятливими умовами виконання польових робіт. Сотні дрібних островів та морських скель, значні

акваторії шхерного мілководдя не обстежені промірами глибин, складна льодова обстановка, відсутність великомасштабних топографічних карт – такими й досі лишаються умови проведення геологічних досліджень у районі УАС. Тим не менше, у 2017 р. сезонний заїгн 22-ї Української антарктичної експедиції розпочав виконання великомасштабних геологічних зйомок на архіпелазі Вільгельма та сусідньому узбережжі півострова Київ. Зазначені роботи тривають і досі. Стратиграфію району УАС описано у попередній авторській публікації (Mytrokhyn and Bakhmutov, 2019). З'ясовано, що стратифіковані утворення архіпелагу Вільгельма представлені вулканогенними товщами юрсько-крейдяного віку, які обмежено поширені на частині Аргентинських островів, а також на островах Ялур, Ховгаард та Бус. Метою даної роботи було охарактеризувати прояви інтрузивного магматизму на архіпелазі Вільгельма. Перша частина роботи присвячена інтрузивним утворенням плутонічної фації: габроїдам, діоритам та гранітоїдам.

Фактичний матеріал, методи та результати досліджень. Польові дослідження на архіпелазі Вільгельма здійснили О. Митрохин та В. Бахмутов під час сезонних робіт 22-, 24- та 25-ї Українських антарктичних експедицій, що виконувались у 2017, 2019 та 2020 рр. відповідно.

Отриманий фактичний матеріал включав первинну документацію геологічних спостережень, фотографії відслонень, маршрутні карти, колекцію геологічних зразків та супровідні каталоги. Методику польових досліджень охарактеризовано у роботі (Mytrokhyn and Bakhmutov, 2019). Камеральну обробку польових матеріалів виконували співробітники ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Інституту геофізики імені С.І. Субботина НАН України. Зокрема, О. Митрохин та В. Бахмутов здійснили обробку польової документації, дешифрування космознімків та матеріалів магнітометричних зйомок. Петрографічні дослідження виконали О. Митрохин, О. Марущенко та Т. Митрохіна. Зразки гірських порід досліджувалися у прозорих

петрографічних шліфах з використанням поляризаційних мікроскопів МП-7 та ПОЛАМ РП-1. Рудну та акцесорну мінералізацію досліджували А. Алексєнко та О. Марущенко під керівництвом О. Митрохіна. Спеціально підготовлені прозоро-поліровані шліфи вивчалися на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі REMMA-202M, оснащеному енергодисперсійним рентгенівським спектрометром "Link systems". Для складання геохронологічної схеми (рис. 1) автори використали дані попереднього ізоотопного датування інтрузивно-магматичних утворень архіпелагу Вільгельма (Bakhmutov et al., 2013; Pankhurs, 1982; Rex, 1976; Ryan, 2007; Tangeman et al., 1996; Zheng et al., 2018).

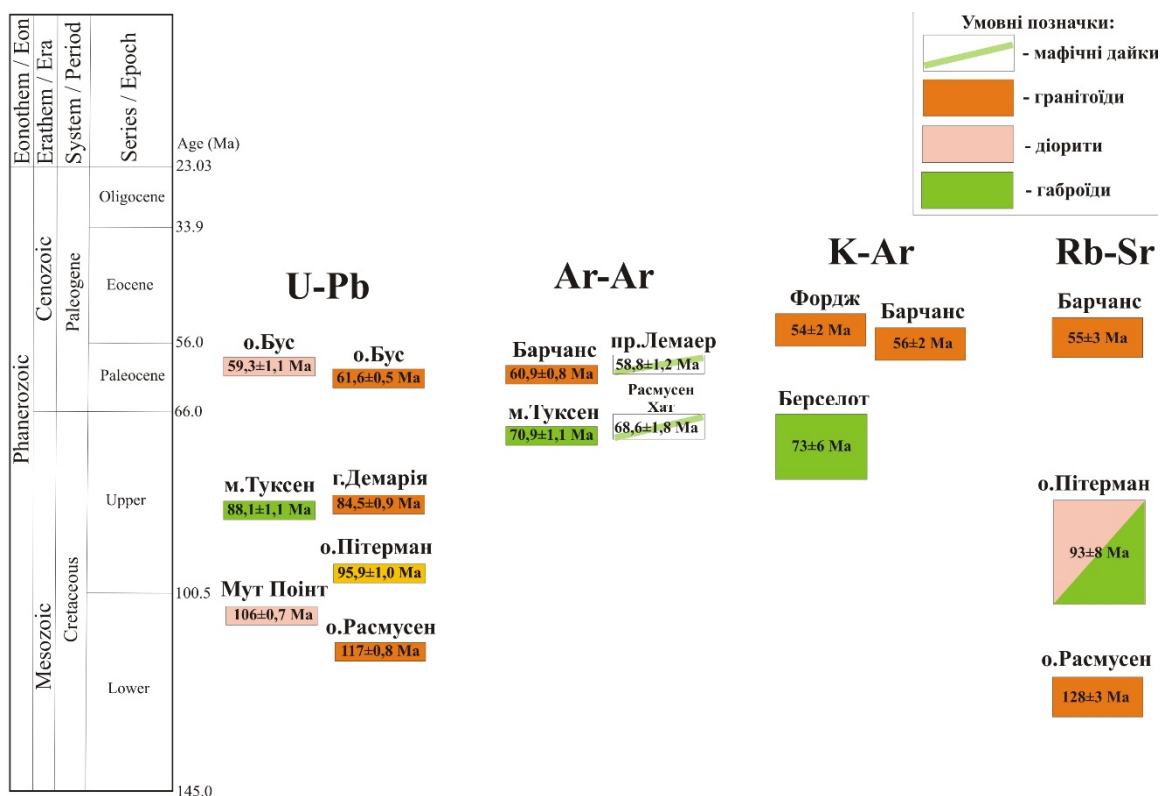


Рис. 1. Геохронологія інтрузивно-магматичних утворень архіпелагу Вільгельма та найближчого узбережжя півострова Київ. Дані U-Pb, Ar-Ar, K-Ar Rb-Sr ізоотопного датування запозичені з публікацій (Bakhmutov et al., 2013; Pankhurs, 1982; Rex, 1976; Ryan, 2007; Tangeman et al., 1996; Zheng et al., 2018)

У результаті виконаних досліджень було отримано нові дані про географічну поширеність, умови залягання, геологічний вік, петрографічне різноманіття, особливості речовинного складу та рудоносність інтрузивно-магматичних утворень архіпелагу Вільгельма. З'ясовано, що на досліджуваній території найбільше поширені плутонічні інтрузиви діоритового та гранітоїдного складу. Габроїдні інтрузиви значно поступаються їм за площами поширення. Вік окремих плутонів змінюється від раньокрейдяного до палеогенового включно. Габроїдні та діоритові інтрузиви звичайно є давнішими за гранітоїди. Вікові ж співвідношення між габроїдами та діоритами більш складні. В одних випадках вони виявляють ознаки магматичного змішування, тобто застигали майже одночасно. В інших – діорити інтродують повністю закристалізовані габроїди.

Габроїдні інтрузиви архіпелагу Вільгельма представлені численними габроїдними тілами, що виявлені на островах Пітерман, Анаграм, Берселот, Ховгаард, Ведель, Рока, Крулс, а також на сусідньому материковому

узбережжі півострова Київ у районі заток Веддінгтон Бей та Жирард Бей (рис. 2).

Жодне з відомих габроїдних тіл не вдалося оконтурити з усіх боків, оскільки їх геологічні границі в багатьох місцях лежать нижче рівня моря або ж закриті перманентним снігом та льодом. Тому дані про їх розміри є неповними і тільки опосередковано можуть бути оцінені за даними магнітної зйомки, а морфологічні особливості лишаються здебільшого нез'ясованими. Напевно, що усі досліджені тіла являють лише невеликі оголені частини значно більших інтрузивних масивів, занурених під сучасний рівень вод моря Белінсгаузена або похованих під льодовиковими покривами (рис. 3а).

За геологічними даними, формування габроїдних інтрузивів відбулося у часовому проміжку між нагромадженням юрської вулканогенної товщі півострова Київ та формуванням гранітоїдів верхньокрейдяного віку. Найхарактернішою особливістю внутрішньої будови та речовинного складу габроїдних інтрузивів архіпелагу Вільгельма є розшарованість різного масштабу, яка має

первинно-магматичне походження. Нинішнє стрімке та вертикальне залягання шаруватості пов'язане з регіональними тектонічними деформаціями, яких зазнали консолідовані габроїдні інтрузиви внаслідок субдукційних процесів, що відбувалися в Західній Антарктиці аж до початку палеогенового періоду. Петрографічні особливості габроїдів свідчать про значний розвиток процесів

кристалізаційної диференціації первинних базитових магм. Виходячи з цього, а також за результатами вивчення рудної мінералізації габроїдів, у донних частинах досліджуваних інтрузивних тіл прогнозується залягання ультрамафітових кумулатів імовірно піроксеніт-перидотитового складу, з якими може бути пов'язане Fe-Ti-V або Cu-Ni-EPG зруденіння.

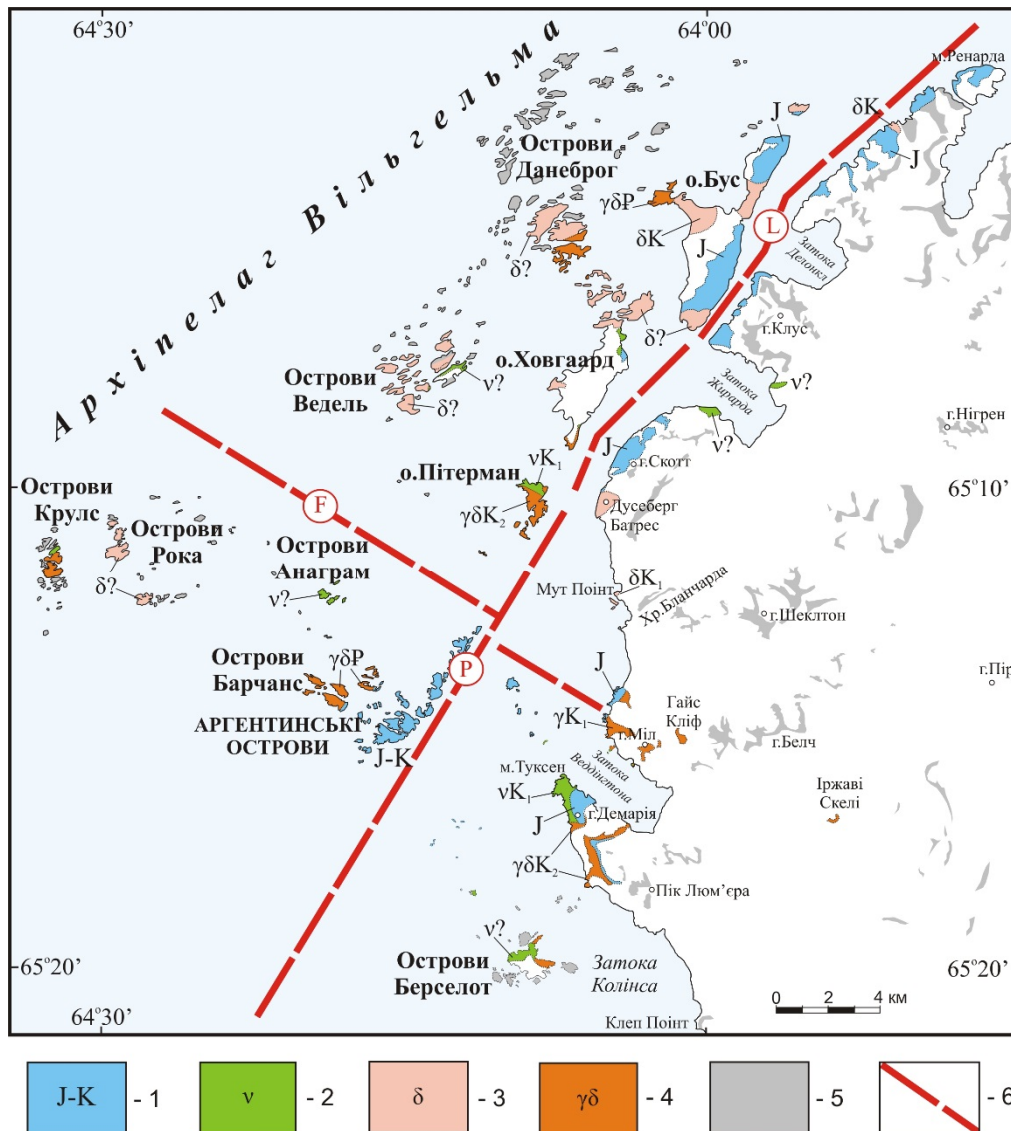


Рис. 2. Геологічна карта району архіпелагу Вільгельма та найближчого узбережжя півострова Київ.

Умовні позначення: 1 – вулканогенні товщі півострова Київ та Аргентинських островів;
2 – габроїдні інтрузиви ранньокрейдяного (vK_1) та нез'ясованого ($v?$) віку; 3 – діоритові інтрузиви ранньокрейдяного (δK_1) та нез'ясованого ($\delta?$) віку; 4 – гранітоїдні інтрузиви ранньокрейдяного (vK_1), пізньокрейдяного ($\gamma\delta K_2$) та палеогенового ($\gamma\delta P$) віку;
5 – неідентифіковані виходи гірських порід; 6 – регіональні розломи у протоках Лемаєр (L), Пенола (P) та Френч (F).
Карта складена О. Митрохином, крім авторських даних використані матеріали (Curtis, 1966)

Габроїдна інтрузія острова Пітерман (ГІП) відслонюється в північній частині острова (рис. 3а). Загальна площа закартованих виходів габроїдів становить 0,2 км². Вони формують стрімкі схили на північному узбережжі острова, а також його найбільшу височину Clayton Hill. У північному напрямку габроїди занурюються під рівень моря, глибини якого між Пітерманом та сусіднім о. Ховгард сягають 70–80 м. На півдні ГІП зрізається пізньокрейдяною гранітоїдною інтрузією. U-Pb ізотопний вік останньої сягає 96 ± 1 млн років (Bakmutov et al., 2013). Перманентний снігово-льодовий покрив частково

закриває інтрузивний контакт між гранітоїдами та габроїдами. Тим не менше у цілій низці відслонень можна побачити його північно-західне простягання, з падінням, що змінюється від субвертикального до північно-східного. У ході польових спостережень встановлено, що площина контакту орієнтується незгідно щодо елементів залягання шаруватості у габроїдах. На більш давній геологічний вік ГІП також вказують численні гранітоїдні жили у габроїдах, а також присутність габроїдних ксенолітів у гранітоїдах. Зазначені геологічні співвідношення з гранітоїдами дозволяють обмежити верхню вікову

границю формування ГІП згадуваним вище пізньокрейдяним значенням U-Pb ізотопного віку гранітоїдної інтрузії о. Пітерман. Нижня вікова межа для габроїдів лишається нез'ясованою. Імовірно, вік габроїдів не давніший за юрську вулканогенну товщу півострова Київ, виходи якої слугують рамою для габроїдних інтрузивів на сусідньому материковому узбережжі. Дві генерації мафічних дайок інтродують габроїди ГІП (рис. 3b). Догранітні дайки габро-порфіритів зазнали регіонального метаморфізму амфіболітової фації сумісно із вмісними габроїдами. Постгранітні діабазові дайки зазнали локальних гідротермально-метасоматичних змін. В окремих відслоненнях габроїди ГІП виявляють первинну магматичну розшарованість, що має ритмічно-градаційний модальний характер. Кожний ритм завтовшки від 2–5 до 10 см складається з мезократового та лейкократового кумулатів, які поступово переходять один в одного за рахунок збільшення вмісту плагіоклазу щодо мафічних мінералів. Зокрема вміст плагіоклазу варіює від 50–60 % до 90 % або й більше. Межі між сусідніми ритмами є прямолінійними, доволі різкими без біляконтарних змін. Потужності сусідніх ритмів майже однакові, витримані за простяганням. Проте зустрічаються ділянки з лінзоподібно-шаруватою будовою, де окремі габроїдні прошарки поступово виклинюються по простяганням. Шаруватість звичайно залягає субвертикально або зі стрімким

падінням на південний захід під кутами більше 75°. Простягання шаруватості північно-західне з азимутами $A_{pr}=330-355^\circ$. Навіть на поруч розташованих ділянках шаруватість може орієнтуватись "перехресно". Генеральне північно-західне простягання шаруватості може свідчити про подальше-продовження габроїдного тіла у цьому напрямку нижче рівня моря. Петрографічний склад ГІП представлений амфіболовими габро, габро-норитами та анортозитами. Амфіболові габро є найпоширенішими. Це темно-сірі явнокристалічні середньозернисті породи з реліктовою гіпідіоморфнозернистою кумулятивною структурою. Їх головні породотвірні мінерали – основний плагіоклаз та амфіболи. По плагіоклазу подекуди розвиваються вторинні серицит та сосюрит. Амфіболи представлені роговою обманкою та актинолітом. Зелена рогова обманка заміщує первинний клінопіроксен, який зустрічається в ній у вигляді реліктових зерен. Сама ж рогова обманка може заміщуватися волокнистим агрегатом актиноліту. Крім серициту, сосюриту та амфіболів, вторинне походження мають біотит, хлорит, епідот та кварц. В окремих відслоненнях виявлено пливкові виокремлення вторинних хлоридів міді. Рудна мінералізація габроїдів представлена магнетитом, ільменітом, піритом, халькопіритом та сфалеритом. Серед акцесоріїв діагностовано хлор-апатит, сфен та циркон.

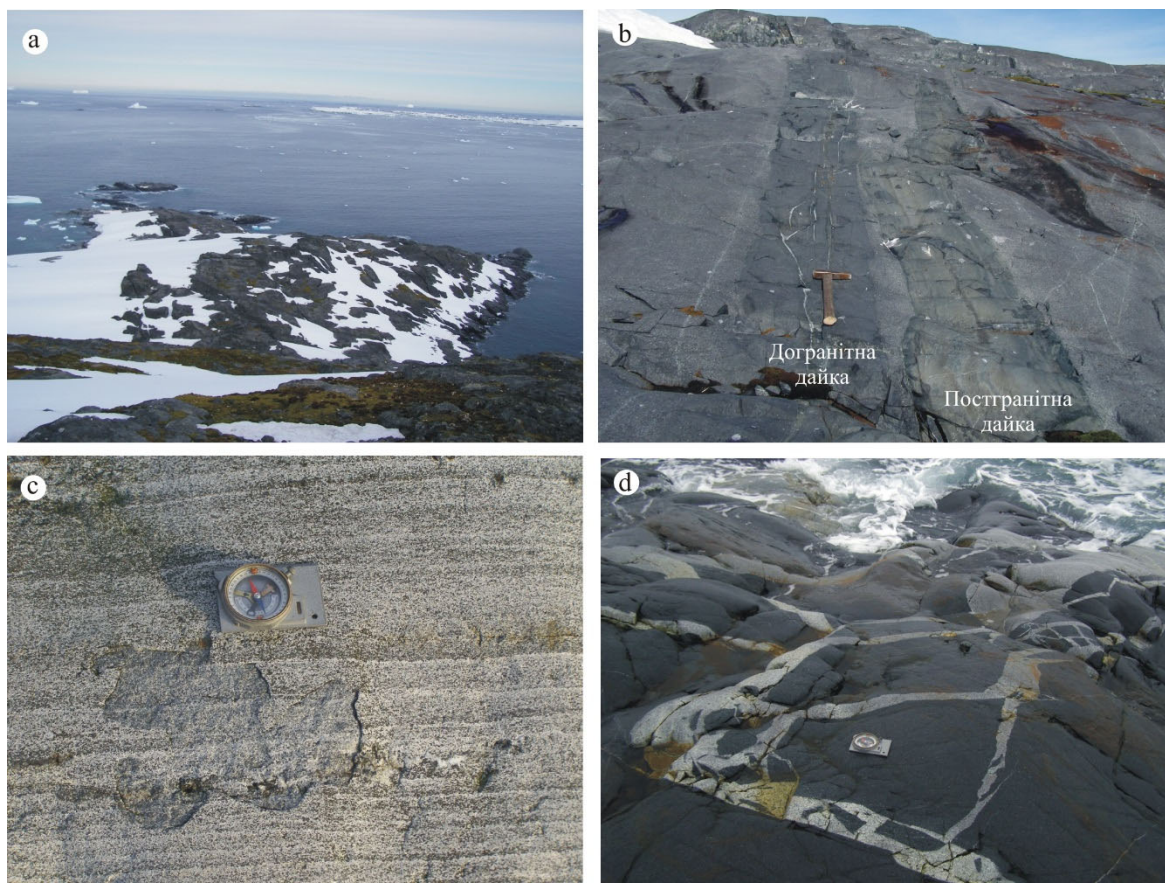


Рис. 3. Умови залягання габроїдних інтрузивів архіпелагу Вільгельма:

а – виходи габроїдів о. Пітерман з півночі обмежуються лінією узбережжя, а в напрямку на південь закриті під снігово-льодовиковим покривом; б – габроїди о. Пітерман інтродуються двома різновіковими мафічними дайками; с – магматична розшарованість у габроїдах о. Анаграм-III; д – габроїди о. Ноб ін'єкуються сіткою гранітоїдних жил

Габроїдна інтрузія островів Анаграм (ГІА) відслонюється на острові Ноб та щонайменше на трьох сусідніх безіменних островах з групи Анаграм. Габроїди формують

більшу частину обстеженої території островів Анаграм. Лише в північно-східній частині острова Анаграм-II вони контактують з інтрузією більш молодих гранітоїдів. Хоча

невеликі гранітоїдні жили перетинають габроїди в багатьох інших місцях (рис. 3d). У прибережній зоні островів габроїди звичайно занурені під рівень моря. Перманентний сніг та лід частково вкривають південні та центральні частини найбільших островів. Загальна площа закартованих корінних виходів габроїдів становить 0,13 км². Центральна та південно-східна частини о. Ноб, а також островів Анаграм-II та Анаграм-III складаються зовнішньо масивними габроїдами. Але вздовж північного узбережжя о. Ноб та по всій протяжності о. Анаграм-III габроїди виявляють магматичну розшарованість (рис. 3с). Смуга розшарованих габроїдів має сумарну протяжність більше 1 км при горизонтальній потужності близько 200 м. Шаруватість залягає субвертикально з генеральним простяганням на північний-схід – $\text{Apr}=50\text{--}60^\circ$. Найбільш характерною є паралельна шаруватість ритмічно-градаційного модального типу. Елементарні прошарки мають потужності від 1–2 до 8–10 см. Відносно різка підошва кожного такого прошарку ідентифікується за суттєвим збагаченням мафічними мінералами аж до утворення меланократових та ультрамафічних кумулатів. У напрямку покрівлі елементарного прошарку вміст мафічних мінералів поступово зменшується, натомість зростає вміст плагіоклазу та поступово збільшується зернистість. Відповідно, біля покрівлі прошарку формується крупнозернистий лейкократовий кумулянт аж до утворення анортозиту. Лейкократовий кумулянт також має різку границю з наступним елементарним прошарком, в межах якого описувана картина має повторюватись. Зазначений характер шаруватості дозволяє визначати взаємне розташування покрівлі та підошви габроїдного тіла. Щоправда, габроїди з паралельною ритмічно-градаційною шаруватістю не мають суцільного поширення. Такий "простий" тип шаруватості може ускладнюватись складками сковзання та троговими структурами, які свідчать про мобільність кристалічної осаду під час застигання магматичної камери. Складки являють собою невеликі синеклізи протяжністю не більше кількох метрів. Шаруватість тут має лінзоподібний характер, потужності габроїдних шарів поступово збільшуються у напрямку замкової частини складки. Трогові структури мають форму протяжних та звивистих жолобів, що заповнюються шаруватими габроїдами. Шаруватість у таких трюгах є косою або перехресною з ознаками часткового розмивання та нагромадження нової пачки шаруватих габроїдів на поверхні розмиву. Ці особливості також дають можливість визначати положення підошви та покрівлі габроїдного тіла. Нарешті, крім макроскопічної шаруватості, у габроїдах Анаграм виявлено й приховану розшарованість. Остання проявляється у закономірній зміні мінерального складу порід та хімізму породотвірних мінералів при переході від розшарованих габроїдів до масивних. Авторські дослідження довели, що розшаровані габроїди первинно складали придонну частину інтрузії, сучасне ж положення її покрівлі прогнозується у південно-східному напрямку. Мікроскопічні спостереження виявляють директивні текстури шаруватих габроїдів з плоско-паралельною орієнтацією кумулятивних мінеральних зерен. Петрографічне різноманіття гірських порід ГІА включає: амфіболові габро, габро-норити, олівінові габро, анортозити та піроксеніти (олівінові вебстерити). Як і на острові Пітерман, найбільше поширені амфіболові габро. Розвиток зеленої рогової обманки, актиноліту, біотиту, хлориту, епідоту та кварцу тут також пов'язаний з метаморфічними процесами. Проте ступінь збереження первинно-магматичних мафічних мінералів у габроїдах Анаграм є кращим. Так,

в них відносно добре зберігаються як моноклінний, так і ромбічний піроксени, подекуди також – олівін та керсутит. Рудна мінералізація представлена Ti-V магнетитом, ільменітом, піритом та халькопіритом. Характерними акцесорними мінералами є хлор-апатит та сфен.

Діоритові інтрузиви архіпелагу Вільгельма займають набагато більші площі порівняно з габроїдами (див. рис. 2). Інтрузивні породи діоритового складу поширені на островах Бус, Плено, Ховгаард, Данебруг, Ведель та Рока. Крім того, розрізнені виходи діоритів відомі на сусідньому узбережжі "мейнленду" в районі Дусеберг-Батресс та Мут Поінт, а також у затоці Ведінгтон Бей. У петрографічному складі діоритових інтрузивів ідентифіковані діорити, кварцові діорити та кварцові монцодіорити. Найбільш поширеними є кварцові діорити. Слід зазначити, що у попередніх петрографічних описах (Curtis, 1966) ці породи визначалися як "тоналіти". Згідно з прийнятою тоді класифікацією, тоналітами називали кварц-плагіоклазові плутонічні породи з вмістом кварцу >10 %, лужного польового шпату <10 %. U-Pb ізотопне датування цирконів з діоритів Мут Поінт засвідчило їх ранньокрейдяний вік (Tangeman et al., 1996). Ранньопалеогенове датування, яке нещодавно було отримано (Zheng et al., 2018) для кварцових діоритів о. Бус, напевно є омолодженням. Тому наразі можна обговорювати лише відносний геологічний вік окремих діоритових інтрузивів Архіпелагу Вільгельма. Наприклад, на тому ж острові Бус авторами описаний інтрузивний контакт діоритів з юрською вулканогенною товщею півострова Київ, самі ж діорити інтродуються палеогеновими гранітоїдами.

Діоритова інтрузія острова Бус (ДІБ) фрагментарно відслонюється на кількох ділянках. Власне на о. Бус протяжні виходи кварцових діоритів закартовані на узбережжях затоки Порт Шарко. Зокрема, вони складають значну частину примітного субширотного мису, що обмежує Порт Шарко з півдня, а також простежені вздовж північно-західних схилів вершини Вандел Пік до абсолютної відмітки 430 м (рис. 4а).

Кварцовими діоритами також складена вузька перемичка, яка поєднує північну та центральну гористі частини острова, відокремлюючи Порт Шарко від протоки Лемера. Можливо, до цієї ж інтрузії належать виходи кварцових діоритів в крайній південній частині о. Бус, а також на сусідніх островах Плено та Ховгаард. Загальна площа закартованих на острові Бус виходів ДІБ перевищує 2 км². Найкраще досліджені кварцові діорити, які відслонюються в межах примітного субширотного мису в західній частині острова. Це сірі явнокристалічні середньозернисті породи. З огляду на доволі темну окраску та мезократовий склад, їх можна прийняти за габроїди. Мафічні включення різного розміру та форми надають діоритам о. Бус такситової будови. На ділянці з координатами 65°3'56,3"S; 64°01'22,2"W спостерігається ендоконтактова зона діоритової інтрузії, яка далі на схід контактує з юрською вулканогенною товщею. Діорити на цій ділянці дуже насичені ксенолітами, що місцями утворюють справжню еруптивну брекчію. Серед ксенолітів переважають темно-сірі дрібнозернисті породи, що напевно є ороговикованими вулканітами основного або середнього складу. Місцями вони виявляють нечітку дрібношарувату текстуру. У деяких ксенолітах погано проявлена грубоуламкова пірокластична структура. Розміри ксенолітів звичайно коливаються від 2–3 до 10–20 см, деякі сягають перших метрів. Більшість з них мають гострокутну форму з різкими обмеженнями. Хоча зустрічаються і частково оплавлені. З боку вмісної породи навколо ксенолітів може спостерігатися вузька

переривчаста кайма, яка складається більш лейкократовим матеріалом. Окремі ксеноліти перетинаються прожилками такого ж матеріалу. У просторовому розподілі ксенолітів виявлено певну неоднорідність. Найнасиченіша ксенолітами зона має меридіональне простягання. У межах цієї зони є смуги завширшки 1–2 м, де вміст ксенолітів не менший ніж вміст умісної породи. У таких смугах умісна порода може мати флюїдальну будову, яка визначається чергуванням тонких переривчастих смуг з різною світлістю забарвлення, а також субпаралельною орієнтацією ксенолітів. На схід насичена ксенолітами зона занурюється під рівень моря. Тим не менше, огляд ще більш східних берегових відслонень показав, що там залягають вулканіти, які представлені лапілевими туфами з проверстками андезитових лав. Натомість на захід від описуваної ендоконтактової зони кількість ксенолітів швидко зменшується аж до повного зникнення. Нарешті, у пункті з координатами 65°3'57,5"S; 64°01'49,6"W діорити перетинаються більш молодшою гранодіоритовою інтрузією (рис. 4b-с). Площина контакту різка, нахилена на північний схід у бік діоритів під кутом 25°, азимут простягання 350°. З боку гранодіоритової інтрузії спостерігається ендоконтактова зона товщиною біля 1 м, яка складається рожевим смугастим апліт-пегматоїдним гранітоїдом. Його смугастість обумовлена

чергуванням смуг дрібнозернистого аплітовидного, середньозернистого та грубозернистого гранітоїдного матеріалу. У діориті спостерігається вузька, екзоконтактова зона освітлення. Крім того, поблизу від контакту він ін'єкується гранітоїдною жилою, завтовшки 12 см, яка також має зональну будову. Її осьова зона складена аплітоподібним гранітом, призальбандові зони – гранодіоритом. Нижня гранодіоритова зона є більш потужною порівняно з верхньою. Згідно з даними U-Pb ізотопного датування (Zheng et al., 2018), гранодіоритова інтрузія о. Бус має ранньопалеогеновий вік $61 \pm 0,5$ млн років. Натомість значення U-Pb ізотопного віку цирконів з кварцових діоритів, $59,3 \pm 1,1$ млн років, вочевидь є омолодженням, оскільки проба для датування відбиралася неподалік від описуваного контакту з гранодіоритовою інтрузією. Головним петрографічним представником ДІБ є кварцові діорити. Під мікроскопом вони демонструють гіпідіоморфнозернисту структуру, в якій плагіоклаз виявляє ідіоморфізм щодо кварцу та мафічних мінералів. Серед останніх головну роль відіграють рогова обманка та біотит. Fe-Ti оксиди мають другорядне значення. Незначно розвинена вторинна мінералізація, яка представлена серицитом, хлоритом та актинолітом. Серед акцесорних мінералів ідентифіковано апатит, епідот, ортит, сфен та циркон.



Рис. 4. Умови залягання діоритових інтрузивів архіпелагу Вільгельма:

a – виходи діоритів в затоці Порт Шарко на о. Бус; b-с – діорити о. Бус інтродуються гранодіоритами палеогенового віку; d – mafic magmatic enclaves в діоритах о. Рока-IV

Діоритову інтрузію островів Рока (ДІР) виявлено під час польових робіт 2019 р. На раніш опублікованих геологічних картах та в петрографічному нарисі (Curtis, 1966) помилково зазначено, що острова Рока складаються габроїдами. Наразі з'ясовано, що як мінімум на трьох найбільших островах цієї групи: Рока-I, Рока-II та Рока-IV, а також на острові Локатор, значно поширені

гірські породи діоритового складу. Геологічне картування засвідчує, що площа, яку вони займають, має перевищувати 1,3 км². Дійсні ж розміри ДІР мають бути уточнені подальшою геологічною зйомкою численних невеликих островів, розкиданих на площі понад 14 км² на схід від вже дослідженої групи островів. Натомість габроїди складають лише дві невеликі ділянки на

о. Локатор та Рока-IV, а в інших місцях зустрічаються у вигляді дрібних включень у діоритових породах. Під час польових досліджень діоритові породи островів Рока можна сплутати з гранітоїдами. Подібно до останніх, вони характеризуються світло-сірим забарвленням, явнокристалічною структурою та доволі лейкократовим складом. На відміну від діоритів о. Бус вони більш грубозернисті, містять менше мафічних мінералів. Ще однією характерною особливістю є присутність неправильних лусок біотиту, розміром 4–8 мм, нерівномірно розсіяних в об'ємі породи. У відслоненнях діоритоїди звичайно мають такситову текстуру, що визначається присутністю мафічних включень, розміром від кількох сантиметрів та перших метрів. Такі включення можуть мати як фанеритову, так і дрібнокристалічну будову. За даними мікроскопічних досліджень, їх склад варіює від габроїдного до мезократового діоритового. Розподіл мафічних включень на різних ділянках ДІР доволі неоднорідний – в одних місцях маємо лише поодинокі мафічні включення, в інших вони можуть становити від 10–20 до 40–50 % від загальної площі відслонення. В останньому випадку мафічні включення формують смугоподібні скупчення у вмісних діоритових породах. Форма включень може бути як гострокутною, так і заокругленою. Є місця, де включення мають різною мірою сплюснену еліптичну форму. У межах протяжного відслонення з координатами 65°11'17,2"S та 64°29'35,9W на північно-західному узбережжі о. Рока-I сплюснені мафічні включення, розміром від 3–5 см до 20–50 см по довгій осі, орієнтовані у вертикальній площині з азимутом простягання 355°. Окрім того, вмісні кварцові діорити на цьому відслоненні місцями мають нечітку флюїдальну смугастість, яка орієнтується в цій же площині. Поперек описуваної площини течії у діоритах розвинена густа сітка тріщин з азимутом простягання 80° та падінням на північний захід під кутом 75°. Вздож тріщин розвинені зони гідротермальних змін. Їх наявність діагностується навролоотріщинним висвітленням діориту. Борозни сколювання на поверхнях тріщин орієнтуються під кутом 50° до горизонту. На окремих ділянках, наприклад на східному узбережжі о. Рока-IV, мафічні включення у діоритоїдах можна ідентифікувати як *mafic magmatic enclaves* (ММЕ), що виникають у процесі змішування двох контрастних за складом магм у рідкому або напіврідкому стані. ММЕ характеризуються своєрідною морфологією "зім'ятої подушки" із заокругленими затокоподібними границями (рис. 4d). В їх периферійній частині розрізняються вузькі зони "загартування", які сформовані афанітовим мікрогабро або мікродіоритом. Внутрішні частини включень складаються значно краще розкристалізованою мафічною породою. На островах Локатор, Рока-II та Рока-IV діоритові породи інтродуються жилами мікрогранітів та гранітних пегматитів. Напевно, наймолодшими інтрузивними утвореннями є невеликі мафічні дайки північно-східного простягання, які перетинають діорити на о. Локатор та Рокка-II. Такі дайки можуть утворювати рої, які орієнтуються відповідно до переважальної системи тріщинуватості з $\text{Apr}=70\text{--}85^\circ$. Петрографічний склад ДІР представлений кварцовими діоритами та кварцовими монцодіоритами. Візуально вони не відрізняються один від одного і при польових дослідженнях мають визначатися під спільним найменуванням діоритові породи (інакше – діоритоїди). У шліфах діоритоїди демонструють типову гіпідіоморфнозернисту структуру. Панівний плагіоклаз виявляє ідіоморфізм щодо інших породотвірних мінералів. Кварц звичайно присутній у другорядних кількостях. У кварцових монцодіоритах маємо дещо

підвищений вміст калішпату. Мафічні мінерали представлені роговою обманкою, піроксенами та біотитом. Плагіоклаз може незначно зазнавати серицитизації, біотит – частково заміщуватись хлоритом. Характерними рудними мінералами є Fe-Ti оксиди. Подекуди зустрічаються плівкові виокремлення хлоридів міді. Серед акцесоріїв ідентифіковано апатит, сфен, епідот, ортит та циркон.

Гранітоїдні інтрузиви архіпелагу Вільгельма за площами свого поширення є зіставними з діоритами. Гранітоїди поширені на островах Барчанс, Фордж та Пітерман. Їх також знайдено на островах Бус, Данебруг та на узбережжі півострова Київ (див. рис. 2). Найбільше поширення серед гранітоїдів мають гранодіорити. Значно менш поширені граніти та тоналіти. Дані ізотопного датування дають підстави виділити щонайменше дві вікові групи гранітоїдів архіпелагу Вільгельма: пізньокрейдяну та палеогенову (див. рис. 1). Пізньокрейдяні гранітоїди наразі виявлено лише на острові Пітерман. Палеогеновий вік мають гранітоїди на островах Барчанс, Фордж та Бус. Усі інші прояви гранітоїдного магматизму на островах архіпелагу Вільгельма нині лишаються недатованими.

Гранітоїдна інтрузія острова Пітерман на сьогодні є єдиним виявленим представником пізньо-крейдяного гранітоїдного магматизму на архіпелазі Вільгельма. Гранітоїди складають центральну та південну частини острова (рис. 5a). На півночі гранітоїди контактують з більш давніми габроїдами. На сході виходи гранітоїдів занурюються під рівень моря, глибини якого стрімко зростають до 200–350 м у протоці Пенола. Так само їх виходи обмежуються лінією західного та південного узбережжя. Але глибини моря тут значно менші. Крім того, такі ж гранітоїди відслонюються і на найближчих дрібних островах, що розташовуються на південний захід від о. Пітерман. З урахуванням їх, а також припускаючи залягання гранітоїдів під снігово-льодовим покривом у центральній частині острова, загальну площу гранітоїдного масиву о. Пітерман можна оцінити щонайменше у 0,71 км². Скоріше за все ця цифра має бути значно більшою, оскільки дрібні морські скелі, які розсіяні на мілководді південніше та західніше від о. Боудер аж до скелі Геральд Риф, також складаються гранітоїдами. Інтрузивний контакт гранітоїдів з більш давніми габроїдами відслонюється на кількох ділянках у північній частині о. Пітерман. Найцікавішою є ділянка з координатами 65°09'57,3" пвд. ш. та 64°09'7,4" зхд. д., яка розташовується в північно-західній частині острова в 350 м східніше від мису Rough Point. Виходи габроїдів, які складають північну частину відслонення, різко уриваються по лінії контакту (рис. 5b). Площина контакту має північно-західне простягання з падінням у бік габроїдів – $\text{Apd}=41^\circ$ кут 20° . Отже, контакт є незгідним щодо простягання шаруватості габроїдів. Більш того, лінія контакту повністю зрізає й "догранітну" дайку порфіроподібного мікрогабро, яка залягає у габроїдах, простягаючись у меридіональному напрямку від північного узбережжя острова аж до описуваного відслонення. Габроїди в області контакту інтродовані численними жилами дрібнозернистих гранітоїдів. Гранітоїди, які підстиляють габроїди, представлені середньозернистою плутонічною фацією. У вузькій приконтактовій зоні завширшки ~1–3 м вони набувають плямисто-смугастої будови за рахунок неоднорідного розподілу мафічних мінералів. Склад окремих смуг змінюється від гранодіориту до кварцового діориту. Крім такої смугастості, в гранітоїдах також зустрічаються різною мірою "засвоєні" ксеноліти габроїдів та невеликі жили граніт-аплітів. Наймолодший геологічний вік на описуваному відслоненні має діабазова дайка

субширотного простягання, яка перетинає і габроїди з гранітоїдами, і "догранітну" дайку порфіроподібного мікрогабро. Саме в районі описуваної ділянки попередники відбирали проби для ізотопного датування гранітоїдів острова Пітерман. Зокрема, (Pankhurst, 1982) для п'яти валових проб "діорит/гранітового" складу, відібраних на мисі Rough Point, отримав Rb-Sr ізохрону з

пізньокрейдяним віком 93 ± 8 млн років. У роботі (Bakmutov et al., 2013) опубліковано результати U-Pb ізотопного датування цирконів з гранодіориту (тоналіту) північно-західної частини о. Пітерман, яке дало вік $95,9 \pm 1,0$ млн років. Крім описаного вище відслонення, гранітоїди складають майже всю центральну та південну частини о. Пітерман.

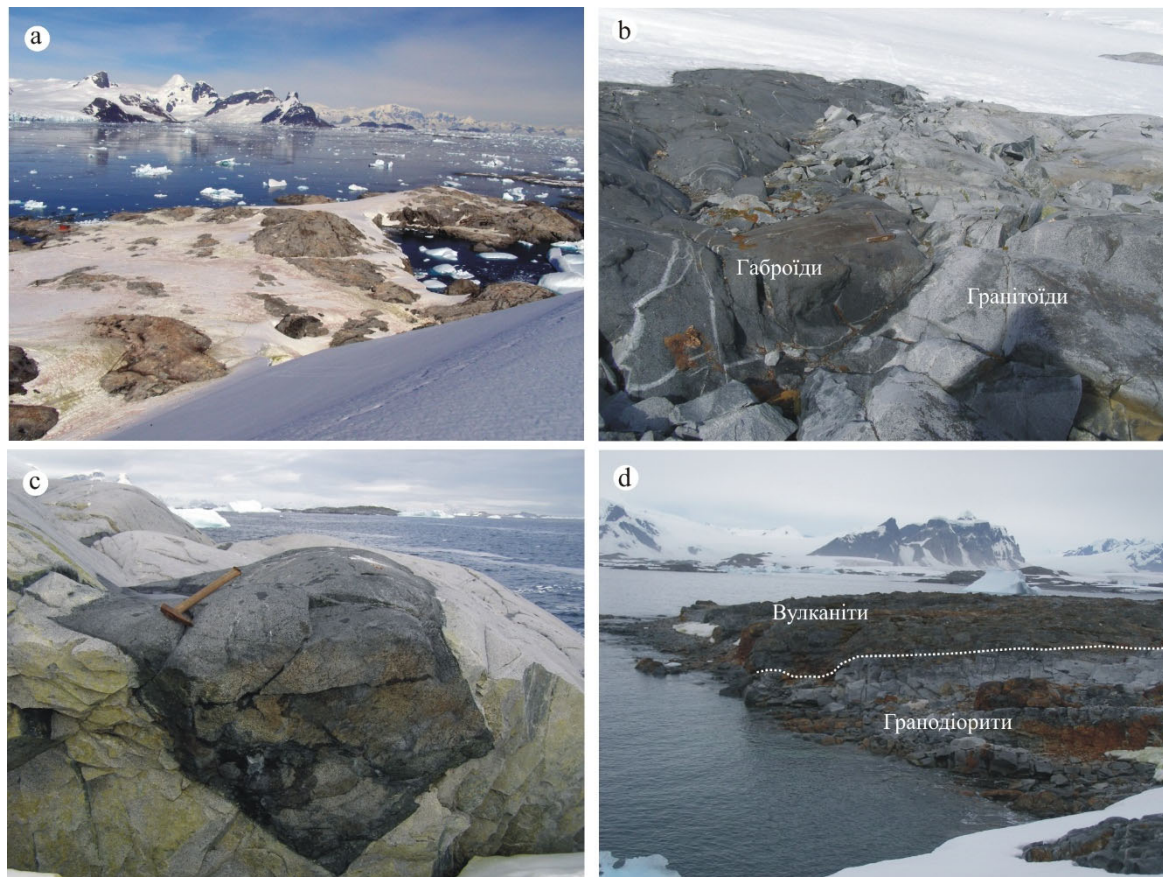


Рис. 5. Умови залягання гранітоїдних інтрузивів архіпелагу Вільгельма:

а – виходи пізньокрейдяних гранодіоритів у південній частині о. Пітерман; б – гранітоїди інтродують габроїди на о. Пітерман; в – ксеноліт габроїда у гранодіориті о. Пітерман; д – інтрузивний контакт палеогенових гранодіоритів з більш давніми вулканітами на острові Барчанс

Головне місце серед них посідають гранодіорити. Габроїди ж тут зустрінуті лише у вигляді ксенолітів серед гранодіоритів. Такі ксеноліти зазвичай мають гострокутну форму з різкими межами та темними приконтактними облямівками (рис. 5с). Крім габроїдів, гранодіорити на цій ділянці також містять включення темних дрібнозернистих порід на кшталт мікродіоритів та мікрогабро. Крім того, гранодіорити південної частини острова інтродуються численними мафічними дайками. За значних варіацій потужності більшість дайок мають північно-східне простягання та субвертикальне падіння. Менш поширені мафічні дайки північно-західного простягання. На окремих ділянках спостерігаються ознаки багатозафазового вкорінення дайок у гранодіорити. Крім мафічних дайок, у гранодіоритах подекуди спостерігаються також жили граніт-аплітів. Деякі з аплітових жил, що перетинають гранодіорити, можуть самі перетинатись мафічними дайками. Типові гранодіорити о. Пітерман є світло-сірими явнокристалічними породами з рівномірною середньозернистою структурою. Спорадичні включення габроїдів та діоритів можуть надавати їм такситової текстури. Незважаючи на доволі високий вміст кварцу, він

погано розрізняється у зразках на тлі таких же світло-сірих польових шпатів. Вміст мафічних мінералів невисокий, так що гранодіорити мають доволі лейкократовий склад. У шліфах під мікроскопом вони характеризуються гіпідіоморфнозернистою гранітною структурою. Головні породотвірні мінерали – плагіоклаз, кварц та ортоклаз. Другорядні – рогова обманка та біотит. Незначно розвинені вторинні серицит, актиноліт, хлорит та епідот. В акцесорних кількостях завжди присутні магнетит, ільменіт, апатит, сфен, циркон та ортит.

Гранітоїдна інтрузія островів Барчанс-Фордж (ГБФ) являє один із прикладів палеогенового гранітоїдного магматизму на архіпелазі Вільгельма. Зазначені острови розкидані на площі близько 7 км^2 . Розмір найбільшого з них становить $0,4 \times 1 \text{ км}$. На відміну від решти інших Аргентинських островів, що складаються мезозойськими вулканічними породами, більша частина території островів Барчанс та Фордж складаються гранітоїдами палеогенового віку. Лише на східних узбережжях островів Барчанс та Фордж гранітоїди контактують з більш давніми вулканічними породами – метаморфізованими лапілевими туфами (рис. 5д). Останні зазнають інтенсивної мілонітизації та розсланцювання. Площини

розсланцювання мають північно-східну орієнтацію з азимутами простягання 25–40°, падіння ж змінюється від вертикального до північно-західного з кутами падіння 60–75°. Вулканіти перетинаються численними мафічними дайками, серед яких розрізняються декілька вікових груп. Найдавніші з дайок зазнають інтенсивних тектонічних деформацій сумісно із вмісними вулканітами. Наймолодші ж дайки інтродують як вулканіти, так і гранітоїди ГІБФ. Інтрузивний контакт гранітоїдів з вулканічними породами виявлений та досліджений на островах Барчанс-I, Барчанс-II та Фордж. Поблизу контакту спостерігається чергування гранітоїдів з вулканітами. При цьому межі між ними є достатньо різкими та січними щодо структури вулканітів. Гранітоїди, які розвинені біля контакту з вулканітами, мають більш дрібнозернисту структуру порівняно з гранітоїдами, поширеними на віддаленні від зони контакту. Місцями у гранітоїдах ендоконтактової фації спостерігається смугаста текстура, яка зумовлена нерівномірним розподілом темноколірних мінералів. Крім того, вони вміщують велику кількість ксенолітів вулканічних порід. Більшість ксенолітів мають гострокутну уламкову форму, деякі з них підлягають приконтактовому ороговикюванню. Палеогеновий вік гранітоїдів ГІБФ обґрунтовується даними ізотопного датування. Так, (Rex, 1976) виконав K-Ar датування біотитів та амфіболів з досліджуваних гранітоїдів, отримавши значення 54–57 млн років. Пізніше ці визначення були підтверджені Rb-Sr ізохронним датуванням валових проб гранітоїдів, для яких (Pankhurst, 1982) отримав вік 55 ± 3 млн років. Палеогенове значення віку – 60.9 ± 0.8 млн років – дало й Ar-Ar ізотопне датування по біотиту з гранітоїдів островів Барчанс (Bakhmutov et al., 2013). Найхарактернішим петрографічним представником ГІБФ є гранодіорити. Це світло-сірі явнокристалічні породи з рівномірною середньозернистою структурою. Густа сітка тріщин поділяє їх виходи на блоки з паралелепіпедальною окремістю. Доволі часто гранодіорити містять мафічні включення розміром від перших сантиметрів до перших десятків сантиметрів, які можуть надавати їм такситової текстури. Частина таких включень складена темними дрібнокристалічними або навіть афанітовими породами, інші ж представлені більш лейкократовими фанеритовими діоритами та габроїдами. Гострокутна уламкова або напівоплавлена форма більшості включень дозволяє вважати їх ксенолітами. Поодинокі жили граніт-аплітів та гранітних пегматитів, які розтинають гранітоїди плутонічної фації, напевно, належать до найбільш пізніх інтрузивних фаз ГІБФ. У шліфах гранітоїди Барчанс-Фордж демонструють типову гіпідіоморфнозернисту гранітову структуру. На ділянках більшого розвитку лужного польового шпату структура може набувати характеру монцонітової. Кількісний мінеральний склад більшості досліджених зразків відповідає гранодіоритам, хоча частина з них на класифікаційній діаграмі QAP знаходиться біля границі класифікаційного поля гранодіоритів з тоналітами та кварцовими монцодіоритами. Звертає увагу лейкократовий склад гранодіоритів Барчанс-Фордж, кольоровий індекс M у цих породах коливається у діапазоні 12–20 %. Головними породотвірними мінералами є плагіоклаз, кварц та ортоклаз, другорядними – рогова обманка та біотит. Крім перелічених у другорядних або акцесорних кількостях як правило присутній клінопіроксен, а також вторинні – серицит, актиноліт, хлорит та епідот. Звичайними акцесорними мінералами є титаномagnetит, ільменіт, апатит, сфен, циркон, ортит та торит. Кварцові жили гідротермального походження, які у багатьох місцях перетинають гранодіорити Барчанс-

Фордж, можуть містити магнетитову, пірит-халькопіритову та молібденітову мінералізацію.

Висновки.

1. Архіпелаг Вільгельма є важливою складовою частиною магматичного поясу Антарктичного півострова. На його островах значно поширені інтрузивно-магматичні утворення плутонічної фації. Вони включають усіх петрографічних представників габро-діорит-гранітоїдної асоціації. Завдяки процесам тектонічного підняття та ексгумації, на одному рівні сучасного ерозійного зрізу відслонюються як апікальні, так і придонні частини окремих інтрузивних тіл.

2. Геологічний вік глибинного інтрузивного магматизму на цій території охоплює ранньокрейдяний, пізньокрейдяний та ранньопалеогеновий періоди. Різновікові плутони перетинають один одного у складній послідовності, що дає можливість визначати їх відносний геологічний вік та реконструювати загальну спрямованість розвитку глибинного магматизму.

3. Невеликі масиви габроїдів, які фрагментарно відслонюються на кількох островах архіпелагу Вільгельма, є частинами значно більших інтрузивних тіл. Найдавніші габроїдні інтрузиви сформувалися у часовому проміжку між юрським та ранньокрейдяним періодами. Кристалізаційна диференціація материнських магм основного складу надала їм розшарованості різного масштабу. У донних частинах габроїдних інтрузивів існують умови для формування Fe-Ti-V або Cu-Ni-EPG зруденіння. Завдяки тектонічному перекиданню габроїдних тіл їх придонні частини можуть відслонюватися на сучасному рівні ерозійного зрізу.

4. Діоритові інтрузиви архіпелагу Вільгельма займають набагато більші площі порівняно з габроїдами. Їх формування відбулося у часовому проміжку між ранньокрейдяним та ранньопалеогеновим періодами. Хоча найдавніші габроїдні інтрузиви сформувалися значно раніше діоритів, явища магматичного змішування в останніх вказують на те, що під час формування діоритових інтрузивів магми середнього та основного складу майже одночасно інтродували у спільні магматичні камери. Потенційна рудоносність діоритових інтрузивів досі нез'ясована та потребує додаткових досліджень.

5. Гранітоїдні інтрузиви архіпелагу Вільгельма за площами свого поширення є зіставними з діоритами. Геологічний вік гранітоїдного магматизму охоплює пізньокрейдяний та палеогеновий періоди. Більшість гранітоїдних інтрузивів сформувалася у ранньому палеогені після головної фази орогенічних деформацій у регіоні. Саме з цими інтрузіями може бути пов'язана Cu-Mo сульфідна мінералізація.

Список використаних джерел / References

- Bakhmutov, V.G., Gladkochub, D.P., Shpira, V.V. (2013). Age position, geodynamic specifics and paleomagnetism of intrusive complexes of the western coast of the Antarctic Peninsula. *Geophysical Journal*, 35, 3, 3-30. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i3.2013.116387
- Burton-Johnson, A., Riley, T.R. (2015). Autochthonous v. accreted terrane development of continental margins: a revised in situ tectonic history of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 172, 822-835. doi.org/10.1144/jgs2014-110
- Curtis, R. (1966). The petrology of the Graham Coast, Graham Land. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 50, 51.
- Elliot, D.H. (1964). The petrology of the Argentine Islands. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 41, 31.
- Jordan, T.A., Riley, T.R., Siddoway, C.S. (2020). The geological history and evolution of West Antarctica. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 117–133. doi.org/10.1038/s43017-019-0013-6
- Leat, P.T., Scarrow, J.H., Millar, I.L. (1995). On the Antarctic Peninsula Batholith. *Geological Magazine*, 132, 4, 399-412. doi.org/10.1017/S0016756800021464
- Mytrokhyn, O.V., Bakhmutov, V.G. (2019). Stratigraphy of the district of the Ukrainian Antarctic Station "Academician Vernadsky". *Ukrainian Antarctic Journal*, 1, 18, 45-61. doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.129 [in Ukrainian]

Pankhurst, R.J. (1982). Rb-Sr geochronology of Graham Land, Antarctica. *Journal of the Geological Society*, 139, 6, 701–711. doi.org/10.1144/gsjgs.139.6.0701

Rex, D.C. (1976). Geochronology in relation to the stratigraphy of the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Bulletin*, 43, 49–58.

Riley, T.R., Flowerdew, M.J., Haselwimmer, C.C. (2011). Geological map of Eastern Graham Land, Antarctic Peninsula (1:625000 scale). BAS GEOMAPS 2 Series, sheet 1, British Antarctic Survey, Cambridge, UK.

Ryan, C.J. (2007). Mesozoic to Cenozoic igneous rocks from Northwestern Graham Land: constraints on the tectono-magmatic evolution of the Antarctic Peninsula. University of Brighton, 495.

Tangeman, J.A., Mukasa, S.B., Grunov, A.M. (1996). Zircon U-Pb geochronology of plutonic rocks from the Antarctic Peninsula: Confirmation on presence of unexposed Paleozoic crust. *Tectonics*, 15, 6, 1309–1324. https://doi.org/10.1029/96TC00840

Zheng, G.G., Liu, X., Liu, S., Zhang, S.H., Zhao, Y. (2018). Late Mesozoic–early Cenozoic intermediate–acid intrusive rocks from the Gerlache Strait area, Antarctic Peninsula: Zircon U–Pb geochronology, petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 312–313, 204–222. doi:10.1016/j.lithos.2018.05.008

Надійшла до редколегії 18.07.21

O. Mytrokhyn¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: mitrokhin.a.v@ukr.net;

V. Bakhmutov^{2,3}, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: bakhmutovvg@gmail.com;

A. Aleksieienko¹, PhD (Geol.),

E-mail: scr315@gmail.com;

T. Mytrokhina¹, PhD (Geol.),

E-mail: tanussa@ukr.net;

O. Marushchenko¹, Student,

E-mail: lesymarush@gmail.com;

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine;

²Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of the Ukraine

32 Palladin Ave., 03680, Kyiv, Ukraine;

National Antarctic Scientific Center

INTRUSIVE-MAGMATIC COMPLEXES OF WILHELM ARCHIPELAGO, WEST ANTARCTICA (PART 1 – INTRUSIONS OF GABBROIDS, DIORITES AND GRANITOIDS)

The Wilhelm Archipelago and the adjacent coast of Graham Land are typical areas of calc-alkaline magmatism associated with the protracted evolution of the Antarctic Peninsula igneous belt. The authors studied intrusive complexes of the Wilhelm Archipelago (WA) in order to characterize their geographical distribution, geological occurrence and age, mineralogical and petrographical features. Geological surveys revealed that gabbro, diorite, and granitoid intrusions are widespread on the WA. Due to the processes of tectonic uplift and exhumation, both apical and bottom parts of individual intrusive bodies can be exposed on the modern erosion level. Recent geological observations have shown that plutons of different ages intersect each other in a complex sequence. This made it possible to determine their relative geological age and reconstruct the general direction of the deep magmatic development from the Early Cretaceous to the Early Paleogene, inclusive. It has been proved that the oldest massifs of gabbroids are parts of much larger intrusive bodies. They were formed in the period between the Jurassic and the Early Cretaceous periods. Crystallization differentiation of basaltic magmas gave them various scale layering. In the bottom parts of gabbroid intrusions there were conditions for the formation of Fe-Ti-V and Cu-Ni-EPG mineralization. Diorite and granitoid intrusions occupy much larger areas compared to gabbroids. The formation of diorite intrusions took place in the period between the Early Cretaceous and the Paleocene. Although the oldest gabbroids were formed much earlier than diorites, the phenomena of magmatic mingling in the latter indicate that magmas of basic and intermediate composition could also synchronously intrude in common magmatic chambers. Granitoid magmatism on the WA covers the Late Cretaceous and the Paleogene periods. Most granitoid intrusions formed in the Paleocene after the main phase of tectonic deformations. Cu-Mo mineralization may be associated with these intrusions.

Keywords: geology, calc-alkaline magmatism, Antarctic Peninsula.

A. Митрохин¹, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: mitrokhin.a.v@ukr.net;

В. Бахмутов^{2,3}, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: bakhmutovvg@gmail.com

A. Алексеевко¹, канд. геол. наук, науч. сотр.,

E-mail: scr315@gmail.com;

T. Митрохина¹, канд. геол. наук, науч. сотр.,

E-mail: tanussa@ukr.net;

A. Марущенко¹, студ.,

E-mail: lesymarush@gmail.com;

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина;

²Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,

просп. Академика Палладина, 32, Киев, 03680, Украина;

Национальный антарктический научный центр

ИНТРУЗИВНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ АРХИПЕЛАГА ВИЛЬГЕЛЬМА ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИКИ (ЧАСТЬ 1 – ИНТРУЗИВЫ ГАББРОИДОВ, ДИОРИТОВ И ГРАНИТОИДОВ)

Архипелаг Вильгельма и прилегающее побережье Земли Грея являются типичными районами развития известково-щелочного магматизма, связанного с длительной эволюцией магматического пояса Антарктического полуострова. Авторы изучили интрузивно-магматические образования архипелага Вильгельма (АВ) с целью охарактеризовать их географическую распространенность, условия залегания, геологический возраст и минералого-петрографические особенности. В результате проведенной геологической съемки установлено, что на АВ распространены интрузивы габброидов, диоритов и гранитоидов. Благодаря процессам тектонического поднятия и эксгумации, на одном уровне современного эрозийного среза могут обнажаться как апикальные, так и придонные части отдельных интрузивных тел. Новейшие геологические исследования указывают на то, что разновозрастные плутоны пересекают друг друга в сложной последовательности. Это дает возможность определять их относительный геологический возраст и реконструировать общую направленность развития глубинного магматизма от раннего мела до раннего палеогена включительно. Доказано, что наиболее древние массивы габброидов являются частями значительно больших интрузивных тел. Они сформировались в возрастном интервале между юрским и раннемеловым периодами. Кристаллизационная дифференциация базитовых магм придавала им слоистость разного масштаба. В донных частях габброидных интрузивов существовали условия для формирования Fe-Ti-V и Cu-Ni-EPG оруденения. Диоритовые и гранитоидные интрузивы занимают на АВ намного большие площади по сравнению с габброидами. Формирование диоритовых интрузивов происходило во временном промежутке между ранним мелом и ранним палеогеном. Хотя наиболее ранние габброиды образовались значительно раньше диоритов, явления магматического смешения в последних указывают на то, что магмы базитового и среднего состава могли и синхронно интродуцироваться в общие магматические камеры. Гранитоидный магматизм АВ охватывает позднемеловой и палеогеновый периоды. Большинство гранитоидных интрузивов АВ сформировалось в палеоцене после главной фазы орогенных деформаций. Именно с этими интрузивами может быть связана Cu-Mo минерализация.

Ключевые слова: геология, известково-щелочной магматизм, Антарктический полуостров.

UDC 561.4:565.736(470.13)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.02>

V. Dernov, PhD Student,
E-mail: vitaly Dernov@gmail.com,
Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,
O. Honchar Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

THE EARLIEST INSECT ENDOPHYTIC OVIPOSITION (EARLY PENNSYLVANIAN, EASTERN UKRAINE)

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

The world's oldest insect endophytic oviposition from the deposits of the Mospinka Formation (Upper Bashkirian, Lower Pennsylvanian) of the Donets Basin is described in the paper. There is little information on Carboniferous endophytic oviposition of insects. The earliest insect endophytic oviposition specimens are specimens from the Upper Moscovian and the uppermost part of the Gzhelian of Germany, as well as the uppermost Gzhelian of France and the USA. The endophytic oviposition described in this article is almost 10 million years older than specimens from the Upper Moscovian of Germany.

The studied material was collected on five localities and four stratigraphic levels. The study area is the upper reaches of the Velyka Kamyanka River (southern part of the Luhansk Region, Ukraine). The rocks with the studied oviposition were formed in shallow marine, lagoonal and lacustrine environments. Insect damages were noted on leaves of arborescent lycopsids and cordaitaleans, and pteridosperm rachises. The above mentioned oviposition belongs to the following damage types sensu Labandeira et al., 2007: DT76, DT100, DT101 and DT175. The studied oviposition occurs mainly in sediments formed in the environments of a highly watered coastal alluvial-deltaic lowland with associations of the semi-aquatic sphenopsids (shores of lakes, rivers, and freshened lagoons), predominantly arborescent lycopsids (swampy areas), as well as pteridosperms on the elevated areas of accumulation plain. The most likely producers of endophytic oviposition are representatives of Odonatoptera, Palaeodictyopteroidea, and Orthoptera. The new findings substantially supplement the fossil record of insect endophytic oviposition.

Keywords: Ukraine, Donets Basin, Bashkirian Stage, endophytic oviposition, insects.

Introduction. Author has made detailed taphonomic and paleoecological observations on the deposits of the Mospinka Formation (Late Bashkirian) in the central part of Donets Basin (Dernov, 2016; 2019; Dernov and Udovychenko, 2019b) for several years. The territory of study is a small area of about 75 km² located in the upper reaches of the Velyka Kamyanka River (southern part of the Luhansk Region, Ukraine). Marine, transitional, and continental sediments of the Mospinka Fm. along strike are replaced by marine sediments of the Dyakivka Group at this area (Dernov, 2016). Concentrating efforts on a limited territory has led to unique results. One of them is a collection of the world earliest insect endophytic oviposition. The results of its study are presented in this article.

Oviposition is the process by which female insects, using a special organ (the ovipositor) place eggs on the surface of dead or living plants (exophytic oviposition) or in their tissues (endophytic oviposition) (Gnaedinger et al., 2014; Xu et al., 2018). The representatives of Odonatoptera, Orthoptera, Hemiptera, Coleoptera, Lepidoptera, and Hymenoptera lay eggs in the plant tissues (Vassilenko and Rasnitsyn, 2007; Laaß and Hoff, 2014). Eggs placed in the plant tissues are protected from predators, as well as temperature and humidity fluctuations (Laaß and Hoff, 2014).

Research history. There is little information on Carboniferous insect endophytic oviposition. The monograph by David White (1899, plate III) depicts cordaitalean leaf with endophytic oviposition. The fossil is found in the Carboniferous sediments of Missouri (USA). In the article (Bethoux et al., 2004) endophytic oviposition on the axis of the sphenopsid *Calamites cistii* Brongniart from the Upper Gzhelian of France is described. The potential producers of this oviposition are representatives of Palaeodictyopteroidea or Odonatoptera (Bethoux et al., 2004).

The article (Vassilenko and Scherbakov, 2013) gives an image of Late Carboniferous cordaitalean leaves with oviposition (Khakassia, Russia). This oviposition can be attributed to the DT100 (Damage Type 100) of typology proposed in (Labandeira et al., 2007). In the work (Laaß and Hoff, 2014) oviposition from the upper part of Stephanian C (the upper part of the Gzhelian) of Germany was described. The work (Laaß, 2017) briefly described two morphotypes of

endophytic oviposition from Westphalian D of Germany. Westphalian D roughly corresponds to the Myachkovian Horizon of the Moscovian Stage of the East European Platform (Fisunen et al., 2000; Popov, 1979). The article (Xu et al., 2018) described 46 types of plant damages (11 are oviposition) from the uppermost part of Pennsylvanian (the Upper Gzhelian) of Texas. The monograph (Lucas et al., 2021) presented an image and a brief description of oviposition DT101 from the Gzhelian of New Mexico (USA).

Thus, the earliest insect endophytic oviposition specimens are specimens from the Upper Moscovian (Laaß, 2017) and the uppermost part of the Gzhelian of Germany (Laaß and Hoff, 2014), as well as the uppermost Gzhelian of France (Bethoux et al., 2004) and the USA (Xu et al., 2018; Lucas et al., 2021). Material from the Upper Carboniferous of Russia (Vassilenko and Scherbakov, 2013) is dated too widely. A review of information on the finds of insect remains in the Carboniferous of the Don-Dnipro downramp is presented in works (Dernov, 2019; Dernov and Udovychenko, 2019a).

Geological setting. The study area is the basins of the Luhanchyk and Velyka Kamyanka Rivers (figs. 1B and 1C). This area belongs to the zone of large linear folding (Northern anticline) and the northern zone of small folding of the Donets folded structure. All studied oviposition comes from deposits of the Mospinka Fm. (Fig. 1A).

Mospinka Fm. is represented by a cyclic sequence of mudstones, siltstones, sandstones with subordinate limestones (up to 8 layers) and coals (10-12 seams) (Nemyrovskaya and Yefimenko, 2013). The age of this stratigraphic unit is the Late Bashkirian (Early Pennsylvanian). The absolute age of the base and top of the formation is about 318.5 and 317 Ma, respectively (Davydov et al., 2010). The thickness of the formation is 315-730 m (Nemyrovskaya and Yefimenko, 2013). Fossils in the sediments of the Mospinka Fm. are very numerous and varied. From this formation foraminifers, chaetetids, corals, brachiopods, bryozoans, scaphopods, pelecypods, gastropods, cephalopods, crinoids, echinoids, arthropods (ostracods, cyclides, trilobites, horseshoe crabs, and insects), fishes, conodonts, algae, palynoflora, macroflora and trace fossils are known.

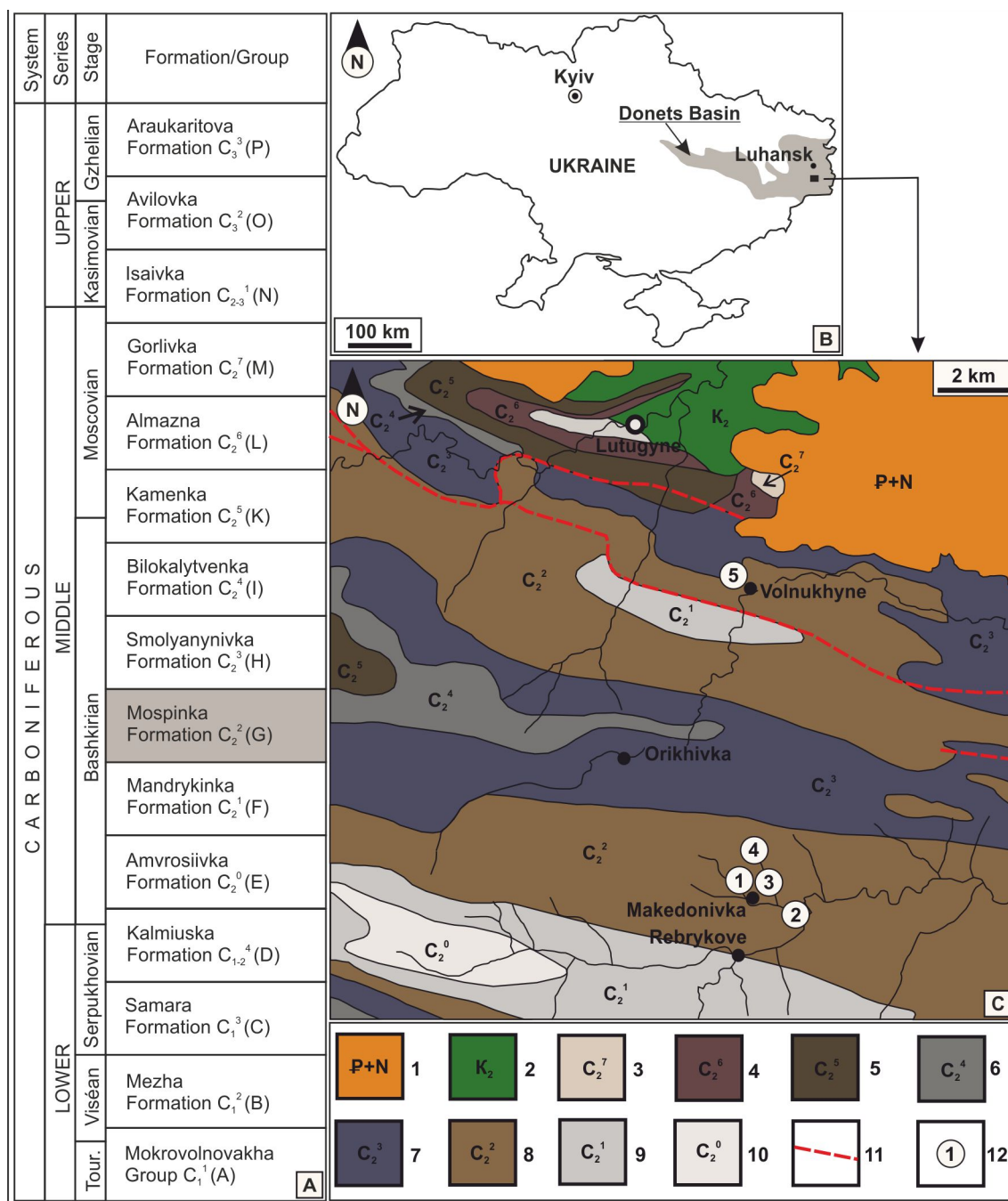


Fig. 1. Stratigraphic position of Mospinka Formation (fig. A) and geographic location of studied outcrops (figs. B and C).

Legend: 1 – Paleogene and Neogene, 2 – Upper Cretaceous, 3 – Gorlivka Fm., 4 – Almazna Fm., 5 – Kamyanka Fm., 6 – Bilokalytvenka Fm., 7 – Smolyanynivka Fm., 8 – Mospinka Fm., 9 – Mandrykinka Fm., 10 – Amvrosvivka Fm., 11 – faults, 12 – localities of oviposition. The stratigraphic scheme after (Nemyrovska and Yefimenko, 2013)

The Mospinka Fm. corresponds to the lower half of the Zuevian Horizon of the Don-Dnipro downwarp, which corresponds to the Cheremshanian Horizon of the East European platform (Nemyrovska and Yefimenko, 2013).

The sediments of the Mospinka Fm. are assigned to the *Neuraethopteris* spp.-*Lyginopteris hoeninghausii* Zone of the Oleg P. Fisunen macrofloristic scheme or the *Alethopteris decurrens* Subzone of the *Lyginopteris hoeninghausii* Zone of the Nataliya I. Boyarina scheme (2016). According to Oleg P. Fisunen (1991), *Neuraethopteris* spp.-*Lyginopteris hoeninghausii* Zone corresponds to the base of Westphalian A of Western Europe. According to Nataliya I. Boyarina (2016), the *Alethopteris decurrens* Subzone is an

age analogue of the Langsettian of the Western European chronostratigraphic scale.

Andrian V. Popov (1979) correlated the Mospinka Fm. with the base of Westphalian A of Western Europe and the Bloyd Fm. of North America. Conodonts (Nemyrovska, 1999) make it possible to correlate the Mospinka Fm. with the base of Westphalian A of Western Europe and the upper part of the Morrowan of North America.

The Mospinka Fm. is composed of rocks of various origins: paleosols (sandstones, siltstones, coals), lacustrine and lagoonal siltstones and mudstones, prodeltaic siltstones, deltaic sandstones and siltstones, shallow marine limestones, and also deepwater mudstones. In addition,

sometimes there are thin lenses of extremely shallow marine conglomerates.

In the Bashkirian Age the territory of the modern Donets Basin was located on the western coast of Laurasia at approximately 5° north paleolatitude (Scotese, 2014). The climate at the time of accumulation of the Mospinka Fm. in the Donets Basin was humid subtropical or tropical with periodically occurring dry periods (Dernov, 2019).

Material and methods. The material was collected on several outcrops of the Mospinka Fm. located in the Lutugyne District of the Luhansk Region (Ukraine). The localities are listed and briefly characterized below (Figs. 1B and 1C).

1. Ukraine, Luhansk Region, Lutugyne District, a ravine near the north-western outskirts of the Makedonivka Village (Fig. 2I; coordinates: 48°14'19.2"N 39°17'35.6"E); siltstone 10-15 m below G_1^2 limestone layer. A single oviposition (specimen IGSU-3/1652) was found in siderite nodule from marine light gray siltstone with remains of pelecypods, gastropods, and other fauna, as well as a single imprint of the lycopsid axis *Lepidodendron aculeatum* Sternberg.

2. Ukraine, Luhansk Region, Lutugyne District, the shore of the Kamyanka reservoir 0.8 km southeast of the outskirts of the Makedonivka Village (figs. 2E, 2H; coordinates: 48°13'44.0"N 39°19'11.3"E); limonite nodules from lacustrine roof shale of the g_1^2 coal bed. The nodules contain macroflora *Calamites cistii* Brongniart, *Palaeostachya* sp., *Neuraethopteris* sp., *Artisia approximata* (Lindley and Hutton) Corda, *Cordaites principalis* (Germar) Geinitz. Materials: specimens IGSU-3/6345, IGSU-3/7502a, IGSU-3/7643a, IGSU-3/7644, IGSU-3/7649.

3. Ukraine, Luhansk Region, Lutugyne District, dumps of the old mine near the northwestern outskirts of the Makedonivka Village (Fig. 2G; coordinates: 48°14'35.3"N 39°17'54.8"E); roof shale of the g_1^2 coal bed. Material: specimen IGSU-3/7019.

A description of the section and its paleogeographic interpretation are given in (Dernov, 2019). A diverse macroflora was identified from this locality (Dernov and Udovychenko, 2019b), as well as the remains of non-marine animals (freshwater pelecypods, horseshoe crabs, fishes, problematics and trace fossils) (Dernov, 2019). Sediments were formed in lagoonal and lacustrine environments (Dernov and Udovychenko, 2019b).

4. Ukraine, Luhansk Region, Lutugyne District, quarry 2 km north of the Makedonivka Village (Fig. 2D and 2F; coordinates: 48°14'59.1"N 39°17'50.1"E); siltstones below the g_2 coal bed.

The same sediments, as well as the roof shale of the g_2 coal bed, were studied on dumps of old small mines 300 m east of the quarry. Materials: specimens IGSU-3/1053, IGSU-3/1058, IGSU-3/1067, IGSU-3/4760, IGSU-3/7054.

Some information regarding this locality is given in (Dernov, 2016). Macroflora from siltstones below the g_2 coal layer is represented by the following forms: autochthonous appendices of *Stigmaria*, *Cyperites bicarinatus* Lindley et Hutton, *Annularia radiata* Brongniart, *Calamites carinatus* Sternberg, *Calamites cistii* Brongniart, *Calamites suckowii* Brongniart, *Pinnularia capillacea* Lindley et Hutton, *Paripteris gigantea* Sternberg (Gothan), and *Cordaites principalis* (Germar) Geinitz. Here are also found rare remains of not yet studied arthropods (horseshoe crabs, cyclides and insects). Siltstones formed in lacustrine environment.

5. Ukraine, Luhansk Region, Lutugyne District, quarry in the Volnukhyne Village (figs. 2B and 2C; coordinates: 48°21'27.9"N 39°16'49.4"E); roof shale of g_3 coal bed. Material: specimen IGSU-3/7044.

The results of studying the remains of macroflora from this locality are given in the article (Dernov and Udovychenko, 2019b). The microconchids and trace fossils were also found here (Dernov and Udovychenko, 2019b). Siltstones with plant remains have lacustrine origin.

The methodology of the oviposition description was taken from works of Dmitry Vassilenko (2011; 2013) with some changes. Abbreviations: L_{OV} – length of oviposition (clutch), L_s – length of single oviposition marks, W_{OV} – maximum width of oviposition (clutch), W_s – maximum width of single oviposition marks, $K = L_s/W_s$ ratio, AM – arithmetic mean.

The studied collection (IGSU-3; author's collection 2010-2013) is housed in the Department of Stratigraphy and Paleontology of Paleozoic Deposits of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv).

Results. Endophytic ovipositions of insects are briefly described below. The work (Labandeira et al., 2007) was mainly used to determine the parasystematic affiliation of ovipositions.

Oviposition DT76 (figs. 3H, 3N-P, 4A, 4C, 4E)

Material. Four samples with oviposition from two localities (specimens IGSU-3/6345, IGSU-3/7019, IGSU-3/7044, IGSU-3/7644).

Description. Oviposition consists of a large number of ellipsoidal and rounded relatively small and large lesions located in a line parallel to the axes and veins of pteridosperm rachises (specimens IGSU-3/6345, IGSU-3/7019, IGSU-3/7044) and *Cordaites* leaf venation (specimen IGSU-3/7644) to which they are attached. The oviposition marks of some specimens (for example, Fig. 4A) are concentrated in a row parallel to the axis of the plant shoot. The others (Fig. 4C) are concentrated in zigzag rows.

Dimensions (in mm) and ratios:

Specimen IGSU-3/6345 (Fig. 4A): $L_{OV} = 12.0$ mm, $W_{OV} = 1.0$ mm, L_s ranges from 1.2 to 3.0 mm; W_s ranges from 0.7 to 1.0 mm ($K=1.0-3.0$, $AM=2.22$). The distance between the scars is approximately 1.0-2.5 mm.

Specimen IGSU-3/7019 (fig. 3H): L_{OV} (incomplete) – 16.0 mm, $W_{OV} = 3.0$ mm, L_s – from 0.5 to 1.0 mm, $W_s = 0.25-0.50$ mm ($K=2.0$).

Specimen IGSU-3/7044 (figs. 3N-P): $L_{OV} = 14.0$ mm, $W_{OV} = 1.0$ mm, $L_s = 0.50$ mm, $W_s = 0.35$ mm ($K=1.43$).

Specimen IGSU-3/7644 (figs. 4C-4E): L_{OV} – about 26.0 mm, W_{OV} (incomplete) – about 7.0 mm, $L_s = 0.8-1.0$ mm, $W_s = 0.3-0.4$ mm ($K=2.50-2.66$).

Potential producers. In the work (Lin et al., 2019) the morphological closeness of the oviposition DT76 and egg clutches of the *Ceutorrhynchus quadridens* Panz. (Coleoptera: Curculionidae) was noted. Coleoptera can be excluded from the list of potential producers of the oviposition DT76 from Pennsylvanian of the Donets Basin, since this group of insects are not known in the Carboniferous. Apparently, the producers of DT76 from the Carboniferous of the Donets Basin are Orthoptera, Odonatoptera or Palaeodictyopteroidea. One specimen (figs. 4C and 4E) is slightly different from the other ovipositions DT76. The ovipositional damage is concentrated in zigzag rows. This arrangement of eggs is typical for egg clutches of modern dragonflies (the so-called "Coenagrionid Type" oviposition pattern) (Laaß and Hoff, 2014).

Localities. The studied ovipositions were found on the localities 2, 3, and 5.

Oviposition DT100 (figs. 4B, 4D)

Material. One well-preserved oviposition (specimen IGSU-3/7502a).

Description. The oviposition consists of several dozen small, highly elongated lesions on the leaf of the cordaitalean. The egg scars are oriented with their long axis along

the leaf veins, but at the same time form rows transverse to the venation.

Dimensions (in mm) and ratios:

Specimen IGSU-3/7502a (figs. 4B, 4D): L_{OV} (incomplete) – 25.0 mm, W_{OV} – 7.0 mm, L_s – 0.4-0.5 mm, W_s – 0.15-0.20 mm ($K=2.50-2.66$, $K_{AM}=2.58$).

Potential producers. Oviposition DT100 according to (Lin *et al.*, 2019) has significant morphological similarity with egg clutch of modern grasshopper *Cornops frenatum* Marschall (Orthoptera: Acrididae). At the same time, oviposition

DT100 is similar to those of modern dragonflies ("Coenagrionid Type" oviposition pattern) (Laaß and Hoff, 2014).

Locality. The material comes from locality 2.

Oviposition DT101 (figs. 3A-G, 3I-K)

Material. 10 samples with oviposition from three localities (specimens IGSU-3/1053, IGSU-3/1058, IGSU-3/1067, IGSU-3/1652, IGSU-3/4760, IGSU-3/7054, IGSU-3/7287, IGSU-3/7649, IGSU-3/8000, IGSU-3/8003).

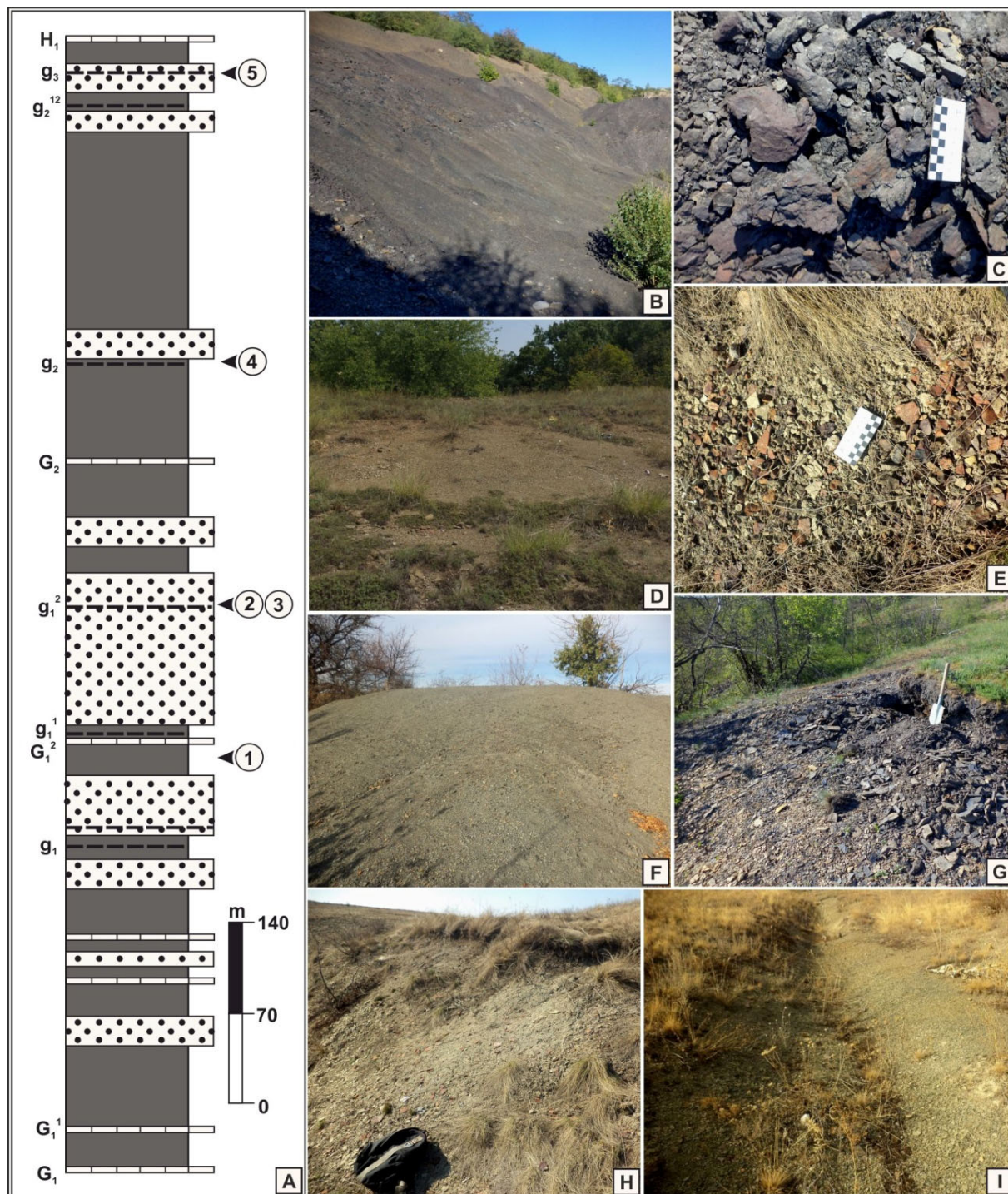


Fig. 2. Stratigraphic position of insect oviposition localities in the section of the Mospinka Fm. (Fig. A) and studied outcrops (B-I):

B – locality 5, C – limonite nodules from siltstones of locality 5, D, F – locality 4,

E – limonite nodules in eluvium of roof shale of the g_1^2 coal seam (locality 2), G – locality 3, H – locality 2, I – locality 1.

Legend: 1 – sandstone, 2 – mudstone and siltstone, 3 – coal, 4 – limestone, 5 – index of coal layer, 6 – index of limestone layer



Fig. 3. Insect endophytic oviposition (DT76, DT101, and DT175) from the Pennsylvanian of the Donets Basin:

A-G – oviposition DT101 (locality 4: A – specimen IGSU-3/1053, B – IGSU-3/1058, C – IGSU-3/4760, E – IGSU-3/1067, F – IGSU-3/7054; locality 1: D – IGSU-3/1652; locality 2: G – IGSU-3/7649). H – oviposition DT76 (locality 3: IGSU-3/7019). I-K – oviposition DT101 (locality 2: IGSU-3/8003): I – general view, J and K – enlarged. L – oviposition DT175 (locality 2: IGSU-3/7643a). M – oviposition DT101 (locality 4: field photo). N-P – oviposition DT76 (locality 5: IGSU-3/7044). Scale bars: 5 mm (figs. A–N) and 2 mm (figs. O and P)

Description. Large (length 2.0–4.0 mm, width – 0.8–2.0 mm; $K=1.50$ – 2.50 , $K_{AM}=1.90$) elliptical oviposition lesion on the rachises of pteridospores and cordaitalean leaves.

The oviposition marks are oriented parallel to the venation of rachises and leaves. The oviposition consists of single mark, around which a reaction scar is often observed.

Dimensions (in mm) and ratios:

Dimension	Specimens								AM
	IGSU-3/1053	IGSU-3/1058	IGSU-3/1067	IGSU-3/1652	IGSU-3/4760	IGSU-3/7054	IGSU-3/7649	IGSU-3/8000	
L_s	4.0	2.20	3.0	2.20	3.0	2.0	3.0	2.50	2.74
W_s	2.40	1.20	2.0	1.20	1.80	0.80	1.50	1.50	1.55
K	1.67	1.83	1.50	1.83	1.67	2.50	2.0	2.10	1.90

Remarks. Most of ovipositions are found in the lacustrine siltstones; one specimen (IGSU-1652; fig. 3D) was found in siderite nodule from gray siltstones with remains of marine pelecypods *Solenomorpha*, *Sanguinolites*, *Phestia*, gastropods *Euphemites*, cephalopods *Liroceras* and *Peripetoceras* (Dernov, 2018).

Potential producers. Oviposition DT101 is similar to egg clutch of the modern beetle *Dytiscus marginalis* L. (Coleoptera: Dytiscidae) (Lin et al., 2019). Nevertheless, apparently, the producers of the oviposition DT101 from the Carboniferous of Donets Basin are Palaeodictyopteroidea.

Localities. The studied oviposition was found on localities 1, 2, and 4.

Oviposition DT175 (fig. 3L)

Material. One sample with oviposition (specimen IGSU-3/7643a).

Description. Oviposition consisting of a large number of lenticular small lesion located in a line parallel to the axes of lycopsid leaf *Cyperites bicarinatus* Lindley et Hutton to which it was attached.

Dimensions (in mm) and ratios:

Specimen IGSU-3/7643a (fig. 3L): L_{OV} (incomplete) – 13.0 mm, W_{OV} – 3.0 mm, L_s – 0.4–0.5 mm, W_s – 0.15–0.20 mm ($K=2.50$ – 2.66 , $K_{AM}=2.58$).

Potential producers. Ovipositions DT175 are very close to the egg clutch of *Neodiprion sertifer* (Geoffroy ex Fourcroy) (Hymenoptera: Tenthredinidae) (Lin et al., 2019). However, Hymenoptera are not known from the Carboniferous.

Locality. The material comes from locality 2.



Fig. 4. Insect endophytic oviposition (DT76 and DT100) from the Pennsylvanian of the Donets Basin:

A – oviposition DT76 (locality 2: specimen IGSU-3/6345); B, D – oviposition DT100 (locality 2: IGSU-3/7502a): B – general view, D – enlarged; C, E – oviposition DT76 (locality 2: IGSU-3/7644). Scale bars: 5 mm (figs. A–C) and 2 mm (figs. D and E)

Taphonomy and paleoecology. The studied oviposition occurs mainly in sediments formed in the environments of a highly watered coastal alluvial-deltaic lowland with associations of semi-aquatic sphenopsids (shores of lakes, rivers, and freshened lagoons), predominantly arborescent lycopsids (swampy areas), and pteridosperms on the elevated areas of accumulation plain (Fisunenکو, 1975; 1978).

Insects ("dragonflies") in the Middle Carboniferous (Lower and Middle Pennsylvanian) of the Donets Basin were characteristic of the slightly elevated coastal plain with lycopsid-ferpteridosperm phytocoenosis and the most elevated areas of the sedimentation area mainly with pteridosperm phytocoenosis (Fisunenکو, 1987). The following groups of insects are known from the Pennsylvanian of the Donets Basin: Palaeodictyopteroidea (Sharov and Sinichenكو, 1977; Demov, 2019), Odonoptera (Demov, 2016), Dictyoptera (Demov and Udovychenko, 2019a) and presumably Orthoptera (unpublished data; definition by Joerg W. Schneider, Freiberg).

The predominant amount of material comes from the sediments of freshwater lakes, which have arisen as a result of siltation of peat swamp. It should be noted that ovipositions were observed on various plant organs: leaves of lycopsids and cordaitaleans, as well as rachises of pteridosperms.

The number of the plant damages is sometimes quite large. For example, on the surface of limonite nodule (specimen IGSU-3/7643), with an area of approximately 21 cm², among the plant detritus two plants fragments with traces of arthropod influence were found: oviposition DT100 (lycopsid leaf) and piercing and sucking DT138 (pteridosperm rachis). As already noted, insect endophytic ovipositions are also known in the marine sediments of the Mospinka Fm.

The most likely producers of endophytic ovipositions are representatives of Odonoptera, Palaeodictyopteroidea, Dictyoptera, Archaeorthoptera, Hemipteroidea, and Orthoptera (Schachat et al., 2014). To date, it is almost impossible to correlate the above-described oviposition with a specific group of insects due to limited information regarding the reproductive strategy of insects in the Late Paleozoic. Applying the principle of actualism and comparing Carboniferous and modern insect oviposition is fraught with gross mistakes. Nevertheless, at least some of the oviposition described in this article may belong to Odonoptera (DT100) and Palaeodictyopteroidea (DT76, DT101).

The earliest endophytic oviposition of insects, as already noted, are specimens from the Upper Moscovian (Laaß, 2017) and the uppermost part of the Gzhelian of Germany (Laaß and Hoff, 2014), France (Bethoux et al., 2004), and the United States (Xu et al., 2018; Lucas et al., 2021). The endophytic ovipositions described in this article are almost 10 million years older than specimens from the Upper Moscovian of Germany.

Conclusion. The main results of the study are as follows.

(1) The world's earliest endophytic ovipositions of insects (DTs 76, 100, 101, 175) described are from the deposits of the lower part of the Bashkirian stage of the Donets Basin.

(2) New findings substantially supplement the fossil record of insect endophytic oviposition. The producers of the described ovipositions are presumably Palaeodictyopteroidea, Odonoptera and/or Orthoptera.

(3) The research results show significant prospects for the study of Carboniferous terrestrial ecosystems on the example of the Donets Basin.

Acknowledgments. I am grateful to the PhD Mykola I. Udovychenko (Luhansk Taras Shevchenko National University, Starobilsk) for comprehensive assistance in the course

of research. I also acknowledge the PhD Joerg W. Schneider for identification of insect remains from Pennsylvanian of the Donets Basin (TU Bergakademie Freiberg, Germany). I thank anonymous reviewers for their valuable comments of the work.

Список використаних джерел

- Боярина, Н.И. (2016). Макрофлористические зоны среднего и верхнего карбона (пенсильванской подсистемы) Донецкого бассейна. *Геологический журнал*, 1, 21–35.
- Василенко, Д.В., Щербаков, Д.Е. (2013). На грани между палеоботаникой и палеознтомологией – ископаемые повреждения растений насекомыми. *Палеоботанический временник. Приложение к журналу "Lethaea rossica"*, 1, 66–69.
- Дернов, В.С. (2016). Нові дані щодо палеонтологічної характеристики відкладів дяківської серії (башкирський ярус) Донбасу. *Вісник Національного науково-природничого музею*, 14, 35–46. <https://doi.org/10.15407/vnm.2016.14.035>
- Дернов, В.С., Удовиченко, М.І. (2019a). Стан вивченості й перспективи досліджень неморської фауни середнього та верхнього карбону Донбасу. *Матеріали X Всеукраїнської наукової конференції "Проблеми геології фанерозою України", 9-11 жовтня 2019 р., Львів*, 75–78.
- Дернов, В.С., Удовиченко, Н.И. (2019b). К палеоботанической характеристике моспинской свиты (средний карбон, Донбасс). *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія Геологія. Географія. Екологія*, 51, 67–82. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-05>
- Немировська, Т.І., Єфіменко, В.І. (2013). Середній карбон (нижній пенсильваній). Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. Київ, 283–303.
- Попов, А.В. (1979). Каменноугольные амmonoидеи Донбасса и их стратиграфическое значение. Ленинград: Недра.
- Фисуненко, О.П. (1975). О роли палеозоологических исследований для установления стратиграфических рубежей. В кн. Стратиграфия карбона и геология угленосных формаций СССР. Москва: Недра, 26–31.
- Фисуненко, О.П. (1978). Тафономия и инфрафауна. В кн. Вопросы тафономии и палеобиологии. Душанбе: Дониш, 165–173.
- Фисуненко, О.П. (1987). Ландшафты среднего карбона Донецкого бассейна. В кн. Палеонтология и реконструкция геологической истории палеобассейнов. Ленинград: Наука, 92–99.
- Фисуненко, О.П. (1991). Зональная фито-стратиграфическая шкала нижнего и среднего карбона Донецкого бассейна. *Геологический журнал*, 3, 55–64.
- Фисуненко, О.П. (2000). К проблеме московского яруса. Луганск.
- Шаров, А.Г., Синиченкова, Н.Д. (1977). Новые Palaeodictyoptera с территории СССР. *Палеонтологический журнал*, 1, 48–63.
- Bethoux, O., Galtier, J., Nel, A. (2004). Earliest evidence of Insect endophytic oviposition. *Palaios*, 19, 408–412.
- Davydov, V.I., Crowley, J.L., Schmitz, M.D., Poletaev, V.I. (2010). High-precision U–Pb zircon age calibration of the Global Carboniferous Time Scale and Milankovitch band cyclicity in the Donets Basin, Eastern Ukraine. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11 (1), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2009GC002736>
- Demov, V.S. (2018). Cephalopods from the Middle Carboniferous of the Donets Basin (Luhansk region, Eastern Ukraine). *GEO&BIO*, 16, 3–14. <https://doi.org/10.15407/gb.2018.16.003>
- Demov, V. (2019). To the study of the non-marine fauna of the Mospinka Formation (Middle Carboniferous, Donets Basin). *Tectonics and stratigraphy*, 46, 105–115.
- Gnaedinger, S.C., Adami-Rodrigues, K., Gallego, O.F. (2014). Endophytic oviposition on leaves from the Late Triassic of northern Chile: Ichnotaxonomic, palaeobiogeographic and palaeoenvironment considerations. *Geobios*, 47, 221–236. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2014.06.003>
- Labandeira, C.C., Wilf, P., Johnson, K.R., Marsh, F. (2007). Guide to insect (and other) damage types on compressed plant fossils. Version 3.0. Smithsonian Institution, Washington, DC. Available at: <http://paleobiology.si.edu/pdfs/insectDamageGuide3.01.pdf>
- Laaß, M. (2017). The first evidence of endophytic oviposition from the Piesberg quarry (Late Pennsylvanian, Westphalian D). *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, 109, 58.
- Laaß, M., Hoff, C. (2014). The earliest evidence of damselfly-like endophytic oviposition in the fossil record. *Lethaia*, 48 (1), 115–124. <https://doi.org/10.1111/let.12092>
- Lin, X., Labandeira, C.C., Ding, Q., Meng, Q., Ren, D. (2019). Exploiting nondietary resources in deep time: patterns of oviposition on Mid-Mesozoic plants from Northeastern China. *International Journal of Plant Sciences*, 180 (5), 411–457. <https://doi.org/10.1086/702641>
- Lucas, S.G., DiMichele, W.A., Krainer, K., Barrick, J.E., Vachard, D., Donovan, M.P., Looy, C., Kerp, H., Chaney, D.S. (2021). The Pennsylvanian system in the Sacramento Mountains, New Mexico, USA. *Smithsonian contributions to paleobiology*, 104, 1–216.
- Nemyrovska, T.I. (1999). Bashkirian conodonts of the Donets Basin, Ukraine. *Scripta Geologica*, 119, 1–116.

Schachat, S.R., Labandeira, C.C., Gordon, J., Chaney, D., Levi, S., Halt-hore, M.N., Alvarez, J. (2014). Plant-insect interactions from Early Permian (Kungurian) Colwell Creek Pond, North-Central Texas: The early spread of herbivory in riparian environments. *International Journal of Plant Sciences*, 175 (8), 855–890. <https://doi.org/10.1086/677679>

Scotese, C.R., (2014). Atlas of Permo-Carboniferous Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 53–64, Vol. 4. The Late Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL.

Vassilenko, D.V. (2011). The first record of endophytic insect oviposition from the Tartarian of European Russia. *Paleontological Journal*, 45 (3), 333–334. <https://doi.org/10.1134/S0031030111030154>

Vassilenko, D.V. (2013). Traces of interactions between arthropods and plants from the Upper Permian deposits of European Russia. In: *Fossil insects of the Middle and Upper Permian*. *Paleontological Journal*, 47 (7), 675–678. <https://doi.org/10.1134/S0031030113070010>

Vassilenko, D.V., Rasnitsyn, A.P. (2007). Fossil ovipositions of dragonflies: review and interpretation. *Paleontological Journal*, 41 (11), 1–4. <https://doi.org/10.1134/S0031030107110147>

White, D. (1899). Fossil flora of the Lower coal measures of Missouri. U.S. Geological Survey, 37, 1–467.

Xu, Q., Jin, J., Labandeira, C.C. (2018). Williamson Drive: Herbivory from a north-central Texas flora of latest Pennsylvanian age shows discrete component community structure, expansion of piercing and sucking, and plant counterdefenses. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 251, 28–72. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.01.002>

References

Béthoux, O., Galtier, J., Nel, A. (2004). Earliest evidence of Insect endophytic oviposition. *Palaos*, 19, 408–412.

Boyarina, N.I. (2016). Middle and Upper Carboniferous (Pennsylvanian) megafossil zones of the Donets Basin. *Geological Journal*, 354 (1), 21–35. [in Russian]

Davydov, V.I., Crowley, J.L., Schmitz, M.D., Poletaev, V.I. (2010). High-precision U–Pb zircon age calibration of the Global Carboniferous Time Scale and Milankovitch band cyclicity in the Donets Basin, Eastern Ukraine. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 11 (1), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2009GC002736>

Dernov, V. (2019). To the study of the non-marine fauna of the Mospino Formation (Middle Carboniferous, Donets Basin). *Tectonics and stratigraphy*, 46, 105–115. [in Russian]

Dernov, V.S. (2016). Novi dani shchodo paleontologichnoy kharakterystyky vidkladiv dyakivskoy seriyi (bashkyrskyy yarus) Donbasu. *Visnyk Natsional'noho naukovo-pryrodnychoho muzeyu*. 14, 35–46. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/vnm.2016.14.035>

Dernov, V.S. (2018). Cephalopods from the Middle Carboniferous of the Donets Basin (Luhansk region, Eastern Ukraine). *GEO&BIO*, 16, 3–14. <https://doi.org/10.15407/gb.2018.16.003>

Dernov, V.S., Udovychenko, M.I. (2019a). Stan vyvchenosti y perspektivy doslidzhen' nemors'koy fauny seredn'oho ta verkh'n'oho karbonu Donbasu. *Materialy X Vseukrayinskoy naukovo-y konferentsiyi "Problemy heolohiyi fanerozoynu Ukrayiny"*, 9-11 zhovtnya 2019 r., L'viv, 75–78. [in Ukrainian]

Dernov, V.S., Udovychenko, M.I. (2019b). On the paleobotanical characteristic of the Mospino Formation (Middle Carboniferous, Donets Basin). *Visnyk V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 51, 67–82. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-05> [in Russian]

Fisunen, O.P. (1975). O roli paleoekologicheskikh issledovaniy dlya ustanovleniya stratigraficheskikh rubezhey. In: *Stratigrafiya karbona i geologiya ugleosnykh formatsiy SSSR*. Moskva: Nedra, 26–31. [in Russian]

Fisunen, O.P. (1978). Tafonomiya i infrafatsii. In: *Voprosy tafonomii i paleobiologii*. Dushanbe: Donish, 165–173. [in Russian]

Fisunen, O.P. (1987). Landshafty srednego karbona Donetskogo bassey-na. In: *Paleontologiya i rekonstruktsiya geologicheskoy istorii paleobassey-nov*. Leningrad: Nauka, 92–99. [in Russian]

Fisunen, O.P. (1991). Zonal'naya fitostratigraficheskaya shkala nizhnego i srednego karbona Donetskogo bassey-na. *Geologicheskyy zhurnal*, 3, 55–64. [in Russian]

Fisunen, O.P. (2000). K probleme moskovskogo yarusa. *Luhansk*. [in Russian]

Gnaedinger, S.C., Adami-Rodrigues, K., Gallego, O.F. (2014). Endophytic oviposition on leaves from the Late Triassic of northern Chile: Ichnotaxonomic, palaeobiogeographic and palaeoenvironment considerations. *Geobios*, 47, 221–236. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2014.06.003>

Laaf, M. (2017). The first evidence of endophytic oviposition from the Piesberg quarry (Late Pennsylvanian, Westphalian D). *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, 109, 58.

Laaf, M., Hoff, C. (2014). The earliest evidence of damselfly-like endophytic oviposition in the fossil record. *Lethaia*, 48 (1), 115–124. <https://doi.org/10.1111/let.12092>

Labandeira, C.C., Wilf, P., Johnson, K.R., Marsh, F. (2007). Guide to insect (and other) damage types on compressed plant fossils. Version 3.0. Smithsonian Institution, Washington, DC. Available at: <http://paleobiology.si.edu/pdfs/insectDamageGuide3.01.pdf>

Lin, X., Labandeira, C.C., Ding, Q., Meng, Q., Ren, D. (2019). Exploiting nondietary resources in deep time: patterns of oviposition on Mid-Mesozoic plants from Northeastern China. *International Journal of Plant Sciences*, 180 (5), 411–457. <https://doi.org/10.1086/702641>

Lucas, S.G., DiMichele, W.A., Krainer, K., Barrick, J.E., Vachard, D., Donovan, M.P., Looy, C., Kerp, H., Chaney, D.S. (2021). The Pennsylvanian system in the Sacramento Mountains, New Mexico, USA. *Smithsonian contributions to paleobiology*, 104, 1–216.

Nemyrovska, T.I. (1999). Bashkirian conodonts of the Donets Basin, Ukraine. *Scripta Geologica*, 119, 1–116.

Nemyrovska, T.I., Yefimenko, V.I. (2013). Serebnyi karbon (nyzhniy pensyl'vaniy). *Stratigrafiya verkh'n'oho proterozoynu ta fanerozoynu Ukrayiny*. T. 1. *Stratigrafiya verkh'n'oho proterozoynu, paleozoynu ta mezozoynu Ukrayiny*. Kyiv: 283–303. [in Ukrainian]

Popov, A.V. (1979). Kamennougol'nyye ammonoidy Donbassa i ikh stratigraficheskoye znachenie. Leningrad: Nedra. [in Russian]

Schachat, S.R., Labandeira, C.C., Gordon, J., Chaney, D., Levi, S., Halt-hore, M.N., Alvarez, J. (2014). Plant-insect interactions from Early Permian (Kungurian) Colwell Creek Pond, North-Central Texas: The early spread of herbivory in riparian environments. *International Journal of Plant Sciences*, 175 (8), 855–890. <https://doi.org/10.1086/677679>

Scotese, C.R., (2014). Atlas of Permo-Carboniferous Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 53–64, Vol. 4. The Late Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL.

Sharov, A.G., Sinichenkova, N.D. (1977). New Palaeodictyoptera from the territory of USSR. *Paleontological Journal*, 1, 48–63. [in Russian]

Vassilenko, D.V. (2011). The first record of endophytic insect oviposition from the Tartarian of European Russia. *Paleontological Journal*, 45 (3), 333–334. <https://doi.org/10.1134/S0031030111030154>

Vassilenko, D.V. (2013). Traces of interactions between arthropods and plants from the Upper Permian deposits of European Russia. In: *Fossil insects of the Middle and Upper Permian*. *Paleontological Journal*, 47 (7), 675–678. <https://doi.org/10.1134/S0031030113070010>

Vassilenko, D.V., Rasnitsyn, A.P. (2007). Fossil ovipositions of dragonflies: review and interpretation. *Paleontological Journal*, 41 (11), 1–4. <https://doi.org/10.1134/S0031030107110147>

Vassilenko, D.V., Shcherbakov, D.Ye. (2013). Na grani mezhdru paleobotanikoy i paleontologiyey – iskopayemyye povrezhdeniya rasteniy nas-ekomyi. *Paleobotanicheskiy vremennik. Prilozheniye k zhurnalu "Lethaea rossica"*, 1, 66–69. [in Russian]

White, D. (1899). Fossil flora of the Lower coal measures of Missouri. U.S. Geological Survey, 37, 1–467.

Xu, Q., Jin, J., Labandeira, C.C. (2018). Williamson Drive: Herbivory from a north-central Texas flora of latest Pennsylvanian age shows discrete component community structure, expansion of piercing and sucking, and plant counterdefenses. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 251, 28–72. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.01.002>

Надійшла до редколегії 10.07.21

В. Дернов, асп.,
E-mail: vitaly Dernov@gmail.com,
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна

НАЙДАВНІШІ ЕНДОФІТНІ ЯЙЦЕКЛАДКИ КОМАХ (РАННІЙ ПЕНСИЛЬВАНІЙ, СХІДНА УКРАЇНА)

З відкладів моспінської світи (верхній башкир, нижній пенсильваній) Центральної Донбасу описано найдавніші у світі ендофітні яйцекладки комах. Відомостей щодо ендофітних яйцекладок комах із кам'яноугільних відкладів небагато. Найдавнішими з них, описаними в літературі на сьогодні, є екземпляри з верхів московського і найвищої частини жельського ярусу Німеччини, а також верхів жельського ярусу Франції і США. Описані у статті ендофітні яйцекладки комах є майже на 10 млн років давнішими за екземпляри, що відомі з верхів московського ярусу Німеччини.

Вивчений матеріал походить з п'яти місцезнаходжень і чотирьох стратиграфічних рівнів. Територією досліджень є верхня течія ріки Велика Кам'янка (південна частина Луганської області, Україна). Породи зі слідами життєдіяльності комах утворилися в мілководно-морських, лагунних та озерних умовах. Яйцекладки комах відзначені на листових пластинках деревовидних лікоподів і кордаїтантових, а також

рахісах птеридоспермів. Вивчені іхнофосилії належать до таких типів пошкоджень *sensu* (Labandeira et al., 2007): яйцекладки DT76, DT100, DT101, DT175. Переважна більшість вивчених яйцекладок походить з відкладів, що накопичились в умовах сильно зволоженої приморської алювіально-дельтової низовини, вкритої заростями напівводних членистостеблових (узбережжя озер, річок і розпріснених лагун), переважно деревовидних лікопсид (заболочені ділянки), а також птеридоспермів (припідняті ділянки області седиментації). Найімовірнішими продуцерами ендofітних яйцекладок є представники *Odonoptera*, *Palaeodictyopteroidea*, *Dictyoptera*, *Archaeorthoptera*, *Hemipteroidea* і *Orthoptera*. Нові знахідки суттєво доповнюють викопний літопис ендofітних яйцекладок комах.

Ключові слова: Україна, Донбас, башкирський ярус, ендofітні яйцекладки, комах.

В. Дернов, асп.,
E-mail: vitalydernov@gmail.com,
Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-6, г. Киев, 01054, Украина

ДРЕВНЕЙШИЕ ЭНДОФИТНЫЕ ЯЙЦЕКЛАДКИ НАСЕКОМЫХ (РАННИЙ ПЕНСИЛЬВАНИЙ, ВОСТОЧНАЯ УКРАИНА)

Из отложений моспинской свиты (верхний башкир, нижний пенсильваний) Центрального Донбасса описаны древнейшие в мире эндofитные яйцекладки насекомых. Сведений о каменноугольных эндofитных яйцекладках насекомых немного. Древнейшими из них, описанными в литературе на сегодняшний день, являются экземпляры из верхов московского и высшей части гжельского яруса Германии, а также верхов гжельского яруса Франции и США. Описанные в статье эндofитные яйцекладки насекомых почти на 10 млн лет древнее известных экземпляров из верхней части московского яруса Германии.

Изученный материал происходит из пяти местонахождений и четырех стратиграфических уровней. Территорией исследований является верхнее течение реки Большая Каменка (южная часть Луганской области, Украина). Породы со следами жизнедеятельности насекомых образовались в мелководно-морских, лагунных и озерных условиях. Яйцекладки насекомых отмечены на различных органах растений: листовых пластинках древовидных ликопсид и кордаитантовых, а также рахисах птеридоспермов. Ихнофосиллии относятся к следующим типам повреждений *sensu* (Labandeira et al., 2007): яйцекладки DT76, DT100, DT101, DT175. Изученные яйцекладки происходят преимущественно из отложений сильно увлажненной приморской алювиально-дельтовой низменности, покрытой зарослями полуводных членистостебельных (побережья озер, рек и опресненных лагун), древовидных ликопсид (заболоченные участки), а также птеридоспермов (приподнятые участки области седиментации). Наиболее вероятными продуцерами эндofитных яйцекладок являются представители *Odonoptera*, *Palaeodictyopteroidea*, *Dictyoptera*, *Archaeorthoptera*, *Hemipteroidea* и *Orthoptera*. Новые находки существенно дополняют ископаемую летопись эндofитных яйцекладок насекомых.

Ключевые слова: Украина, Донбасс, башкирский ярус, эндofитные яйцекладки, насекомые.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: s.vyzhva@knu.ua;В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua;М. Орлюк^{1,2}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: orliuk@ukr.net;І. Онищук¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: oivan1@ukr.net;М. Рева¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;О. Шабатура¹, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32, м. Київ, 03142, Україна**ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ПРУЖНІ ПАРАМЕТРИ УЩІЛЬНЕНИХ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД КАРБОНУ СХІДНОЇ ЧАСТИНИ ПІВНІЧНОЇ ПРИБОРТОВОЇ ЗОНИ ДДЗ**

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

Присвячено вивченню електричних і акустичних параметрів ущільнених теригенних порід карбону східної частини північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини.

Установлено, що в атмосферних умовах значення питомого електричного опору сухих екстрагованих порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (середнє значення 1,033 МОм·м); для пісковиків – від 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (середнє 27,973 МОм·м). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової води (мінералізація $M=180$ г/л), змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (середнє 8,5 Ом·м); для пісковиків – від 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (середнє 8,2 Ом·м).

Лабораторними дослідженнями встановлено, що в атмосферних умовах варіації відносного електричного опору лежать у межах: для алевролітів – від 41,2 до 277,9 (середнє 96,2); для пісковиків – від 34,0 до 238,5 (середнє 94,5).

Електрометричні дослідження зразків порід у змодельованих пластових умовах (температура $t=94-126^{\circ}\text{C}$; ефективний тиск $p_{\text{еф}}=41-55$ МПа, мінералізація води $M=180$ г/л) показали, що питомий електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (середнє 2,1 Ом·м); для пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (середнє 1,3 Ом·м). Внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску. Регресійний зв'язок коефіцієнта збільшення питомого електричного опору з тиском для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку.

Проведеними дослідженнями встановлено, що у пластових умовах відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 132 до 2480 (середнє 562); для пісковиків – від 81 до 953 (середнє 339).

Лабораторні акустичні дослідження швидкостей поширення поздовжніх хвиль у сухих екстрагованих породах показали, що цей параметр змінюється: в алевролітах – від 2616 м/с до 4706 м/с (середнє 3940 м/с); в пісковиках – від 3660 м/с до 4971 м/с (середнє 4245 м/с). При насиченні порід моделлю пластової води цей параметр змінюється: для алевролітів – від 3596 м/с до 5438 м/с (середнє 4681 м/с); для пісковиків – від 4302 м/с до 5463 м/с (середнє 4942 м/с).

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 3763 м/с до 6223 м/с (середнє 5053 м/с); для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с (середнє 5176 м/с). Із збільшенням тиску швидкість поздовжніх хвиль зростає унаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних та акустичних досліджень порід дозволив установити кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними, електричними і пружними параметрами досліджених ущільнених порід.

Ключові слова: алевроліти, ущільнені пісковики, питомий електричний опір, відносний електричний опір, швидкість пружних хвиль.

Постановка проблеми. Одним із результатів виконаних останнім часом геолого-геофізичних досліджень є те, що у північній прибортовій зоні Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) було виявлено значні перспективи наявності нетрадиційних покладів вуглеводнів (газ ущільнених порід, сланцевий газ, сланцева нафта), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014). Ущільнені породи складають покривки над колекторами, що містять вуглеводні. Вони у деяких районах містять значну кількість органіки й можуть слугувати колекторами газу. У зв'язку з розвитком новітніх технологій видобутку газу встановлено, що з багатих органікою ущільнених порід можна добувати газ у значних обсягах, з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю.

Основа ефективної технології виділення й оцінки газонасичених ущільнених порід становить буріння горизонтальних свердловин, орієнтованих у напрямку, перпендикулярному

мінімальній горизонтальній напрузі порід, і проведення гідророзриву в продуктивному інтервалі геологічного розрізу. Важливою частиною технології є геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначаються напрямки горизонтального стовбура свердловини гідророзриву і його параметри.

Ущільнені породи, петрофізичні властивості яких наведені у даній статті, представлені низькопористими пісковиками й алевролітами. Характеристика електричних і пружних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних параметрів порід газонафтоперспективних районів України присвячений ряд публікацій (Вижва та ін., 2012, 2013, 2014, 2017 – 2021; Vyzhva et al., 2017;

Карпенко та ін., 2014, 2015; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014; Орлюк, 2013; Orlyuk, 2018; Рибалка та Карпенко, 2016; Соболев та Карпенко, 2021; Садівник, 2013 та багатьох інших авторів). Електричні й акустичні властивості порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними електрометричних та акустичних методів досліджень свердловин. При цьому петрофізичні характеристики порід і їх кореляційні зв'язки з фільтраційно-ємнісними параметрами мають досить виражений індивідуальний характер щодо кожної ділянки досліджень. Тому лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проблема пошуків та вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є очевидною і актуальною. З метою оцінки перспективності на газ геологічних структур і комплексів окрім геолого-геометричних та економічних параметрів важливе значення мають петрофізичні властивості гірських порід (у т. ч. електричні та пружні). Ці дані необхідно враховувати для оцінки колекторських властивостей порід за матеріалами електрометричних та акустичних методів досліджень пошуково-розвідувальних свердловин. Незважаючи на велику кількість публікацій, для ряду ущільнених порід-колекторів практично відсутні дані результатів їх лабораторних фільтраційно-ємнісних, електрометричних, акустичних досліджень та їхніх кореляційних залежностей з фільтраційно-ємнісними параметрами. Окрім того, петрофізичні дослідження до недавнього часу були направлені переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел вуглеводнів і на даному етапі петрофізичні параметри ущільнених порід є маловивченими або зовсім невивченими.

Мета досліджень. Метою наших досліджень була оцінка електричних та акустичних властивостей ущільнених теригенних порід карбону нетрадиційних джерел вуглеводнів перспективних ділянок східної частини північної прибортової зони ДДЗ, як основи комплексного аналізу їх фізичних параметрів та встановлення кореляційних зв'язків з фільтраційно-ємнісними властивостями. Кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними характеристиками і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Основою для визначення цих зв'язків є комплекс лабораторних петрофізичних досліджень. Дані, отримані в результаті лабораторних досліджень фільтраційно-ємнісних параметрів і густини порід, їх питомого електричного опору, швидкості поширення пружних хвиль у них та кореляційні зв'язки цих петрофізичних характеристик, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки й сейсморозвідки.

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

У даній статті наведено результати комплексних досліджень електричних та акустичних властивостей колекції із 71 зразка ущільнених теригенних порід карбону (пісковиків і алевролітів) східної частини північної прибортової зони ДДЗ, відібраних на пошукових площах: Аксютівська (інт. глиб. 3905–4033 м); Гашинівська (інт. глиб. 3398–3404 м); Дружелюбівська (інт. глиб. 2852–2857 м); Євгенівська (інт. глиб. 1109–1419 м); Наріжнська (інт. глиб. 3359–4186 м); Островецька (інт. глиб. 3780–4572 м).

Методика електрометричних та акустичних досліджень. Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керна виконані за температури 20 °С цифровим тераомметром С.А.6547, який дозволяє виконувати високоточні вимірювання електричного опору на постійному струмі за двоелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (Вижва та ін., 2012 – 2014; Vyzhva et al., 2017). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 180 г/л), застосовувався RCL-метр МНС-1100. Циліндричні зразки під час вимірювання розташовувались у спеціальному кернотримачі, розробленому в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики.

Розв'язання задач інверсії даних сейсморозвідки й акустичного каротажу у фільтраційно-ємнісні параметри неможливе без надійної прив'язки цих даних до петрофізичних характеристик. Для лабораторних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод (Продайвода, 2004, 2007). Лабораторні акустичні дослідження виконані за допомогою установки "Керн-4", розробленої в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики разом із співробітниками механіко-математичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених лабораторних зразках, орієнтованих уздовж на шарування.

З метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід, досліджені зміни питомого електричного опору й швидкості пружних хвиль за різного ступеня відгонки води на центрифугі ОС-6М (Породы..., 1985; Рудько, 2005). У процесі цих досліджень виконана серія вимірювань електричного опору й швидкості пружних хвиль зразків порід, насичених моделлю пластової води, до їх центрифугування та після центрифугування за режимів відгонки від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що відповідає діапазону зміни тиску витіснення води від 0 до 1,2 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення.

Для встановлення кореляційного зв'язку між електричними та швидкісними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконаний відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах (температура $t=94-126$ °С; ефективний тиск $p_{\text{эф}}=41-55$ МПа; мінералізація пластової води $M=180$ г/л).

Середня відносна похибка визначення електричного опору порід у рамках виконаних досліджень склала 3,4 %, а швидкості пружних хвиль – 2,2 %.

Аналіз даних електрометричних досліджень. Лабораторними вимірюваннями визначено електричні параметри ущільнених порід-колекторів нетрадиційних джерел вуглеводнів перспективних ділянок північної прибортової зони ДДЗ, дані про межі змін та середні значення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів порід

№	Породи	Значення параметра	Атмосферні умови		Пластові умови		
			Питомий електричний опір, Ом·м		Відносний електричний опір, Р	Питомий електричний опір порід, насичених розчином NaCl, Ом·м	Відносний електричний опір, Р _{пл}
			сухих	насичених розчином NaCl			
1	Алевроліти	мін.	6522	3,3	41,2	0,4	132
		макс.	2781844	26,8	277,9	7,7	2480
		сер.	1033161	8,5	96,2	2,1	562
2	Пісковики	мін.	16180	2,9	34,0	0,4	81
		макс.	206815014	20,3	238,5	3,5	953
		сер.	27973188	8,2	94,5	1,3	339

У результаті виконаних лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах установлено, що питомий електричний опір сухих екстрагованих зразків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м (алевроліт дрібнозернистий світло-сірий) до 2,782 МОм·м (алевроліт сірий) за середнього значення 1,033 МОм·м; для пісковиків – від 16,18 кОм·м (піскови́к дрібнозернистий смугастий) до 206,815 МОм·м (піскови́к світло-сірий крупнозернистий (гравеліт) з кременистим цементом) за середнього значення 27,973 МОм·м. Питомий електричний опір зразків порід, насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl), змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м (алевроліт зеленувато-сірий з сидеритом) до 26,8 Ом·м (алевроліт глинистий) за середнього значення 8,5 Ом·м; для пісковиків – від 2,9 Ом·м (піскови́к середньозернистий світло-сірий кварцовий) до 20,3 Ом·м (піскови́к дрібнозернистий світло-сірий кварцовий) за середнього значення 8,2 Ом·м.

Важливим інформаційним параметром є відносний електричний опір порід (Р) – відношення питомого опору

повністю насиченої породи ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{\text{в}}$): $R = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Аналіз електрометричних даних дозволив установити, що відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 41,2 (алевроліт світло-сірий тонкосму́гастий) до 277,9 (алевроліт глинистий) за середнього значення 96,2; для пісковиків – від 34,0 (піскови́к середньозернистий світло-сірий кварцовий) до 238,5 (піскови́к дрібнозернистий світло-сірий кварцовий) за середнього значення 94,5.

Побудовані кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) і відносним електричним опором (Р), яка має вигляд $R = a \cdot k_n^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Отримані кореляційні залежності описуються степеневими рівняннями:

$$R = 3,1494 \cdot k_n^{-0,914}, \text{ при } R^2 = 0,97 \text{ – алевроліти;}$$

$$R = 3,2344 \cdot k_n^{-0,991}, \text{ при } R^2 = 0,81 \text{ – пісковики.}$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 1, 2.

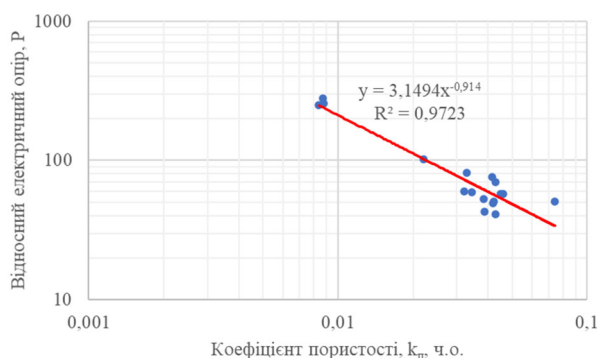


Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) та відносним електричним опором (Р) алевролітів

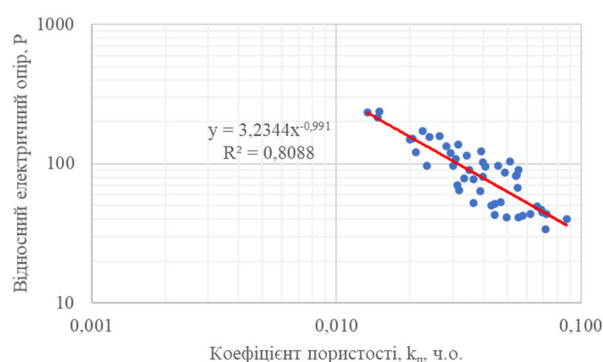


Рис. 2. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) та відносним електричним опором (Р) ущільнених пісковиків

Досить важливою інформаційною характеристикою порід-колекторів є параметр збільшення електричного опору (R_n), який являє собою відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$): $R_n = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{пв}}$. Експериментальними лабораторними дослідженнями на центрифугі ОС-6М і статистичним аналізом даних електрометричних вимірювань було отримано кореляційні залежності параметра R_n від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{в}}$), які мають вигляд $R_n = b \cdot k_{\text{в}}^{-n}$, де b – постійний коефіцієнт, n – показник змочуваності, що залежить від ступеня гідрофобності зерен породи (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009), описуються степеневими рівняннями і для досліджених порід записуються у вигляді

$$R_n = 0,9873 \cdot k_{\text{в}}^{-3,071} \text{ при } R^2 = 0,75 \text{ – алевроліти;}$$

$$R_n = 1,1122 \cdot k_{\text{в}}^{-1,472} \text{ при } R^2 = 0,9 \text{ – ущільнені пісковики.}$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 3, 4.

Для оцінки питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах виконано комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000. Вимірювання виконувались на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах (температура $t=94-126$ °С; ефективний тиск $p_{\text{еф}}=41-55$ МПа; мінералізація пластової води $M=180$ г/л) наведено в табл. 1.

Вимірювання електричних параметрів порід у разі зміни тиску від атмосферного до пластового показало, що їх питомий електричний опір із збільшенням тиску зростає, що пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них порового простору. Однак якщо збільшується температура від атмосферної до пластової, то опір порід зменшується. Отже, маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах.

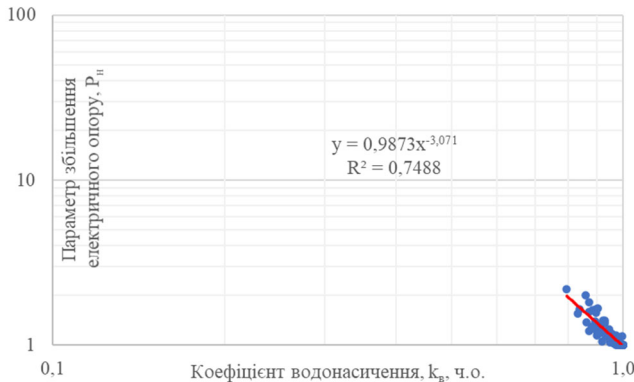


Рис. 3. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (K_w) алевролітів

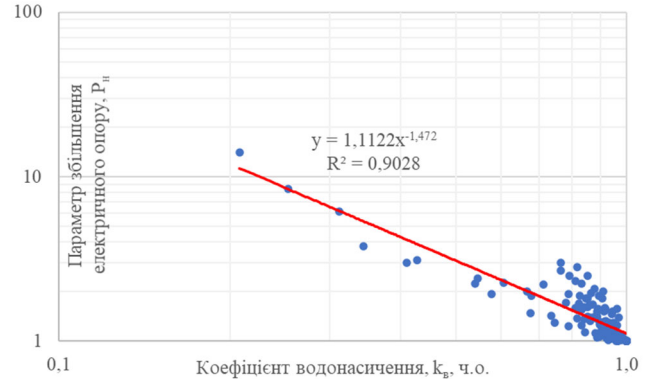


Рис. 4. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (K_w) ущільнених пісковиків

За результатами фізичного моделювання встановлено, що питомий електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м за середнього значення 2,1 Ом·м, а пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м за середнього значення 1,3 Ом·м (табл. 1). Відносний електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 132 до 2480 за середнього значення 562, а пісковиків – від 81 до 953 за середнього значення 339 (табл. 1).

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних вимірювань дозволив отримати для досліджених порід кореляційні залежності між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах (рис. 5, 6), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах (рис. 7, 8) та між відносними електричними опорами ($P_{пл}$)

і коефіцієнтами пористості ($K_{п,пл}$) у пластових умовах (рис. 9, 10). Аналітичні вирази цих залежностей наведено нижче:

$$\rho_{пл} = 0,3008 \cdot \rho - 0,4365, \text{ при } R^2 = 0,94 - \text{ алевроліти;}$$

$$\rho_{пл} = 0,1767 \cdot \rho - 0,1802,$$

$$\text{при } R^2 = 0,97 - \text{ ущільнені пісковики;}$$

$$P_{пл} = 10,456 \cdot P - 324,8, \text{ при } R^2 = 0,96 - \text{ алевроліти;}$$

$$P_{пл} = 3,9949 \cdot P - 38,429,$$

$$\text{при } R^2 = 0,97 - \text{ ущільнені пісковики;}$$

$$P_{пл} = 1,6324 \cdot K_{п,пл}^{-1,503}, \text{ при } R^2 = 0,82 - \text{ алевроліти;}$$

$$P_{пл} = 6,3829 \cdot K_{п,пл}^{-1,124}, \text{ при } R^2 = 0,85 - \text{ ущільнені пісковики.}$$

Залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійними функціями (рис. 5–8), а між відносними електричними опорами і коефіцієнтами пористості – степеневими функціями (рис. 9–10).

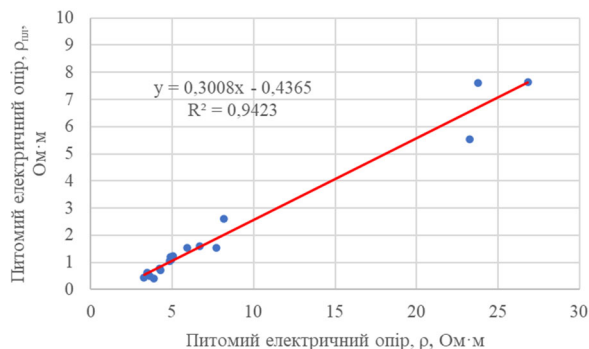


Рис. 5. Кореляційна залежність між питомим електричним опором алевролітів в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

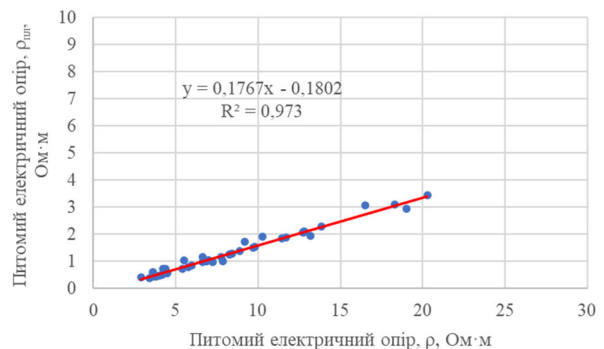


Рис. 6. Кореляційна залежність між питомим електричним опором щільних пісковиків в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

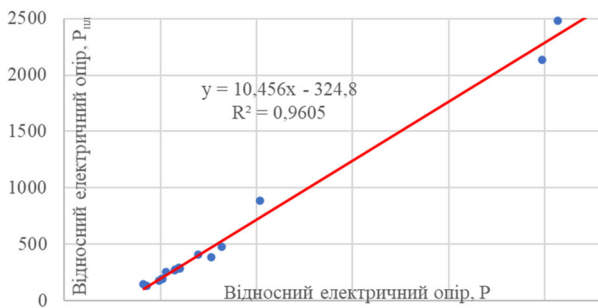


Рис. 7. Кореляційна залежність між відносним електричним опором алевролітів в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

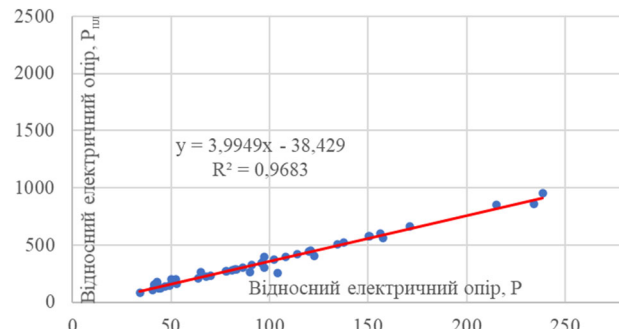


Рис. 8. Кореляційна залежність між відносним електричним опором ущільнених пісковиків в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

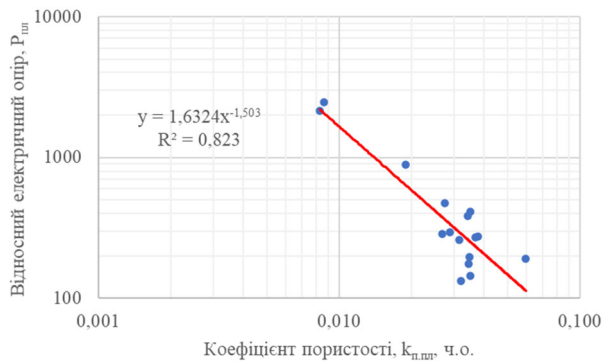


Рис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п.пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) алевролітів (пластові умови)

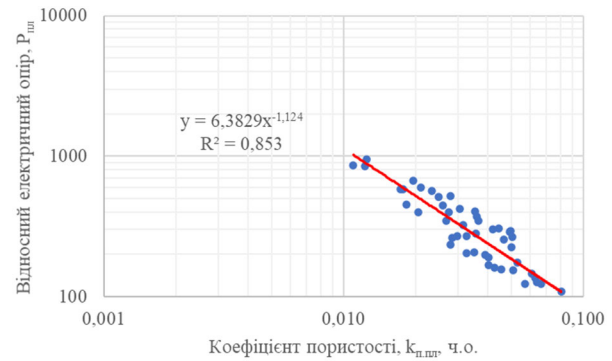


Рис. 10. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п.пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) ущільнених пісковиків (пластові умови)

Наведені вище кореляційні залежності, графіки яких представлено на рис. 5–10, дозволяють оцінювати електричні параметри порід, що перебувають у пластових умовах, за результатами лабораторного визначення їх в атмосферних умовах.

Аналіз даних акустичних досліджень. Під час лабораторних петрофізичних досліджень в атмосферних

і змодельованих пластових умовах проведений комплекс акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль в ущільнених породах – алевролітах і низькопористих пісковицх північної прибортової зони ДДЗ. Результати зазначених акустичних досліджень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення швидкостей поздовжніх пружних хвиль досліджених порід

№	Породи	Значення параметра	Атмосферні умови		Пластові умови
			Швидкість поздовжніх хвиль, м/с		Швидкість поздовжніх хвиль, м/с
			сухих	насичених розчином NaCl	насичених розчином NaCl
1	Алевроліти	мін.	2616	3596	3763
		макс.	4706	5438	6223
		сер.	3940	4681	5053
2	Пісковики	мін.	3660	4302	4430
		макс.	4971	5463	5752
		сер.	4245	4942	5176

У результаті аналізу даних лабораторних акустичних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що в екстрагованих сухих алевролітах швидкість поширення поздовжніх пружних хвиль змінюється від 2616 м/с (алевроліт зеленувато-сірий із сидеритом) до 4706 м/с (алевроліт глинистий) при середньому значенні 3940 м/с, а пісковиків – від 3660 м/с (пісковицх світло-сірий крупнозернистий кварцовий) до 4971 м/с (пісковицх середньозернистий кварцовий світло-сірий) при середньому значенні 4245 м/с.

В алевролітах, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl), цей параметр змінюється від 3596 м/с до 5438 м/с при середньому значенні 4681 м/с, а в пісковицх – від 4302 м/с до 5463 м/с при середньому значенні 4942 м/с.

За результатами сейсмоакустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено ряд кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль (V_p) і коефіцієнтом пористості (k_p) та густиною досліджених порід (δ), насичених розчином NaCl, графіки яких зображено на рис. 11–14. Аналітичні вирази цих залежностей наведено нижче:

$$V_p = -25310 \cdot k_p + 5539, \text{ при } R^2 = 0,84 \text{ – алевроліти;}$$

$$V_p = -13937 \cdot k_p + 5506,1,$$

$$\text{при } R^2 = 0,75 \text{ – ущільнені пісковики;}$$

$$V_p = 6,3707 \cdot \delta - 12001, \text{ при } R^2 = 0,75 \text{ – алевроліти;}$$

$$V_p = 5,7252 \cdot \delta - 9939,4,$$

$$\text{при } R^2 = 0,74 \text{ – ущільнені пісковики.}$$

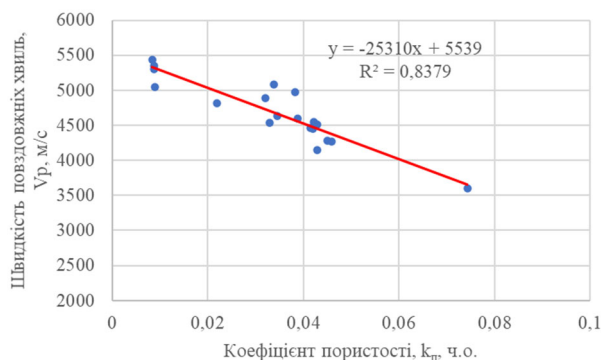


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) алевролітів і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

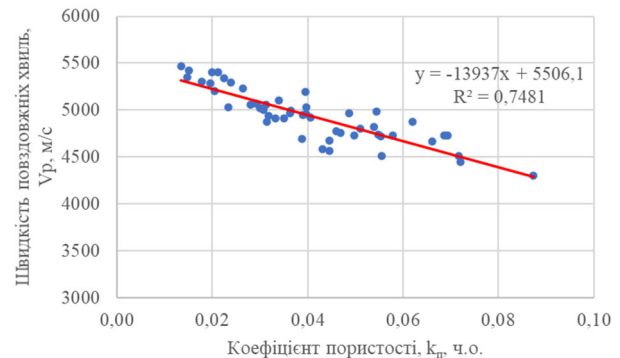


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) пісковиків і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

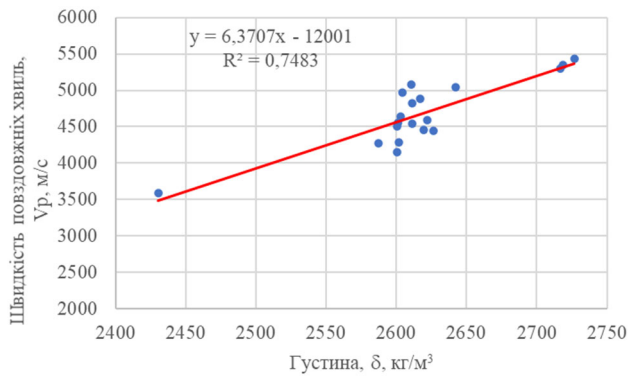


Рис. 13. Кореляційна залежність між густиною (δ) алеволітів і швидкістю позовдовжніх хвиль (V_p)

Акустичні дослідження швидкості поширення позовдовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$ проведені комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000. Вимірювання виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін та середні значення $V_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведені в табл. 2. За результатами лабораторних акустичних вимірювань під час фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість позовдовжніх хвиль у досліджених породах зростає із збільшенням тиску, внаслідок закриття в них мікротріщин та деформації порового простору, і загалом змінюється: для алеволітів – від 3763 м/с до 6223 м/с за середнього значення 5053 м/с; для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с за середнього значення 5176 м/с. Кореляційна залежність зростання швидкості позовдовжніх хвиль від тиску описується поліномом 2 порядку.

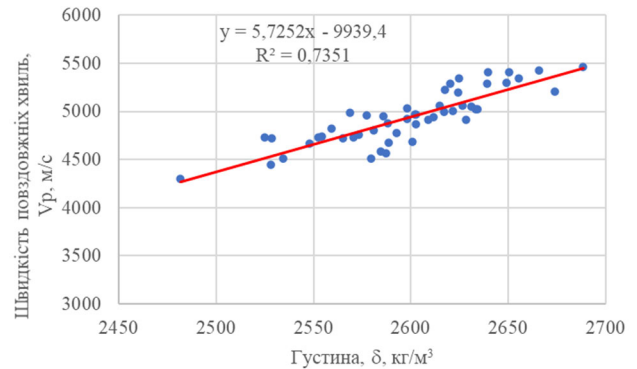


Рис. 14. Кореляційна залежність між густиною (δ) пісковиків і швидкістю позовдовжніх хвиль (V_p)

Комплексний аналіз даних лабораторних акустичних досліджень дозволив отримати для досліджених порід кореляційні зв'язки між швидкостями позовдовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 15, 16) та між коефіцієнтами пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 17, 18), які виражаються лінійними функціями. Аналітичні вирази цих залежностей наведені нижче:

$$V_{p,пл} = 1,2806 \cdot V_p - 937,55, \text{ при } R^2 = 0,95 - \text{ алеволіти;}$$

$$V_{p,пл} = 1,0556 \cdot V_p - 39,901, \text{ при } R^2 = 0,95 - \text{ ущільнені пісковики;}$$

$$V_{p,пл} = -33006 \cdot k_{п,пл} + 5874,7, \text{ при } R^2 = 0,77 - \text{ алеволіти;}$$

$$V_{p,пл} = -16384 \cdot k_{п,пл} + 5775,7, \text{ при } R^2 = 0,78 - \text{ ущільнені пісковики.}$$

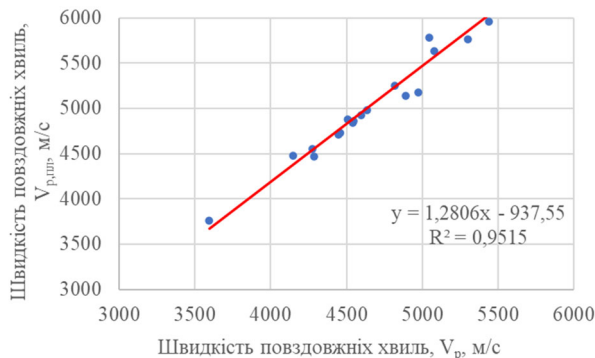


Рис. 15. Кореляційна залежність між швидкістю позовдовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах. Алеволіти

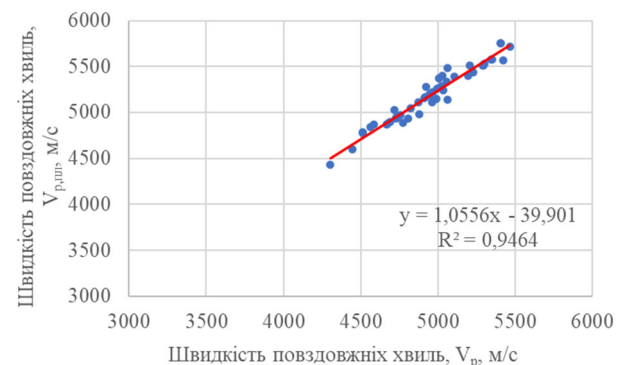


Рис. 16. Кореляційна залежність між швидкістю позовдовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах. Пісковики

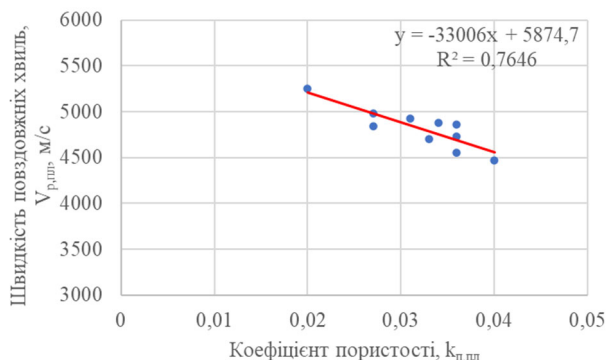


Рис. 17. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю позовдовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) (пластові умови). Алеволіти

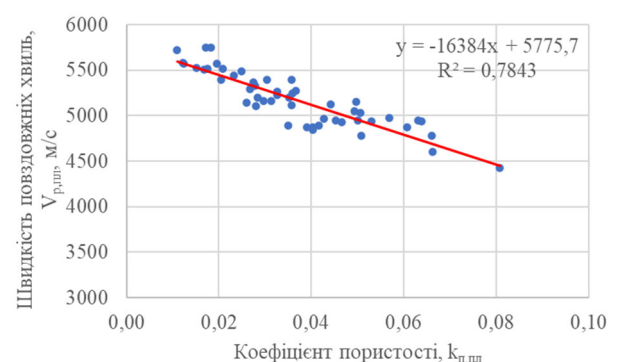


Рис. 18. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю позовдовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) (пластові умови). Пісковики

Висновки. У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекції із 71 зразка ущільнених порід (пісковиків і алевролітів), відібраних на 6 пошукових площах північного борту ДДЗ в інтервалах глибин від 1100 м до 4500 м.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що значення питомого електричного опору сухих екстрагованих зразків порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (середнє значення 1,033 МОм·м); для пісковиків – від 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (середнє значення 27,973 МОм·м). При цьому спостерігаються значні варіації питомого опору зразків, що пояснюється неоднорідностями в текстурі порід (нааявністю глинистих і піщаних прошарків та їх неупорядкованістю). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини, змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (середнє 8,5 Ом·м); для пісковиків – від 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (середнє значення 8,2 Ом·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів, породи насичені моделлю пластової води, практично не відрізняються. У той же час за питомим електричним опором мінерального скелета алевроліти і пісковики суттєво відрізняються.

Петрофізичними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід в атмосферних умовах. Отримані дані показали, що відносний електричний опір змінюється: для алевролітів – від 41,2 до 277,9 (середнє 96,2); для пісковиків – від 34,0 до 238,5 (середнє 94,5).

На основі проведених досліджень залежності параметра збільшення електричного опору від коефіцієнта водонасичення встановлено відповідний кореляційний зв'язок, який виражається степеневою функцією.

Фізичне моделювання пластових умов дозволило встановити, що в цих умовах питомий електричний опір змінюється: для алевролітів – від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (середнє 2,1 Ом·м); для пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (середнє 1,3 Ом·м). Вимірювання питомого опору порід при різних тисках показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску, при цьому залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку.

Дослідженнями відносного електричного опору порід у пластових умовах встановлено, що цей параметр змінюється: для алевролітів – від 132 до 2480 (середнє 562); для пісковиків – від 81 до 953 (середнє 339).

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

У результаті акустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено, що швидкість поширення поздовжніх хвиль, насичених моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів – від 3596 м/с до 5438 м/с (середнє 4681 м/с); для пісковиків – від 4302 м/с до

5463 м/с (середнє 4942 м/с). У сухих екстрагованих алевролітах швидкість поздовжніх хвиль має діапазон зміни від 2616 м/с до 4706 м/с (середнє 3940 м/с), а в пісковиках – від 3660 м/с до 4971 м/с (середнє 4245 м/с).

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 3763 м/с до 6223 м/с (середнє 5053 м/с); для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с (середнє 5176 м/с). Із збільшенням тиску швидкість поздовжніх хвиль зростає, унаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

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

Кореляційні зв'язки електричних й акустичних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і щільних пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах північної прибортової зони ДДЗ.

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

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

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 83, 30–37.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 85, 37–45.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2020). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В., Олійник, О.В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського*

національного університету імені Тараса Шевченка. *Геологія*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>.

Вижва, С.А., Онишчук, Д.І., Онишчук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 57, 13–16.

Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишчук, І.І. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20.

Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. Недр, 343 с.

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

Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 68, 49–54.

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

Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Книга IV. ВПЦ "Київський університет", 430 с.

Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35, 2, 127–136.

Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. Москва: Миннео СССР, 18 с.

Продайвода, Г.Т. (2004). Акустика текстур гірських порід. Київ: ВГЛ "Обрії", 144 с.

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

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

Рудько, Г.І., Нестеренко, М.Ю. та ін. (2005). Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів терригенних порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ-Львів, 58 с.

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

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

Тиаб, Дж., Дональдсон, Эрл Ч. (2009). Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. "Премии Инжиниринг", 868 с.

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

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

Reference

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

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

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

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

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

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geophysical Journal*, 35, 2, 127–136. [in Russian]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of mai-kop series of the crimean-black sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79, 12–20. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I. (2014). Reservoir Rocks in Impact Structures: Electrical Parameters. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 65, 31–35. [in Ukrainian]

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

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

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., Shabatura O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvitsky zone of the Dnieper-Donets Basin). *Geophysical Journal*, 41, 2, 145–160. [in Ukrainian]

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

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of condensed rocks of the northern edge of the Dnieper-Donets depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04> [in Ukrainian]

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

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, I.I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional types of reservoir rocks from southern oil-and-gas region. *Geoinformatics*, 3 (47), 17–25. [in Ukrainian]

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

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

Надійшло до редколегії 24.09.21

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
M. Orlyuk^{1,2}, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: orlyuk@ukr.net;
I. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva¹, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura¹, PhD (Geol.),
E-mail: dard@ukr.net;

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

²Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine,
32 Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

ELECTRIC AND ELASTIC PARAMETERS OF CARBONIC PERIOD TERRIGENOUS ROCKS OF THE EASTERN PART OF THE NORTHERN EDGE OF THE DNIEPER-DONETS DEPRESSION

The main objective of this article is studying of electrical and acoustic parameters of Carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the Dnieper-Donets depression (DDD).

It was determined that in atmospheric conditions the resistivity of dry extracted rocks (the specific electrical resistivity of framework of grains) varies from 6.522 kΩ·m to 2.782 MΩ·m (mean 1.033 MΩ·m), for sandstones – from 16.18 kΩ·m to 206.815 MΩ·m (mean 27.973 MΩ·m). The resistivity of rocks saturated with model of reservoir water (salinity $M = 180$ g/l) varies: for siltstones from 3.3 Ω·m to 26.8 Ω·m (mean 8.5 Ω·m), for sandstones from 2.9 Ω·m to 20.3 Ω·m (mean 8.2 Ω·m).

In laboratory it was defined that in atmospheric conditions formation resistivity factor varies: for siltstones from 41.2 to 277.9 Ω·m (mean 96.2 Ω·m), for sandstones from 34 Ω·m to 238.5 Ω·m (mean 94.5 Ω·m).

Physical modelling of reservoir conditions (temperature 94–126 °C, confining stress 41–55 MPa, salinity $M = 180$ g/l) showed that the specific electrical resistivity varies: for siltstones from 0.4 Ω·m to 7.7 Ω·m (mean 2.1 Ω·m), and sandstones – from 0.4 Ω·m to 3.5 Ω·m (mean 1.3 Ω·m). Due to the closure of microcracks and the deformation of the pore space, the electrical resistance of rocks increases with increase of pressure. The regression dependence of the formation resistivity enlargement factor with pressure for the studied rocks manifest itself in second order polynomial.

It was determined that in reservoir conditions the range of the formation resistivity factor varied: for siltstones from 132 to 2480 Ω·m (mean 562 Ω·m), for sandstones from 81 to 953 Ω·m (mean 339 Ω·m).

Laboratory acoustic study of velocities of the P-waves in dry extracted rocks showed that this parameter varies: for siltstones from 2616 m/s to 4706 m/s (average 3940 m/s), for sandstones from 3660 m/s to 4971 m/s (average 4245 m/s). If rocks are saturated with model of reservoir water, velocities have higher values of P-waves: for siltstones from 3596 m/s to 5438 m/s (average 4681 m/s), for sandstones from 4302 m/s to 5463 m/s (average 4942 m/s).

It was determined by physical modelling of reservoir conditions that velocities of P-waves vary: for siltstones from 3763 m/s to 6223 m/s (mean 5053 m/s), for sandstones from 4430 m/s to 5752 m/s (mean 5176 m/s). With the increase of pressure, the velocity of P-waves increases as well due to the closure of microcracks and the deformation of the pore space. The dependence of the increase in velocity from pressure is described by second order polynomial.

The comprehensive analysis of electrical and acoustic parameters of condensed rocks has been resulted in a set of correlation ratios between reservoir, electric and elastic parameters of studied samples in normal and modeling conditions.

Keywords: siltstone, sandstone, electrical resistivity, formation resistivity factor, velocities of elastic waves.

C. Выхва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
М. Орлюк^{1,2}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: orlyuk@ukr.net;
И. Онищук¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
Н. Рева¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура¹, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна;

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботина НАН України,
пр. Палладина, 32, г. Київ, 03142, Україна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ УПЛОТНЕННЫХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД КАРБОНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЫ ДДВ

Посвящено изучению электрических и акустических параметров уплотненных терригенных пород карбона восточной части северной прибортовой зоны Днепровско-Донецкой впадины.

Установлено, что в атмосферных условиях значение удельного электрического сопротивления сухих экстрагированных пород (удельное электрическое сопротивление минерального скелета) изменяется: для алевролитов – от 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (среднее 1,033 МОм·м), для песчаников – от 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (среднее 27,973 МОм·м). Удельное электрическое сопротивление пород, насыщенных моделью пластовой воды (минерализация $M = 180$ г/л), изменяется: для алевролитов – от 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (среднее 8,5 Ом·м), для песчаников – от 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (среднее 8,2 Ом·м).

Лабораторными исследованиями установлено, что в атмосферных условиях вариации относительного сопротивления находится в пределах: для алевролитов – от 41,2 до 277,9 (среднее 96,2), для песчаников – от 34,0 до 238,5 (среднее 94,5).

Электрометрические исследования образцов пород в смоделированных пластовых условиях (температура $t = 94–126$ °C; эффективное давление $p_{эф} = 41–55$ МПа, минерализация воды $M = 180$ г/л) показали, что удельное электрическое сопротивление пород изменяется: для алевролитов – от 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (среднее 2,1 Ом·м), для песчаников – от 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (среднее 1,3 Ом·м). Вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства электрическое сопротивление пород возрастает с увеличением давления. Регрессионная связь коэффициента увеличения удельного электрического сопротивления с давлением исследованных пород выражается полиномом 2 порядка.

Проведенные исследования показали, что в пластовых условиях относительное электрическое сопротивление пород изменяется: для алевролитов – от 132 до 2480 (среднее 562), для песчаников – от 81 до 953 (среднее 339).

Лабораторные акустические исследования скоростей распространения продольных волн в сухих экстрагированных породах, показали, что этот параметр изменяется: в алевролитах – от 2616 м/с до 4706 м/с (среднее 3940 м/с); в песчаниках – от 3660 м/с до 4971 м/с (среднее 4245 м/с). При насыщении пород моделью пластовой воды этот параметр изменяется: для алевролитов – от 3596 м/с до 5438 м/с (среднее 4681 м/с); для песчаников – от 4302 м/с до 5463 м/с (среднее 4942 м/с).

Физическим моделированием пластовых условий установлено, что скорость продольных волн изменяется: для алевролитов – от 3763 м/с до 6223 м/с (среднее 5053 м/с); для песчаников – от 4430 м/с до 5752 м/с (среднее 5176 м/с). С увеличением давления скорость продольных волн растет вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства. Зависимость увеличения скорости от давления описывается полиномом 2 порядка.

Анализ данных лабораторных электрометрических и акустических исследований пород позволил установить корреляционные связи между фильтрационно-емкостными, электрическими и упругими параметрами исследованных уплотненных пород.

Ключевые слова: алевролиты, уплотненные песчаники, удельное электрическое сопротивление, относительное электрическое сопротивление, скорость упругих волн.

УДК 550.837:551.24(477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.04>

Т. Бурахович, д-р геол. наук,

E-mail: burahovich@ukr.net;

А. Кушнір, д-р геол. наук,

E-mail: anton@ukr.net;

В. Ільєнко, канд. геол. наук,

E-mail: ivageophysicist@gmail.com;Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна 32, м. Київ, 03680, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ 3D ГЕОЕЛЕКТРИЧНОЇ МОДЕЛІ НАДР СТЕПОВОГО КРИМУ. ЄВПАТОРІЙСЬКИЙ ТА САКСЬКИЙ ПРОФІЛІ

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

Виконано інтерпретацію частини глибинної тривимірної геоелектричної моделі Кримського регіону в межах Сакського та Євпаторійського профілів, на основі даних експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, проведених у 2012 р. Інститутом геофізики ім. С.І. Суботіна Національної академії наук України.

Основним результатом аналізу є виявлення вертикальної та горизонтальної перемешованості областей високого та низького питомого опору як у земній корі, так і у верхній мантії. Показано, що геоелектричні розрізи за всіма профільними зрізами моделі характеризуються зануренням у північному напрямку поверхні консолідованого фундаменту та відповідно збільшенням сумарної повсюдньої провідності приповерхневих шарів. Виявлено аномалію електропровідності в консолідованій земній корі в інтервалі глибин 5–10 км з питомим електричним опором (ρ) 5 Ом·м, що гальванічно пов'язана з осадовими відкладами. Глибше за 10 км перемешуються однорідні та неоднорідні за питомим опором шари: 10–60 км з $\rho = 1000$ Ом·м; 60–90 км з $\rho = 100$ та 1000 Ом·м; 90–110 км з $\rho = 1000$ Ом·м; 110–140 км з $\rho = 40$ та 1000 Ом·м, контакти відповідають різним ρ нормальних геоелектричних розрізів різновікових структур Скіфської плити та Східноєвропейської платформи; горизонтально-шаруватий нормальний розріз.

Проаналізовано, що осередки землетрусів сейсмічного району Степового Криму концентруються в геоелектрично-неоднорідних зонах та тяжіють до контактів аномалій електропровідності в консолідованих породах земної кори – вище верхньої кромки аномалій, за межами та поміж аномаліями електропровідності. Розглянутий матеріал повністю свідчить про приуроченість проявів вуглеводнів до виділених за даними геоелектромагнітного зондування та тривимірного моделювання аномалій високої електропровідності, які характеризуються субвертикальними каналами, що гальванічно пов'язані з осадовими відкладами, та розшарованістю в земній корі й верхній мантії. Геоелектричні неоднорідності, які відображають сучасний стан земної кори й верхньої мантії та, ймовірно, зумовлені впливом сучасних мантіїних флюїдів, відповідають проявам сейсмічності та нафтогазоносності.

Ключові слова: геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, сейсмічність.

Вступ. Останнім етапом побудови геоелектричної моделі Криму можна вважати її інтерпретацію з метою отримання фізико-геологічного тлумачення для застосування у таких важливих областях, як вивчення перспектив нафтогазоносності та сейсмічної небезпеки регіону.

На думку дослідників (Порфирьев и др., 1981; Лукин, 2014; Шеремет и др., 2016) утворення нафти і газу в Причорноморсько-Кримській нафтогазонасній провінції пов'язане з процесами, що відбуваються у верхній мантії Землі, звідки вони мігрували в осадову товщу і її фундамент по зонах глибинних розломів у третинно-четвертинний час. Так аналіз геолого-геофізичних і геохімічних даних по різних нафтогазонасних басейнах світу, проведений в роботі (Лукин, 2015), свідчить про те, що головним фактором формування нафтових і газових родовищ є глибинна дегазація Землі. Вона створює тектоно-геодинамічні передумови формування інтенсивно розущільнених зон, особливо у крайових частинах кратонів. Є підстави прогнозувати пов'язані з ними родовища на півдні України (Лукин, 2003).

Одним з яскравих проявів геодинамічних процесів Землі є сейсмічність. Роботи останніх десятиліть, присвячені проблемам сейсмічності, все частіше стосуються питань дегазації Землі, зумовленої проявом надглибинних і глибинних флюїдних процесів у корі і мантії Землі (Гуфельд, 2007, 2013; Шестопалов и др., 2018; Кузин, 2018; Летников, 2003).

Добре відомо, що сейсмічність того чи іншого регіону пов'язана з його тектонічними і геодинамічними особливостями. Район досліджень має складну геолого-тектонічну будову, займає проміжне і не до кінця визначене положення в зоні зчленування глобальних структурних

елементів – південно-західного кута Східноєвропейської платформи і субширотних структур Альпійсько-Гімалайського поясу.

Сейсмічний район Степового Криму відрізняється великою кількістю материкових землетрусів з M 2–3,5, вогнища яких залягають на глибинах від 5 до 25 км. У роботі (Пустовитенко и др., 2019) аналізується помітне поживлення сейсмічної діяльності у Степовому Криму 2010–2012 рр. і розрахована глибина вогнища 5–7 км, що характерна для цього району. У той же час за результатами багаторічних досліджень встановлено, що вогнища землетрусів Криму розташовуються в основному в земній корі і максимальні значення їх глибин не перевищують 60 км (Кульчицкий и др., 2017).

Мета даного дослідження полягає в інтерпретації тривимірної моделі розподілу електричного опору земної кори і верхньої мантії Кримського регіону (Кушнір та Бурахович, 2021), яка побудована за сучасними експериментальними спостереженнями магнітотелуричного зондування і магнітоваріаційного профілювання (Бурахович и др., 2016). Методика 3D моделювання, що проводилась із застосуванням програмного забезпечення Mtd3wd (Mackie et al., 1994), та розрахунки детально описані в (Кушнір, 2019), а загальний аналіз геоелектричної моделі Кримсько-Чорноморського регіону з фізико-геологічною інтерпретацією вздовж профілів Краснополянський, Джанкойський та Феодосія-Керч розглянуто у (Кушнір та Бурахович, 2021). У даному дослідженні виконано подальшу інтерпретацію геоелектричної моделі з деталізацією району Степового Криму вздовж двох профілів: Євпаторійського та Сакського.

Аналіз геоелектрично-неоднорідних зон. Розглянемо частину тривимірної моделі Кримського регіону за серією з 6 глибинних розрізів субмеридіональних профілів (пр. 24–29; пр. 25 та пр. 28 відповідають Євпаторійському та Сакському профілям експериментальних спостережень) з кроком між ними 10 км, довжиною 80 км (рис. 1). Майже всі профілі перетинають різні геологічні структури Степового Криму: Альтинську западину (Азп), Калинівський грабен (Кг), Новоселівське підняття (Нп), Донузлавський грабен (Дг), Тарханкутський вал (Тв) та Каркінітсько-Північнокримський прогин (КПНКпр). Кожна структурна одиниця характеризується сумарною

повздовжньою провідністю приповерхневих шарів (S_{oc}) (від 250–500 См для Азп до 1000–1500 См для КПНКпр) та глибиною поверхні консолідованого фундаменту (від 1 км для Азп, Кг, Нп до 3,5–5 км на південному сході КПНКпр). Відповідно до цих параметрів розподіл питомого електричного опору (ρ) осадових відкладів коливається від 2 до 5 Ом·м на фоні $\rho = 1000$ Ом·м консолідованої земної кори. Як правило, геоелектричні розрізи за всіма профілями характеризуються зануренням на північ поверхні консолідованого фундаменту та відповідно збільшенням S_{oc} .

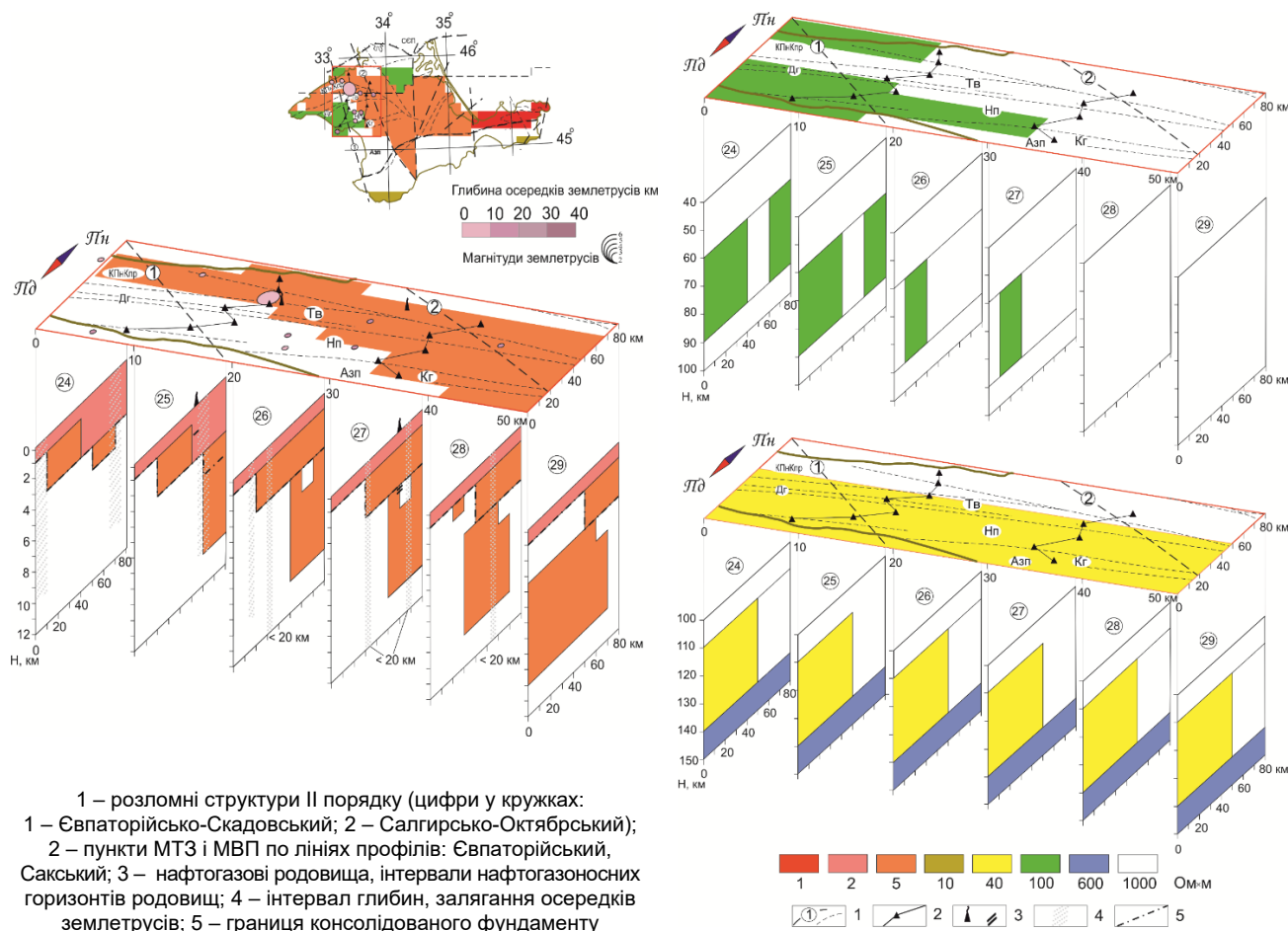


Рис. 1. Вертикальні розрізи 3D моделі розподілу питомого опору Кримського регіону вздовж пр. Євпаторійський і Сакський

Під максимальним зануренням фундаменту до 5 км (ПК 50–70 км), що проявився на границі Тв та півдня КПНКпр геоелектричного розрізу вздовж пр. 24, виявлено аномалію електропровідності завширшки 20 км в інтервалі глибин 5–10 км з $\rho = 5$ Ом·м. Тобто аномалія гальванічно пов'язана з осадовими відкладами.

Глибше потужністю близько 50 км розташований однорідний шар з питомим опором $\rho = 1000$ Ом·м ("нормальний опір"). Нижче за нього, починаючи з глибин 60 км, у верхній мантії за результатами моделювання виділено декілька перемежованих неоднорідних шарів. Перший – 60–90 км, характеризується послідовністю зон низького питомого опору ($\rho = 100$ Ом·м) на фоні нормального опору. Південна зона (ПК 0–40 км) територіально приурочена до півночі Азп та обмежується Дг. Північна зона (ПК 60–80 км) – розташована в межах КПНКпр, її осьова

частина відповідає північній границі аномалії в земній корі. Другий шар (110–140 км) виділяється контактом питомих опорів $\rho = 40$ та 1000 Ом·м, який просторово розташований поміж аномальними зонами першого неоднорідного шару у верхній мантії та південній границі аномалії в земній корі.

Прояви сейсмічності в геоелектрично-неоднорідних зонах вздовж пр. 24 спостерігаються на ПК 0–10 км та 65–75 км. Саме для цих ділянок характерна розшарованість у земній корі та верхній мантії. Так ПК 0–10 км характеризуються сходинкоподібним зануренням глибини фундаменту амплітудою 2,5 км, контактом осадових відкладів ($\rho = 5$ Ом·м) та консолідованої товщі ($\rho = 1000$ Ом·м), а у верхній мантії – вертикальною перемежованістю провідників. На ПК 65–75 км проявляється підняття фундаменту амплітудою 1,5 км, контактом за $\rho = 5/1000$ Ом·м

в інтервалі глибин 3,5–10 км (за рахунок аномалії електропровідності в земній корі) та локальної неоднорідності у верхній мантії.

Південна частина аномалії електропровідності в консолідованій земній корі, що гальванічно пов'язана з осадовими відкладами, проявилася на ПК > 60 км (південь КПНКпр) геоелектричного розрізу вздовж пр. 25: інтервал глибин 5–10 км, $\rho=5$ Ом·м. Звернемо увагу, що на пр. 24 та 25 аномалія характеризується складною просторовою структурою: по-перше, звуженням до 20 км у субмеридіональному напрямку (максимальна ширина понад 80 км наявна в районі поміж Салгирсько-Октябрським та Чонгарським розломами); по-друге, різкою зміною напрямку телуричних струмів від південного заходу до північного та від північного до південного сходу (загальний напрямок аномалії – субширотний).

Глибше за 10 км розподіл геоелектричних неоднорідностей аналогічний глибинному розрізу пр. 24. Необхідно підкреслити, що на пр. 25 південна границя аномалії електропровідності в земній корі зміщується на північ на 10 км, унаслідок чого вона збігається з південною границею північної зони у верхній мантії.

Євпаторійсько-Скадовський розлом, який трасується на ПК 0–40 км пр. 25 та на ПК 40–80 км пр. 24, не проявився єдиною аномальною електропровідною структурою. Не зважаючи на складний розподіл ρ вздовж розлому і виявлені на різних рівнях в земній корі та у верхній мантії геоелектричні неоднорідності, просторово аномалії відповідають структурним одиницям більш високого рангу. Але осередки землетрусів, що концентруються вздовж материкової частини Євпаторійсько-Скадовського розлому з різних його сторін на відстані близько 10 км, відповідають тим його ділянкам, де існують границі аномалій електропровідності в земній корі (пр. 24 ПК 0–10 км та 65–75 км, пр. 25 ПК 55–65 км, пр. 26 ПК 20–30 км та 35–45 км).

Отже, прояви сейсмічності вздовж пр. 25 спостерігаються в межах ПК 55–65 км, що знаходяться в геоелектрично-неоднорідних зонах. Вогнища землетрусів тяжіють до південних границь аномалій в земній корі та верхній мантії, тобто до контактних областей питомих опорів 5/1000 Ом·м в інтервалі глибин 5–10 км, 100/1000 Ом·м в інтервалі глибин 60–90 км, та загальним контактам нормальних геоелектричних розрізів СЄП та СП – 1000/40 Ом·м в інтервалі глибин 110–140 км. Згідно з роботою (Пустовитенко *и др.*, 2019) характерна глибина осередків землетрусів сейсмічного району Степового Криму становить 5–7 км та відповідає верхній частині аномалії електропровідності в консолідованій земній корі і встановлений розшаруватості земних надр.

Геоелектричні розрізи вздовж пр. 26 та 27 схожі між собою. Південна границя аномалії електропровідності ($\rho = 5$ Ом·м в інтервалі глибин 3,5–10 км) у консолідованій земній корі мігрує на південь та спостерігається на ПК 50 км пр. 26 та ПК 40 км пр. 27. Аномалія розширюється на схід та має гальванічний зв'язок з електропровідними осадовими товщами ($\rho = 2$ –5 Ом·м). У межах аномалії залишається останець високого опору на глибинах 3,5–5 км із загальними просторовими розмірами 10×40 км.

Глибше за 10 км перемижуються однорідні та неоднорідні за питомим опором шари: 1) однорідний шар в інтервалі глибин 10–60 км з $\rho = 1000$ Ом·м; 2) неоднорідний шар в інтервалі глибин 60–90 км з $\rho = 100$ та 1000 Ом·м, у якому виділена тільки одна ділянка низького опору у верхній частині верхньої мантії, яка

просторово відповідає перехідній поміж Кг та Нп зони за ширини 20 км; 3) однорідний шар в інтервалі глибин 90–110 км з $\rho = 1000$ Ом·м; 4) неоднорідний шар в інтервалі глибин 110–140 км з наявним у ньому контактом областей питомих опорів 40 та 1000 Ом·м, що відповідає різним ρ нормальних геоелектричних розрізів різновікових структур СП та СЄП; 5) горизонтально-шаруватий нормальний розріз.

Прояви сейсмічності спостерігаються в геоелектрично-неоднорідних зонах вздовж пр. 26 в інтервалах ПК 10–20 км та 30–35 км, а також вздовж пр. 27 в інтервалах ПК 25–35 км та 65–70 км.

Вогнища землетрусів поглиблюються на схід та майже всі тяжіють до консолідованих ділянок в околі контактів різних за питомими опорами ($\rho = 5/1000$ Ом·м) областей, які проявилися як у приповерхневих шарах, так і в неоднорідних за електропровідністю зонах на глибинах 3,5–10 км. Виключенням є землетруси, розташовані в зоні глибинного Салгирсько-Октябрського розлому, який можна вважати західною границею повномасштабної аномалії Кримського регіону в земній корі на глибинах 3,5–10 км. Сама ділянка розлому є неоднорідною та складається з різних за питомими опорами фрагментів. Більшість проявів сейсмічної активності спостережено саме в місцях контактів $\rho = 100/1000$ Ом·м в інтервалі глибин 60–90 км. Отже, цілком обґрунтовано зробити висновок про те, що напружено-деформаційний стан розшарованих земних надр у межах території досліджень значною мірою пов'язаний з її геоелектрично-неоднорідною будовою, установленною за даними тривимірного моделювання.

Зупинимось на аналізі геоелектричних розрізів вздовж пр. 28 та 29. Південна границя аномалії електропровідності ($\rho = 5$ Ом·м в інтервалі глибин 3,5–10 км) у консолідованій земній корі продовжує мігрувати на південь, де спостерігається на ПК 30 пр. 27 та ПК 10 пр. 29. Аномалія також розширюється в східному напрямку, водночас на даній території вона тільки частково (10–20 км при загальній ширині 40–60 км) має гальванічний зв'язок з низькоопорними електропровідними осадовими товщами ($\rho = 5$ Ом·м).

Прояви сейсмічності спостерігаються вздовж пр. 28 на ПК 50–00 км і пр. 29 на ПК 0–10 км. Як і в попередньому випадку, вогнища землетрусів розташовані в зоні глибинного Салгирсько-Октябрського розлому до глибин 20 км. Розлом простежується на південь і в межах Ялтинсько-Алуштинського сейсмічного району розглядається як активна структура, з якою пов'язані найпотужніші ($M = 5$ в акваторії Чорного моря) прояви сейсмічних подій, що сягають глибин понад 40 км.

Як стверджує робота (Доленко *и др.*, 1967), у межах Євпаторійсько-Новоселівського підняття нижньокрейдові відклади, що є найбільш перспективними на вміст у них вуглеводнів на всій території Криму, залягають на невеликих глибинах, що створює несприятливі гідрогеологічні умови для утворення нафти та газу. На території дослідження відомі лише Тетянівське (пр. 27 в районі ПК 55–60) та Серебрянське (пр. 25 в районі ПК 50–55) вуглеводневі родовища, приурочені до Серебрянської депресії КПНКпр. Промислові поклади відповідають двом горизонтальним нижньої та верхньої крейди. Як описано у роботі (Кушнір *та Бурахович*, 2021), родовища можуть бути приурочені до локальної ділянки високого опору, розташованої в межах аномалії високої електропровідності.

Отримана за тривимірною моделлю вертикальна перемешованість високого та низького опору може пояснюватися наявністю каналів, гальванічно пов'язаних з осадовими утвореннями, які є можливими шляхами надходження глибинної вуглеводневої речовини. Це підтверджується й присутністю неоднорідних провідників у верхах верхньої мантії, розташованими саме під вертикальними каналами в земній корі. З іншого боку, у місцях, де відсутні геоелектричні неоднорідності на глибинах 60–90 км (пр. 28–29), умови для надходження глибинних флюїдів несприятливі.

Висновки. Виконано інтерпретацію частини глибинної тривимірної геоелектричної моделі Кримського регіону в межах Сакського та Євпаторійського профілів, побудованої за результатами тривимірного математичного моделювання на основі експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, які були проведені у 2012 р. Інститутом геофізики ім. С.І. Суботіна Національної академії наук України.

Основним результатом аналізу є виявлення вертикальної та горизонтальної перемешованості високого та низького опору як у земній корі, так і у верхній мантії, отже, наявності зон контактів за опором та відповідно можливих шляхів проникності для глибинних флюїдів. Аномальні зони проявляються різною електропровідністю і глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують геологічні структури.

Можна впевнено стверджувати про різний глибинний розподіл електропровідності в межах таких розломних структур, як Євпаторійсько-Скадовська та Салгирсько-Октябрська. Якщо Салгирсько-Октябрський розлом на всьому простяганні в межах материкової частини проявляється в аномальній електропровідності у верхній частині консолідованої земної кори, то Євпаторійсько-Скадовський тільки фрагментарно, а саме – у межах південної частини Каркінітсько-Північнокримського прогину. Відсутнє єдине уявлення про розподіл опору на мантійних глибинах під цими розломними структурами. Іноді спостерігається повна відсутність будь-яких неоднорідностей; подекуди присутні зони лише контактів або неоднорідностей на одному з глибинних мантійних інтервалів, чи загальна перемешованість опору у верхній мантії.

На незначній за розмірами досліджуваній території (80×60 км) виявлено значну кількість геоелектричних неоднорідностей або їх фрагментів на різних глибинах у верхній мантії. Такий результат підтверджується даними інтерпретації інших геофізичних методів. Зокрема, виявлено субгоризонтальну відбивну межу на глибині ~60 км, що приблизно на 25 км нижче поверхні Мохо по лінії профілю DOBRE-5 (Starostenko et al., 2015). На глибині 80 км зареєстровано аномальне зниження швидкості поширення поздовжніх хвиль уздовж V профілю ГСЗ. Вся досліджувана територія характеризується неоднорідним розподілом та високими значеннями теплових потоків (50–70 мВт/м²) (Кутас, 2010). Найбільші значення відповідають саме місцям поширення аномалій електропровідності у верхній мантії. Параметри співвідношень ізотопів ³He/⁴He свідчать про аномальну активну міграцію глибинних флюїдів (Гордиєнко і Тарасов, 2001). Отже, зіставлення результатів тривимірного моделювання електромагнітних даних з відміченими геофізичними особливостями території досліджень дають підстави для висновку про те, що наявність електричної неоднорідності корових та мантійних високопровідних

шарів і зон контактів є опосередкованими ознаками сприятливих умов для міграції глибинних флюїдів.

З урахуванням регіональних сейсмотектонічних умов виділена Донузлавська сейсмогенеруюча структура з $M_{\max} = 4$ (Пустовитенко і Мержа, 2014). Вогнища землетрусів Криму розташовуються переважно в земній корі, де максимальні їх глибини не перевищують 60 км (Кульчицкий і др., 2017). Такі висновки відповідають загальноприйнятим твердженням, що осередки землетрусів концентруються на глибинах вище верхньої кромки аномалій електропровідності, за межами та поміж аномаліями електропровідності в консолідованих породах земної кори. Сучасний стан земної кори й верхньої мантії та, ймовірно, шляхи міграції сучасних мантійних флюїдів відображаються в геоелектричних неоднорідностях та пов'язаних з ними проявах геодинамічної активності.

Розглянутий матеріал упевнено свідчить про приуроченість проявів вуглеводнів до виділень за даними геоелектромагнітного зондування та тривимірного моделювання аномалій високої електропровідності, які характеризуються наявністю субвертикальних каналів, гальванічно пов'язаних з осадовими відкладами, розшаруватістю в земній корі та верхній мантії, яка може сприяти надходженням надглибоких флюїдів.

Публікація містить результати досліджень за прикладною темою Інституту геофізики НАН України № III-16-20: "Геофізичне дослідження літосфери південного заходу Східноєвропейської платформи та її обрамлення у зв'язку з глибинною дегазацією з метою виявлення шляхів міграції флюїдів" (2020–2022 рр.).

Список використаних джерел

- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Николаев, И.Ю., Шермет, Е. М., Ширков, Б. И. (2016). Результаты экспериментальных электромагнитных исследований Крымского региона. *Геофизический журнал*, 2(38), 57–78.
- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Цветкова, Т.О., Шумлянська, Л.О. (2013). Комплексна інтерпретація сейсмотомографічних та геоелектричних моделей для оцінки геодинамічних процесів у літосфері Криму. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, 13(2), 12–26.
- Гордиенко, В.В., Тарасов, В.Н. (2001). Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Київ: Знання.
- Гуфельд, И.Л. (2007). Сейсмический процесс. Физикохимические аспекты. Королев: ЦНИИМаш.
- Гуфельд, И.Л. (2013). О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии. *Электронный журнал "Глубинная нефть"*, 1(1), 18–44.
- Доленко, Г.Н., Парыляк, А.И., Копач, И.П. (1967). Структурно-тектонические этапы нефтегазоносности Крымской нефтегазоносной провинции. *Республиканский межведомственный сборник "Геология и нефтегазоносность Причерноморской впадины"*. Киев: Наукова Думка, 5–15.
- Кузин, А.М. (2018). Дегазация Земли – от землетрясений до образования месторождений полезных ископаемых флюидного генезиса. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 4(23), 1–16.
- Кульчицкий, В.Е., Пустовитенко, Б.Г., Свидлова, В.А. (2017). О глубинах очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Вопросы инженерной сейсмологии*, 44(3), 57–82.
- Кушнір А. М. (2019). Геоелектричні неоднорідності земної кори та верхньої мантії території України. *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.22*. Київ.
- Кушнір, А.М., Бурахович, Т. К. (2021). Геоелектричні неоднорідності Кримського регіону як зони проявів сейсмічності та нафтогазоносності. *Геофизический журнал*, 43(1), у друці.
- Летников, Ф.А. (2003). Сверхглубинные флюидные системы Земли. *Докл. РАН*, 390(5), 673–675.
- Лукин, А.Е. (2003). Изотопно-геохимические индикаторы углекислой и углеводородной дегазации в Азово-Черноморском регионе. *Геологический журнал*, 1, 59–73.
- Лукин, А.Е. (2014). Углеводородный потенциал больших глубин и перспективы его освоения в Украине. *Геофизический журнал*, 4(36), 3–23.
- Лукин, А.Е. (2015). Система "плум – глубокозалегающие сегменты нефтегазоносных бассейнов" – неисчерпаемый источник углеводородов. *Геологический журнал*, 2(315), 7–20.
- Порфирьев, В.Б., Краюшкин, В.А., Ключко, В.П. (1981). Геологические критерии перспектив поиска нефти и газа в гетерогенном фундаменте причерноморско-крымской нефтегазоносной области. *Геологический журнал*, 41(1), 38–47.

Пустовитенко, Б.Г., Свидлова, В.А., Князева, В.С., Бондарь, М.Н. (2019). Крымско-Черноморский регион. Землетрясения Северной Евразии, 22 (2013 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 44-55.

Шеремет, Е. М., Бурахович, Т. К., Николаев, И. Ю., Дудик, А. М., Дудик, К. А., Кушнир, А. Н., Ширков, Б. И., Сетая, Л. Д., Агаркова, Н. Г. (2016). Геоэлектрические и геохимические исследования при прогнозировании углеводородов в Украине. Киев: ЦП "Компринт".

Шестопапов, В.М., Лукин, А.Е., Згонник, В.А., Макаренко, А.Н., Ларин, Н.В., Богуславский, А.С. Очерки дегазации Земли. Киев: БАДАТА-Интер сервис.

Mackie, R.L., Smith, J.T., Madden, T.R. (1994). Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923-935.

Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Faruliak, L., Czuba, W., Šroda, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406-428.

References

Burakhovych, T.K., Kushnir, A.M., Nikolayev, I.Yu., Sheremet, Ye.M., Shirkov, B.I. (2016). Rezul'taty eksperimental'nykh elektromagnitnykh issledovaniy Krymskogo regiona. *Geofizicheskij zhurnal*, 2(38), 57-78. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107765>. [in Russian]

Burakhovych, T.K., Kushnir, A.M., Tsvetkova, T.O., Shumlyanska, L.O. (2013). Kompleksna interpretacija sejsmotomografičnykh ta gheoelektryčnykh modelej dlja ocinky gheodynamichnykh procesiv u litosferi Krymu. *Naukovi praci UkrNDMI NAN Ukraine*, 13(2), 12-26. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57239> [in Russian]

Dolenko, G.N., Parylyak, A.I., Kopach, I.P. (1967). Strukturno-tektonicheskie etazhi neftegazonosnosti Krymskoy neftegazonosnoy provintsii. *Respublikanskij mezhdostvennyy sbornik "Geologiya i neftegazonosnost' Prichernomorskoy vpadiny"*. Kyiv: Naukova Dumka, 5-15. [in Russian]

Gordienko, V.V., Tarasov, V.N. (2001). Sovremennaya aktivizatsiya i izotopnaya geliya territorii Ukrainy. Kyiv: Znannya. [in Russian]

Gufeld, I.L. (2007). Seismicheskiy protsess. Fizikokhimicheskie aspekty. Korolev: TsNIIIMash. [in Russian]

Gufeld, I.L. (2013). O glubinnoy degazatsii i strukture litosfery i verkhney mantii. *Elektronnyy zhurnal "Glubinnaya neft"*, 1(1), 18-44. [in Russian]

Kulchitskiy, V.E., Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A. (2017). O glubinakh ochagov zemletryaseniy Krymsko-Chernomorskogo regiona. *Voprosy inzhenernoy seysmologii*, 44(3), 57-82. DOI: 10.21455/VIS2017.3.4 [in Russian]

Kushnir, A.M. (2019). Gheoelektrychni neodnorodnosti zemnoji kory ta verkhnoji mantiji terytoriji Ukrainy. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.)*: 04.00.22. Kyiv. [in Ukrainian]

Kushnir, A.M., Burakhovych, T.K. (2021). Gheoelektrychni neodnorodnosti Krymskogo regionu jak zony projaviv sejsmichnosti ta naftogazonosnosti. *Geofizicheskij zhurnal*, 43(1), in print. [in Ukrainian]

Kuzin, A.M. (2018). Degazatsiya Zemli – ot zemletryaseniy do obrazovaniya mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh flyuidnogo genezisa. *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 4(23), 1-16. DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art36 [in Russian]

Letnikov, F.A. (2003). Sverkhglubinnye flyuidnye sistemy Zemli. *Dokl. RAN*, 390(5), 673-675. [in Russian]

Lukin, A.E. (2003). Izotopno-geokhimicheskie indikatory uglekislou i uglevodorodnoy degazatsii v Azovo-Chernomorskom regione. *Gheologicheskij zhurnal*, 1, 59-73. [in Russian]

Lukin, A.E. (2014). Uglevodorodnyy potentsial bol'shikh glubin i perspektivy ego osvoiniya v Ukraine. *Geofizicheskij zhurnal*, 4(36), 3-23. [in Russian]

Lukin, A.E. (2015). Sistema "plyum – glubokozalegayushchie segmenty neftegazonosnykh basseynov" – neischerpaemyy istochnik uglevodorodov. *Gheologicheskij zhurnal*, 2(315), 7-20. [in Russian]

Mackie, R.L., Smith, J.T., Madden, T.R. (1994). Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923-935.

Porfiriev, V.B., Krayushkin, V.A., Klochko, V.P. (1981). Geologicheskie kriterii perspektiv poiska nefti i gaza v geterogennom fundamente prichernomorskoy krymskoy neftegazonosnoy oblasti. *Geologicheskij zhurnal*, 41(1), 38-47. [in Russian]

Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A., Knyazeva, V.S., Bondar, M.N. (2019). Krymsko-Chernomorskij region. Zemletryaseniya Severnoy Evrazii, 22 (2013 g.). Obninsk: FITS EGS RAN, 44-55. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.03 [in Russian]

Sheremet, E.M., Burakhovych, T.K., Nikolaev, I.Yu., Dudik, A.M., Dudik, K.A., Kushnir, A.N., Shirkov, B.I., Setaya, L.D., Agarkova, N.G. (2016). Gheoelektricheskie i geokhimicheskie issledovaniya pri prognozirovanii uglevodorodov v Ukraine. Kyiv: TsP "Komprint". [in Russian]

Shestoapalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnik, V.A., Makarenko, A.N., Larin, N.V., Boguslavsky, A.S. Ocherki degazatsii Zemli. Kyiv: BADATA-Intek servis. [in Russian]

Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Faruliak, L., Czuba, W., Šroda, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406-428. doi:10.1093/gji/ggv018.

Надійшла до редколегії 17.08.21

T. Burakhovich, Dr. Sci. (Geol.),

E-mail: burahovich@ukr.net;

A. Kushnir, Dr. Sci. (Geol.),

E-mail: antonn@ukr.net;

V. Iliencko, PhD (Geol.),

E-mail: ivageophysicist@gmail.com;

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,

32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

INTERPRETATION OF THE 3D GEOELECTRICAL MODEL OF THE STEPPE CRIMEA BOWELS. EUPATORIA AND SAKI PROFILES

The interpretation of the segment of the deep three-dimensional Crimean region geoelectrical model within the Saki and Yevpatoria profiles, built on the basis of the Earth's low-frequency electromagnetic field experimental observations, was obtained in 2012 by the INSTITUTE OF GEOPHYSICS named after S.I. Subbotin.

The main result of the analysis is the identification of vertical and horizontal alternation of high and low resistivity, both in the earth's crust and in the upper mantle. It is shown that the geoelectrical sections along all the profile sections of the model are characterized by a dip to the north of the consolidated basement surface depth and, accordingly, an increase of the near-surface layer conductivity. The conductivity anomaly in the consolidated earth's crust was revealed in the depth interval of 5-10 km with resistivity (ρ) of 5 Ohm·m, galvanically connected with the sedimentary cover. Deeper than 10 km, homogeneous and inhomogeneous layers in ρ alternate: 10-60 km with $\rho = 1000$ Ohm·m; 60-90 km with $\rho = 100$ and 1000 Ohm·m; 90-110 km with $\rho = 1000$ Ohm·m; 110-140 km with $\rho = 40$ and 1000 Ohm·m, the contact corresponds to the different ρ of normal geoelectrical sections of different-aged structures of the Scythian plate and the East European platform; also horizontally layered normal section.

It has been analyzed that earthquake sources of the Steppe Crimea seismic region are concentrated in geoelectrically inhomogeneous zones and tend to contact structures with ρ differ - above the upper margin, outside and between the conductivity anomalies in the consolidated rocks of the earth's crust. The considered material confidently indicates the confinement of hydrocarbon manifestations to the high electrical conductivity anomalies identified according to the data of geoelectromagnetical sounding and three-dimensional modeling, which are characterized by subvertical channels galvanically connected with sedimentary deposits, and layering in the earth's crust and upper mantle. Geoelectrical inhomogeneities, which reflect the current state of the earth's crust and upper mantle and are probably due to the influence of modern mantle fluids, correspond to manifestations of seismicity and hydrocarbon content.

Keywords: geoelectromagnetical methods, three-dimensional model interpretation, conductivity anomalies, seismicity.

Т. Бурахович, д-р геол. наук,
E-mail: burahovich@ukr.net;
А. Кушнир, д-р геол. наук,
E-mail: antonn@ukr.net;
В. Ильенко, канд. геол. наук,
E-mail: ivageophysicist@gmail.com;
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
просп. Академика Палладина 32, г. Киев, 03680, Украина

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ 3D ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕДР СТЕПНОГО КРЫМА. ЕВПАТОРИЙСКИЙ И САКСКИЙ ПРОФИЛИ

Проведена интерпретация части глубинной трехмерной геоэлектрической модели Крымского региона в пределах Сакского и Евпаторийского профилей, построенной по данным экспериментальных наблюдений низкочастотного электромагнитного поля Земли, полученных в 2012 г. Институтом геофизики им. С.И. Субботина Национальной академии наук Украины.

Основным результатом анализа является выделение вертикального и горизонтального чередования высокого и низкого удельного сопротивления как в земной коре, так и в верхней мантии. Показано, что геоэлектрические разрезы по всем профильным срезам модели характеризуются погружением на север глубины поверхности консолидированного фундамента и, соответственно, увеличением суммарной продольной проводимости приповерхностных слоев. Выявлено аномалию электропроводности в консолидированной земной коре в интервале глубин 5–10 км с удельным электрическим сопротивлением (ρ) 5 Ом·м, гальванически связанную с осадочными отложениями. Глубже 10 км чередуются однородные и неоднородные по ρ слои: 10–60 км с $\rho = 1000$ Ом·м; 60–90 км с $\rho = 100$ и 1000 Ом·м; 90–110 км с $\rho = 1000$ Ом·м; 110–140 км с $\rho = 40$ и 1000 Ом·м, контакт соответствует различным ρ нормальных геоэлектрических разрезов разновозрастных структур Скифской плиты и Восточно-Европейской платформы; горизонтально-слоистый нормальный разрез.

Проанализировано, что очаги землетрясений сейсмического района Степного Крыма концентрируются в геоэлектрически-неоднородных зонах и тяготеют к контактам с ρ – выше верхней кромки, за пределами и между аномалиями электропроводности в консолидированных породах земной коры. Рассмотренный материал уверенно свидетельствует о приуроченности проявлений углеводородов к выделенным по данным геоэлектромагнитного зондирования и трехмерного моделирования аномалиям высокой электропроводности, которые характеризуются субвертикальными каналами, гальванически связанными с осадочными отложениями, и расслоенностью в земной коре и верхней мантии. Геоэлектрические неоднородности, которые отражают современное состояние земной коры и верхней мантии и вероятно обусловлены влиянием современных мантийных флюидов, соответствуют проявлениям сейсмичности и нефтегазоносности.

Ключевые слова: геоэлектромагнитные методы, интерпретация трехмерной модели, аномалии электропроводности, сейсмичность.

УДК 553.982.22:553.981.2:551.87
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.05>

Х. Мухтарова, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru;
Г. Насибова, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
М. Исмаилова, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mexribani@inbox.ru;

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
просп. Азадлыг, 34, г. Баку, AZE1010, Азербайджан

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ И ИЗУЧЕНИЕ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЕВЛАХ-АГДЖАБЕДИНСКОГО ПРОГИБА

(Представлено членом редакційної колегії канд. геол. наук, ст. наук. сотр. І.М. Безродною)

Цель исследования – обосновать перспективность нефтегазоносности верхнемеловых эффузивных и карбонатных отложений путем изучения их коллекторских параметров.

Ранее проведенными исследованиями было установлено, что в геологическом строении структуры Мурадханлы участвует осадочный комплекс, в литологическом плане представленный глинами, алевролитами, песками и песчаниками, доломитами, известняками, туфами, порфиритами верхнемелового возраста. Так как данный литофациальный состав разреза может выступать в качестве коллектора, по всей территории были всесторонне изучены вулканогенные песчанистые туфы, аргиллиты и плотные песчаники, а также карбонаты верхнемелового возраста. Было выявлено, что карбонаты имеют различную степень уплотненности и подразделяются на три группы: слабо-, средне- и сильно уплотнённые, и это, в свою очередь, оказывает немалое влияние на пористость породы.

В начале исследования коллекторские особенности мезокайнозойских отложений в Евлах-Агджабединской впадине (ЕАВ) изучались на основе терригенных пород, которые относятся к кайнозою. В наших же исследованиях были изучены меловые отложения, которые представлены карбонатными и эффузивными породами, обладающими вторичными коллекторскими свойствами.

Коллекторские свойства меловых отложений по площадям ЕАВ были изучены на основе исследований образцов керна в лабораторных условиях. Установлено, что коллекторы исследуемой площади являются карбонатными, вулканогенными и вулканогенно-осадочными, то есть состоят в основном из трещиноватых известняков, мергелей и доломитов. Исследования показали, что нефтегазоносность впадины связана преимущественно с карбонатными и эффузивными коллекторами. Для оценки перспектив нефтеносности ЕАВ с точки зрения коллекторских свойств были изучены геологические разрезы ряда структур, и на основе полученных по образцам керна в лабораторных условиях данных с помощью программы "Surfer" были составлены карты Тренда. Анализ карт позволяет выделить соответствующие зоны карбонатности, проницаемости, пористости, характеризующиеся высокими, средними и низкими значениями. По показателям карбонатности изучаемая территория не имеет строгой закономерности в ее распределении, а по данным распределения проницаемости делится на две зоны: северную, характеризующуюся средними значениями, и южную – с низкими значениями параметра. Между значениями карбонатности и низкими значениями проницаемости в определенной степени наблюдается закономерность, и это можно объяснить вторичным преобразованием коллекторских свойств карбонатных пород, в результате которых изменились проницаемость и пористость. Распределение пористости в некоторой степени соответствует распределению проницаемости. Обратную зависимость между значениями пористости и проницаемости можно объяснить заполнением пустот цементирующим материалом в среде, в которой формировались породы.

В настоящее время для продолжения поисково-разведочных и буровых работ проводятся комплексные геолого-геофизические исследования, в результате которых сопоставление полученных данных даст возможность более детально оценить перспективность каждой структуры.

Ключевые слова: мощность, керн, мезозой, карбонатность, пористость, проницаемость, перспективность.

Введение. Перспективы нефтегазоносности Евлах-Агджабединской впадины (ЕАВ) связаны в основном с мезозойскими и палеоген-миоценовыми отложениями, геологический разрез которых характеризуется многочисленными нефтегазогенерирующими свитами, зонами нефтегазоаккумуляции, большой мощностью и высоким углеводородным потенциалом. Интенсивные нефтегазопрооявления и полученные из скважин промышленные притоки, наблюдаемые в карбонатных, вулканогенно-осадочных и вулканогенных коллекторах мезозойского и палеоген-миоценового возраста на ряде поднятий ЕАВ, дают основание предполагать перспективность этих отложений и на других площадях впадины (Алиев и др., 2005).

В процессе исследования территории были проведены анализы многочисленных образцов осадочных и магматических пород, изучены и интерпретированы их коллекторские свойства.

Бурение и разведочные работы в отложениях верхнего мела в ЕАВ были проведены на площадях: Бейлаган, Тертер, Советлы, Джарлы, Сорсор, Гараджалы, Мурадханлы, Миль, Зардаб, Амиарх и др. Однако, необходимо отметить, что нефтяные залежи были обнаружены только на площадях Мурадханлы и Зардаб (рис. 1) (Рахманов, 2007; Мухтарова, 2002).

Анализ последних исследований и публикаций.

Исследованиями установлено, что осадочный комплекс, участвующий в геологическом строении структуры Мурадханлы, литологически представлен глинами, алевролитами, песками и песчаниками, доломитами, известняками, туфами, порфиритами верхнемелового возраста. Указанный литофациальный состав разреза имеет большой потенциал в качестве коллектора. Вулканогенные песчанистые туфы, аргиллиты и плотные песчаники верхнемелового возраста всесторонне изученные по всей территории достигают мощности 2000 м. Было установлено, что порфириты верхнемелового возраста имеют различную степень уплотненности и подразделяются на три группы: слабо-, средне- и сильно уплотнённые, что, в свою очередь, оказывает влияние на пористость породы (Салманов и Юсифов, 2013; Халимов, 2012).

В отличие от Мурадханлинского месторождения, интенсивные нефтегазопрооявления на площади Зардаб наблюдались в эоцен-верхнемеловых отложениях. Верхнемеловые коллекторы состоят из туфогенно-осадочных (туфы, туфобрекчии, аргиллиты, мергели, известняки) и эффузивных (порфириты, пироксеновые порфириты, андезиты) пород, а эоценовые – из

© Мухтарова Х., Насибова Г., Исмаилова М., 2021

неравномерного чередования глин с прослойками глинистых песчаников, доломитов, мергелей с известняками, туфами (Салманов и Юсифов, 2012).

Несмотря на проведенные исследования, перспективность многих площадей исследуемой территории не была оценена должным образом.



Рис. 1. Евлах-Агджабединская впадина (Мухтарова, 2002).

Структурно-тектоническая карта по поверхности мезозойских отложений.

Тектонические нарушения: 1 – Предмалокавказское; 2 – Южнокуринское; 3 – Мингечаур-Саатлинское; 4 – Удобно-Геокчайское; 5 – Кюровад-Нефтахалинское; 6 – Имишли-Габалинское; 7 – Нижнекуринское; 8 – Гызылбогаз-Девечинское; 9 – Арпа-Самурское; 10 – Гянджачай-Ганыхское. **Локальные поднятия:** 1 – гемиянтиклиналь Бозйери, 2 – Бозйери, 3 – Далимамедли, 4 – Газанбулаг, 5 – Боздаг, 6 – Гызылхаджылы, 7 – Барда, 8 – гемиянтиклиналь Барда, 9 – Гушчу, 10 – Хархунлу, 11 – Амирах, 12 – Уджар, 13 – Зардаб, 14 – Джаллы, 15 – Гасанлы, 16 – Миль, 17 – Мюсюлю, 18 – Гараджаллы, 19 – Газанбулаг, 20 – Сорсор, 21 – Джаллы

Ранее нерешенные проблемы и цели статьи. Коллекторские особенности мезо-кайнозойских осадков в ЕАВ изучались в основном на основе терригенных пород (которые относятся к кайнозою) в самом начале исследований (Хеиров и Касумова, 2000). Мы же исследовали меловые отложения, представленные эффузивными и карбонатными породами, обладающими вторичными коллекторскими свойствами. Обоснование перспектив нефтегазоносности верхнемеловых эффузивных и карбонатных отложений на основе изучения их коллекторских параметров является основной целью исследования.

Наряду с указанными площадями Мурадханлы и Зардаб ЕАВ, изменения мощности и литологического состава верхнемеловых отложений также изучены и на большинстве других площадей впадины на основе данных, полученных при бурении скважин и анализе керновых материалов (табл. 1, рис. 2). Исследование по площади показало, что в ЕАВ верхнемеловые отложения были вскрыты почти на всех структурах, и в скважинах, пробуренных в этих отложениях, были зафиксированы многочисленные нефтегазопоявления как в процессе бурения, так и опробования (Klosterman et al., 1997).

Следует отметить, что на примере мезозойских отложений нефтегазовых месторождений ЕАВ в основном изучались типы ловушек и формирование месторождений, коллекторские свойства были рассмотрены не полностью, и поэтому их изучение требует более детального подхода (Хеиров и Халилов, 2000).

Результаты научных исследований. Коллекторские свойства меловых отложений по площадям ЕАВ были изучены на основе исследований образцов керна в лабораторных условиях (табл. 1). Было установлено, что коллекторы исследуемой территории являются

карбонатными, вулканогенными и вулканогенно-осадочными, то есть состоят в основном из трещиноватых известняков, мергелей и доломитов (Мухтарова, 2001).

Исследования показали, что нефтегазоносность впадины связана преимущественно с карбонатными и эффузивными коллекторами. Коллекторские свойства пород играют значительную роль и при оценке нефтегазоносности, и при выборе правильного направления поисково-разведочных работ на перспективных площадях. Следует отметить, что разрез верхнемеловых отложений исследуемой территории сложен трещиноватыми карбонатами и выветренными эффузивами, которые несогласно перекрываются эоценовыми отложениями (Исмаилова, 2017).

Полученные из эффузивных пород верхнего мела фонтаны нефти с очень высокими дебитами таковы: 70 т/сут. на площади Мурадханлы, 11.5 т/сут. – Зардаб, 2 т/сут. – Газанбулаг и 18 т/сут. – Советляр (рис. 2). Это говорит о том, что данные коллекторы обладают большой емкостью и фильтрационной способностью, связанной макро- и микротрещинами, стилолитовыми швами, вторичной пористостью, что и создает основу для продолжения исследований (Мухтарова, 2002). Расположение названных структур охватывает всю ЕАВ, и этот факт также дает возможность высоко оценить перспективы нефтегазоносности всей исследуемой территории.

Для более достоверной оценки перспектив нефтегазоносности ЕАВ были изучены геологические разрезы с точки зрения коллекторских свойств ряда структур, и на основе полученных данных с помощью программы "Surfer" были составлены карты Тренда. Анализ карт позволяет выделить соответствующие зоны карбонатности, проницаемости, пористости, характеризующиеся высокими, средними и низкими значениями.

Таблица 1

Изменения коллекторских параметров меловых отложений по отдельным структурам ЕАВ (Исмаилова, 2017)

№	Площадь	Количество образцов	Карбонатность, %	Пористость, %	Проницаемость, 10^{-15} м^2
1	Агджабеди	18	14,5	4,7	0,9
2	Советляр	21	39,9	7,1	1,65
3	Бейлеган	15	61,2	9,8	3,4
4	Гараджаллы	17	66,9	2,9	7,8
5	Сорсор	16	45,8	6,4	8,7
6	Зардаб	24	13,2	9,8	1,6
7	Джарлы	23	44,1	10,7	1,7
8	Мурадханлы	26	18,4	11,2	1,98
9	Миль	21	71,2	8,2	0,2
10	Амирарх	16	66,0	11,1	1,8
11	Герби Амирарх	14	20,0	14,0	2,5
12	Борсунлу	18	13,4	7,0	6,1
13	Газанбулаг	14	14,8	7,7	6,6
14	Тертер	13	36,5	3,6	3,0
15	Гюллюджа	19	64,2	12,9	0,9
16	Далимамедли	18	11,2	9,8	5,3
17	Гедекбоз	15	19,1	7,5	5,6
18	Нафталан	25	26,0	5,8	5,1
19	Аджидере	17	26,0	5,6	5,2
20	Айрыджа	13	29,0	11,6	1,9
21	Ширванлы	15	37,9	11,7	2,2
22	Дуздаг	14	16,1	9,8	5,9
23	Берде	17	38,8	11,0	2,3
24	Тезекенд	13	52,5	11,3	1,2
25	Ширингум	9	36,6	9,3	0,75
26	Акгел	11	29,1	5,9	1,1

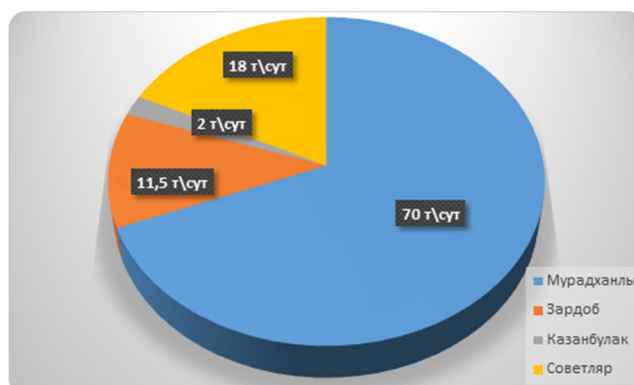


Рис. 2. Диаграмма изменения продуктивности по площади ЕАВ (Х.З. Мухтарова, Г.Д. Насибова)

Следует отметить, что по показателям карбонатности (рис. 3) исследуемая территория делится на северо-западную и юго-восточную зоны с низкими (от 11,2 до 38,8 %), и на северо-восточную (Гараджаллы (66,9 %), Амирарх (66,0 %)) и юго-западную (Тезекенд (52,5 %), Гюллюджа (64,2 %)) зоны с высокими значениями параметра. На карте видно, что строгой закономерности в распределении карбонатности по территории практически нет. Однако максимальный уровень карбонатности в 50–60 % наблюдается в юго-западной зоне на площади Гюллюджа и Тезекенд и 65–70 % на северо-востоке на площади Гараджаллы. При этом минимальный уровень карбонатности наблюдается на юго-востоке на площадях Зардаб (13,2 %), Агджабеди (14,5 %), Мурадханлы (18,4 %), Акгел (29,1 %) и на северо-западе на площадях Далимамедли (11,2 %), Борсунлу (13,4 %), Газанбулаг (14,8 %), Дуздаг (16,1 %), Гедекбоз (19,1 %), Герби Амирарх (20,0 %), Аджидере (26,0 %), Нафталан (26,0 %), Айрыджа (29,0 %), колеблясь между 11,2–29,0 процентами. Высокие показатели карбонатности также наблюдаются на юго-востоке в районе Миль (72 %) и на юге на площади Бейлаган (62 %).

Согласно показателям на карте распределения проницаемости (рис. 4), исследуемую территорию можно разделить на две зоны: характеризующуюся средними значениями ($3,0\text{--}6,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) – северную (Далимамедли, Борсунлу, Газанбулаг, Дуздаг, Гедекбоз, Аджидере, Нафталан, Тертер) и низкими значениями – южную ($0,2\text{--}2,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) (Зардаб, Мурадханлы, Миль, Ширингум, Агджабеди, Акгел, Советляр, Тезекенд, Гюллюджа, Берде, Ширванлы). Следует отметить, что средние значения на площади Бейлаган на юге и высокие значения на площадях Джарлы и Сорсор на востоке составляют исключение. Между значениями карбонатности и низкими значениями проницаемости наблюдается определенная закономерность – это находит свое подтверждение в том, что на площади Зардаб наблюдаются минимальные показатели как карбонатности, так и проницаемости. Это можно объяснить вторичным преобразованием коллекторских свойств карбонатных пород, в результате которых изменились проницаемость и пористость. Если учесть, что породообразование в бассейне происходит приблизительно в одинаковых условиях, то это обстоятельство можно объяснить разными условиями возникновения вторичной пористости и проницаемости по площадям.

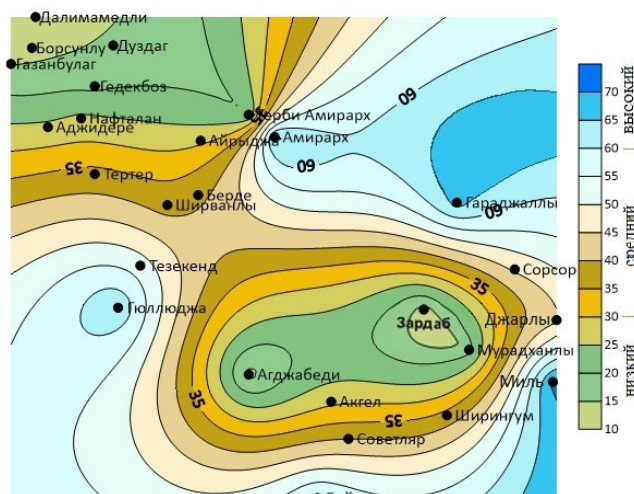
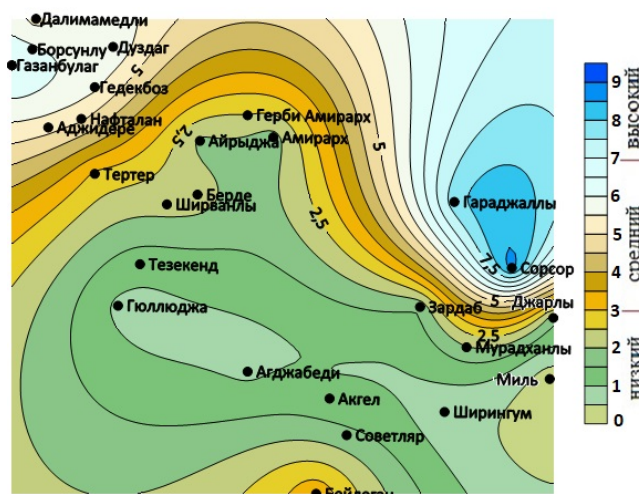


Рис. 3. Карта территориального изменения карбонатности (%) в ЕАВ (Х.З. Мухтарова, Г.Д. Насибова)

Рис. 4. Карта территориального изменения проницаемости (10^{-15} м^2) в ЕАВ (Х.З. Мухтарова, Г.Д. Насибова)

Согласно карте (рис. 4) наибольшие значения проницаемости наблюдаются на площадях Сорсор ($8,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), Гараджаллы ($7,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), и относительное увеличение имеет продолжение в направлении северо-западной центриклинали. Если учесть, что эксплуатируемые площади Мурадханлы, Зардаб и Джарлы расположены вблизи площади Сорсор, то перспективность данной структуры может представлять немалый интерес. Увеличение значений проницаемости в северо-западном направлении и наличие в этой зоне, кроме структуры Гараджаллы, четырех месторождений – Газанбулаг, Нафталан, Аджидере, Тертер, также дает возможность с большой вероятностью прогнозировать перспективность соседних площадей.

Следует отметить, что на площадях, где наблюдаются относительно высокие значения проницаемости, карбонатность характеризуется разными значениями. По сути, изучаемые карбонаты имеют довольно низкую проницаемость, а наблюдаемые различные значения проницаемости следует объяснить тем, что возникающая в них в результате как денудационных, так и тектонических процессов трещиноватость, положительно повлияла на их коллекторские свойства.

Исследования показали, что по всей территории впадины в распределении пористости (рис. 5) наблюдается определенная зональность с северо-запада на юго-

восток, которая характеризуется следующим образом: низкие значения на северо-западе – на площадях Тертер (3,6 %), Аджидере (5,6 %), Нафталан (5,8 %), на востоке – на Гараджаллы (2,9 %), на юге на площади Агджабеди (4,7 %); средние значения на северо-западе на Далимамедли (9,8 %), Борсунлу (7,0 %), Газанбулаг (7,7 %), Дуздаг (9,8 %), Гедекбоз (7,5 %) и на юго-востоке в пределах зоны, локально направленной с северо-востока на юго-запад, на площадях Сорсор (6,4 %), Зардаб (9,8 %), Акгел (5,9 %), Советляр (7,1 %), Ширингум (9,3 %), Миль (8,2 %), за исключением площадей Мурадханлы (11,2 %) и Джарлы (10,7 %), к этой зоне также следует отнести площадь Бейлаган (9,8 %) на юге; и, наконец, зона с высокими значениями, простирающаяся ближе к центральной части с северо-востока на юго-запад на площадях Герби Амиарх (14,0 %), Амиарх (11,1 %), Айрыджа (11,6 %), Берде (11,0 %), Ширванлы (11,7 %), Тезекенд (11,3 %), Гюллюджа (12,9 %).

Распределение пористости на изучаемой территории почти не соответствует распределению проницаемости. Как видно из рис. 4 и 5, на юго-востоке высокие значения пористости совпадают с низкими показателями проницаемости. Также наблюдается обратная зависимость и в северо-восточной, и в юго-западной центриклинали впадины. Обратная зависимость между значениями пористости и проницаемости, наблюдаемая

на территории почти всей впадины, связана с тектоническими условиями ее развития и с условиями образования пород, где важную роль сыграли заполняющие пустоты цементирующие материалы, лишая их хороших коллекторских качеств. На площади Гараджаллы наблюдается низкая пористость, тогда как карбонатность и проницаемость характеризуются высокими значениями. Это результат того, что именно эта часть

изучаемой территории, характеризующаяся высокой степенью трещиноватости, подвергалась относительно активным тектоническим движениям.

Отсутствие, в той или иной степени, зависимости между пористостью, карбонатностью и проницаемостью подтверждает сложный характер геологического разреза исследуемой территории.

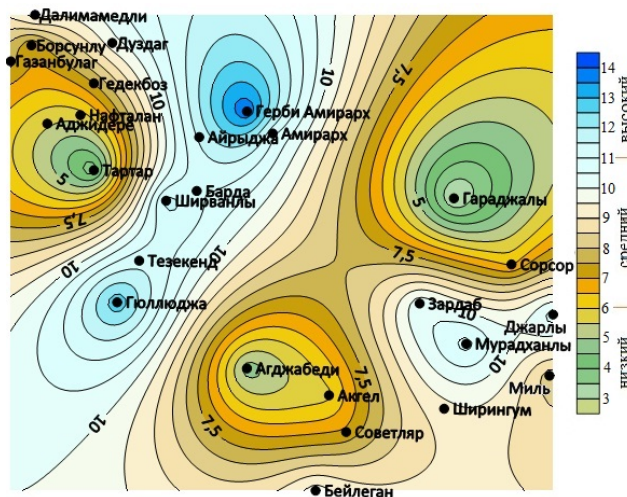


Рис. 5. Карта территориального изменения пористости (%) в ЕАВ (Х.З. Мухтарова, Г.Д. Насибова)

Перспективы дальнейших исследований. Учитывая вышесказанное и длительный период разработки месторождений Мурадханлы, Джарлы и Зардаб, можно высоко оценить перспективность площадей Герби Амиарх, Амиарх, Айрыджа, Барда, Ширванлы, Тезекенд, Гюллюджа. В настоящее время для обоснования и продолжения буровых работ проводятся комплексные геолого-геофизические исследования по всей территории. В свою очередь, необходимо отметить, что сопоставление полученных данных даст возможность более детально оценить перспективность каждой структуры.

Выводы.

1. Результаты анализа построенных карт распределения карбонатности, проницаемости и пористости для изучаемой территории дают возможность выделить три группы с низкими, средними, высокими значениями без наблюдаемой строгой взаимосвязи между ними.

2. Так как из трещиноватых карбонатов и эффузивов верхнего мела, имеющих высокую пористость (10,4–11,2 %) и низкую проницаемость ($1,6–1,98 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), на площадях Мурадханлы, Зардаб и Джарлы был получен нефтяной фонтан, то перспективность трещиноватых карбонатов и эффузивов верхнего мела, имеющих высокую пористость (11,1–14,0 %) и низкую проницаемость ($0,9–2,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$), на площадях Герби Амиарх, Амиарх, Айрыджа, Ширванлы, Тезекенд, Гюллюджа можно оценить достаточно высоко.

3. Эоценовые глины, несогласно залегающие на верхнемеловых отложениях, наряду с экранирующей ролью для нижележащих комплексов, могут потенциально выступать, в зависимости от условий, в качестве нефтегазогенерирующей толщи для вышележащих коллекторов.

Список использованной литературы

- Алиев, Г.М.А., Алиев, Ад.А., Велиева, С.Р. (2005). Условия нефтегазообразования в меловых и палеогеновых отложениях Евлах-Агджабединского прогиба. *Геолог Азербайджана*, 10, 123–128.
- Исмаилова, С.М. (2017). Коллекторские свойства меловых отложений западной части Азербайджана. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 7–8, 3–10.

Мухтарова, Х.З. (2001). Перспективность нефтегазоносности мезозойских отложений Евлах-Агджабединской впадины и направления поисково-разведочных работ. *Известия высших технических учебных заведений Азербайджана*, 5, 14–17.

Мухтарова, Х.З. (2002). Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности мезозойских отложений Евлах-Агджабединского прогиба. Дис. ... канд. геол.-минералог. наук. Баку.

Рахманов, Р.Б.Р. (2007). Закономерности формирования и размещения залежей нефти и газа в мезокайнозойских отложениях Евлах-Агджабединского прогиба. Баку: Текнур.

Салманов, А.М., Юсифов, Х.М. (2012). Основные критерии нефтегазоносности мезозойских отложений Азербайджана. *SOCAR, АЗНИПИНефтегаз, Баку: Научные труды*, 2, 6–14.

Салманов, А.М., Юсифов, Х.М. (2013). К перспективам нефтегазоносности северо-восточного борта Евлах-Агджабединского прогиба. *SOCAR, АЗНИПИНефтегаз, Баку: Научные труды*, 2, 6–14.

Халимов, Ю.Э. (2012). Промышленная нефтегазоносность фундамента в гранитоидных коллекторах. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 4 (7), 1–9.

Хеиров, М.Б., Касумова, М.Э. (2000). Развитие нефтегазообразования в мезокайнозойских отложениях Среднекуриной впадины. *Геолог Азербайджана*, 3, 17–36.

Хеиров, М.Б., Халилов, Н.Ю. (2000). Литолого-петрографические, литогенетические, геохимические и некоторые другие аспекты мезозойских отложений Азербайджана. *Геолог Азербайджана*, 4, 37–51.

Klosterman, M.J., Abrams, M.A., Aleskerov, E.A. (1997). Hydrocarbons system of the Evlakh-Agdzhabadi depression. *Azerbaijan Geologist*, 1, 90–120.

References

- Aliyev, G.M.A., Aliyev, Ad.A., Velieva, S.R. (2005). Usloviia neftegazooobrazovaniia v melovykh i paleogenovykh otlozheniiakh Evlakh-Agdzhabedinskogo progiba. *Geolog Azerbaidzhana*, 10, 123–128. [in Azerb.]
- Ismailova, S.M. (2017). Kollektorskie svoistva melovykh otlozhenii zapadnoi chasti Azerbaidzhana. *Azerbaidzhanskoe Neftianoe Khoziaistvo*, 7–8, 3–10. [in Azerb.]
- Khalimov, Yu.E. (2012). Industrial oil and gas content of the basement in granitoid reservoirs. *Oil and gas geology. Theory and Practice*, 4 (7), 1–9. [in Russian]
- Kheirov, M.B., Kasumova, M.E. (2000). Razvitiie neftegazooobrazovaniia v mezo i nozoiskikh otlozheniiakh Srednekurinskoii vpadiny. *Geolog Azerbaidzhana*, 3, 17–36. [in Azerb.]
- Kheirov, M.B., Khalilov, N.I.U. (2000). Litologo-petrograficheskie litogeneticheskie geokhimicheskie i nekotorye drugie aspekty mezozoiiskikh otlozhenii. *Azerbaidzhana Geolog Azerbaidzhana*, 4, 37–51. [in Azerb.]
- Klosterman, M.J., Abrams, M.A., Aleskerov, E.A. (1997). Hydrocarbons system of the Evlakh-Agdzhabadi depression. *Azerbaijan Geologist*, 1, 90–120.
- Mukhtarova, Kh.Z. (2001). Perspektivnost neftegazonosnosti mezozoiiskikh otlozhenii Evlakh-Agdzhabedinskoi vpadiny i napravleniia poiskovo-razvedochnykh работ. *Izvestiia vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedenii Azerbaidzhana*, 5, 14–17. [in Azerb.]

Mukhtarova, Kh.Z. (2002). Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti mezozoiskikh otlozhenii Evlakh-Agdzhabedinskogo progiba. *Thesis ... Cand. Sci. (Geol.-Min.)*. Baku. [in Azerb.]

Rakhmanov, Rb.R. (2007). Zakonomernosti formirovaniia i razme shcheniia zalezhei nefiti i gaza v mezokainozoiskikh otlozheniakh Evlakh-Agdzha bedinskogo progiba. Baku: Teknur. [in Azerb.]

Salmanov, A.M., Iusifov, K.H.M. (2013) K perspektivam neftegazonosnosti severo-vostochnogo borta Evlakh-Agdzhebiedinskogo progiba. *SOCAR, Az NIPi Neftegaz. Baku: Nauchnye trudy*, 2, 6-14. [in Azerb.]

Salmanov, A.M., Iusifov, K.H.M. (2012). Osnovnye kriterii neftegazo nos nosti mezozoiskikh otlozhe nii Azerbaidzhana. *SOCAR, AzNIPiNeftegaz. Baku: Nauchnye trudy*, 2, 6-14. [in Azerb.]

Надійшла до редколегії 04.05.21

Kh. Mukhtarova, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru;
G. Nasibova, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
M. Ismayilova, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: mexribani@inbox.ru;
Azerbaijan State Oil and Industry University,
34 Azadlig Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

OIL AND GAS POTENTIAL AND STUDY OF RESERVOIR PROPERTIES OF THE CRETACEOUS DEPOSITS OF THE YEVLAKH-AGDJABEDI DEPRESSION

The aim of the study is to substantiate the prospects for the oil and gas content of the Upper Cretaceous effusive and carbonate deposits by studying their reservoir parameters.

Previous studies have established that a sedimentary complex, present in the geological structure of the Muradkhanly field, is lithologically represented by clays, siltstones, sands and sandstones, dolomites, limestones, tuffs, Upper Cretaceous porphyrites. Since this lithofacies composition of the section is of great importance as a reservoir rock, volcanic sandy tuffs, mudstones and dense sandstones of the Upper Cretaceous age have been comprehensively investigated throughout the territory. We studied carbonates of this age and found that they have compaction of varying extent and are divided into 3 groups: weakly, moderately and strongly compacted and this, in turn, has considerable effect upon the rock porosity.

At the beginning of the study, the reservoir features of Meso-Cenozoic sediments in the Yevlakh-Agdjabedi depression [YAD] were studied mainly on the basis of terrigenous rocks that refer to the Cenozoic. In our studies, Cretaceous deposits were studied, which are represented by effusive, carbonate rocks with secondary reservoir properties.

The reservoir properties of chalk deposits in the YAD areas were investigated on the basis of studies of core samples in laboratories. It was found that the reservoir rocks of the area under investigation are volcanic, volcanic-sedimentary and carbonate, that is, they mainly consist of fractured limestones, marls and dolomites. Studies have shown that the oil and gas content of the depression is associated mainly with carbonate and effusive reservoirs. To assess the prospects for the oil-bearing capacity of the YAD, geological sections were studied in terms of the reservoir properties of a number of structures, and on the basis of the obtained core samples data. Trend maps were compiled using the "Surfer" software. Analysis of the maps allows identifying the corresponding zones of carbonate content, permeability, porosity, characterized by high, medium and low values. According to the carbonate readings, the studied territory does not have a strict distribution pattern and, according to the permeability distribution data, it is divided into two zones: the northern zone with average and the southern one with low values. There is, to a certain extent, pattern for variation of the values of carbonate content and permeability, and this can be explained by the secondary transformation of the reservoir properties of carbonate rocks, as a result of which permeability and porosity changed. Porosity distribution, to some extent, is aligned with permeability. Inverse relationship between the values of porosity and permeability can be explained with the filling of voids with cement material in the rock formation environment.

Currently, in order to continue exploration and drilling works, comprehensive geological and geophysical studies are being carried out, as a result of which comparison of data obtained will make it possible to assess the prospects of each structure in more detail.

Keywords: thickness, core, Mesozoic, carbonate content, porosity, permeability, prospects.

X. Мухтарова, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru;
Г. Насибова, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
М. Ісмаїлова, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: mexribani@inbox.ru;
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості,
просп. Азадліг, 34, м. Баку, AZE1010, Азербайджан

ПЕРСПЕКТИВИ НАФТОГАЗОНОСНОСТІ ТА ВИВЧЕННЯ КОЛЕКТОРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРЕЙДОВИХ ВІДКЛАДІВ ЄВЛАХ-АГДЖАБЕДИНСЬКОГО ПРОГІНУ

Мета дослідження – обґрунтувати перспективність нафтогазоносності верхньокрейдових ефузивних і карбонатних відкладів шляхом вивчення їх колекторських параметрів.

Раніше проведеними дослідженнями було встановлено, що в геологічній будові структури Мурадханлі бере участь осадовий комплекс, у літологічному плані представлений глинами, алевролітами, пісками і пісковиками, доломітами, вапняками, туфами, порфіритами верхньокрейдового віку. Оскільки даний літофаціальний склад розрізу може виступати як колектор, по всій території було всебічно вивчено вулканогенні піщаністі туфи, аргіліти і щільні пісковики, а також карбонати верхньокрейдового віку. Було виявлено, що карбонати мають різний ступінь ущільненості і підрозділяються на три групи: слабо-, середньо- і сильно ущільнені, і це, у свою чергу, має неабиякий вплив на пористість породи.

На початку дослідження колекторські особливості мезокайнозойських відкладів в Євлах-Агджабедінській западині (ЄАЗ) вивчалися на основі теригенних порід, які належать до кайнозою. У наших же дослідженнях було вивчено крейдові відклади, представлені карбонатними і ефузивними породами, що мають вторинні колекторські властивості.

Колекторські властивості крейдових відкладів по площах ЄАЗ було вивчено на основі досліджень зразків керна в лабораторних умовах. Встановлено, що колектори досліджуваної площі є карбонатними, вулканогенними і вулканогенно-осадовими, тобто складаються в основному з тріщинуватих вапняків, мергелів і доломітів. Дослідження показали, що нафтогазоносність западини пов'язана переважно з карбонатними і ефузивними колекторами. Для оцінки перспектив нафтоносності ЄАЗ з погляду колекторських властивостей було вивчено геологічні розрізи ряду структур, і на основі отриманих за зразками керна в лабораторних умовах даних за допомогою програм "Surfer" було складено карти Тренда. Аналіз карт дозволяє виділити відповідні зони карбонатності, проникності, пористості, що характеризуються високими, середніми і низькими значеннями. За показниками карбонатності територія, що вивчається, не має суворой закономірності в розподілі цього параметру, а за даними розподілу проникності ділиться на дві зони: північну, що характеризується середніми значеннями, і південну – з низькими значеннями параметра. Між значеннями карбонатності і низькими значеннями проникності певною мірою спостерігається закономірність, і це можна пояснити вторинним перетворенням колекторських властивостей карбонатних порід, в результаті яких змінилися проникність і пористість. Розподіл пористості деякою мірою відповідає розподілу проникності. Зворотну залежність між значеннями пористості і проникності можна пояснити заповненням порожнин цементуючим матеріалом у середовищі, в якому формувалися породи.

Нині для продовження пошуково-розвідувальних і бурових робіт проводяться комплексні геолого-геофізичні дослідження, в результаті чого зіставлення отриманих даних дасть можливість більш детально оцінити перспективність кожної структури.

Ключові слова: потужність, kern, мезозой, карбонатність, пористість, проникність, перспективність.

УДК 550.83

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.06>

Л. Шумлянская, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: lashum@ukr.net;
Ю. Дубовенко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: nemishaevo@ukr.net;
П. Пигулевский, д-р геол. наук, вед. науч. сотр.,
E-mail: pigulev@ua.fm;
Институт геофизики НАН Украины, им. С.И. Субботина,
просп. Академіка Палладіна, 32, Киев, Украина

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ S-СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ПУТЕМ ПЕРЕСЧЕТА P-СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ

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

Проблема ограниченности и неполноты сейсмологических данных приводит к существенным искажениям в расчётных моделях, основанных на первичных сейсмологических моделях. Одной из причин неполноты первичных сейсмологических данных является значительное преобладание данных определений вступлений P-фаз объёмных волн по сравнению с регистрацией вступлений S-волн. В связи с этим возникает вопрос о статистической соразмерности (значимости) и соответствии скоростных моделей, полученных по приходам P- и S-волн. В рамках решения этой задачи в работе изучена возможность пересчёта P-скоростной модели в синтетическую скоростную модель S-волн с целью оценки ее подобия экспериментальной модели. Показано, что отклонения синтетической модели скоростей S-волн от измеренной кривой сопоставимы с точностью методов, по которым были получены эти скоростные модели, следовательно полученную синтетическую модель S-волн можно использовать при построении структурных моделей мантии. Мы предложили свой подход для решения проблемы получения синтетической S-скоростной модели в результате пересчёта P-скоростной модели и показали, что при пересчете с использованием среднеарифметического от пяти референтных сейсмологических моделей соотношения V_p/V_s , синтетическая S-скоростная модель имеет приемлемые отклонения, сравнимые с разрешающей способностью метода их получения. Как показывают результаты по определению погрешностей скоростей при использовании кинематического метода Тейлорового приближения, при погрешностях определения максимальной глубины кажущейся скорости рефрагированного луча $\varepsilon_0(q) = 6; 7; 8$ км, вычисленные погрешности скоростей имеют тот же порядок, что и отклонения для одномерных моделей, и значительно меньше погрешности $\pm 0,1$ км/с, которая достигается другими сейсмическими методами.

Синтетическая S-скоростная модель, полученная в результате пересчёта P-скоростной модели, обладает свойством соразмерности с исходной моделью, что дает преимущества в точности при дальнейшем совместном использовании двух коллинеарных моделей (P, S) при преобразовании в физико-литологические модели мантии.

Ключевые слова: синтетическая S-скоростная модель, погрешность, кинематический метод сейсмической томографии.

Вступление. Проблема ограниченности и неполноты сейсмологических данных приводит к существенным искажениям в расчётных моделях, основанных на первичных сейсмологических моделях. Одной из причин неполноты первичных сейсмологических данных является значительное преобладание данных определений вступлений P-фаз объёмных волн по сравнению с регистрацией вступлений S-волн. В этом легко убедиться, открыв любой том Сейсмологического бюллетеня, международного или местного. Невзирая на утверждения сейсмологов о том, что вступления S-фазы чётко видны на сейсмограммах (Инструкция..., 1981), а также значительный прогресс методик измерений и большое количество алгоритмов и программ для автоматического выделения фаз сейсмических волн, указанное количественное несоответствие определений P и S фаз за последние годы совсем не изменилось.

Скорее наоборот, мы видим практически полное игнорирование выделения S фазы в современных бюллетенях, в которых соотношение вступлений P- и S-фаз регистрируется приблизительно 10 к 1. В связи с этим возникает вопрос о статистической соразмерности (значимости) и соответствии скоростных моделей, полученных по приходам P- и S-волн. Мы исследовали возможность детализации строения верхней мантии путём вычисления трансформаций годографов сейсмических волн, используя уточнённые стандартные модели для земной коры и верхней мантии (Shumlianska et al., 2020). В рамках решения этой задачи возникает вопрос о возможности пересчёта P-скоростной модели в "искусственную" скоростную модель S-волн с целью оценки ее подобия до экспериментальной модели, полученной по данным полевых измерений. Если нам удастся доказать,

что отклонения синтетической модели скоростей S-волн от измеренной кривой сопоставимы с точностью методов, по которым были получены эти скоростные модели, то полученную модель S-волн можно использовать при построении структурных моделей мантии.

При этом количественная интерпретация наблюдений P- и S-волн возможна при условии состоятельности исходных данных. Под состоятельностью (достоверностью) мы понимаем геологическое разрешение метода, т. е. возможность отождествления разрезов, полученных по данным прихода P- и S-волн и наблюдаемых на них сопоставимых (коррелируемых) особенностей морфологии или динамики (изменчивости) изучаемой среды. И в таком случае не коррелируемое, произвольное взаимное отношение полученных особенностей среды можно считать следствием погрешности (недостоверности) исходных данных наблюдений либо неудачным подбором моделей среды.

Цель исследования. Исходя из вышесказанного, цель нашего исследования можно сформулировать следующим образом: создание синтетической скоростной модели S-волн путем пересчёта из модели P-волн и оценка возможности ее использования при построении структурных моделей мантии.

Исходные данные. Несмотря на огромное количество работ по сейсмической томографии различными методами, при изучении мантии под территорией Украины существует ряд ограничений. Одно из которых связано с недостаточным интересом исследователей к данной территории. Причины этого лежат в плоскости недостаточного количества первичного материала, связанного, в первую очередь, со слабой сейсмичностью и недостаточным покрытием сейсмическими станциями

© Шумлянская Л., Дубовенко Ю., Пигулевский П., 2021

территории. Что приводит к малому количеству исходных данных, в случае кинематической и лучевой сейсмической томографии – это первые вступления фаз соответствующих волн, P , S или др., недостаточному и неравномерному для покрытия всей территории Украины. Поэтому данные о скоростных характеристиках мантии в основном получают на основе глобальных исследований (Babuska et al., 1992; Marquering et al., 1996; Bijwaard et al., 1998), что накладывает ограничения на размеры выделенных неоднородностей.

На данном фоне исключением является P -скоростная томографическая модель мантии, полученная методом, разработанным В.С. Гейко (Geiko, 2004). Модификация кинематического метода, предложенного Гейко, позволила получить скоростную модель мантии под территорией Украины с разрешением по отношению к аномалиям масштабов тектонических структурных единиц первого и второго порядка (массивы, шовные зоны и т. д.), что выгодно отличает ее от других сейсмотомографических моделей.

В качестве исходных данных мы взяли 3D P -скоростную модель мантии под Украинским щитом (Шумлянская и др., 2014), построенную по методу Гейко с использованием моделей средних скоростей для земной коры для тектонических структур первого и второго порядка, с использованием данных ГСЗ, проведенных за период начиная с 1960 г. Сама сейсмотомографическая модель представляет собой набор одномерных скоростных кривых, полученных из обращения годографов, что в совокупности составляет квази-трёхмерную модель. Годографы построены по данным о временах прихода первых вступлений P -волн от землетрясений с магнитудой $\geq 4,5$, по данным сейсмологических бюллетеней Международного сейсмологического центра ISC (<http://www.isc.ac.uk/>). Одномерные годографы сформированы для Украины путём выборки значений время-расстояния из общего поля времён, заданного в формате *средней точки* по заданным прямоугольным областям, охватывающей каждую крупную тектоническую структуру Украинского щита.

Методика. Пересчет исходной P -скоростной модели в синтетическую S -скоростную модель мы будем проводить в несколько этапов: пересчет; оценка применимости.

Сам пересчет производится простыми арифметическими преобразованиями с помощью отношения V_p/V_s , описывать которые нет смысла в силу очевидности. Для этого необходимо понять, какое соотношение будет оптимальным. Мы предположили, что таким оптимальным соотношением является среднее V_p/V_s , рассчитанное по пяти одномерным референтным моделям.

Для оценки приемлемости использования средней V_p/V_s , пересчитаем скорости V_p известных моделей в синтетические V_s с помощью средней кривой V_p/V_s и сравним с исходными V_s , задокументированными в литературе для каждой из референтных моделей, используемых для расчета среднего соотношения V_p/V_s . Непосредственно оценка приемлемости состоит в сравнении отклонений исходных V_s от синтетических с точностями определения скоростей в ходе решения сейсмической задачи. Если отклонения сопоставимы с точностью методов, то наша задача решена корректно.

Приведём некоторые теоретические соображения в качестве обоснования дальнейших рассуждений.

Пересчет первичных моделей скоростей продольных волн для оценки скоростей поперечных волн используется давно. В основе идеи пересчёта лежит аналитическое решение Пуассона для волнового уравнения в

двумерном евклидовом пространстве (Корзюк, 2008). Пуассон впервые доказал наличие в однородной изотропной среде двух типов волн (сжатия – продольные и сдвига – поперечные), с разными скоростями распространения фронта волны. Это следствие того, что в волнах сжатия-растяжения отсутствуют вращающиеся частицы, а сдвиговые волны не сопровождаются изменением объема.

Согласно теории упругости, при *малых деформациях* движения частиц представляют собой *упругие* волны. А уравнения для плоской упругой волны в неограниченной среде имеют вид

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} - \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} - \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = 0,$$

где $c_1 = \sqrt{\frac{3k+4\mu}{3\rho}}$; $c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ – скорости продольной P - и поперечной S -волны, зависящие от упругих констант; $k = \Delta P/(\Delta V/V)$ – модуль сжатия (объёмная упругость) – отношение изменения гидростатического давления ΔP к сжатию заданного объема V ; $\mu = (\Delta F/A)/(\Delta L/L)$ – модуль сдвига, т. е., отношение поперечной деформации (удельная сила сдвига в поперечном сечении A) к продольной деформации (сдвиг ΔL на длину L). Таким образом, упругая волна представляет собой две независимо распространяющиеся с разными скоростями волны. При этом скорость распространения продольной P -волны всегда больше, чем скорость поперечной S -волны: $c_1 > c_2 \sqrt{\frac{4}{3}}$.

Если бы геологическая среда была *однородной и изотропной*, последнее отношение было бы *константой* и не существовало бы проблем с расчётом модели поперечных волн. Но изучаемая среда далека от *однородности* и анизотропна. Как показали многочисленные прямые сейсмические наблюдения и лабораторные измерения (Christensen, 1996; Wilkens et al., 1984), наблюдается весьма значительная *изменчивость* отношения продольных и поперечных волн в реальной геологической среде. Так, скорости V_p и V_s в горных породах, как и их соотношения, зависят от их *литологического состава, пористости*, реологических свойств среды (вязкости и сдвиговой прочности), термодинамических условий (*давления, температур, насыщенности* флюидами и т. д. Соотношение V_p/V_s является достаточно чувствительным к изменениям коэффициента Пуассона (показателю изменения объема). На его *изменении* построены различные методы исследований неоднородной сплошной среды – от оценки ее напряжённо-деформированного состояния (Байрамян, 2013) до поисков углеводородов (Тяпкина и Тяпкин, 2019; Ленский и др., 2008; Кузин, 2016).

Как отмечено выше, в реальной геологической среде зафиксирована заметная *изменчивость* V_p/V_s (Толстой и др., 2014; Гордиенко, 2010), что делает невозможным пересчёт скоростей продольных волн в поперечные *напрямую*. Поэтому для ее решения мы прибегли к упрощениям, применяемым при построении различных моделей в геофизике.

В качестве усреднённых эталонных значений мы рассматриваем одномерные радиальные модели плотности (*дисперсии масс*) Земли, согласованные со значениями скоростей P - и S -волн, как функций радиуса Земли. Итак, для пересчёта скоростей V_p в V_s мы использовали *среднеарифметическое* значение V_p/V_s от рассчитанных нами одномерных сейсмологических моделей V_p и V_s . При расчётах были использованы 5 известных моделей PREM, IASP-91, PEMA, PEMC, AK135, которые часто применяются как стандартные *референтные* модели *нулевого* приближения.

Чем больше моделей усреднено, тем меньше отклонения любой экспериментальной модели от среднеарифметической выборки. Для сравнения самих референтных моделей между собой можно рассчитать отношение их *правдоподобия*, но это выходит за рамки нашей статьи.

Цифровые данные о моделях взяты на сайте IRIS (<https://ds.iris.edu/ds/products/emc-reference-models/>). Для удобства расчёта средней кривой V_p/V_s все модели приведены к одному масштабу – масштабу скоростных кривых сейсмотомографической модели мантии Украины. Экспериментальные данные для пересчёта взяты из P -скоростной модели, полученной в ходе решения задачи сейсмической томографии для верхней мантии территории Украины (Шумлянская и др, 2014; Shumlianska et al., 2020).

Результаты исследований. Анализ радиально-плотностных моделей Земли. Детальнее охарактеризуем одномерные модели, используемые при осреднении значений V_p/V_s . Данные модели относятся к классу *параметрических* моделей, т.е., для их получения были использованы, кроме сейсмологических данных, аналитические функции радиуса и плотности Земли, данные о свободных колебаниях, о дисперсии поверхностных волн, о периодах собственных колебаний Земли, значения массы, моментов инерции Земли, моментов силы тяжести J_n и другие атрибуты – различные по полноте и масштабу для разных моделей.

РЕМ-А, РЕМ-С. Параметрические модели Земли (Dziewonski et al., 1975), в которых радиальные вариации плотности и скоростей представлены *кусочно-непрерывными* аналитическими функциями радиуса Земли (полиномы не выше 3-го порядка в каждом слое). Модели идентичны, но ниже глубины 420 км модель РЕМ-С спроектирована так, чтобы отражать свойства *континентальной* верхней мантии (которая нас и интересует). Модель РЕМ-А отражает *усреднённую* модель Земли по данным, используемым в инверсии, которые состоят из наблюдений собственных периодов для 1064 нормальных мод, 246 времен пробега объёмных волн для 5 различных фаз и региональных данных о дисперсии поверхностных волн океанических и континентальных регионов за период не более 20 секунд. Согласие функционалов, полученных для моделей РЕМ, с использованными наблюдениями удовлетворительное. В частности, соответствие данных о свободных колебаниях сопоставимо с данными, полученными в исследованиях инверсии.

Распределение плотности для всех глубин более 670 км согласуется с частным решением уравнения Вильямсона–Адамса в пределах 0,2 % максимального отклонения, и эти незначительные отклонения являются результатом ограничений, налагаемых параметрической простотой моделей. Скорости в нижней мантии согласуются со значениями, которые предполагает теория конечных деформаций 3-го порядка – их среднеквадратичные относительные отклонения имеют точность до 0,2 % для V_p и 0,4% для V_s . Производные скоростей по давлению $V(P)$ близки к значениям, полученным для корундовых структур в лабораторных экспериментах. Отклонения модели от однородности и условия адиабатичности во внутреннем ядре, внешнем ядре и нижней мантии – небольшие.

РЕМ. Сферически-симметричная модель Земли (Dziewonski, Anderson, 1981), которая кроме *изотропной* параметризации (заданной плотностью и скоростями продольных и поперечных волн), дополнена радиально-анизотропной параметризацией с 5 упругими параметрами в дополнение к плотности. Эти модель подтвердила

твёрдый характер внутреннего ядра с оценками скорости S -волн внутри ядра и определила три границы в верхней мантии, на глубинах ~220, ~400 и ~670 км.

Модель получена на основе большого набора данных, состоящего из ~1000 периодов нормальных мод свободной осцилляции Земли Q , 500 суммарных наблюдений за временем прохождения волн, 100 значений Q в нормальном режиме, массы и момента инерции Земли. Эти данные инвертированы для получения радиального распределения упругих свойств, значений Q и плотности в недрах Земли. Данные дополнены специальным исследованием данных *фазы* ISC за 12 лет, которое дало дополнительно $1,75 \times 10^6$ наблюдений за временем пробега для P - и S -волн. Чтобы получить удовлетворительное согласие со всем набором данных, была учтена *неупругая дисперсия*. Для мантии от границы Мохоровичича на глубине 24 км до глубины 220 км была введена *поперечная изотропия*, чтобы удовлетворить более короткопериодные основные тороидальные и сфероидальные моды. Эта анизотропия улучшила соответствие большому набору данных и указывает на то, что в этой зоне возможны процессы *течения* горных пород. Горизонтальные и вертикальные скорости в верхней мантии различаются на 2–4 % для продольных и для поперечных волн. В модели не требуется, чтобы мантия ниже 220 км была анизотропной. Для анизотропной модели мантийные волны Рэлея чувствительны к скорости сжатия в верхней мантии. Высокие скорости S_n и низкие скорости P_n показывают наличие выраженной зоны *низких скоростей* в пределах от 80 до 220 км. Это особенности большинства моделей глобальной инверсии, которые в значительной степени подавляются, когда в инверсии учитывается анизотропия.

IASP91. Сферически-симметричная модель IASP91 (Kennett, 1991) выполнена в виде таблиц времён пробега P - и S' -волн, которые построены таким образом, чтобы времена для основных сейсмических фаз согласовывались с указанными временами для событий в каталоге Международного сейсмологического центра (ISC) за период с 1964 по 1984 г. В 1987 г. базовая линия для времён пробега P -волн в модели IASP91 была скорректирована, чтобы обеспечить лишь небольшую погрешность по времени возникновения событий на основных ядерных испытательных полигонах по всему миру. Для P -волн на телесеизмических расстояниях времена прихода волны оказались на ~0,7 с медленнее, чем приведенные в таблице P -волн 1968 г. (Herrin 1968), и в среднем примерно на 1,8–1,9 с быстрее, чем указанные в таблице (Jeffreys and Bullen, 1940). Для S -волн телесеизмическое время находилось между значениями, указанными в таблицах (Jeffreys and Bullen, 1940) и результатами Randall (1971). Поскольку времена пробега волн для всех фаз получены из одной и той же скоростной модели, существует полная согласованность между временами пробега для разных *фаз* на разных глубинах фокуса землетрясения.

Модель IASP91 в верхней мантии заметно отличается от модели PREM: в ней скачки скоростей P - и S' -волн расположены на глубинах 410 и 660 км. Амплитуды отклонений этих границ от средних значений, зависящие от разных причин, равны 30–40 км, и различие PREM и IASP91 у них невелико. В модели IASP91 нет слоя низких скоростей с анизотропией и скачка скоростей на глубине 220 км, а граница Мохоро расположена на глубине 35 км.

AK135. Обработка ещё большего объёма данных позволила уточнить модель IASP91 и построить на ее

основе модель АК135. Последняя содержит зависимость от глубины (радиуса) для скоростей сейсмических волн (Kennet и др., 1995), для плотности и добротности (Montagner, Kennett, 1996).

Приведя все модели к масштабу скоростных кривых сейсмотомографической модели мантии под территории Украины, мы рассчитали среднее отношение V_p/V_s (табл. 1) как среднее арифметическое от 5 указанных выше моделей. Затем мы пересчитали V_p скорости одномерных моделей в синтетические параметры V_s и определили отклонения этих синтетических скоростей V_s от начальных данных для каждой модели.

Прежде чем дать оценку *приемлемости* полученных синтетических параметров V_s , уточним общую точность метода сейсмической томографии и точность определения скоростей в параметрической одномерной модели (Dziewonsky et al., 1975). Затем мы будем использовать эту точность в качестве сравнения для остальных исследуемых одномерных моделей, поскольку сведений об их точности мы не нашли. При этом важно различать точность метода и точность определения параметров среды как различные понятия, проистекающие из различных подходов к их подсчёту. Точность метода подразумевает точность теоретических расчётов от опорных моделей среды и характеризуется *сходимостью* к известному эталонному решению. Тогда как точность параметров – это степень их близости (отклонения) от среднего значения экспериментальных данных, измеренных со случайными погрешностями; она определяется методикой измерений и зависит от ошибок исходных данных и ошибок вычислений тех или иных подставляемых параметров.

Точность (достоверность) определения параметров одномерных параметрических моделей. В статье (Dziewonsky et al., 1975) авторы описывают определение точности полученных данных одномерной модели так: "В данной статье мы принимаем определённую гипотезу относительно *плавности* распределения сейсмических параметров по радиусу; наблюдаемые данные инвертируются с использованием всех степеней свободы, допускаемых гипотезой; после инверсии проверяются *невязки* – и если они приемлемы, гипотеза должна считаться правдоподобной, а если они превышают допустимые пределы, гипотеза должна быть отклонена".

Gilbert (1971) показал, что при *равномерном* распределении сейсмических станций и *усреднении* собственных частот колебания Земли, параметрическая модель будет точно соответствовать модели невращающейся Земли с вырожденной собственной частотой. Однако сейсмические станции *неравномерно* распределены по поверхности (Burmin, Shumlianska, 2020), также недостижимы ограничения, связанные с *усреднением* собственных колебаний Земли (данные о них весьма ограничены). Это приводит к *минимальной* относительной стандартной ошибке 0,05 %, при которой общее распределение невязок точно соответствует *нормальному* распределению (Gilbert et al., 1975). При этом указано, что инверсия производится по *ковариационной* диагональной матрице, что приводит к *некорректированным* ошибкам. Т. е., указанная точность 0,05 %, скорее всего, *преувеличена*.

Точность метода сейсмической томографии, на основе приближений Тейлора. Конечной целью исследования является переход от P -скоростной модели к *синтетической* модели скоростей S -волн. P -скоростная модель была получена для мантии под территориями Украины в ходе решения обратной сейсмологической задачи

методом приближения Тейлора. Этот метод предложен В.С. Гейко (Geyko, 2004) и относится к кинематическим методам решения обратной задачи сейсмологии. В качестве исходных данных он использует кинематические атрибуты, связанные с формой волновых фронтов, траекториями лучей, распределением времён прихода сейсмических волн. А это не налагает *жёстких* требований к измерительной аппаратуре, поэтому этот метод – один из старейших в сейсмической томографии.

Впервые кинематическая обратная задача для дифференциального уравнения Эйконала $|\nabla t| = V^{-1}(x)$ была сформулирована в 1907 г. в работах (Herglotz, 1907; Wiechert, 1907), где для сферически симметричной модели Земли, т. е., в предположении, что скорость V монотонно зависит только от глубины, были доказаны существование и однозначность определения искомой скорости V по известной функции t – времени прихода сейсмического сигнала из одной точки поверхности в другую.

В дальнейшем теория одномерной кинематической задачи как для рефрагированных, так и для отражённых волн получила развитие в работах (Бессонова и др., 1973; Гейко, 1970; Гервер, Маркушевич, 1967; Гольдин, 1977; Павленкова, 1973). В 2004 г. Гейко модифицировал кинематический метод, развитый им для обработки ГСЗ, к данным сейсмической томографии. В своей работе он показал, что разложение скоростной функции в ряд Тейлора с последующим ограничением до первого члена ряда дает решение обратной кинематической задачи для годографа с точностью ϵ , в ограниченном однородно-изотропном пространстве. Использование этого подхода позволяет корректно решать обратную задачу сейсмологии с ограничениями Адамара–Тихонова на параметры среды.

На основе теоремы Тихонова и разложения скорости в ряд Тейлора разработан метод Тейлорового приближения и построена квази-трёхмерная (набор одномерных кривых) P -скоростная модель мантии территории Украины (Шумлянская и др., 2014). Вопрос, почему не была рассчитана S -скоростная модель, освещён в работе (Shumlianska et al., 2020).

Нас интересует точность данного метода, ведь если наша синтетически созданная модель скоростей S -волн будет иметь точность, соизмеримую с точностью метода сейсмической томографии по методу Гейко, можно считать, что наш подход к расчёту V_p/V_s достаточно обоснован.

Вопрос о точности кинематических методов был исследован в работе (Бурмин, 2012). Автор отмечает: "Существует заблуждение, что в качестве решения задачи обращения годографа следует давать некоторую *полосу* скоростных функций, которая содержит скоростные функции, удовлетворяющие наблюдаённому годографу сейсмических волн. В то же время эта полоса ассоциируется с *оценкой* погрешностей в определении функции $v(z)$. Смысл этих оценок не вполне понятен.

Дело в том, что для любого интервала скоростей на заданном сегменте $[z_1, z_2]$ можно построить бесконечное множество скоростных кривых, которые не отвечают наблюдаённому годографу. В этом случае любая точка этой полосы, по определению, должна являться решением задачи, что, конечно же, не так. Таким образом, если давать *полосу* возможных решений, то следует определить свойства скоростных функций, которые заполняют заданную полосу, и задать алгоритм построения этой полосы таким образом, чтобы каждая функция из полосы являлась решением обратной задачи. В настоящее время такого алгоритма не существует и такие функции никак не определены".

При оценке погрешности в определении скоростного разреза следует говорить об оценке *погрешностей* $\varepsilon_0(q)$ в определении глубины максимального *проникновения* луча рефрагированной волны

$$\varepsilon_0(q) \leq \varepsilon(u^*) + \frac{\delta_0}{\pi} \ln \left(\frac{u^*}{q} + \sqrt{\frac{u^{*2}}{q^2} - 1} \right).$$

Величина $\delta_0 = \max |\delta x(p)| = \max |\tilde{x}(p) - x(p)|$ соответствует $\max |\tilde{t}(p) - t(p)|$ и определяется, как $\delta t(p) / p$, где $\delta t(p)$ – максимальное отклонение аппроксимирующего сплайна от экспериментальных точек годографа. Значения лучевого параметра p *непрерывно* заполняют некоторый сегмент $[p_1, p_2]$, который определяется началом и концом аппроксимирующего сплайна, и не нуждаются в оценке погрешностей, поскольку p является независимой переменной.

На рис. 1 показана кривая зависимости погрешности определения глубины проникновения сейсмического луча от *кажущейся скорости*, определённой по годографу сейсмической волны при $\delta t = 0,2$ с, $u_0 = 0,2$ с/км и $\delta_0 = 2,0$ км.

Оценка погрешностей в определении глубины максимального проникновения лучей показывает ее зависимость от окна аппроксимирующего сплайна, если в приведённом примере эта величина составляет 0,2 с, то для получения P -скоростной модели для территории Украины методом Тейлорового приближения временное окно составляло 2 с. Поэтому, если в приведённом примере погрешность определения глубины для окна 0,2 с и интервала скоростей 7–10 км/с (мы работаем с мантийными скоростями) составляет 0,6–0,8 км, то для временного окна аппроксимации 2 с погрешности составляют 6–8 км. Этот результат мы используем для оценки применимости пересчитанной синтетической модели скоростей S -волн. Приведённые на рис. 1 погрешности рассчитаны для P -волн, для S -волн погрешности будут несколько больше.

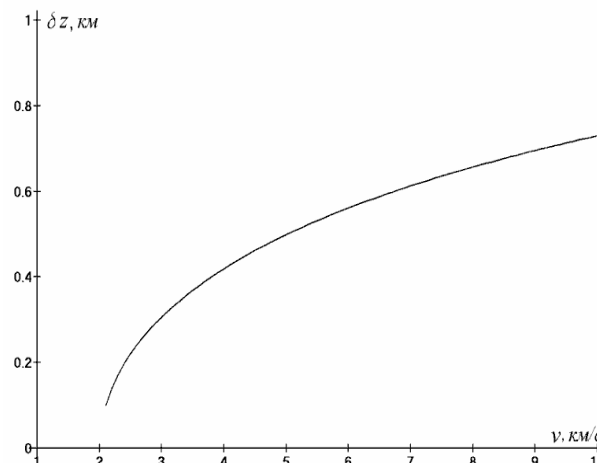


Рис. 1. Оценки погрешностей в определении глубины максимального проникновения лучей для различных значений скорости сейсмических волн

Таблица 1 представляет синтетические скорости V_s , и отклонения этих синтетических скоростей по отношению к представленным в литературе ($V_s - V_{s1}$) для каждой одномерной параметрической модели, используемой в этом исследовании. Также показаны значения погрешностей теоретических отклонений, составляющие 0,05 % от первичных скоростей, вычисленных по рекомендациям (Gilbert et al., 1975). Как видим, такая точность в практической геофизике почти *недостижима* по ряду причин, связанных как с ошибками получения данных, так и ограничений, связанных с методами. В табл. 2 показаны расчеты погрешности значений скоростей P -волн, рассчитанные для одной из скоростных кривых модели Гейко при разных значениях *погрешностей* в определении глубины максимального *проникновения* луча рефрагированной волны $\varepsilon_0(q)$.

Таблица 1

Отклонения синтетических значений скоростей S -волны по отношению к значениям, представленным в литературе по референтным одномерным моделям

h, км	PEM A			PEM C			PREM			IASP 91			ak 135		
	V_{s1}	$V_s - V_{s1}$	0,05 %	V_{s1}	$V_s - V_{s1}$	0,05 %	V_{s1}	$V_s - V_{s1}$	0,05 %	V_{s1}	$V_s - V_{s1}$	0,05 %	V_{s1}	$V_s - V_{s1}$	0,05 %
50	4,4974	-0,1566	0,0022	4,5461	-0,1439	0,0023	4,5308	0,1289	0,0023	4,5585	0,0832	0,0023	4,5589	0,0739	0,0023
100	4,4313	0,0903	0,0022	4,5014	-0,886	0,0023	4,4545	0,0411	0,0022	4,5169	0,0240	0,0023	4,5170	0,0215	0,0023
500	5,2427	0,0567	0,0026	5,2427	0,0567	0,0026	5,2086	-0,0156	0,0026	5,2175	-0,0433	0,0026	5,2992	-0,0570	0,0026
1000	6,3748	0,0166	0,0032	6,3748	0,0166	0,0032	6,3769	-0,0202	0,0032	6,3770	-0,0063	0,0032	6,3716	-0,0069	0,0032
1500	6,6702	0,0081	0,0033	6,6703	0,0082	0,0033	6,6826	-0,0060	0,0033	6,6742	-0,0054	0,0033	6,6740	-0,0049	0,0033
2000	6,9171	0,0115	0,0035	6,9171	0,0115	0,0035	6,9251	-0,0079	0,0035	6,9123	-0,0087	0,0035	6,9129	-0,0065	0,0035
2500	7,1237	0,0170	0,0036	7,1237	0,0170	0,0036	7,1468	-0,0105	0,0036	7,1334	-0,0150	0,0036	7,1304	-0,0086	0,0036

*($V_s - V_{s1}$) – отклонения первоначальных скоростей V_s одномерных моделей и синтетических V_{s1}

Таблица 2

Погрешности значений скоростей P -волн, рассчитанные для одной из скоростных кривых модели Гейко при разных значениях *погрешностей* в определении глубины максимального *проникновения* луча рефрагированной волны $\varepsilon_0(q)$

h, км	V_p , (модель Гейко)	Погрешности значений скоростей P -волн		
		при $\varepsilon_0(q) = 6$, км	при $\varepsilon_0(q) = 7$, км	при $\varepsilon_0(q) = 8$, км
50	7,739	0,06625	0,07729167	0,08833333
100	8,088	0,01775	0,02070833	0,02366667
500	9,527	0,0315	0,03675	0,042
1000	11,415	0,0105	0,01225	0,014
1500	12,105	0,008	0,00933333	0,01066667
2000	12,783	0,0065	0,00758333	0,00866667
2500	13,402	0,00725	0,00845833	0,00966667

Обсуждение результатов. В работе (Мордвинова, Артемьев, 2010) указывается, что скорость, в зависимости от начальных приближений, может изменяться от 0 до 0,2 км/с в коре и в несколько больших пределах – в мантии. А среднеквадратичная погрешность определения скорости поперечных волн в исследуемом интервале глубин на основании ряда результирующих моделей, рассчитанных при различных начальных приближениях, оценивается в среднем величиной $\pm 0,1$ км/с.

Таблица 2 показывает результаты по определению погрешностей скоростей при использовании кинематического метода Тейлорового приближения, рассчитанные при погрешностях определения максимальной глубины кажущейся скорости рефрагированного луча $\varepsilon_0(q) = 6; 7; 8$ км. Скорости определены пропорционально ошибкам по глубине. Как видим, вычисленные погрешности имеют тот же порядок, что и отклонения ($V_S - V_{S1}$) для одномерных моделей и значительно меньше погрешности $\pm 0,1$ км/с (Мордвинова, Артемьев, 2010). Следовательно, наш подход к пересчёту исходной V_P в синтетическую скорость V_S с использованием средней кривой V_P/V_S , имеет право на существование для оценки первого приближения скоростной модели для поперечных волн. В общем случае, для всех изученных моделей наблюдается *регрессия* к среднему значению скорости и – соответственно, к средней плотности.

Для большей убедительности в физичности полученной синтетической S-скоростной модели сравним такой показатель, как коэффициент Пуассона, полученный по модели А Буллена (Буллен, 1978) и по модели Гейко (табл. 3). Выражение объёмной деформации позволяет рассчитать *предельное* значение коэффициента Пуассона для любого *изотропного* материала. Для напряжений в *пластической* области деформационные параметры среды (модуль упругости и коэффициент Пуассона) зависят от температуры. Значение коэффициента Пуассона возрастает с увеличением температуры в пределах 0,25–0,35. Отношение скоростей волн V_P/V_S зависит от коэффициента Пуассона среды, т. е. эти скорости можно использовать как упругие константы вместо модулей упругости. Для упругих констант их значения при статических испытаниях соответствуют изотермическим условиям, при акустических (с учётом скоростей) – адиабатическим; отличие равно $\sim 0,2\%$. Полученные значения коэффициента Пуассона позволяют в дальнейшем перейти от значений скоростей волн V_P и V_S к синтетической модели распределения температуры в верхней и нижней мантии.

Таблица 3
Сравнения коэффициентов Пуассона, полученных для модели А Буллена и с использованием P-скоростей по модели Гейко и синтетической скоростной модели S-волн

Н, км	Коэффициент Пуассона по модели Буллена А	Модель Гейко
33	0,27	0,263
413	0,28	0,297
984	0,276	0,275
2000	0,293	0,293
2898	0,299	0,302

Выводы. Отметим, что использование различных математических моделей для прогнозирования строения мантии, даже при значительной дисперсии результатов такого моделирования, имеет смысл. Получаемый разброс вызван наличием вариаций в начальных

скоростных моделях среды по сейсмическим данным. Это не означает отсутствия "надёжных" моделей среды и не умаляет их принципиальной важности, а говорит о дефиците качества, *полноты* и достоверности *исходных данных* для построения моделей среды с приемлемым разрешением.

В данной статье мы предложили свой подход для решения проблемы получения синтетической S-скоростной модели в результате пересчёта P-скоростной модели. Мы показали, что при пересчёте с использованием среднеарифметического от пяти референтных сейсмологических моделей соотношения V_P/V_S , синтетическая S-скоростная модель имеет приемлемые отклонения сравнимые с разрешающей способностью метода их получения. Как показывают результаты по определению погрешностей скоростей при использовании кинематического метода Тейлорового приближения, при погрешностях определения максимальной глубины кажущейся скорости рефрагированного луча $\varepsilon_0(q) = 6; 7; 8$ км, вычисленные погрешности скоростей имеют тот же порядок, что и отклонения ($V_S - V_{S1}$) для одномерных моделей, и значительно меньше погрешности $\pm 0,1$ км/с, которая достигается другими сейсмическими методами (Мордвинова, Артемьев, 2010).

Синтетическая S-скоростная модель, полученная в результате пересчёта P-скоростной модели, обладает свойством соразмерности с исходной моделью, что даёт преимущества в точности при дальнейшем совместном использовании двух коллинеарных моделей (P, S) при преобразовании в физико-литологические модели мантии.

Список использованной литературы

- Байрамян, А.Л. (2013). Оценка напряжённо-деформированного состояния Арагатского сейсмополигона с помощью V_P/V_S . *Учёные записки Ереванского гос. ун-та*, 3, 20–24.
- Бессонова, Э.Н., Рябой, В.З., Ситникова, Г.А., Фишман, В.М. (1973). Решение обратной кинематической задачи ГСЗ методом т. *Вычислительная сейсмология*, 14, 45–66.
- Буллен, К.Е. (1978). Плотность Земли М.: Мир.
- Бурмин, В.Ю. (2012). Обратные кинематические задачи сейсмологии. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG.
- Гейко, В.С. (1970). Определение скоростных свойств градиентной среды и реконструкция кинематической структуры поля рефрагированной волны по ее годографу. *Геофизический сборник*, 33, 15–31.
- Гервер, М.Л., Маркушевич В.М. (1967). Определение по годографу скорости распространения сейсмической волны. В кн. Методы и программы для анализа сейсмических наблюдений. Москва: Наука. *Вычислительная сейсмология*, 3, 3–51.
- Гольдин, С.В. (1977). Одна обратная кинематическая задача сейсмике отражённых волн. *Докл. АН СССР*, 233, 1, 64–67.
- Гордиенко, В.В. (2010). О природе аномалий скорости распространения продольных сейсмических волн в верхней мантии. *Геофизический журнал*, 32, 2, 43–63.
- Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. (1981). М.: Наука.
- Корзюк, В.И. (2008). Уравнения математической физики: курс лекций. Ч. 3. Минск: БГУ.
- Кузин, А.М. (2016). Флюиды в классификации разрывных нарушений. Отображение фазового состава флюида в зонах разрывных нарушений в параметрах сейсмического поля. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 3(15), 1–17. DOI: 10.29222/impng.2078-5712.2016-15.art4.
- Ленский, В.А., Адиев, Р.Я., Ахтямов, Р.А. (2008). К оценке структуры порового пространства по данным ВСП. *Conf. Proceed., Geomodel 2008 - 10th EAGE science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development, Sep. 2008*, ср-94-00122.
- Мордвинова, В.В., Артемьев, А.А. (2010). Трёхмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны сопредельных территорий по обменным волнам. *Геология и геофизика*, 51, 6, 887–904.
- Павленкова, Н.И., Пилипенко, В.Н., Роман, В.А. (1972). Методика определения скоростных разрезов земной коры. Киев: Наук. думка.
- Толстой, М., Шабатура, А., Костенко, Н., Гасанов, Ю. (2014). Сопоставление продуктов вулканизма различных структурных зон альпийского складчатого пояса Восточной Европы по результатам исследования их физических свойств. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(66), 44–49.

- Тяпкина, А.Н., Тяпкин, Ю.К. (2019). Синхронная сейсмическая инверсия для выявления перспективных участков в карбонатных породах юго-восточной части Западно-Сибирской платформы. *Геофизический журнал*, 1(41), 76-94.
- Шумлянська, Л.А., Трипольський, А.А., Цветкова, Т.А. (2014). Влияние скоростной структуры коры на результаты сейсмической томографии Украинского щита. *Геофизический журнал*, 36, 4, 95-117.
- Babuska, V., Plomerovfi, J. (1992). The lithosphere in central Europe Seismological and petrological aspects. *Tectonophysics*, 207, 141-163.
- Bijwaard, H., Spakman, W., Engdahl, E.R. (1998). Closing the gap between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 103, 30,055-30,078.
- Burmin, V.Y., Shumlianska, L.A. (2020). Design of the optimal seismological network in Ukraine. *Pure Appl. Geophys. Published: 06 March 2020*. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02453-9>.
- Christensen, N.I. (1996). Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophys. Res.*, 101, B2, Feb. 10, 3139-3156.
- Dziewonski, A.M., Anderson, D.L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Plan. Int.*, 25, 297-356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Dziewonski, A.M., Hales, A.L., Lapwood, E.R. (1975). Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 10, 12-48.
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофизический журнал*, 26, 2, 3-32.
- Gilbert, F. (1971). The Diagonal Sum Rule and Averaged Eigenfrequencies. *Geophys. J. Int.*, 23(1), 119-123.
- Gilbert, F., Dziewonski, A.M. (1975). An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 187-269.
- Herglotz, G. (1907). Über das Benndorfsche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen. *Zeitschrift für Geophys.*, 8, 5, 145-147.
- Herrin, E. (1968). Introduction to '1968 Seismological Tables for P-phases'. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1193-1195.
- Jeffreys, H., Bullen, K.E. (1940). Seismological Tables. British Association for the Advancement of Science. London.
- Johnson, L.R. (1969). Array measurements of P velocities in the lower mantle. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 59(2), 973-1008.
- Kennet, B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth traveltimes. *Geophys. J. Int.*, 122, 108-124.
- Kennett, B.L.N. (Compil. and Ed.) (1991). "IASPEI 1991 Seismological Tables." Bibliotech, Canberra, Australia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00863.x>
- Marquering, H., Snieder, R. (1996). Shear-wave velocity structure beneath Europe, the northeastern Atlantic and western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling. *Geophys. J. Int.*, 124, 283-304.
- Montanger, J.-P., Kennet, B.L.N. (1996). How to reconcile body-wave and normal-mode reference earth models. *Geophys. J. Int.*, 125(1), 229-248.
- Randall, M.J. (1971). A revised travel-time table for S. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 22, 229-234.
- Shumlianska, L.O., Dubovenko Yu.I., Pigulevskyy P.I. (2020). 2.5 Dimensional model of mantle heterogeneities under Ukrainian Shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29, 2, 51-61.
- Wiechert, E. (1907). Über Erdbebenwellen. I. Theoretisches über die Ausbreitung der Erdbebenwellen. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 415-529.
- Wilkens, R., Simmons, G., Caruso, L. (1984). The ratio V_p/V_s as a discriminant of composition for siliceous limestones. *Geophysics*, 49, 1850-1860.
- Dziewonski, A.M., Hales, A.L., Lapwood, E.R. (1975). Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 10, 12-48.
- Gerver, M.L., Markushevich, V.M. (1967). Determination of seismic wave propagation velocity by hodograph. In: Methods and programs for the analysis of seismic observations. Moscow: Science. *Computational seismology*, 3, 3-51. [in Russian]
- Geyko, V.S. (1970). Determination of the velocity properties of the gradient medium and reconstruction of the kinematic structure of the refracted wave field from its hodograph. *Geophysical collection*, 33, 15-31. [in Russian]
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geophysical journal*, 26, 2, 3-32.
- Gilbert, F. (1971) The Diagonal Sum Rule and Averaged Eigenfrequencies. *Geophys. J. Int.*, 23(1), 119-123.
- Gilbert, F., Dziewonski, A.M. (1975). An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 187-269.
- Goldin, S.V. (1977). One inverse kinematic problem of reflected wave seismic. *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 233, 1, 64-67. [in Russian]
- Gordienko, V.V. (2010). On the nature of anomalies in the propagation velocity of longitudinal seismic waves in the upper mantle. *Geophysical Journal*, 32, 2, 43-63. [in Russian]
- Herglotz, G. (1907). Über das Benndorfsche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen. *Zeitschrift für Geophys.*, 8, 5, 145-147.
- Herrin, E. (1968). Introduction to '1968 Seismological Tables for P-phases'. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1193-1195.
- Instruction on the procedure for the production and processing of observations at seismic stations of the Unified system of seismic observations of the USSR. (1981). Moscow: Nauka. [in Russian]
- Jeffreys, H., Bullen, K.E. (1940). Seismological Tables. British Association for the Advancement of Science. London.
- Johnson, L.R. (1969). Array measurements of P velocities in the lower mantle. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 59(2), 973-1008.
- Kennet, B.L.N., Engdahl, E.R., Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth traveltimes. *Geophys. J. Int.*, 122, 108-124.
- Kennett, B.L.N. (Compil. and Ed.) (1991). "IASPEI 1991 Seismological Tables." Bibliotech, Canberra, Australia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00863.x>
- Korzyuk, V.I. (2008). Equations of mathematical physics: a course of lectures. Part 3. Minsk: BSU. [in Russian]
- Kuzin, A.M. (2016). Fluids in discontinuity classification. Display of the phase composition of the fluid in the zones of faults in the parameters of the seismic field. *Actual problems of oil and gas*, 3 (15), 1-17. DOI: 10.29222 / ipng.2078-5712.2016-15.art4. [in Russian]
- Lensky, B.A., Adiev, R.Ya., Akhtyamov, P.A. (2008). On the assessment of the pore space structure according to VS-P data. *Conf. Proceed., Geomodel 2008 - 10th EAGE science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development, Sep. 2008*, cp-94-00122. [in Russian]
- Marquering, H., Snieder, R. (1996). Shear-wave velocity structure beneath Europe, the northeastern Atlantic and western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling. *Geophys. J. Int.*, 124, 283-304.
- Montanger, J.-P., Kennet, B.L.N. (1996). How to reconcile body-wave and normal-mode reference earth models. *Geophys. J. Int.*, 125 (1), 229-248.
- Mordvinova, V.V., Artemiev, A.A. (2010). Three-dimensional model of the south of the Baikal rift zone of adjacent territories by converted waves. *Geology and Geophysics*, 51, 6, 887-904. [in Russian]
- Pavlenkova, N.I., Pilipenko, V.N., Roman, V.A. (1972). Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
- Randall, M.J. (1971). A revised travel-time table for S. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 22, 229-234.
- Shumlianska, L.A., Tripolsky, A.A., Tsvetkova, T.A. (2014). Influence of the velocity structure of the crust on the results of seismic tomography of the Ukrainian Shield. *Geophysical Journal*, 36, 4, 95-117. [in Russian]
- Shumlianska, L.O., Dubovenko, Yu.I., Pigulevskyy, P.I. (2020). 2.5 Dimensional model of mantle heterogeneities under Ukrainian Shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29, 2, 51-61.
- Tolstoy, M., Shabatura, A., Kostenko, N., Hasanov, Yu. (2014). Comparison of volcanic products of different structural zones of the alpine fold belt of Eastern Europe based on the results of a study of their physical properties. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (66), 44-49. [in Russian]
- Tyapkina, A.N., Tyapkin, Yu.K. (2019). Synchronous seismic inversion to identify promising sites in carbonate rocks of the southeastern part of the West Siberian platform. *Geophysical Journal*, 1 (41), 76-94. [in Russian]
- Wiechert, E. (1907). Über Erdbebenwellen. I. Theoretisches über die Ausbreitung der Erdbebenwellen. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 415-529.
- Wilkens, R., Simmons, G., Caruso, L. (1984). The ratio V_p/V_s as a discriminant of composition for siliceous limestones. *Geophysics*, 49, 1850-1860.

Надійшла до редколегії 29.06.21

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

THE POSSIBILITY OF CREATING A SYNTHETIC S-VELOCITY MODEL BY RECALCULATING THE P-VELOCITY MODEL

The problem of limited and incomplete seismological data leads to significant distortions in design models based on primary seismological models. One of the reasons for the incompleteness of the primary seismological data is the significant predominance of these definitions of P phase arrivals of body waves in comparison with the registration of S-wave arrivals. In this regard, the question arises about the statistical proportionality (significance) and correspondence of the velocity models obtained from the arrivals of P- and S-waves. As part of the solution of this problem, the authors studied the possibility of recalculating the P-velocity model into a synthetic velocity model of S-waves to assess its similarity to the experimental model. The article shows that the deviations of the synthetic model of S-wave velocities from the measured curve are comparable with the accuracy of the methods by which these velocity models were obtained, therefore, the obtained synthetic model of S-waves can be used to construct structural models of the mantle. We proposed our own approach to solving the problem of obtaining a synthetic S-velocity model because of recalculation of the P-velocity model and showed that when recalculated, using the arithmetic mean of five reference seismological models of the Vp/Vs ratio, the synthetic S-velocity model has acceptable deviations comparable to the resolution ability of the method of obtaining them. As the results of determining the velocity errors when using the kinematic method of the Taylor approximation show, with errors in determining the maximum depth of the apparent velocity of the refracted ray $\varepsilon_0(q) = 6; 7; 8$ km, the calculated velocity errors are of the same order as the deviations for one-dimensional models, and significantly less than the error of ± 0.1 km/s, which is achieved by other seismic methods.

The synthetic S-velocity model obtained because of the recalculation of the P-velocity model has the property of proportionality with the original model, which gives advantages in accuracy in the further joint use of two collinear models (P, S) when converting to physico-lithological models of the mantle.

Keywords: synthetic S-wave model, correction, cinematic method of seismic tomography.

Л. Шумлянська, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: lashum@ukr.net;
Ю. Дубовенко, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.;
П. Пігулевський, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.;
Інститут геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна,
просп. Академіка Палладіна, 32, Київ, Україна

ПРО МОЖЛИВІСТЬ СТВОРЕННЯ СИНТЕТИЧНОЇ S-ШВИДКІСНОЇ МОДЕЛІ ШЛЯХОМ ПЕРЕРАХУНКУ P-ШВИДКІСНОЇ МОДЕЛІ

Проблема обмеженості і неповноти сейсмологічних даних призводить до суттєвих перекоженень у розрахункових моделях, заснованих на первинних сейсмологічних моделях. Однією із причин неповноти первинних сейсмологічних даних є значне переважання даних визначень вступів Р-фаз об'ємних хвиль порівняно з реєстрацією вступів S-хвиль. У зв'язку з цим виникає питання статистичної пропорційності (значущості) і відповідності швидкісних моделей, отриманих по приходу Р- і S-хвиль. У рамках вирішення цього завдання в роботі вивчено можливість перерахунку Р-швидкісної моделі в синтетичну швидкісну модель S-хвиль з метою оцінки її подоби до експериментальної моделі. Показано, що відхилення синтетичної моделі швидкостей S-хвиль від вимірної кривої можна порівняти з точністю методів, за якими були отримані ці швидкісні моделі, отже отриману синтетичну модель S-хвиль можна використовувати при побудові структурних моделей мантії. Ми запропонували свій підхід для вирішення проблеми отримання синтетичної S-швидкісної моделі в результаті перерахунку Р-швидкісної моделі і показали, що при перерахунку з використанням середньоарифметичного від п'яти референтних сейсмологічних моделей співвідношення Vp/Vs, синтетична S-швидкісна модель має прийнятні відхилення, порівнянні з роздільною здатністю методу їх отримання. Як показують результати з визначення погрешностей швидкостей при використанні кінематичного методу Тейлорового наближення, при похибці визначення максимальної глибини уявної швидкості рефрагированного променя $\varepsilon_0(q) = 6, 7, 8$ км, обраховані похибки швидкостей мають той же порядок, що і відхилення для одновимірних моделей, і значно менше похибки $\pm 0,1$ км/с, яка досягається іншими сейсмічними методами.

Синтетична S-швидкісна модель, отримана в результаті перерахунку Р-швидкісної моделі, має властивість пропорційності з вихідною моделлю, що дає переваги в точності при подальшому спільному використанні двох колінарних моделей (Р, S) при перетворенні у фізико-літологічні моделі мантії.

Ключові слова: синтетична S-швидкісна модель, похибка, кінематичний метод сейсмічної томографії.

УДК 622.41

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.07>В. Портнов¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: vs_portnov@mail.ru;В. Юров^{1,2}, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: exciton@list.ru;Н. Рева³, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;А. Маусымбаева^{1,4}, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: aliya_maussym@mail.ru;С. Иманбаева¹, докторант,
E-mail: svetakaz77@mail.ru;¹Карагандинский технический университет,
просп. Н. Назарбаева, 56, г. Караганда, 100027, Казахстан;²Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова,
ул. Университетская, 28, г. Караганда, 470074, Казахстан;³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;⁴Университет Назарбаева,
просп. Кабанбай Батыра, 53, Нур-Султан, 010000, Казахстан

НАНОСТРУКТУРЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

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

По современным представлениям под поверхностным слоем соединений понимают сверхтонкую пленку, свойства, структура и состав которой отличны от кристаллической подложки, с которой этот слой находится в термодинамическом равновесии. Поверхностный слой состоит из двух слоев – $d(l)$ толщиной $h=d$, при которой происходит фазовый переход, и $d(l)$ с нижней границей $h \approx 10d$, при которой начинают проявляться физические свойства кристалла. Показано, что толщина поверхностного слоя $d(l)$ определяется одним фундаментальным параметром – молярным (атомным) объемом элемента $v=M/\rho$, где M – молярная масса (г/моль), ρ – плотность (г/см³). Среднестатистическая структурная единица угля соответствует высшим фуллеренам с числом атомов углерода в кластере >100 , что является уникальной особенностью угольного вещества, которое представляет собой не кристаллическую структуру, а сложный полимер, имеющий надмолекулярную структуру. Толщина поверхностного слоя угольного вещества на два порядка больше толщин чистых металлов и близка к толщине поверхностного слоя высших фуллеренов C_{96} (135 нм).

Увеличение пористости угольного вещества до 90 % приводит к увеличению толщины $d(l)$ поверхностного слоя на порядок, т. е. до 2 мкм. В связи с этим "кажущееся" изменение радиуса угольной частицы означает изменение ее массы, пропорциональное выделению метана из твердого раствора. Установлена зависимость времени полного распада углеметана τ_0 от параметра $|\lambda|$. Получено уравнение, в которое входит отношение потока тепла, вносимого в объем пласта за счет внутреннего процесса тепловыделения, к потоку тепла, который уносится из объема за счет теплопроводности. В случае если это отношение превысит некоторую критическую величину порядка единицы, возникает тепловой взрыв, приводящий к распаду углеметана.

Размерные эффекты в слое $d(l)$ определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие "квазиклассические" размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах. Слой $d(l)$ для угольного вещества изменяется от 151,5 нм (Антрацит) до 214,2 нм (Бурый). Размерная температура наночастицы угля при начальной температуре $T_c = 300$ К будет равна не менее $T_m = 872$ К. Это соответствует частицам порядка полмикрона. Угольные частицы с радиусом около одного микрона (или отмеченных полмикрона) в случае разложения угольного вещества прогреваются до температур, при которых возможно самовозгорание наночастиц. Гигроскопическая влага в генетическом ряду каменных углей имеет определенную закономерность изменения и коррелирует с толщиной их поверхностного слоя.

Ключевые слова: угольное вещество, поверхностный слой, кристаллическая подложка, фуллерены, молярный объем, кластер, наноструктура, молекулярная масса.

Постановка проблемы. Гиббс (Гиббс, 1950) рассматривал поверхностный слой как геометрическую, не имеющую толщины поверхность. Для термодинамики поверхностных явлений используется подход Ван-дер-Ваальса, Гуггенгейма, Русанова, в котором поверхностный слой рассматривается как слой конечной толщины (Русанов, 1967). По современным представлениям (Оура и др., 2006) под поверхностным слоем понимают сверхтонкую пленку, находящуюся в термодинамическом равновесии с кристаллической подложкой, свойства, структура и состав которой отличны от объемных. Однако вопрос о толщине поверхностного слоя и ее влияния на свойства вещества остается пока открытым. То же самое относится и к наноструктуре угольного вещества.

Анализ публикаций по теме исследований. Исследованиями поверхностного слоя и его влияния на свойства веществ посвящен целый ряд научных публикаций: (Гиббс, 1950; Русанов, 1967; Оура и др., 2006; Юров и др., 2018; Юров и Маханов, 2020; Юров, 2020; Yurov et al., 2019) и ряд других. В результате разработаны представления о поверхностном слое веществ (Гиббс, 1950; Русанов, 1967; Оура и др., 2006), установлена связь толщины поверхностного слоя с поверхностной энергией и атомным объемом

элементов (Юров и др., 2018), проанализирована толщина фуллеренов различной структуры (Юров и Маханов, 2020), рассчитана толщина поверхностного слоя пористого кремния и ее влияние на свойства кремнистых образований (Юров, 2020; Korotcenkov, 2015), изучены фазовые переходы в поверхностном слое металлов (Yurov et al., 2019). Целый ряд публикаций, приведенных в перечне использованных источников, посвящены таким опасным явлениям, как самонагревание и самовозгорание угольных пластов, присутствию в них метана и его выделению, которые во многом также связаны с наноструктурами угольных образований и, в частности, с их поверхностным слоем.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Важной частью общей проблемы является исследование роли толщины поверхностного слоя угольного вещества в протекании большинства процессов, происходящих при взаимодействии угольных образований через их контактную поверхность с внешней средой.

Цель исследований. Сложный состав ископаемых углей характеризуется тремя основными составными частями: органической массой, минеральными компонентами и влагой (Гюльмалиев и Гагарин, 2010).

© Портнов В., Юров В., Рева Н., Маусымбаева А., Иманбаева С., 2021

Соотношение этих макросоставляющих является индивидуальным для углей каждого месторождения или даже его участка. Целью работы является определить толщину тонких пленок угольного вещества и их влияние на физические свойства угольных образований и процессы, протекающие при их взаимодействии с вмещающей средой.

Описание используемой модели. В работе (Юров и др., 2018) обобщена модель поверхностного слоя атомарно-гладких металлов (рис. 1а). Поверхностный слой атомарно-гладкого металла состоит из двух слоев: $d(I)$ и $d(II)$. Первый слой толщиной $h=d$ назван слоем (I), а слой толщиной $\Delta h \approx 9d$, нижняя граница которого находится при $h \approx 10d$, – слоем (II) атомарно-гладкого кристалла. При $h=d$ в поверхностном слое происходит фазовый переход (рис. 1б), а при $h \approx 10d$ начинается проявляться размерная зависимость физических свойств материала.

Для определения толщины поверхностного слоя различных соединений используется размерная зависимость физического свойства $A(r)$ (Юров и др., 2018):

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r+d}\right), \quad r \leq d; \quad (1)$$

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right), \quad r \geq d,$$

где $r=h$ (рис. 1а).

Параметр d связан с поверхностным натяжением σ формулой (Юров и др., 2018)

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение массивного образца; v – объем одного моля ($\text{см}^3/\text{моль}$); R – газовая постоянная; T – температура.

В работах (Юров и др., 2018; Рехвиашвили и др., 2007) было показано, что с большой точностью выполняется соотношение

$$\sigma = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m, \quad (3)$$

где T_m – температура плавления твердого тела (К). Соотношение выполняется для всех металлов и кристаллических соединений. Если его подставить в (2), то при $T = T_m$ получим

$$d(I) = 0,17 \cdot 10^{-9} \cdot v, \text{ м} = 0,17 \cdot v, \text{ нм}. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что толщина поверхностного слоя $d(I)$ определяется одним фундаментальным параметром – молярным (атомным) объемом элемента ($v = M/\rho$, где M – молярная масса (г/моль), ρ – плотность (г/см^3)), который периодически изменяется в соответствии с таблицей Д.И. Менделеева. В таблице 1 показана толщина поверхностного слоя $d(I)$ чистых металлов.

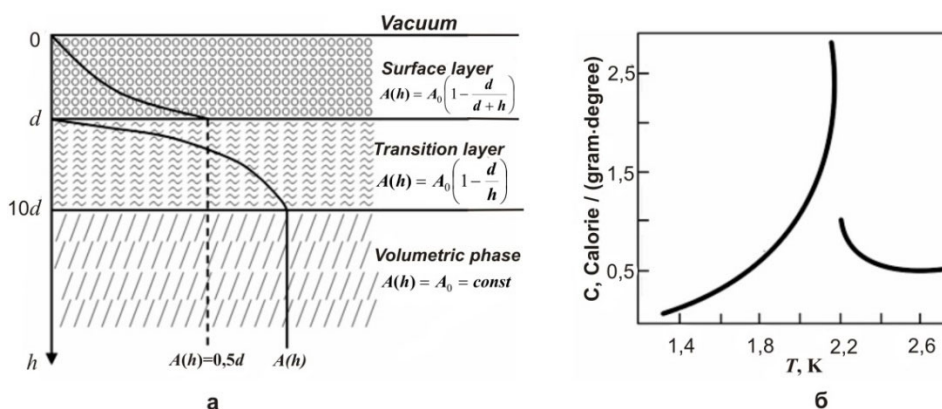


Рис. 1. Схематическое изображение поверхностного слоя (а) и фазового перехода $h=d$ (б):
С – удельная теплоемкость (кал/(г·град))

Таблица 1

Толщина d поверхностного слоя $d(I)$ чистых металлов (Me) (Юров и др., 2018)

Me	d , нм	Me	d , нм	Me	d , нм	Me	d , нм	Me	d , нм	Me	d , нм
Li	2,2	Sr	5,9	Sn	2,8	Cd	3,4	Fe	1,2	Gd	3,4
Na	4,5	Ba	6,6	Pb	3,1	Hg	1,8	Co	1,1	Tb	3,3
K	7,7	Al	1,6	Se	2,8	Cr	1,2	Ni	1,1	Dy	3,3
Rb	10,0	Ga	2,0	Te	3,5	Mo	1,8	Ce	3,6	Ho	3,2
Cs	12,1	In	2,7	Cu	1,2	W	1,6	Pr	3,5	Er	3,2
Be	0,8	Tl	2,4	Ag	1,7	Mn	1,1	Nd	3,4	Tm	3,1
Mg	2,4	Si	2,0	Au	1,9	Tc	1,4	Sm	3,4	Yb	4,2
Ca	4,4	Ge	2,4	Zn	1,6	Re	1,5	Eu	5,0	Lu	3,0

Экспериментально толщину $d(I)$ можно определить методом скользящих рентгеновских лучей. Так для золота и кремния получено (Guo, 2010) $d(I) = 1,9$ и $2,1$ нм соответственно, что совпадает с данными, приведенными в табл. 1.

Толщина поверхностного слоя угольного вещества. Чтобы по формуле (4) рассчитать толщину поверхностного слоя угольного вещества, нужно знать молярную массу и плотность. Мы воспользуемся работой (Москаленко и др., 2018), где показано, что такая

характеристика, как "молекулярная масса" угля, достаточно хорошо отражает степень метаморфизма, а также является определяющей для изучения состава и строения угольного сырья. В этой работе приведены методики расчета молекулярной массы на 100 атомов углерода или на 100 атомов органической массы угля, что зависит от принятой к рассмотрению среднестатистической структурной единицы. Полученная модель выглядит следующим образом:

$$M_{100} = 130,385 \cdot C - 1,941 \cdot O - 14042 \cdot f_e + 461,909 \cdot N, \quad (5)$$

где M_{100} – молекулярная масса на 100 атомов углерода; C, O – содержание в топливе углерода и кислорода соответственно по данным элементного анализа, f_e – показатель степени ароматичности органической массы угля, N – число парамагнитных центров.

По результатам элементного анализа различных разновидностей углистых образований в рамках рассмотренной модели (5) были рассчитаны их молярные массы. Результаты выполненных расчетов отображены в табл. 2 и на рис. 2а, на котором представлена графическая иллюстрация молярных масс различных марок угля, достаточно наглядно отражающая их тесную связь со степенью метаморфизма: в ряду углистых образований от бурых углей к антрацитам с увеличением степени метаморфизма молярная масса имеет четкую тенденцию к снижению.

Рисунок 2б, заимствованный из работы (Москаленко и др., 2018), иллюстрирует тесную корреляционную связь молярных масс углистых образований с содержанием углерода в них.

На основе определенных молярных масс для различных марок угля и соответствующих им плотностей, были рассчитаны по формуле (4) толщины поверхностного слоя $d(I)$ ($h_I=d$) и нижние границы слоя $d(II)$ ($h_{II}=10d$), с которых начинается проявляться размерная зависимость физических свойств углей (табл. 2). Сравнение табл. 1 и 2 показывает, что толщины поверхностного слоя угольного вещества примерно на два порядка больше толщин поверхностных слоев чистых металлов.

Толщина поверхностного слоя фуллеренов. Фуллерены – углеродные кластеры с четным, более 20, количеством атомов углерода, образующих три связи друг с другом. Атомы в молекулах фуллеренов расположены на поверхности сфероидов в вершинах гексагонов и пентагонов (Шпилевский, 2006).

Наиболее распространенными и изученными являются фуллерены C_{60} и C_{70} . Фуллерены с количеством атомов более 70 (например, C_{76} , C_{78} , C_{84}) называют высшими фуллеренами. Чтобы рассчитать толщину поверхностного

слоя $d(I)$ по формуле (4), нужно знать молярную массу M и плотность ρ фуллеренов. Эти данные мы возьмем из работ (Юров и Маханов, 2020; Магомедов, 2005). Результаты выполненных расчетов толщины поверхностного слоя фуллеренов представлены в табл. 3.

Зная толщину поверхностного слоя $d(I)$ и параметр кристаллической решетки a , можно оценить количество n монослоев, которые образуют слой $d(I)$: $n = d(I)/a$. Сравнение табл. 1 и 3 показывает, что толщина поверхностного слоя $d(I)$ фуллеренов значительно превышает толщину поверхностного слоя металлов.

Сравнение табл. 2 и 3 показывает, что толщина поверхностного слоя высших фуллеренов C_{96} (135 нм) близка к таковой для антрацита (151,5 нм). В работе (Москаленко и др., 2018) приведены методики расчета молекулярной массы на 100 атомов углерода или на 100 атомов органической массы угля, что отвечает принятой к рассмотрению среднестатистической структурной единице. Таким образом, среднестатистическая структурная единица угля соответствует высшим фуллеренам с числом атомов углерода в кластере >100 , что является уникальной особенностью угольного вещества.

Определим теперь толщину поверхностного слоя других соединений углерода – алмаза и графита (табл. 4).

Сравнение табл. 4 и 1 показывает, что толщина поверхностного слоя алмаза и графита находится на уровне бериллия ($Be - 0,8$ нм) и содержит 2–3 монослоя атомов углерода. Структура золота в слое $d(I)$ содержит также 3 монослоя (Оура и др., 2006). В результате равновесная структура верхнего атомного слоя углерода должна отличаться от соответствующей атомной плоскости в объеме.

Выделяют два основных типа атомной перестройки поверхности (Оура и др., 2006): релаксация и реконструкция. Под релаксацией поверхности понимается отличие расстояний между последними кристаллографическими плоскостями, параллельными плоскости границы с вакуумом, от расстояний между такими же плоскостями в объеме (рис. 3). При этом предполагается, что расположение атомов в последней плоскости полностью совпадает с расположением атомов во всех остальных параллельных ей плоскостях.

Таблица 2

Толщина поверхностного слоя угольного вещества

Марка угля	Молярная масса M , г/моль	Плотность ρ , г/см ³	Молярный объем v , см ³ /моль	$h_I=d$, нм	$h_{II}=10d$, нм
Бурые (Б)	1575	1,25	1260,0	214,2	2142
Длиннопламенные (Д)	1578	1,35	1168,9	198,7	1987
Газовые (Г)	1448	1,24	1167,7	198,5	1985
Жирные (Ж)	1400	1,25	1120,0	190,4	1904
Коксовые (К)	1351	1,27	1063,8	180,8	1808
Отощенно-спекающие (ОС)	1340	1,29	1038,8	176,6	1766
Тощие (Т)	1332	1,31	1016,8	172,8	1728
Антрациты (А)	1310	1,47	891,2	151,5	1515

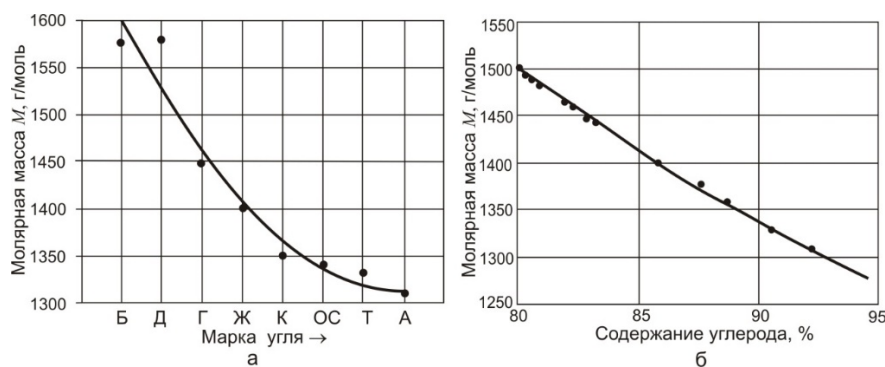


Рис. 2. Молярные массы различных марок угля (а) и их зависимость от содержания углерода (б) (Москаленко и др., 2018)

Таблица 3

Толщина поверхностного слоя фуллеренов

Фуллерен	ρ , г/см ³	M , г/моль	a , Å	$d(I)$, нм	$d(II)$, нм	n
C ₃₆	1,810	432,40	11,725	40,61	406,1	36
C ₆₀	1,484	720,66	14,17	85,56	855,6	60
C ₇₀	1,547	840,23	14,96	93,39	933,9	64
C ₇₆	1,582	912,84		98,09	980,9	-
C ₈₄	1,589	1008,92		107,93	1079,3	-
C ₉₆	1,452	1153,06		135,00	1350,0	-

Таблица 4

Толщина поверхностного слоя алмаза и графита

Углерод	ρ , г/см ³	M , г/моль	a , нм	$d(I)$, нм	$d(II)$, нм	n
C _A	3,52	12,01	0,357	0,6	6	~ 2
C _G	2,23	12,01	0,355	0,9	9	~ 3

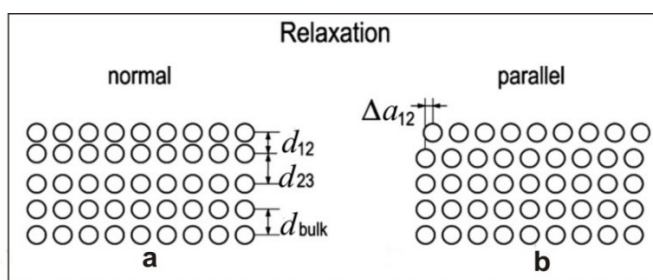


Рис. 3. Нормальная (а) и латеральная (b) релаксация поверхности

Отклонения межслойного расстояния от объемного значения убывает с глубиной, причем часто осцилляторно. В частности, в случае поверхности А1(110) второе межслойное расстояние растянуто на +5,0 %, а третье опять сжато, хотя и незначительно, на -1,6 % (Оура и др., 2006).

У фуллеренов (табл. 3) число монослоев, подвергнутых искажению на поверхности, составляет порядка 30 и более слоев. У угольного вещества эти искажения еще значительнее, т. е. порядка 100 атомных слоев углерода находятся в совершенно других условиях по сравнению с остальным объемом. В этом и состоит уникальность угольного вещества, которое представляет собой не кристаллическую структуру, а сложный полимер, имеющий надмолекулярную структуру.

Пористость угольного вещества. Существующая номенклатура, принятая Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC, выделяет три категории пористости вещества в зависимости от размера (диаметра) пор: микропористая (<2 нм), мезопористая (2–50 нм) и макропористая (>50 нм) (Korotcenkov, 2015).

Важной характеристикой кремния (Si) является степень его пористости P , определяемая как:

$$P = 1 - \rho_{\text{пк}} / \rho_{\text{Si}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{пк}}$ – плотность пористого кремния (ПК), ρ_{Si} – плотность монокристалла.

Учитывая (4) и (6), толщину первого верхнего слоя пористого кремния $d(I)_{\text{пк}}$ можно записать в виде (Юров, 2020):

$$d(I)_{\text{пк}} = d(I)_{\text{Si}} / (1 - P). \quad (7)$$

Соотношение (7) примем как расчетное, позволяющее оценить влияние пористости угольного вещества на толщину первого верхнего слоя $d(I)$. Выполним такие расчеты для двух марок угля: бурого (Б) и антрацита (А). В качестве исходных значений параметра d воспользуемся данными, приведенными в табл. 2, а именно: для бурого угля $d(I)_{\text{Б}} = 214,2$ нм, для антрацита $d(I)_{\text{А}} = 151,5$ нм. Будем считать, что пористость меняется от 40 % до 90 %, и рассчитаем изменение толщины поверхностного слоя для этих двух марок угля (табл. 5). Из таблицы следует, что увеличение пористости до 90 % приводит к увеличению толщины $d(I)$ поверхностного слоя на порядок, т. е. до 2 мкм.

Таблица 5

Толщина поверхностного слоя в зависимости от пористости

Марка угля ↓	P , % →	40	50	60	70	80	90
Бурый (Б)	$d(I)_{\text{Б}}$, нм →	357,0	428,6	535,5	714,0	1071,0	2142,0
Антрацит (А)	$d(I)_{\text{А}}$, нм →	252,5	303,0	378,8	505,0	757,5	1515,0

В соответствии с классификацией М.М. Дубинина, основанной на механизмах, протекающих в порах адсорбционных и капиллярных процессов, поры разделяют по эквивалентному радиусу, равному удвоенному отношению площади нормального сечения поры к ее периметру, на микропоры с эквивалентным радиусом $r < 0,6...0,7$ нм, супермикропоры с $0,6...0,7 < r < 1,5...1,6$ нм, мезопоры с $1,6 \leq r \leq 100$ нм и макропоры с $r > 100...200$ нм (Олонцев и др., 2015). Это незначительно отличается от нашего подхода. Согласно табл. 5 для высокопористых марок угля с $P \geq 40$ %, толщина слоя $d(I) > 250$ нм, что согласно

приведенной структурной классификации пор соответствует макропорам.

Удельный объем микропор и супермикропор может достигать 1,3...1,5 см³/г. Углеродные адсорбенты содержат поры и других разновидностей (табл. 5). Мезопоры с удельным объемом 0,04...0,20 см³/г и удельной поверхностью скелета до 100 см²/г участвуют в адсорбции крупных молекул органических веществ из растворов. У некоторых лабораторных образцов удельный объем мезопор достигает 0,7 см³/г, а удельная поверхность 200...450 см²/г.

Для каждого сырья существует оптимальный темп нагрева при производстве механически прочных адсорбентов с развитой структурой пор. В табл. 6 приведены данные о влиянии скорости нагрева гранул на их

пористую структуру. Из приведенных данных следует, что увеличение скорости нагрева гранул приводит к некоторому увеличению у них объема всех видов пор и, как следствие, их суммарного объема.

Таблица 6

Характеристики пористой структуры активированного угля (Малышев и др., 2000)

Скорость нагрева, °С/мин	Суммарный объем пор, см³/г	Объем микропор, см³/г	Объем мезопор, см³/г	Объем макропор, см³/г
3	0,21	0,06	0,03	0,12
10	0,43	0,10	0,03	0,30
20	0,53	0,11	0,05	0,37

Наличие пор в угольном веществе важно, так как их присутствие и структура влияет на широко распространенный в практике горного производства параметр, называемый коэффициентом фильтрации (K_f), который практически представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через образец породы с площадью поперечного сечения S (Десяткин, 2006):

$$K_f = Q/(t \cdot S), \quad (8)$$

где Q – количество жидкости (газа), прошедшее через образец (породы, угля); t – время фильтрации. В табл. 7 приведены пределы изменения значений коэффициента фильтрации и его средние значения для различных марок углей.

Таблица 7

Пределы изменения коэффициента фильтрации для различных марок угля, м/мин (Десяткин, 2006)

Марка угля →	Д	Г	Ж	К	ОС	Т	А
$(K_f \cdot 10^5)_{\max} \rightarrow$	4,24	3,50	13,70	3,50	3,27	3,40	9,7
$(K_f \cdot 10^5)_{\min} \rightarrow$	3,12	0,20	0,26	0,80	0,26	0,30	0,13
$(K_f \cdot 10^5)_{\text{ср}} \rightarrow$	3,68	1,45	2,45	1,54	1,3	1,63	1,7

Из табл. 7 следует, что данные по фильтрации коррелируют с толщиной поверхностного слоя угольного вещества (табл. 2) согласно формуле $K_f = Q/(t \cdot S) \sim 1/d(l)$.

Метан в угольном веществе. Один из вариантов распределения метана в угле, согласно форм существования в зависимости от его локализации (в процентном отношении от общего количества), приведен в работах (Василенко и др., 2015; Малышев и др., 2000) и состоит в следующем:

- свободный – метан локализуется внутри макропор, микротрещин и других дефектов сплошности угля в природных условиях (2–12 %);
- адсорбированный – локализация метана происходит на угольных поверхностях природных пор и дефектов сплошности, межблочных промежутках, включая объемное заполнение переходных пор и макроскопических дефектов (8–16 %);
- твердый углеметановый раствор – метан локализован в межмолекулярном пространстве угольного вещества (70–85 %);
- химически сорбированный метан – сосредоточен в дефектах ароматических слоев кристаллитов (1–2 %);
- твердый раствор внедрения – метан находится внутри клатратоподобных структур (1–3 %).

Понятие средней макромолекулы или среднестатистической структурной единицы угля удобно для расчетов, но в действительности молекулярная масса макромолекул в любом образце угля изменяется в широком интервале. При этом более высокомолекулярные компоненты формируют жесткий скелет угольного вещества, а низкомолекулярные размещаются в межмолекулярном пространстве.

Рассмотрим физическую модель угольной частицы, содержащей молекулы метана (Таткеева и др., 2010). Систему "уголь+метан" будем называть *углеметаном*. Если к частице углеметана подвести энергию $E \geq 200$ кДж/моль, которая соответствует энергии вхождения молекулы метана в твердый раствор углеводорода, то молекулы метана начнут покидать угольную частицу. При этом масса частицы углеметана начнет со

временем уменьшаться. Формально этот процесс имеет сходство с растворением или плавлением частицы и протекает по законам фазовых переходов I рода.

Будем считать, что на поверхности раздела фаз достигнуто концентрационное равновесие. Пока будем пренебрегать поверхностным натяжением, влияние которого рассмотрим ниже. Частицу углеметана считаем сферической (координата z). Математическая формулировка нестационарной задачи для концентрации метана $c(t)$ будет иметь вид

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{2}{z} \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial c}{\partial t}$$

с начальными и граничными условиями

$$c(z, 0) = c_0, \quad c(\infty, t) = c_1, \quad c(z_0, \infty) = c_\infty,$$

$$(c_1 - c_\infty) \frac{dz_0}{dt} = \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_0},$$

где c_0 – концентрация метана в начальный момент времени; c_1 , c_∞ – концентрация метана на поверхности сферы; D – коэффициент диффузии. При решении этой задачи условно матрица разбивается на две области: $z_0 \leq z \leq 1$ и $1 \leq z \leq \infty$. Подробное решение приведено в работе (Юров и др., 2013).

Здесь нас интересует результат. Проанализируем полученное решение. Прежде всего, заметим, что "кажущееся" изменение радиуса угольной частицы z_0 означает изменение ее массы, пропорциональное выделению метана из твердого раствора. На рис. 4 изображена зависимость времени полного распада углеметана τ_0 от параметра $\lambda = (c_0 - c_\infty)/(c_1 - c_\infty) < 0$.

Изобары сорбции метана соответствуют кривой времени распада углеметана (рис. 4), поскольку процесс сорбции и десорбции является обратимым.

Для пористых и сыпучих масс различают истинную плотность (без учета пустот) и "кажущуюся" плотность – отношение массы вещества ко всему занимаемому им объему. Общее превращение органической части угля количественно связано с изменением его "кажущейся" плотности и объема зерен (Miura and Silveston, 1975).

Подобная зависимость справедлива для карбонизации гранул неспекающихся тощих углей, а также пористость образующегося карбонизата зависит от плотности скелета и от "кажущейся", но не истинной, плотности исходного углеродсодержащего продукта, его массового и объемного выхода при термообработке.

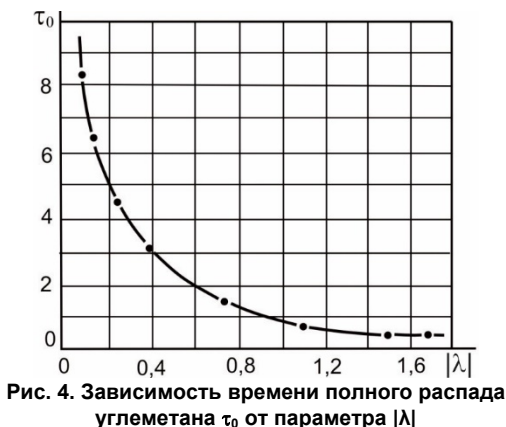


Рис. 4. Зависимость времени полного распада углеметана τ_0 от параметра $|\lambda|$

Далее в работе (Таткеева и др., 2010), получено равенство:

$$\frac{\ell^2}{\chi} \cdot \frac{df(T)}{dT} \Big|_{T=T_{cm}} = 0,44.$$

В приведенное уравнение входит отношение потока тепла, вносимого в объем пласта за счет внутреннего процесса тепловыделения ℓ , к потоку тепла, который уносится из объема за счет теплопроводности χ . Как только это отношение превысит некоторую критическую величину, порядка единицы, возникает тепловой взрыв, приводящий к распаду углеметана. Распад углеметана возникает и с уменьшением ее частиц (толщины поверхностного слоя). В работе (Юров, 2005) было показано:

$$T_{nl}(r) = T_0(1 - d/r),$$

$$d = 2\sigma\nu / RT.$$

где r – радиус частицы, $T_{nl}(r)$ – температурная зависимость пласта от r , T_0 – температура плавления массивного образца, T – текущая температура, $R = 8,317$ Дж/(град·моль) – газовая постоянная, d – критический радиус, начиная с которого имеет место размерный эффект.

Размерный эффект в угольном веществе. Толщина поверхностного слоя $d(l)$ чистых металлов при температуре, близкой к температуре плавления, колеблется от 0,8 нм (Be) до 12,1 нм (Cs), а для угольного вещества – от 151,5 нм (Антрацит) до 214,2 нм (Бурый).

В слое $d(l)$ поверхностное натяжение σ начинает зависеть от r в соответствии с уравнением А.И. Русанова (Русанов, 1967):

$$\sigma = K \cdot r, \quad (9)$$

где $K = \text{const}$.

В работе (Юров и др., 2013) для предела текучести от получено уравнение

$$\sigma_T = \sigma_M + C \cdot \sigma \cdot d^{-1/2}, \quad (10)$$

где σ_M – натяжение, характеризующее сопротивление пластической деформации со стороны кристаллической решетки и ее дефектов, препятствующих движению решеточных дислокаций, $C = \text{const}$, σ – поверхностное натяжение угля.

Уравнение (10) по форме совпадает с уравнением Холла-Петча (Глезер и др., 2016), в котором

коэффициент пропорциональности $K = C \cdot \sigma$, а $d^{-1/2}$ заменяется на $d^{1/2}$. С учетом этого уравнение (10) запишется в виде

$$\sigma_T = \sigma_M + K \cdot d^{1/2}. \quad (11)$$

Данное уравнение представляет собой "обратный" эффект Холла-Петча.

Размерные эффекты в слое $d(l)$ определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие "квазиклассические" размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах (Уваров и Болдырев, 2001).

Для металлов размер слоя $d(l)$ простирается до $d \approx \lambda_{ab} \cdot (\sim 0,01 \div 0,1 \text{ нм})$, где λ_{ab} – длина волны де Бройля (Фейнман и др., 1976), после чего начинаются квантовые размерные эффекты. К основным квантовым размерным структурам относятся структуры: с двумерным электронным газом – эпитаксиальные пленки, МДП-структуры, гетероструктуры и т. п.; структуры с одномерным газом – квантовые нити или проволоки; структуры с нульмерным газом – квантовые точки, ящики, кристаллиты (Арутюнов, 2015).

Слой $d(II)$ простирается примерно до размера $h_{II} \approx 10d$, где начинается объемная фаза и проявление размерных свойств вещества. Под наноматериалами принято понимать материалы, основные структурные элементы которых не превышают нанотехнологической границы 100 нм, по крайней мере в одном направлении. Для угольного вещества эта граница на порядок больше и составляет – от 1515 нм для антрацита до 2142 нм для бурого угля (табл. 2). Ряд исследователей высказывают мнение, что верхний предел (максимальный размер элементов) для наноструктур должен быть связан с некими критическими характеристическими параметрами, а именно: с длиной свободного пробега носителей в явлениях переноса, размерами доменов (доменных стенок), диаметром петли Франка-Рида для скольжения дислокаций и т. п. (Уваров и Болдырев, 2001). Значит в слое $d(II)$ должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами согласно уравнению (1).

На рис. 1 показан фазовый переход, связанный с реконструкцией или релаксацией поверхности $h = d$. Исследованию фазовых переходов и реконструкций на поверхности твердого тела посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ (Оура и др., 2006; Мамонова и др., 2011). Для описания фазовых переходов в наноструктурах предложены различные модели, среди которых можно отметить метод среднего поля Ландау, в котором используется "параметр порядка" (Maritan et al., 1991). В результате, воспользовавшись теорией Ландау и заменив температуру T на координату h (Yurov et al., 2019), скачок теплоемкости ΔC_p при фазовом переходе будет равен

$$\Delta C_p = \alpha_0^2 \cdot d / 2C_0, \quad (12)$$

где C_0 , α_0 – константы теории Ландау (Maritan et al., 1991).

Для золота $\alpha_0^2 / 2C_0 \approx 0,45$. Следовательно, учитывая данные табл. 1, скачок теплоемкости для золота при $h=d$ будет равен: $\Delta C_p|_{h=d} = 0,45d = 0,855 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$. В работе (Гафнер и др., 2015) проведены расчеты методом молекулярной динамики теплоемкости золота при размерах частиц от 1,5 до 5,5 нм, из которых следует, что $\Delta C_p \approx 0,65 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$, что близко к полученному значению.

В табл. 8 представлены результаты выполненных расчетов скачка теплоемкости угольного вещества различных марок в сравнении с литературными данными средних значений этого параметра, приведенными в

скобках. Сравнительный анализ свидетельствует о том, что расчетные данные отличаются не более чем на 12–13 % от средних значений.

Таблица 8

Скачок теплоемкости для угольного вещества различных марок

Марка угля	ΔC_p Дж/моль·К	Марка угля	ΔC_p Дж/моль·К	Марка угля	ΔC_p Дж/моль·К
Бурый (Б)	107,1; (96)	Жирные (Ж)	97,0; (86)	Тошние (Т)	86,4; (88)
Длиннопламенные (Д)	99,4; (88)	Коксовые (К)	90,0; (82)	Антрациты (А)	75,5; (80)
Газовые (Г)	99,3; (88)	Отощено-спекающие (ОС)	98,7; (89)	-	-

На рис. 5 приведен график зависимости скачка теплоемкости углистых веществ (табл. 8) от толщины d их верхнего слоя $d(l)$ (табл. 2), свидетельствующий практически о линейной зависимости этих параметров.

В работе (Захаров и Качурин, 2013) рассматривается возможный процесс самонагрева угля (из-за скачка теплоемкости) вследствие поглощения углем кислорода из воздуха и переход самонагрева в самовозгорание. Этот переход воспринимается как начало эндогенного пожара.

Рассмотрим в качестве размерного параметра угля его температуру плавления T_m и выполним ее расчет, используя формулу (1)

$$T_m(r) = T_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r + d}\right),$$

где T_0 – температура плавления массивного угля, которая по разным данным колеблется от 1200 до 1600 °С. При температуре плавления золы 1500 °С (~1773 К) топливо при сгорании почти не образует шлака. Эту температуру будем считать как среднюю, а в качестве

толщины слоя берем $d(l)$ из табл. 2 для бурого угля и антрацита. Результаты расчета температуры плавления T_m для различных значений r представлены в табл. 9.

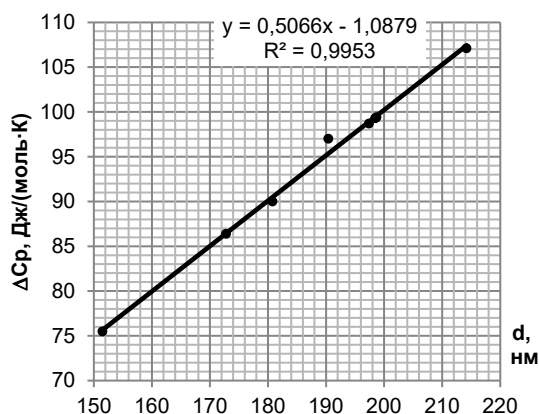
Рис. 5. Зависимость скачка теплоемкости ΔC_p угольных веществ от толщины d их верхнего слоя

Таблица 9

Температура плавления угля T_m (размерный эффект) для различных r

Марка угля	T_0 , К	$T_m(r)$, К $r = 50$ нм	$T_m(r)$, К $r = 100$ нм	$T_m(r)$, К $r = 150$ нм	$T_m(r)$, К $r = 200$ нм	$T_m(r)$, К $r = 500$ нм	$T_m(r)$, К $r = 1000$ нм
Бурый (Б)	1773	336	564	730	856	1013	1393
Антрацит (А)	1773	440	705	882	1236	1236	1504

В работе (Калякин, 2013) проведены исследования пожаровзрывоопасности угля, его пылевоздушных смесей с горючими газами и оценка опасности наночастиц угольной пыли при воспламенении пылегазовых аэрозолей. Методом электронно-микроскопического анализа угольных частиц углей всех стадий метаморфизма установлено наличие на поверхности частиц пленочных покрытий, образованных в результате соединения угля с кислородом воздуха. С уменьшением размера частиц толщина покрытия растет и изменяется в среднем от 100 до 150 нм (табл. 2). В случае если в этой поверхностной окисленке угля перекисные комплексы инициируют реакции, вызывающие разложение и окисление угольного вещества, происходит выделение энергии, приводящее к прогреву наночастиц. По уравнению, приведенному в этой же работе (Калякин, 2013), можно оценить приращение температуры частицы в результате ее прогрева. Выполненные оценки свидетельствуют о том, что температура наночастицы угля, при начальной температуре $T_0 = 300$ К, будет не менее $T_m = 872$ К. По табл. 9 это соответствует частицам порядка полмикрона. Считается доказанным, что угольные частицы с

радиусом около одного микрона (в нашем случае – полмикрона) при разложении угольного вещества прогреются до температур, при которых возможно самовозгорание наночастиц.

Важным выводом является то, что при разложении угольного вещества выделяются горючие газы, которые в случае самовозгорания угольных наночастиц тоже воспламеняются, а их смеси-аэрозоли с воздухом – взрываются. Одновременное присутствие метана и других горючих газов в пылегазовом аэрозоле снижают нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли.

Влага в угольном веществе. Влага в углях подразделяется на внешнюю, внутреннюю, гигроскопическую, влагу воздушно-сухого состояния и пр.

Гигроскопическая влага в 31-генетическом ряду каменных углей имеет определенную закономерность изменения (Глушенко, 1990).

Наиболее высоким содержанием гигроскопической влаги характеризуются угли низкой степени метаморфизма – длиннопламенные и газовые, затем ее содержание снижается до тошних углей, а в антрацитах вновь возрастает (табл. 10).

Таблица 10

Закономерность изменения гигроскопической влаги в генетическом ряду каменных углей

Марка угля →	Д	Г	Ж	К	ОС	Т	А
d , нм →	198,7	198,5	190,4	180,8	197,4	172,8	151,5
W , % →	10	7	5	3,5	2	1	2,4

Анализ связи влажности углистых образований с толщиной их верхнего слоя свидетельствует, что в целом проявлена тенденция повышения влажности с увеличением толщины слоя. Из этой корреляционной связи выпадают антрациты ($d=151,5$ нм с влажностью 2,4 %). Для остального ряда углей отмечается достаточно тесная корреляционная связь с высоким коэффициентом регрессии (рис. 6).

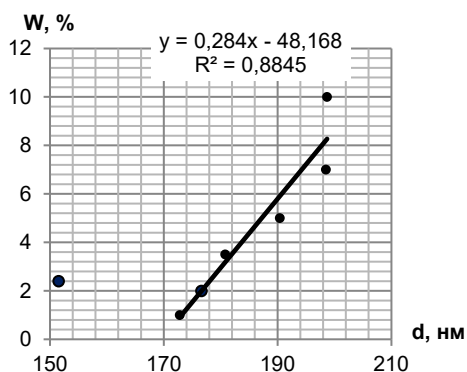


Рис. 6. Связь влажности W каменных углей с толщиной d верхнего слоя

По мнению Г. Стадникова, присутствие влаги и воздуха является ближайшим условием самовозгорания, поскольку не было констатировано ни одного самовозгорания без наличия воды (Стадников, 1956). Отмечено, что влага, присутствующая в угле, влияет на интенсивность и характер протекания низкотемпературного окисления (Исхаков, 1990), а сорбция влаги и кислорода каким-то образом взаимосвязаны, вследствие чего влага способствует самовозгоранию (Калякин, 2013). Приведенные в табл. 10 данные коррелируют с данными, фигурирующими в этой работе.

Выводы. Показана роль толщины поверхностного слоя угольного вещества в протекании большинства процессов, возникающих при взаимодействии с внешней средой, тем более что эти взаимодействия осуществляются через поверхность. Толщина поверхностного слоя определяется одним фундаментальным параметром – молярным (атомным) объемом элемента. Тонкий поверхностный слой угольного вещества существенно отличается от металлов и других соединений, его толщина изменяется от 151,5 нм (Антрацит) до 214,2 нм (Бурий), что на два порядка больше толщин поверхностных слоев чистых металлов и, следовательно, близка к толщине поверхностного слоя высших фуллеренов C_{96} (135 нм). Среднестатистическая структурная единица угля соответствует высшим фуллеренам с числом атомов углерода в кластере >100 , что является уникальной особенностью угольного вещества, которое представляет собой не кристаллическую структуру, а сложный полимер, имеющий надмолекулярную структуру. Увеличение пористости угольного вещества до 90 % приводит к увеличению толщины поверхностного слоя на порядок, т. е. до 2 мкм. Размерная температура наночастицы угля при начальной температуре $T_0 = 300$ К будет равна не менее $T_m = 872$ К, что соответствует частицам порядка полмикрона. Угольные частицы с радиусом около одного микрона (или отмеченных полмикрона) в случае разложения угольного вещества прогреваются до температур, при которых возможно самовозгорание наночастиц. Гигроскопическая влага в генетическом ряду

каменных углей имеет закономерные изменения и коррелирует с толщиной их поверхностного слоя.

Авторы надеются, что исследования поверхностного слоя уникального угольного вещества будут продолжены.

Список использованной литературы

- Арутюнов, К.Ю. (2015). Квантовые размерные эффекты в металлических наноструктурах. *ДАН ВШ РАН*, 3(28), 7–16.
- Василенко, Т.А., Гринёв, В.Г., Молчанов, А.Н., Пономаренко, Д.А. (2015). Влияние горно-геологических и структурных факторов на содержание метана в угольных пластах. *Збірник наукових праць УКРДГП*, 1, 46–55.
- Гафнер, Ю.Я., Гафнер, С.Л., Замулин, И.С., Редель, Л.В., Байдышев, В.С. (2015). Анализ теплоемкости нанокластеров ГЦК-металлов на примере Al, Ni, Cu, Pd, Au. *Физика металлов и металловедение*, 116, 6, 602–609.
- Гиббс, Дж.В. (1950). Термодинамические работы. Москва-Ленинград: ГИТТЛ.
- Глезер, А.М., Козлов, Э.В., Конева, Н.А., Полова, Н.А., Курзина, И.А. (2016). Основы пластической деформации наноструктурных материалов. Москва: Физматлит.
- Глушенко, И.М. (1990). Теоретические основы технологии горючих ископаемых. Москва: Изд. Металлургия.
- Гольнская, Ф.А. (2011). Характеристика наиболее действенных факторов самовозгорания углей в пластах. *Горный информ. бюллетень*, 2, 19–23.
- Гусев, А.И., Ремпель, А.А. (2000). Нанокристаллические материалы. Москва: Физматлит.
- Гюльмалиев, А.М., Гагарин, С.Г. (2010). Молекулярное моделирование структуры и свойств органической массы углей. *Химия твердого топлива*, 3, 16–26.
- Десяткин, А.С. (2006). Изучение петрофизических свойств углей по данным геофизических исследований скважин (ГИС). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 6, 118–132.
- Захаров, Е.И., Качурин, Н.М. (2013). Математическое описание процесса самонагревания угля. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 1, 58–70.
- Исхаков, Х.А. (1990). Роль сорбционной влаги в процессах окисления углей. *Химия твердого топлива*, 2, 19–24.
- Калякин, С.А. (2013). Пожаровзрывоопасность угля и пылегазовых смесей в шахтах. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(32), 127–144.
- Магомедов, М.Н. (2005). О межфуллереном взаимодействии и свойствах фуллеритов. *Теплофизика высоких температур*, 43, 3, 385–395.
- Малышев, Ю.Н., Трубецкой, К.Н., Айруни, А.Т. (2000). Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. Москва: Изд-во Академии горных наук.
- Мамонова, М.В., Прудников, В.В., Прудникова, И.А. (2011). Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. Москва: Физматлит.
- Москаленко, Т.В., Михеев, В.А., Ворсина, Е.В. (2018). Математическая модель расчета молекулярной массы угля. *Современные наукоемкие технологии*, 10, 82–85.
- Олонцев, В.Ф., Фарберова, Е.А., Минькова, А.А., Генералова, К.Н., Белоусов, К.С. (2015). Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства. *Вестник ГНИПУ*, 4, 9–23.
- Оура, К., Лифшиц, В.Г., Саранин, А.А., Зотов, А.В., Катаяма, М. (2006). Введение в физику поверхности. Москва: Наука.
- Рехвишвили, С.Ш., Кишторова, Е.В., Кармокова, Р.Ю., Кармоков, А.М. (2007). К расчету постоянной Толмена. *Письма в ЖТФ*, 33, 2, 1–7.
- Русанов, А.И. (1967). Фазовые равновесия и поверхностные явления. Ленинград: Химия.
- Стадников, Г.Л. (1956). Самовозгорающиеся угли и породы, их геологическая характеристика и методы опознавания. Москва: Углемиздат.
- Таткеева, Г.Г., Жаутиков, Б.А., Юров, В.М. (2010). Механо-гидролитическая модель газовой выделения углеметановым пластом. *Современные наукоемкие технологии*, 9, 26–29.
- Уваров, Н.Ф., Болдырев, В.В. (2001). Размерные эффекты в химии гетерогенных систем. *Успехи химии*, 70, 4, 307–329.
- Фейнман, Р., Лейтон, Р., Сэндс, М. (1976). Фейнмановские лекции по физике. Излучение. Волны. Кванты. Т. 3. Москва: Мир.
- Шпилевский, Э. (2006). Фуллерены – новые молекулы для новых материалов. *Наука и инновации*, 5(39), 32–38.
- Юров, В.М. (2005). Термодинамика люминесцирующих систем. *Вестник КарГУ. Физика*, 3(39), 13–15.
- Юров, В.М. (2020). Толщина поверхностного слоя пористого кремния. *Вестник КазНУ им. аль-Фараби*, 1(72), 60–66.
- Юров, В.М., Гученко, С.А., Лауринас, В.Ч. (2018). Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 10, 691–699.
- Юров, В.М., Лауринас, В.Ч., Гученко, С.А. (2013). Некоторые вопросы физики прочности металлических наноструктур. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 5, 408–412.
- Юров, В.М., Маханов, К.М. (2020). Толщина поверхностного слоя фуллеренов. *Научные горизонты*, 1(29), 139–147.
- Guo, J. (2010). X-Rays in Nanoscience: Spectroscopy, Spectromicroscopy and Scattering Techniques. Wiley-Vch. Verlag.

Korotcenkov, G. (2015). Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties. Vol. 1. CRC Press.

Maritan, A., Langie, G., Indekeu, J.O. (1991). Derivation of Landau theories and lattice mean-field theories for surface and wetting phenomena from semiinfinite ising models. *Physica A*, 170, 326-354.

Miura, S., Silveston, P.L. (1975). Change of Pore Properties During Carbonization. Port 2. 12-th Binnial Conference on Carbon. Extended Abstracts and Program, Pittsburg, Pensilvania, 275-276.

Yurov, V.M., Guchenko, S.A., Laurinas, V.Ch., Zavatskaya, O.N. (2019). Structural phase transition in a surface layer of metals. *Вестник КарГУ. Фізика*, 1, 50-60.

References

Arutyunov, K.Yu. (2015). Quantum size effects in metallic nanostructures. *DAN VSh RAS*, 3 (28), 7-16. [in Russian]

Desyatkin, A.S. (2006). The study of the petrophysical properties of coal according to geophysical well surveys (GIS). *Mountain Information and Analytical Bulletin*, 6, 118-132. [in Russian]

Feynman, R., Leighton, R., Sands, M. (1976). Feynman Lectures in Physics. Radiation. Waves. Quants. Vol. 3. Moscow: Mir. [in Russian]

Gafner, Yu.Ya., Gafner, S.L., Zamulin, I.S., Redel, L.V., Baidyshev, V.S. (2015). Analysis of the heat capacity of fcc metal nanoclusters using Al, Ni, Cu, Pd, Au as an example. *Physics of Metals and Metallurgy*, 116, 6, 602-609. [in Russian]

Gibbs, J.V. (1950). Thermodynamic work. Moscow-Leningrad: GITTL. [in Russian]

Glezer, A.M., Kozlov, E.V., Koneva, N.A., Popova, N.A., Kurzina, I.A. (2016). Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials. Moscow: Publishing House Physical and mathematical literature. [in Russian]

Glushenko, I.M. (1990). The theoretical basis of the technology of fossil fuels. Moscow: Publishing House Metallurgy. [in Russian]

Golynskaya, F.A. (2011). Description of the most effective factors of coal spontaneous combustion in the seams. *Mountain News Analytical Bulletin*, 2, 19-23. [in Russian]

Guo, J. (2010). X-Rays in Nanoscience: Spectroscopy, Spectromicroscopy and Scattering Techniques. Wiley-Vch. Verlag.

Gusev, A.I., Rempel, A.A. (2000). Nanocrystalline materials. Moscow: Publishing House Physical and mathematical literature. [in Russian]

Gyulmaliev, A.M., Gagarin, S.G. (2010). Molecular modeling of the structure and properties of the organic mass of coal. *Chemistry of Solid Fuels*, 3, 16-26. [in Russian]

Iskhakov, H.A. (1990). The role of sorption moisture in coal oxidation processes. *Chemistry of Solid Fuels*, 2, 19-24. [in Russian]

Kalyakin, S.A. (2013). Fire and explosion hazard of coal and dust and gas mixtures in mines. *News of the Donetsk Mining Institute*, 1 (32), 127-144. [in Russian]

Korotcenkov, G. (2015). Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties. Vol. 1. CRC Press.

Magomedov, M.N. (2005). On interfullerene interaction and properties of fullerites. *Thermophysics of high temperatures*, 43, 3, 385-395. [in Russian]

Malyshev, Yu.N., Trubetskoy, K.N., Ayruni, A.T. (2000). Fundamentally applied methods for solving the problem of coalbed methane. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences. [in Russian]

Mamonova, M.V., Prudnikov, V.V., Prudnikova, I.A. (2011). Surface physics. Theoretical models and experimental methods. Moscow: Publishing House Physical and mathematical literature. [in Russian]

Maritan, A., Langie, G. and Indekeu, J.O. (1991). Derivation of Landau theories and lattice mean-field theories for surface and wetting phenomena from semiinfinite ising models. *Physica A*, 170, 326-354.

Miura, S., Silveston, P.L. (1975). Change of Pore Properties During Carbonization. Port 2. 12-th Binnial Conference on Carbon. Extended Abstracts and Program, Pittsburg, Pensilvania, 275-276.

Moskalenko, T.V., Mikheev, V.A., Vorsina, E.V. (2018). Mathematical model for calculating the molecular weight of coal. *Modern science-intensive technologies*, 10, 82-85. [in Russian]

Olontsev, V.F., Farberova, E.A., Minkova, A.A., Generalova, K.N., Belousov, K.S. (2015). Optimization of the porous structure of activated carbons in the process of technological production. *Bulletin of PNIPU*, 4, 9-23. [in Russian]

Oura, K., Lifshits, V.G., Saranin, A.A., Zotov, A.V., Katayama, M. (2006). Introduction to surface physics. Moscow: Publishing House "Science". [in Russian]

Rekhviashvili, S.Sh., Kishtikova, E.V., Karmokova, R.Yu., Karmakov, A.M. (2007). To the calculation of the Tolman constant. *Letters in the journal of technical physics*, 33, 2, 1-7. [in Russian]

Rusanov, A.I. (1967). Phase equilibria and surface phenomena. Leningrad: Publishing House "Chemistry". [in Russian]

Shpilevsky, E. (2006). Fullerenes are new molecules for new materials. *Science and Innovation*, 5 (39), 32-38. [in Russian]

Stadnikov, G.L. (1956). Spontaneous igniting coals and rocks, their geological characteristics and identification methods. Moscow: Uglekhimizdat. [in Russian]

Tatkeeva, G.G., Zhautikov, B.A., Yurov, V.M. (2010). Mechano-hydrolytic model of gas evolution by a carbon-methane reservoir. *Modern high technology*, 9, 26-29. [in Russian]

Uvarov, N.F., Boldyrev, V.V. (2001). Size effects in the chemistry of heterogeneous systems. *Advances in Chemistry*, 70, 4, 307-329. [in Russian]

Vasilenko, T.A., Grinev, V.G., Molchanov, A.N., Ponomarenko, D.A. (2015). The influence of geological and structural factors on the methane content in coal seams. *Scientific proceedings of UkrSGRI*, 1, 46-55. [in Russian]

Yurov, V.M. (2005). Thermodynamics of luminescent systems. *Bulletin of the Karaganda State University. Physics series*, 3 (39), 13-15. [in Russian]

Yurov, V.M. (2020). The thickness of the surface layer of porous silicon. *Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University*, 1 (72), 60-66. [in Russian]

Yurov, V.M., Guchenko, S.A., Laurinas, V.Ch. (2018). The thickness of the surface layer, surface energy and atomic volume of the element. *Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 10, 691-699. [in Russian]

Yurov, V.M., Guchenko, S.A., Laurinas, V.Ch., Zavatskaya, O.N. (2019). Structural phase transition in a surface layer of metals. *Bulletin of the Karaganda State University. Physics series*, 1, 50-60.

Yurov, V.M., Laurinas, V.Ch., Guchenko, S.A. (2013). Some questions of the physics of strength of metal nanostructures. *Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 5, 408-412. [in Russian]

Yurov, V.M., Makhanov, K.M. (2020). The thickness of the surface layer of fullerenes. *Scientific horizons*, 1 (29), 139-147. [in Russian]

Zakharov, E.I., Kachurin, N.M. (2013). A mathematical description of the process of coal self-heating. *Bulletin of Tula State University. Earth sciences*, 1, 58-70. [in Russian]

Надійшла до редколегії 06.09.21

V. Portnov¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

E-mail: vs_portnov@mail.ru;

V. Yurov², Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

E-mail: exciton@list.ru ;

N. Reva³, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,

E-mail: mvreva@gmail.com;

A. Maussymbaeva⁴, PhD (Tech.), Assoc. Prof.,

E-mail: aliya_maussym@mail.ru;

S. Imanbaeva¹, Doctoral Student,

E-mail: svetkaz77@mail.ru;

¹Technical University of Karaganda,

56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, 100027, Kazakhstan;

²E.A. Buketov University of Karaganda,

28 Universitetskaya Str., Karaganda, 470074, Kazakhstan;

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kiev, 03022, Ukraine;

⁴Nazarbayev University,

53 Kabanbay Batyr Ave., Nur-Sultan, 010000, Kazakhstan

NANOSTRUCTURES IN THE SURFACE LAYERS OF COAL MATTER

According to modern concepts, the surface layer of compounds is understood as the ultrathin cover, the properties, structure and composition are different from the crystalline substrate with this layer and this layer is in thermodynamic equilibrium. The surface layer consists of two layers - $d(I)$ with thickness $h = d$, at which the phase transition occurs, and $d(II)$ with the lower limit $h \approx 10d$, at which the physical properties of the crystal begin to manifest themselves. The thickness of the surface layer $d(I)$ is determined by one fundamental parameter, the molar (atomic) volume of the element ($v = M/\rho$, M is molar mass (g/mol), ρ is density (g/cm³)). The average statistical structural unit of coal corresponds to higher fullerenes with the number of carbon atoms in the cluster >100 , which is the unique feature of the coal substance, which is not a crystalline structure, but a complex polymer

with a supramolecular structure. The thickness of the surface layer of the coal substance is two orders of magnitude greater than the thickness of pure metals and is close to the thickness of the surface layer of higher fullerenes C96 (135 nm).

The increasing of the coal substance's porosity of 90 % is led to increasing the thickness $d(l)$ of the surface layer by the order of magnitude, that is 2 microns. In this regard, the "apparent" change in the radius of a coal particle means a change in its mass, proportional to the release of methane from the solid solution. The dependence of the complete decomposition's time of coal methane is τ_0 on the parameter $|\lambda|$. The equation which is obtained, includes the ratio of the heat flux introduced into the reservoir volume due to the internal heat release process to the heat flux which is carried away from the volume due to thermal conductivity. If this ratio exceeds a certain critical value of the unity's order, the thermal explosion occurs, leading to the decomposition of coal methane.

The size effects in the $d(l)$ layer are determined by the entire group of atoms in the system (collective processes). Such "quasi-classical" size effects are observed only in nanoparticles and nanostructures. The $d(l)$ layer for coal matter extends from 151.5 nm (Anthracite) to 214.2 nm (Brown). The dimensional temperature of the carbon nanoparticle at the initial temperature $T_0 = 300$ K will be at least $T_m = 872$ K. This corresponds to particles of the order of half a micron. Coal particles with the radius of about one micron (or marked half a micron) in the case of decomposition of coal matter are heated to temperatures at which spontaneous combustion of nanoparticles is possible. Hygroscopic moisture in the genetic line of coal has the certain pattern of change and correlates with the thickness of their surface layer.

Keywords: coal substance, surface layer, crystal substrate, fullerenes, molar volume, cluster, nanostructure, molecular weight.

В. Портнов¹, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: vs_portnov@mail.ru;

В. Юров², д-р техн. наук, проф.,

E-mail: exciton@list.ru;

М. Рева³, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: mvreva@gmail.com;

А. Маусимбаєва⁴, канд. техн. наук, доц.,

E-mail: aliya_maussym@mail.ru;

С. Іманбаєва¹, докторант,

E-mail: svetakaz77@mail.ru;

¹Карагандинський технічний університет,

просп. Н. Назарбаєва, 56, м. Караганда, 100027, Казахстан;

²Карагандинський державний університет ім. Е.А. Букетова,

вул. Університетська, 28, м. Караганда, 470074, Казахстан;

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

⁴Університет Назарбаєва,

просп. Кабанбай Батыра, 53, Нур-Султан, 010000, Казахстан

НАНОСТРУКТУРИ В ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ВУГІЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ

За сучасними уявленнями під поверхневим шаром сполук розуміють надтонку плівку, властивості, структура та склад якої відмінні від кристалічної підкладки, з якою цей шар перебуває в термодинамічній рівновазі. Поверхневий шар складається із двох шарів – $d(l)$ товщиною $h = d$, за якої відбувається фазовий перехід, і $d(l)$ з нижньою межею $h \approx 10d$, після якої починають проявлятися фізичні властивості кристала. Показано, що товщина поверхневого шару $d(l)$ визначається одним фундаментальним параметром – молярним (атомним) об'ємом елемента $v = M/\rho$, де M – молярна маса (г/моль), ρ – густина (г/см³). Середньостатистична структурна одиниця вугілля відповідає вищим фулеренам із числом атомів вуглецю в кластері >100 , що є унікальною особливістю вугільної речовини, яка являє собою не кристалічну структуру, а складний полімер з надмолекулярною структурою. Товщина поверхневого шару вугільної речовини на два порядки більша товщини чистих металів і близька до товщини поверхневого шару вищих фулеренів C96 (135 nm).

Збільшення пористості вугільної речовини до 90 % призводить до збільшення товщини поверхневого шару $d(l)$ на порядок, тобто до 2 мкм. У зв'язку із цим "уявна" зміна радіуса вугільної частинки означає зміну її маси, пропорційну виділенню метану з твердого розчину. Установлено залежність часу повного розпаду вуглеметану τ_0 від параметра $|\lambda|$. Отримано рівняння, у яке входить відношення потоку тепла, внесеного в пласт за рахунок внутрішнього процесу тепловиділення, до потоку тепла, який виноситься з пласта за рахунок теплопровідності. У разі якщо це відношення перевищить деяку критичну величину порядку одиниці, виникає тепловий вибух, що призводить до розпаду вуглеметану.

Розмірні ефекти в шарі $d(l)$ визначаються всім колективом атомів у системі (колективні процеси). Такі "квазікласичні" розмірні ефекти спостерігаються тільки в наночастинках і наноструктурах. Шар $d(l)$ для вугільної речовини змінюється від 151,5 нм (Антрацит) до 214,2 нм (Бурій). Розмірна температура наночастинки вугілля при початковій температурі $T_0 = 300$ K дорівнюватиме не менше $T_m = 872$ K. Це відповідає частинкам порядку пів мікрона. Вугільні частинки з радіусом близько одного мікрона (або відміченого пів мікрона) у разі розкладання вугільної речовини прогріваються до температур, за яких можливе самозаймання наночастинок. Гігроскопічна волога в генетичному ряду кам'яного вугілля має певну закономірність зміни і корелює з товщиною їх поверхневого шару.

Ключові слова: вугільна речовина, поверхневий шар, кристалічна підкладка, фулерени, молярний об'єм, кластер, наноструктура, молекулярна маса.

УДК 550.837

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.08>О. Краснікова¹, студ.,

E-mail: koatinga@gmail.com;

Г. Лісний², д-р геол. наук,

E-mail: lesnoygd@gmail.com;

С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,

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

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²ТОВ "Геоюніт", просп. Степана Бандери, 9, м. Київ, 04073, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МІКРОСЕЙСМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ЗА ПРОВЕДЕННЯМ ТА ЯКІСТЮ ГРП

(Представлено членом редакційної колегії канд. геол. наук, ст. наук. співроб. І.М. Безродною)

Присвячено огляду особливостей обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу гідророзриву пласта (ГРП). Потреба у висвітленні напрямку робіт, пов'язаних з інтенсифікацією видобутку, зумовлена недостатньо розвинутою практикою застосування таких досліджень на території України. Розглянуто світовий досвід застосування мікросейсмічних спостережень та окреслено перспективи проведення таких робіт на території України. Значну увагу приділено розгляду особливостей обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу ГРП. Правильний вибір технологій пов'язаний із коректним урахуванням особливостей геологічної будови перспективної площі або родовища вуглеводнів, а також попередніх етапів розробки родовищ нафти і газу. Визначено шляхи використання світового досвіду мікросейсмічного моніторингу ГРП під час проведення таких робіт в умовах нафтогазоносних провінцій України.

Ключові слова: гідророзрив пласта, мікросейсмічний моніторинг, розв'язання оберненої задачі.

Постановка проблеми. Технологія гідравлічного розриву пласта (ГРП) поширювалася разом із зростанням потреби в інтенсифікації видобутку вуглеводів, у тому числі для родовищ нетрадиційних вуглеводнів. Такі технології застосовувалися на території України ще з радянських часів (Качмар і Цюмко, 2015). Однак проведення мікросейсмічного моніторингу ГРП в нафтогазових регіонах України і досі перебуває на стадії впровадження (Lisny et al., 2021).

Гідравлічний розрив пласта спрямований на збільшення проникності щільних гірських порід, таких як низькопористі пісковики та сланці, та стимулювання видобутку нафти та газу (Donaldson et al., 2013). Польова реалізація гідравлічного розриву безпосередньо не дає можливості спостерігати зміну форми зони поширення тріщин у гірській породі (Miskimins, 2019). Це зумовлює доцільність застосування мікросейсмічного моніторингу з метою отримання інформації щодо характеру поширення тріщин та геомеханіки родовища в цілому.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Дана стаття продовжує цикл робіт кафедри геофізики Інституту геології Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Lisny et al., 2021, Vyzhva et al., 2019), пов'язаних з розробкою ефективних технологій та програм для обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу ГРП.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У статті наведено огляд світового досвіду застосування мікросейсмічних спостережень та окреслено перспективи проведення подібних робіт на території України.

Мета досліджень – огляд особливостей обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу ГРП, верифікація світового досвіду до роботи в умовах основних нафтогазоносних провінцій України.

Історія методу ГРП. У світовому масштабі історія ГРП як технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів почалася у дев'ятнадцятому столітті. У 1857 р. Престон Бармор за допомогою вибуху пороху у свердловині в Канадевей-Крік, штат Нью-Йорк, досяг утворення тріщин у породі і збільшив приплив з експлуатаційної свердловини (Morton, 2013). У 1865 р. брати Робертс удосконалили вибухову технологію ГРП (Morton, 2013).

У 30-х рр. минулого століття з'явилася ідея закачування кислоти в низькопористі карбонатні колектори для

стимулювання припливів вуглеводнів із свердловин (Montgomery and Smith, 2010).

Флойд Фарппіс із Stanolind Oil (Morton, 2013) висунув гіпотезу, що розрив гірської породи гідравлічним тиском може підвищити ефективність ГРП порівняно з вибуховим та кислотним впливом. У 1947 р. відбулося перше застосування такої технології у свердловині № 1 Клеппер на родовищі Хьюгтон, штат Канзас. Особливості технології були вперше опубліковані Дж.Б. Кларком із Stanolind Oil (Clark, 1949). У 1949 р. було видано патент з ексклюзивною ліцензією компанії "Halliburton Oil Well Cementing Company". У перший рік ГРП за рахунок гідравлічного тиску був застосований на 332 свердловинах із середнім збільшенням видобутку на 75 %. ГРП швидко поширювався і збільшував видобуток нафти у США темпами вищими, ніж очікувалося. Протягом 1950-х років ГРП проводився в обсягах більше ніж у 3000 свердловин на місяць. Згодом ГРП почали застосовувати також у похилоспрямованих та горизонтальних свердловинах.

У середині 1970-х Міністерство енергетики США (DOE) та Інститут досліджень газу (GRI) у партнерстві з приватними компаніями розпочали розробку технологій отримання природного газу зі сланців. Особливостями технології було використання горизонтальних свердловин та багатоступеневий гідророзрив. У період між 1981 і 1998 рр. техаська компанія Mitchell Energy and Development експериментувала із цими методами, досліджуючи сланці Барнетт.

Розвиток технологій ГРП зумовив необхідність контролю за поширенням тріщин у гірських породах. Найефективнішою технологією, що вирішує цю задачу, виявився мікросейсмічний моніторинг ГРП (Maxwell, 2011). Теоретичні основи мікросейсмічного моніторингу пов'язані із сейсмологією землетрусів. Моніторинг ГРП у нафтогазовій галузі розпочався у 1970-х рр. Протягом 1980-х та 1990-х рр. було виконано кілька експериментальних проектів. У 2000 р. у сланцях Барнетта в басейні Форт-Ворт був завершений перший успішний проект мікросейсмічного моніторингу гідравлічного розриву (Maxwell et al., 2002). У той час родовище Барнетт було на початку свого розвитку. Згодом воно стало третім за величиною родовищем природного газу у США, а його успішна розробка сприяла поширенню видобутку сланцевого газу в усьому світі. Разом з тим необхідно

© Краснікова О., Лісний Г., Вижва С., 2021

відмітити, що у XXI ст. ГРП стало популярною темою для природоохоронних дискусій та бажаною метою засобів масової інформації (King, 2012).

Механіка гідророзриву. Фундаментом для даного розділу науки є механіка руйнування. Вона спирається на теорію Гріффіта (Griffith, 1921), що пояснює руйнування крихких матеріалів. Ірвін (Irwin, 1957) модифікував цю теорію, ввівши коефіцієнт інтенсивності напружень. Концепція Ірвіна передбачає, що кінець тріщини, що має інтенсивність напружень (K), рівну міцності тріщини (K_n – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень), прискорюватиметься до швидкостей, що наближаються до кінцевої швидкості, яка регулюється швидкістю пружних хвиль у середовищі. Якщо критерій поширення тріщини не виконується, тобто якщо $K < K_n$, то тріщина залишається стабільною (Shen et al., 2014). Робота Желтова (Zheltov and Khristianovic, 1955), що описувала градієнт тиску та утворення вертикальних тріщин при проведенні гідророзриву, вважається однією з перших, присвячених механіці цього процесу (Detournay, 2016). Роботи Баренблатта (Barenblatt, 1956) посідають важливе місце не лише в механізмі руйнування, а також у динаміці флюїдів у пористих середовищах. У другій половині XX ст. було розроблено математичні підходи до побудови плоских та радіальних моделей гідророзривних тріщин (Geertsma and De Clerk, 1969; Nilson, 1983). Для цього застосовано принципи лінійної еластичної механіки руйнування (Vandamme, 1989).

Зазначені дослідження дали змогу охарактеризувати гідророзрив як взаємодію фізичних процесів, що впливають на поширення руйнування, а саме, потоку в'язкої рідини, створення тріщинних поверхонь у твердому тілі, утворення відставання між краєм тріщини та фронтом рідини, пружною деформацією твердого тіла та витіканням рідини з тріщини (Detournay, 2016).

При розгляді питань, пов'язаних з механікою гідророзриву, застосовується низка чисельних методів (Shahid et al., 2015). Більшість моделей гідралічного розриву ґрунтується на роботах Снеддона (Sneddon, 1946) щодо розкриття тріщин як для плоских деформацій, так і для круглих тріщин. Подальше вдосконалення теорії привело до формулювання загальновідомої моделі PKN (Perkins-Kern-Nordgren). Модель включає ефекти втрати рідини та передбачає еліптичний канал потоку, ширина якого визначається падінням тиску тертя (Perkins and Kern, 1961). Тому вона може застосовуватися для тріщин із великим співвідношенням довжини та висоти. Модель Перкінса і Керна передбачає постійну висоту тріщин незалежно від довжини тріщин. У моделі PKN передбачається двовимірна плоска модель деформації у вертикальній площині, де руйнування має еліптичний переріз як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Модель PKN передбачає, що висота тріщини набагато менша, ніж її довжина, а також, що енергія гідралічного руйнування буде розсіюватися або поглинатися лише за рахунок втрат енергії від потоку рідини без врахування міцності тріщин (Belyadi et al., 2017).

На рис. 1 показано схему геометрії тріщини в моделі PKN (Yew and Weng, 2014). Виведене Нордгеном рівняння для поширення гідралічно індукованої тріщини можна записати у такому вигляді:

$$\frac{G}{64 - (1 - \nu)\mu h} \frac{\partial^2 W^4}{\partial x^2} = \frac{8c_t}{\pi\sqrt{t - \tau(x)}} + \frac{\partial W}{\partial t},$$

де G і ν – модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона породи; W – ширина тріщини; μ – в'язкість флюїду; $t(x)$ – час, коли витік рідини починається з положення x ; c_t – коефіцієнт втрати рідини.

Іншими загальноновживаними моделями є модель Християновича–Герцма–де Клерка (KGD) і модель геометрії

радіального руйнування. Модель KGD передбачає двовимірну плоску модель деформації в горизонтальній площині з постійною висотою тріщини, що є більшою за довжину тріщини. Радіальна модель руйнування знайшла застосування в неглибоких формаціях, де напруження, спричинені покриваючими породами, є рівним мінімальному горизонтальному напруженню (Belyadi et al., 2017).

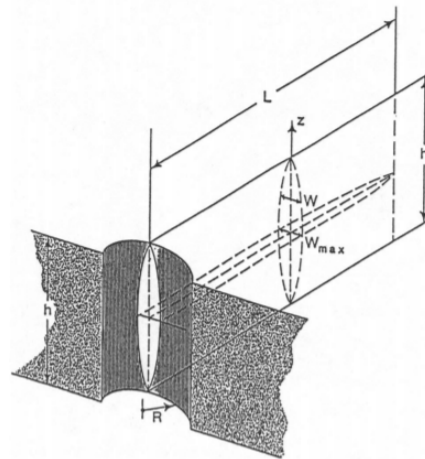


Рис. 1. Модель PKN (Yew and Weng, 2014)

З цих простих теоретичних моделей було розроблено два типи 3D-моделей: псевдотривимірна (P3D) (рис. 2) і площинно-тривимірні (PL3D) моделі. Ці розширення аналітичних моделей дозволили моделювати поширення гідралічного розриву в багатшаровій системі гірських порід (Rahman and Rahman, 2010). Моделі P3D широко використовуються в промисловості для проектування гідралічних розривів в багатшарових пластах. У підході до моделювання PL3D дискретизовано є площина, на якій поширення руйнування може відбуватися в шаруватій системі. Отже, остаточна геометрія руйнування може бути нерівномірною і залежати від механічних параметрів кожного шару.

Для моделювання гідралічного розриву пласта на родовищах вуглеводнів нетрадиційного типу використовуються різні чисельні підходи та схеми дискретизації моделей. Залежно від підходу моделювання, прийнятого різними авторами, ці моделі можна розділити на групи.

У моделі кінцевих елементів (МКЕ) пластова система дискретизується в субдоменах (кінцевих елементах) певної форми (як правило, тетраедри) за допомогою сітки. Перевагою використання методу є можливість моделювання складних 3D-об'єктів. Геомеханіка твердого тіла та флюїду взаємодіють за допомогою теорії Біо (Biot, 1955). Метод граничного елемента використовує дискретизацію лише меж області, тобто лише площин руйнування. У ньому домен поділяється на дві області: внутрішню (тріщина) та зовнішню (ціла гірська порода), що розділені межею (Rahman and Rahman, 2010).

Метод дискретних елементів використовує сукупність взаємодіючих дискретних елементів для імітації розривної системи; ці тіла можуть бути жорсткими або деформованими. Отримана макроскопічна поведінка імітує поведінку вибраного твердого матеріалу. Руйнування матеріалу можна змодельовувати, пошкодивши сили взаємодії між елементами.

Метод кінцево-дискретних елементів (FDEM) (Munjiza et al., 1995) є гібридним методом чисельного моделювання, який поєднує в собі ознаки методу кінцевих елементів та DEM. Він успадковує переваги МКЕ при описі пружних деформацій та можливості DEM у фіксації взаємодії та процесів руйнування твердих тіл (Zhao et al., 2014).

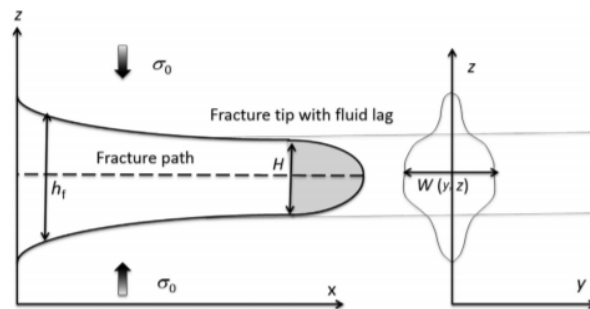


Рис. 2. Псевдотривимірна модель тріщини (Belyadi et al., 2017)

Поступове руйнування гірської породи може бути відтворено в FDEM шляхом моделювання утворення та поширення тріщин. FDEM має можливість моделювати акустичну емісію в лабораторних умовах та польові мікросейсмічні роботи. При гідророзриві енергія деформації, що накопичується в цей час, звільняється і може імітувати поширення пружних хвиль. Ця енергія оцінюється шляхом моніторингу відносного зсуву поверхонь тріщин та реєстрації кінетичної енергії вузлів у безпосередній близькості від тріщин. Для кожної події чисельно розраховуються важливі параметри джерела, включаючи час ініціювання, місце розташування джерела та сейсмічну енергію.

Важливим аспектом геомеханіки є моделювання поведінки природних тріщин. Природні тріщини та розломи можуть виступати в ролі більш проникного каналу, ніж порода в цілому. На пористість та проникність тріщин впливає геометрія, літологія та морфологія разом з існуючим напруженим станом та поровим тиском (Shahid et al., 2015).

Теорія Біо (Biot, 1955) заклала основи для комплексного гідромеханічного моделювання поведінки тріщин та розломів. Для моделювання поведінки тріщинуватої породи на етапі розробки та видобутку використовують різні підходи згідно з обраними схемами дискретизації. Найчастіше підхід, що використовується для моделювання системи тріщин та розломів, – це ітеративно зв'язана схема. Динамічна поведінка руйнованого пласта зазвичай моделюється з використанням подвійної пористості та підходу з подвійною проникністю (Shahid, 2015).

Discrete fracture network (DFN) являє альтернативу підходам до аналізу розривів. Доведено, що DFN реально імітує велику кількість тріщин у масштабі пласта. Тріщини чітко визначаються як окремі елементи в багатовимірному просторі моделі. Їх фізичні та геометричні властивості, такі як орієнтація, розмір та об'єм, статистично присвоюються кожному з елементів окремо (Shahid et al., 2015).

Іншою проблемою геомеханіки є опис природного тріщинуватого середовища, що піддається гідророзриву. На геометрію та розподіл напружень та тиску впливає наявність природних тріщин у нетрадиційних колекторах, що може призвести до розвитку складної геометрії тріщин. Тому під час вибору оптимальних параметрів гідравлічного руйнування на етапі моделювання важливо враховувати вже існуючі природні тріщини (Shahid et al., 2015).

Лабораторні дослідження. З моменту впровадження методу гідравлічного розриву проводилися експериментальні дослідження як у лабораторних, так і в польових умовах з метою вивчення основних параметрів, що впливають на геометрію та характеристики поширення руйнування (Yew and Weng, 2014). Лабораторні дослідження, що мають місце при роботах з гідророзриву пласта, включають у себе дослідження гірських порід, флюїду та їх взаємодії. Зазвичай при лабораторних дослідженнях використовують два типи зразків: циліндричний зразок із порожниною та прямокутний зразок із порожниною або тріщиною (Wang, 2014).

На підготовчому етапі, що передуює проведенню робіт, проводяться лабораторні дослідження гірських порід. Оскільки результатом ГРП має бути структура тріщин, що сприятиме найбільшій продуктивності пласта, існує потреба у визначенні набору параметрів гірських порід (Miskimins, 2019, Maslov et al., 2001). Важливими є модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона, що зумовлюють фізико-механічні властивості породи. За їх допомогою оцінюється крихкість і пластичність порід, що прямо впливають на їх здатність до утворення тріщин. У 1966 р. Коутс і Парсонс ввели поняття індексу крихкості породи (Coates and Parsons, 1966), який визначався як відношення пружної деформації до загальної деформації при руйнуванні. На рис. 3 показано загальну криву напруги та деформації для тривісного стиснення, проведеного до руйнування. Синя лінія показує дані раннього напруження та деформації. Вона відповідає лінійній пружній області. Нахил синьої лінії відповідає модулю Юнга. Розрив зразка відбувається при τ_{max} , що вказує на міцність породи. Межа текучості зразка ідентифікується як перетин синьої лінії та напруги руйнування, перенесеної на фактичні дані про напруження та деформації. Пружна деформація представлена даними зліва, а пластична деформація – даними праворуч від межі текучості, яка обмежена руйнуванням зразка. Нарешті, залишкова міцність породи, τ_{res} , відображається після досягнення пікової напруги. Отже, індекс крихкості породи можна задати формулою

$$BI = \frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{tot}}, BI = \frac{\tau_{max} - \tau_{res}}{\tau_{max}}$$

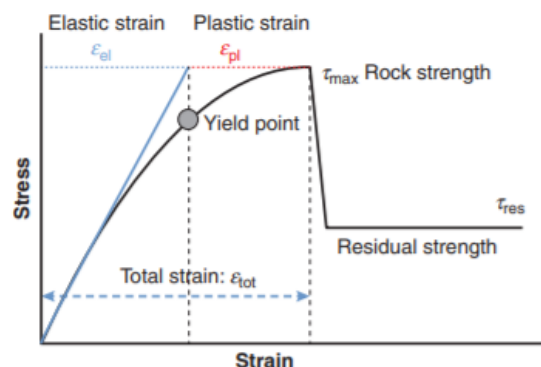


Рис. 3. Крива напруги та деформації (Miskimins, 2019)

Існує два загальні методи використання пружних властивостей для виявлення тенденцій до крихкості: brittleness method (Rickman et al., 2008) та fracability method (Goodway et al., 2006). Тріщинистікість (fracture toughness) та її роль при проведенні гідророзриву протягом багатьох років викликала численні дискусії (Miskimins, 2019). Величини та напрямки основних напружень мають принципові значення для характеру гідророзриву пласта. Незважаючи на проблемний характер

визначення основних напружень з аналізу керну, деякі наближення були отримані з використанням припущень про поперечну ізотропію та коефіцієнт тиску ґрунту. Розуміння ефекту пошкодження пласта (formation damage) необхідне для коректного проектування, а також здійснення гідравлічної обробки тріщин з метою отримання максимізації продуктивності свердловини в результаті гідророзриву. Типовими прикладами механізмів пошкодження пласта є міграція дрібних частинок, а також вплив часу та температури на провідність тріщини.

У лабораторних умовах можуть досліджуватися такі параметри, як тиск гідророзриву, характеристики тріщин, поведінка тріщин у горизонтальних свердловинах, особливості тріщин у кінцевій зоні, перетин тріщин тощо (Yew and Weng, 2014). На підставі цих даних проводиться моделювання гідророзриву. У роботі Papadopoulos (Papadopoulos et al., 1983) описано розроблений лабораторний апарат для імітації поширення підземного гідравлічного руйнування. Вимірювання проникності дає важливу інформацію, оскільки проникність після гідророзриву збільшується приблизно на три порядки порівняно з проникністю первинних порід (Gehne and Benson, 2019).

На рис. 5 показано схему зразка, що використовується для експериментів з моделювання гідророзриву пласта (Patel et al., 2017). Експерименти проводились на зразках циліндричної породи діаметром 10 см та завдовжки 14 см. У центрі циліндричного зразка зроблено отвір діаметром 6,35 мм. В середину поміщено сталеву трубку з отворами. Трубка цементується за допомогою епоксидної смоли. Експериментальна установка складається з тривісної системи, насосного агрегату для гідравлічної рідини та системи контролю та обробки акустичної емісії.

Мікросейсмічний моніторинг. За останні десять років мікросейсмічний моніторинг (МС) швидко поширився як технологія картування різних процесів на родовищах. Візуалізація гідравлічного розриву є найважливішим його застосуванням (Maxwell, 2010).

Типовим виміром мікросейсмічності є об'єм мікросейсмічно активної області як показник стимульованого об'єму на родовищі. Видобуток буде пропорційний масштабу

розриву, тобто величині стимульованого об'єму, а також щільності тріщин. Інший важливий аспект мікросейсмічного моніторингу пов'язаний із фізикою гірських порід або геомеханікою. Як правило, мікросейсмічність відповідає явищам деформації зсуву. Розкриття тріщин відбувається разом із деформацією зсуву, пов'язаною з посиленням порового тиску і прослизанням фрагментів гірських порід. Типові мікросейсмічні дані мають великі амплітуди сейсмічної S-хвилі порівняно з Р-хвилею, що свідчить про значний зсувний компонент для більшості мікросейсмічних деформацій. Ця деформація зсуву створює геомеханічний парадокс щодо класичного погляду на механіку гідравлічного розриву, яка оперує в основному деформацією розтягу. Деформація зсуву може бути наслідком активації напружень на розтяг навколо тріщини.

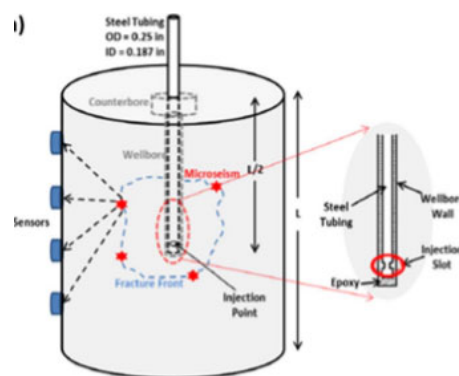


Рис. 5. Схема експериментальної установки для моделювання гідророзриву (Patel et al., 2017)

Мікросейсмічна зйомка передбачає безперервний пасивний сейсмічний контроль із використанням датчиків у ряді різних можливих конфігурацій (Maxwell, 2014). Датчики можуть бути розміщені постійно або тимчасово в контрольній свердловині або на поверхні, залежно від масштабу моніторингу. Свердловинне розміщення є доволі поширеним, однак датчики можуть бути розміщені і на поверхні, як під час моніторингу землетрусів (рис. 6).

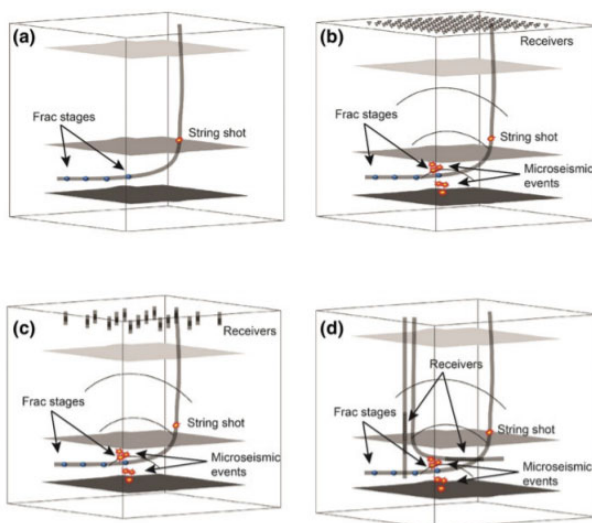


Рис. 6. Можливі конфігурації розміщення датчиків під час мікросейсмічного моніторингу (Maxwell, 2014)

Головною перевагою свердловинного мікросейсмічного моніторингу є близькість приймачів до зони проведення робіт, що приводить до великого відношення сигнал/шум

(S/N) для подій, які відбуваються на відстані до 1 км від свердловини (Akram, 2020). Водночас мікросейсмічний моніторинг на поверхні є значно вигіднішим економічно, оскільки

немає потреби бурити контрольні свердловини або розміщувати контрольні-вимірювальні прилади у свердловинах. Перевагою також є можливість використовувати набагато більшу кількість датчиків (Van der Baan, 2013).

Найбільшою проблемою мікросейсмічного моніторингу є отримання якісних сейсмічних сигналів з мінімальним рівнем завад та ступенем спотворення сейсмічних сигналів. Традиційно моніторинг ГРП – це короткочасна моніторингова діяльність, яка починається і припиняється з періодом закачування. Однак постійний моніторинг, включаючи базовий та моніторинг після закачування, стає все більш поширеним (Maxwell, 2014).

Ранні проекти свердловинного мікросейсмічного моніторингу ГРП використовували групи з кількох датчиків ЗС в одній, майже вертикальній свердловині (Maxwell et al., 2010). Кількість датчиків, розгорнутих у свердловині, з часом змінювалася. У ранніх експериментальних роботах використовували одиночні датчики ЗС. У деяких сучасних проектах моніторингу їх кількість сягає до сотень датчиків. Поверхневий мікросейсмічний моніторинг передбачає альтернативну конфігурацію без необхідності контрольної свердловини. Це особливо вигідно в місцях, де важко знайти відповідні свердловини. У деяких родовищах температура свердловин може перевищувати експлуатаційні характеристики свердловинних датчиків, що робить моніторинг на поверхні більш доцільним варіантом. Кілька ліній вертикальних датчиків або датчиків ЗС є типовою поверхневою конфігурацією, як правило, радіальною (Maxwell, 2014).

Обробка мікросейсмічних даних включає обчислення характеристик мікросейсмічного джерела за допомогою зареєстрованих мікросейсмічних сигналів. Базова обробка передбачає визначення координат джерел, а також атрибутів контролю якості, які разом складають основу для інтерпретації геометрії розриву (Maxwell, 2014).

Точне вимірювання або калібрування моделі швидкостей є важливим для отримання достовірних даних про поширення тріщин. Змодельовані місця мікросейсмічних подій потенційно можуть розташовуватися на десятки, а то й сотні метрів від їх фактичного розташування, якщо використовувати неякісні швидкісні моделі (Warpinski, 2014). Швидкісні моделі можуть бути побудовані за використанням даних з різних джерел, включаючи акустичний каротаж, геологічні моделі, сейсмічний каротаж або вертикальне сейсмічне профілювання, а також 3D сейсмічну томографію (Maxwell, 2014).

Розташування гіпоцентру мікросейсмічних подій є основним атрибутом джерела та основним напрямком базової обробки. Координати джерела та час початку мікросейсмічної події – це невідомі, оцінювані за сейсмограмами, як і при землетрусах (Maxwell, 2014). Загальноприйнятою методологією є інверсія часів надходження сейсмічних хвиль (Gibowicz and Kijko, 1994). Технологія може використовувати час приходу Р- або S-хвилі на ряд датчиків. Рішення, як правило, знаходиться методом найменших квадратів. У результаті визначаються координати x , y , z мікросейсмічного джерела та час початку його роботи або час початку мікросейсмічної події.

На відміну від методів інверсії часів приходу сейсмічних хвиль альтернативна технологія визначення параметрів мікросейсмічного джерела базується на методах продовження хвильових полів у середовище, наприклад з використанням інтегралу Кірхгофа або інших методів (Лісний, 2002, 2012; Duncan and Eisner, 2010; Maxwell, 2014).

Технологія визначення просторових координат мікросейсмічних джерел або мікросейсмічних подій нагадує побудову сейсмічних зображень геологічного середовища з

використанням площинних сейсмограм центральних променів. У задачах розвідки родовищ вуглеводнів такі сейсмограми не реєструються безпосередньо в польових умовах, а обчислюються з використанням відповідного набору зареєстрованих площинних сейсмограм спільних точок збудження. Для побудови сейсмічних зображень геологічного середовища приймається модель випромінюючих елементів, якими можуть бути точкові або протяжні випромінювачі сейсмічної енергії. При цьому функція швидкості у середовищі має множник $1/2$.

У разі мікросейсмічної емісії для побудови зображення мікросейсмічних джерел використовується дещо інша модель. Вважається, що мікросейсмічні джерела є точковими, а їх сукупність визначає геометрію тріщин довільної форми, що утворилися внаслідок проведення ГРП. У цьому випадку сейсмічне або, точніше, мікросейсмічне зображення тріщинної зони може бути побудовано шляхом сканування простору зображення із знаходженням в кожній точці середовища значень хвильової функції за рахунок продовження хвильового поля з поверхні спостережень у середовище. При цьому швидкісна функція використовується без нормування. Такі функції можуть відповідати різним швидкісним моделям, наприклад середньошвидкісній або пластовій.

Однак під час побудови зображень мікросейсмічних подій виникає принципова проблема. Якщо для побудови сейсмічних зображень геологічного середовища за сейсмограмами центральних променів час початку випромінювання є константою, що дорівнює нулю, то для мікросейсмічних зображень часи початку випромінювання мікросейсмічних джерел не є константою. Більш того, їх значення априорно невідомі. Для вирішення цієї проблеми крім просторового сканування області мікросейсмічного зображення необхідно провести сканування за часом для кожної просторової точки мікросейсмічного зображення. Це дозволяє визначити часи початку випромінювання мікросейсмічних джерел. Достовірність мікросейсмічних зображень тріщинної зони у цьому випадку підвищується разом із збільшенням кількості приймачів мікросейсмічних хвиль.

Кроскореляційні методи також можна використовувати для оцінки параметрів мікросейсмічного джерела. Відносно сильні мікросейсмічні події з великими амплітудами сигналів хвиль можуть бути використані як основні події. Тоді перехресна кореляція може знаходити сигнали меншої амплітуди з подібними до основних подій характеристиками форми хвилі. Цей метод є ефективним для виявлення подібних мікросейсмічних подій.

У роботі Шмакова (Шмаков, 2012) наведено приклад реєстрації, обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу ГРП. Реєстрація передбачає використання сейсмічної антени з апертурою 800–1000 м, що складається з 30–60 однокомпонентних вертикальних сейсмічних датчиків, відстань між якими становить 30–50 м (рис. 7).

Для вирішення оберненої задачі застосовується така система рівнянь:

$$T_j(x, y, z, V) = \tau_j,$$

де $T_j(x, y, z, V) = \frac{\rho(M_{j0}, S)}{V} - \frac{\rho(M_j, S)}{V}$ – різниця часів приходу хвилі до точок спостереження M_j ; $S(x, y, z)$ – координати джерела; V – швидкість поширення сейсмічних хвиль;

$\rho(M_j, S) = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2}$ – відстань між точками спостереження сейсмічної антени і джерелом.

Інтерпретація мікросейсмічних даних проводиться для визначення геометрії гідралічного розриву та для того,

щоб зрозуміти мікросейсмічну геомеханічну реакцію. Інтерпретацію можна класифікувати як геометричну і деформаційну. Будь-який тип інтерпретації покращується завдяки залученню наявної додаткової геологічної, свердловинної інформації, геомеханічних даних тощо. Для коректної прив'язки результатів мікросейсмічного моніторингу до гідралічного розриву пласта використовуються відповідні дані про процес гідророзриву, зокрема часові характеристики

процесу закачування або інжекції, тиск закачування, концентрація пропанта (гранулоподібної речовини, що запобігає закриттю тріщин та забезпечує надходження вуглеводнів з пласта до свердловини) тощо. У цьому випадку часову мікросейсмічну шкалу можна зіставити з деталями інжекції та розглядати мікросейсмічні події як реакцію на специфічні характеристики інжекції.

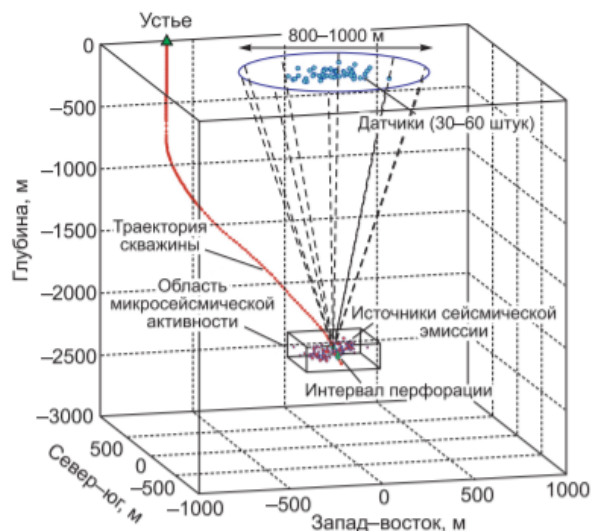


Рис. 7. Схема спостереження для мікросейсмічного моніторингу (Шмаков, 2012)

Висновки. У статті наведено детальний огляд та аналіз сучасного стану методу ГРП. Показано, що для отримання ефективних результатів ГРП необхідно застосовувати мікросейсмічний моніторинг. Це дозволяє визначати оптимальні параметри ГРП та використовувати їх у процесі гідророзриву. Визначення розмірів зон поширення тріщин, що виникають у процесі гідророзриву, дозволяє оцінювати ймовірне збільшення припливів вуглеводнів та визначати доцільний сценарій експлуатації родовищ. Водночас геометрія зон поширення тріщин запобігає виникненню негативних результатів гідророзриву, пов'язаних з непередбаченим руйнуванням продуктивних пластів та виникненням проблем екологічного характеру.

Сьогодні в Україні працює ряд компаній, що успішно виконують роботи з гідророзриву пластів. Разом з тим мікросейсмічний моніторинг ГРП в Україні застосовується доволі обмежено. Це певною мірою пов'язано з тим, що компанії, які працюють на ринку ГРП, віддають перевагу сервісу з мікросейсмічного моніторингу як більш прибутковому. Вони володіють унікальними технологіями та програмним забезпеченням власної розробки. Крім того, такі технології часто характеризуються наявністю доволі значної частки суб'єктивного аналізу результатів мікросейсмічного моніторингу. Наслідком цього є відсутність пропозицій з продажу відповідних технологій та програмного забезпечення на світовому ринку.

Отже, актуальною задачею широкого впровадження мікросейсмічного моніторингу в діяльність нафтогазової галузі України є розробка власних технологій та програм контролю за ГРП. Сьогодні на кафедрі геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка ведуться розробки ефективних технологій і програм для обробки та інтерпретації даних мікросейсмічного моніторингу ГРП. Одним з напрямків таких досліджень є розробка автоматизованих програм

обробки даних мікросейсмічного моніторингу, що ґрунтуються на розв'язанні крайової задачі для хвильового рівняння і продовження зареєстрованих мікросейсмічних хвильових полів у геологічне середовище. Застосування таких технологій і програмного забезпечення дозволить підвищити ефективність розробки родовищ вуглеводнів на території України, зокрема родовищ, що характеризуються наявністю низькопористих та низькопроникних гірських порід.

Список використаних джерел

- Качмар, Ю.Д., Цьомко, В.В. (2015). До 60-річчя застосування гідралічного розриву пласта у ПАТ "Укрнафта". *Нафтогазова галузь України*, 4, 43-46. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu_2015_4_12.
- Лісний, Г.Д. (2002). Використання моделі анізотропного середовища для аналізу сейсмічних зображень геологічних об'єктів. Київ: "Київський університет".
- Лісний, Г.Д. (2012). Практичні аспекти побудови об'ємних сейсмічних зображень за сейсмограмами спільних джерел. Київ: ПВНЗ "Інститут Тутковського".
- Шмаков, Ф.Д. (2012). Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП. *Технологии сейсморазведки*, 3, 65-72.
- Akram, J. (2020). Understanding Downhole Microseismic Data Analysis: With Applications in Hydraulic Fracture Monitoring. *Springer*.
- Shen, B., Stephansson, O., Rinne M. (2014) Modelling Rock Fracturing Processes: Theories, Methods, and Applications. Springer 2014.
- Barenblatt, G. I. (1956). On certain problems of the theory of elasticity arising in the studies of the mechanism of the hydraulic fracturing of the oil-bearing strata. *Applied Mathematics and Mechanics (PMM)*, 20, 4, 475-486.
- Belyadi, H., Fathi, H. and Belyadi, F. (2017). Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs Theories, Operations, and Economic Analysis. Gulf Professional Publishing.
- Biot, M.A. (1955). Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*, 26 (2), 182-185. <https://doi.org/10.1063/1.1721956>.
- Clark, J.B. (1949). A Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells. *J. Pet. Technol.*, 1, 1-8. <https://doi.org/10.2118/949001-G>.
- Coates, D., Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 3 (3), 181-189. <https://doi.org/10.4095/300105>.
- Detournay, E. (2016). Mechanics of Hydraulic Fractures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, 311-339. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014736>.
- Donaldson, E. C., Alam, W., Begum, N. (2013). Hydraulic Fracturing Explained. Evaluation, Implementation, and Challenges. Gulf Publishing Company.

- Duncan, P.M., Eisner L. (2010). Reservoir characterization using surface microseismic monitoring. *GEOPHYSICS* 75: 75A139-75A146. 10.1190/1.3467760.
- Geertsma, J., De Klerk, F. (1969). A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures. *J. Pet. Technol.*, 21 (12), 1571–158. <https://doi.org/10.2118/2458-PA>
- Gehne, S., Benson, P.M. (2019). Permeability enhancement through hydraulic fracturing: laboratory measurements combining a 3D printed jacket and pore fluid over-pressure. *Sci. Rep.*, 9, 12573. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49093-1>
- Gibowicz, S.J., Kijko A. (1994). An introduction to mining seismology. Academic Press.
- Goodway, B.V., Varsek, J., Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, 221 (582–593), 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- Irwin, G. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361–364.
- Khrisianovic, S.A. Zheltov, Y.P. (1955). Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Liquid. *Proceedings of the 4th World Petroleum Congress*, June 6–15, 1955.
- King, G. E. (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference February 6–8, 2012, The Woodlands, Texas, USA*. <https://doi.org/10.2118/152596-MS>
- Lisny, G., Krasnikova, O., Vyzhva, S. (2021) Prospects of microseismic monitoring of hydraulic fracturing in Ukraine. *Conference Proceedings, Geoinformatics 2021*, Vol. 2021, p.1 – 6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521145>
- Maslov, B., Prodaivoda, G.T., Vyzhva, S. (2001). Mathematical modeling of elastic wave velocity anisotropy in a cracked geological medium. *Geophysical Journal*, 20, 191–212.
- Maxwell, S. (2010). Microseismic: Growth born from success. *The Leading Edge*, 29, 338–343. <https://doi.org/10.1190/1.3353732>
- Maxwell, S. (2011). Microseismic hydraulic fracture imaging: The path toward optimizing shale gas production. *The Leading Edge*, 30, 340–346. <https://doi.org/10.1190/1.3567266>
- Maxwell, S. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. *Society of Exploration Geophysicists*. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803164>
- Maxwell, S.C., Rutledge, J., Jones, R., Fehler, M., (2010). Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring. *Geophysics*, 75, 5, 75A129–75A137. <https://doi.org/10.1190/1.3477966>
- Maxwell, S., Urbanic, T., Steinsberger, N., Zinno, R. (2002). Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale. *SPE paper*, 77440. <https://doi.org/10.2118/77440-MS>
- Miskimins, J.(2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements. Society of Petroleum Engineers.
- Montgomery, C. and Smith, M. (2010). Hydraulic Fracturing. History of An Enduring Technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62 (12), 26–40. <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>
- Morton, M. (2013). Unlocking the Earth A Short History of Hydraulic Fracturing. *GeoExPro*, 10, 6.
- Munjiza, A., Owen, D.R.J., Bicanic, N. (1995). A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids. *Engineering Computations*, 12, 2, 145–174.
- Nilson, R.H., Griffiths, S.K. (1983). Numerical analysis of hydraulically-driven fractures. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 36, 359–70. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(83\)90129-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(83)90129-9)
- Papadopoulos, J.M., Narendran, V.M., Cleary, M.P. (1983). Laboratory Simulations of Hydraulic Fracturing. *Proceedings of SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*, Denver, Colorado.
- Patel, S., Sondergeld, C., Rai, C. (2017). Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 95, 8–15. 10.1016/j.ijrmms.2017.03.008
- Perkins, T.K., Kern, L.R. (1961). Widths of hydraulic fractures. *J. Pet. Technol.*, 13(9), 937–949.
- Rahman, Md., Rahman, M. (2010). A Review of Hydraulic Fracture Models and Development of an Improved Pseudo-3D Model for Stimulating Tight Oil/Gas Sand. *Energy Sources. Part A: Recovery*, 1416–1436. 10.1080/15567030903060523.
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, September 2008. doi: <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Shahid, A.S.A., Fokker, P.A., Rocca, V. (2016). A Review of Numerical Simulation Strategies for Hydraulic Fracturing, Natural Fracture Reactivation and Induced Microseismicity Prediction. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 2016, 9, (Suppl-1, M5) 72–91. <http://dx.doi.org/10.2174/1874834101609010072>
- Sneddon, I.N. (1946). The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci.*, 187, 1009, 229–260. <https://doi.org/10.1098/rspa.1946.0077>
- van der Baan, M., Eaton, D., Dusseault, M. (2013). Microseismic Monitoring Developments in Hydraulic Fracture Stimulation. *Proceedings of the ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, Brisbane, Australia, May 2013*.
- Vandamme, L., Curran, J. (1989) A three-dimensional hydraulic fracturing simulator *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 28, 4, 909–927.
- Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Conference Proceedings, Monitoring 2019*, Vol. 2019, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224>
- Wang, J.J. (2014). Hydraulic Fracturing in Earth-Rock Fill DAMS. China Water and Power Press, 4. 10.1002/9781118725542
- Warpinski, N.R. (2014). A Review of Hydraulic-Fracture Induced Microseismicity. *Proceedings of the 48th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Minneapolis, Minnesota, June 2014.
- Yew, C.H., Weng, X. (2014). Mechanics of Hydraulic Fracturing. Gulf Professional Publishing.
- Zhao, Q., Lisjak, A., Mahabadi, O., Liu, Q., Grasselli, G. (2014). Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 10.1016/j.jrmge.2014.10.003.

References

- Akram, J. (2020). Understanding Downhole Microseismic Data Analysis: With Applications in Hydraulic Fracture Monitoring. *Springer*
- Barenblatt, G. I. (1956). On certain problems of the theory of elasticity arising in the studies of the mechanism of the hydraulic fracturing of the oil-bearing strata. *Applied Mathematics and Mechanics (PMM)*, 20, 4, 475–486. [in Russian]
- Belyadi, H., Fathi, H. and Belyadi, F. (2017). Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs Theories, Operations, and Economic Analysis. Gulf Professional Publishing.
- Biot, M.A. (1955). Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*, 26 (2), 182–185. <https://doi.org/10.1063/1.1721956>
- Clark, J.B. (1949). A Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells. *J. Pet. Technol.*, 1, 1–8. doi: <https://doi.org/10.2118/949001-G>
- Coates, D., Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 3 (3), 181–189. <https://doi.org/10.4095/300105>
- Detournay, E. (2016). Mechanics of Hydraulic Fractures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, 311–339. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014736>
- Donaldson, E. C., Alam, W., Begum, N. (2013). Hydraulic Fracturing Explained. Evaluation, Implementation, and Challenges. Gulf Publishing Company.
- Duncan, P.M., Eisner L. (2010). Reservoir characterization using surface microseismic monitoring. *GEOPHYSICS* 75: 75A139-75A146. 10.1190/1.3467760.
- Geertsma, J., De Klerk, F. (1969). A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures. *J. Pet. Technol.*, 21 (12), 1571–158. <https://doi.org/10.2118/2458-PA>
- Gehne, S., Benson, P.M. (2019). Permeability enhancement through hydraulic fracturing: laboratory measurements combining a 3D printed jacket and pore fluid over-pressure. *Sci. Rep.*, 9, 12573. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49093-1>
- Gibowicz, S.J., Kijko A. (1994). An introduction to mining seismology. Academic Press.
- Goodway, B.V., Varsek, J., Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, 221 (582–593), 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- Irwin, G. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361–364.
- Kachmar, Yu.D., Tsomko, V.V. (2015). To the 60th anniversary of the application of hydraulic fracturing in PJSC "Ukrnafta". *Oil and gas industry of Ukraine*, 4, 43–46. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu_2015_4_12. [in Ukrainian]
- Khrisianovic, S.A. Zheltov, Y.P. (1955). Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Liquid. *Proceedings of the 4th World Petroleum Congress*, June 6–15, 1955.
- King, G. E. (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference February 6–8, 2012, The Woodlands, Texas, USA*. <https://doi.org/10.2118/152596-MS>
- Lisny, G. (2002). Using the model of anisotropic medium for the analysis of seismic images of geological objects. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Lisny, G. (2012). Practical aspects of three-dimensional seismic imaging based on common source seismograms. Kyiv: Tutkovsky Institute Publishing. [in Ukrainian]
- Lisny, G., Krasnikova, O., Vyzhva, S. (2021) Prospects of microseismic monitoring of hydraulic fracturing in Ukraine. *Conference Proceedings*,

Geoinformatics 2021, Vol. 2021, p. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521145>

Maslov, B., Prodaivoda, G.T., Vyzhva, S. (2001). Mathematical modeling of elastic wave velocity anisotropy in a cracked geological medium. *Geophysical Journal*, 20, 191–212.

Maxwell, S. (2010). Microseismic: Growth born from success. *The Leading Edge*, 29, 338–343. <https://doi.org/10.1190/1.3353732>

Maxwell, S. (2011). Microseismic hydraulic fracture imaging: The path toward optimizing shale gas production. *The Leading Edge*, 30, 340–346. <https://doi.org/10.1190/1.3567266>

Maxwell, S. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. *Society of Exploration Geophysicists*. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803164>

Maxwell, S., Urbancic, T., Steinsberger, N., Zinno, R. (2002). Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale. *SPE paper*, 77440. <https://doi.org/10.2118/77440-MS>

Maxwell, S.C., Rutledge, J., Jones, R., Fehler, M., (2010). Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring. *Geophysics*, 75, 5, 75A129–75A137. <https://doi.org/10.1190/1.3477966>

Miskimins, J. (2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements. Society of Petroleum Engineers.

Montgomery, C. and Smith, M. (2010). Hydraulic Fracturing. History of An Enduring Technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62 (12), 26–40. <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>

Morton, M. (2013). Unlocking the Earth A Short History of Hydraulic Fracturing. *GeoExPro*, 10, 6.

Munjiza, A., Owen, D.R.J., Bicanic, N. (1995). A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids. *Engineering Computations*, 12, 2, 145–174.

Nilson, R.H., Griffiths, S.K. (1983). Numerical analysis of hydraulically-driven fractures. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 36, 359–70. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(83\)90129-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(83)90129-9)

Papadopoulos, J.M., Narendran, V.M., Cleary, M.P. (1983). Laboratory Simulations of Hydraulic Fracturing. *Proceedings of SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium, Denver, Colorado*.

Patel, S., Sondergeld, C., Rai, C. (2017). Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 95, 8–15. [10.1016/j.ijrmms.2017.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.03.008)

Perkins, T.K., Kern, L.R. (1961). Widths of hydraulic fractures. *J. Pet. Technol.*, 13(9), 937–949.

Rahman, Md., Rahman, M. (2010). A Review of Hydraulic Fracture Models and Development of an Improved Pseudo-3D Model for Stimulating Tight

Oil/Gas Sand. *Energy Sources. Part A: Recovery*, 1416–1436. [10.1080/15567030903060523](https://doi.org/10.1080/15567030903060523).

Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008*. doi: <https://doi.org/10.2118/115258-MS>

Shahid, A.S.A., Fokker, P.A., Rocca, V. (2016). A Review of Numerical Simulation Strategies for Hydraulic Fracturing, Natural Fracture Reactivation and Induced Microseismicity Prediction. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 2016, 9, (Suppl-1, M5) 72–91. <http://dx.doi.org/10.2174/1874834101609010072>

Shen, B., Stephansson, O., Rinne, M. (2014). Modelling Rock Fracturing Processes: Theories, Methods, and Applications. Springer 2014.

Shmakov, F.D. (2012). Methods of processing and interpretation of hydraulic fracturing ground microseismic monitoring data. *Seismic technologies*, 3, 65–72. [in Russian]

Sneddon, I.N. (1946). The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci.*, 187, 1009, 229–260. <https://doi.org/10.1098/rspa.1946.0077>

Van der Baan, M., Eaton, D., Dusseault, M. (2013). Microseismic Monitoring Developments in Hydraulic Fracture Stimulation. *Proceedings of the ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, Brisbane, Australia, May 2013*.

Vandamme, L., Curran, J. (1989) A three-dimensional hydraulic fracturing simulator *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 28, 4, 909–927.

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Conference Proceedings, Monitoring 2019, Vol. 2019, 1–5*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224>

Wang, J.J. (2014). Hydraulic Fracturing in Earth-Rock Fill DAMS. China Water and Power Press, 4. [10.1002/9781118725542](https://doi.org/10.1002/9781118725542)

Warpinski, N.R. (2014). A Review of Hydraulic-Fracture Induced Microseismicity. *Proceedings of the 48th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Minneapolis, Minnesota, June 2014*.

Yew, C.H., Weng, X. (2014). Mechanics of Hydraulic Fracturing. Gulf Professional Publishing.

Zhao, Q., Lisjak, A., Mahabadi, O., Liu, Q., Grasselli, G. (2014). Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6. [10.1016/j.jrmge.2014.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.10.003).

Надійшла до редколегії 15.09.21

O. Krasnikova¹, Stud.,
E-mail: koatinga@gmail.com;

G. Lisny², Dr. Sci. (Geol.),
E-mail: lesnoygd@gmail.com;

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;

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

²Geounit LLC, 9 Stepana Bandery Str., Kyiv, 04073, Ukraine

CURRENT STATE OF APPLICATION OF HYDRAULIC FRACTURING MICROSEISMIC MONITORING METHODS

The article is devoted to the review of processing and interpretation of microseismic fracturing monitoring. The need to cover the works related to the intensification of production is caused by the underdeveloped practice of such research in Ukraine. The article describes the world experience of microseismic observations and outlines their prospects on the territory of Ukraine. Considerable attention is paid to the processing and interpretation of fracturing microseismic monitoring data. The choice of technologies is associated with the correct consideration of the geological structure of the prospective area or hydrocarbon field, as well as the previous stages of development of oil and gas fields. The ways of using the world experience of microseismic monitoring of hydraulic fracturing in the conditions of oil and gas provinces of Ukraine are determined.

Keywords: hydraulic fracturing, microseismic monitoring, solving the inverse problem.

Е. Красникова¹, студ.,
E-mail: koatinga@gmail.com;

Г. Лесной², д-р геол. наук,
E-mail: lesnoygd@gmail.com;

С. Вызхва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;

²ООО "Геоюнит", проспект Степана Бандеры, 9, г. Киев, 04073, Украина

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗА ПРОВЕДЕНИЕМ И КАЧЕСТВОМ ГРП

Посвящено обзору особенностей обработки и интерпретации данных микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта (ГРП). Потребность в освещении направлений работ, связанных с интенсификацией добычи, обусловлена недостаточно развитой практикой применения таких исследований на территории Украины. В статье рассмотрен мировой опыт применения микросейсмических наблюдений и намечены перспективы проведения таких работ на территории Украины. Значительное внимание уделено рассмотрению особенностей обработки и интерпретации данных микросейсмического мониторинга ГРП. Правильный выбор технологий связан с корректным учетом особенностей геологического строения перспективной площади или месторождения углеводородов, а также предыдущих этапов разработки месторождений нефти и газа. Определены пути использования мирового опыта микросейсмического мониторинга ГРП при проведении таких работ в условиях нефтегазоносных провинций Украины.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, микросейсмический мониторинг, решение обратной задачи.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 552.52:551.735.1(477.5)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.09>О. Тунік^{1,2}, асп., геофізик-інтерпретатор,
E-mail: alyonatunik1@gmail.com,¹ТОВ "Укрспецгеологія", вул. В. Тютюнника, 37/1, м. Київ, 03150, Україна,²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОРИННИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ГЛИНИСТИХ ПОРІД НИЖНЬОГО КАРБОНУ
ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

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

Описано основні результати дослідження впливу вторинних перетворень на нижньокам'яновугільні глинисті породи на глибинах, що перевищують 3 тис. метрів. За допомогою силікатного, енергодисперсійного рентгено-флюорисцентного аналізу та електронно-мікроскопічних досліджень було вивчено структуру глинистих порід та визначено основні породотвірні компоненти в зразках керну. Дослідження показало наявність як фонових, так і накладених епігенетичних змін у вивчених зразках. Інтенсивність та різноманітність проявлених вторинних перетворень збільшується з глибиною. Підтверджено, що ущільнення глинистих порід зменшує їх пористість та покращує екранувальну здатність. При цьому наявність розсіяного алевроитового матеріалу не впливає на значення пористості. Її зростання та, відповідно, погіршення якості глинистих покришок може зумовлюватись накладеним процесом каолінізації. За складом мінеральних парагенезисів встановлено, що досліджені глинисті породи перебувають на стадії мезокатагенезу. Окреслено подальший розвиток досліджень з метою апроксимації мікроскопічних та геохімічних даних за допомогою розширеного комплексу ГДС.

Ключові слова: глинисті породи, епігенез, екранувальна здатність, нижній карбон, Дніпровсько-Донецька западина

Постановка проблеми. За сучасними оцінками близько половини осадових утворень різного генезису та віку складають глинисті породи (Осипов *и др.*, 2001). Вони є обов'язковим елементом більшості нафтогазових систем, формуючи регіональні, зональні та локальні покришки. За наявності органічної речовини глинисті породи здатні генерувати вуглеводні (ВВ), які внаслідок міграції формують традиційні поклади вуглеводнів, а також вміщують сингенетичні поклади сланцевих нафти і газу в різних регіонах світу.

У розвитку седиментаційних басейнів у процесі літогенезу глинисті породи зазнають епігенетичних перетворень, які можуть призводити як до зростання їх екранувальної здатності, так і до її повної втрати і перетворення глинистих порід у колектори (Клубова, 1988; Осипов *и др.*, 2001). Детальні лабораторні дослідження збагачених органічною речовиною глинистих порід, що вміщують сланцеві ВВ, демонструють суттєвий вплив епігенетичних перетворень на їх колекторські властивості (Josh *et al.*, 2012). Тому вивчення вторинних змін глинистих порід у седиментаційних басейнах має важливе значення для прогнозування нафтогазоносності останніх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порівняльно-історичний підхід до вивчення осадових товщ започаткований М.М. Страховим. У роботі, що стала класичною, "Основы теории литогенеза" він узагальнив весь осадовий процес та поклав початок розвитку генетичної літології (Страхов, 1960). Пізніше процеси літогенезу та епігенетичних перетворень осадових порід вивчала низка дослідників (Л.В. Пустовалов, А.В. Копелович, А.Г. Косовська, М.В. Логвиненко, М.Б. Вассоевич *и др.*), що привело до становлення порівняльно-історичного методу стадіального аналізу в літології (Япаскурт, 1995). Багато дослідників відмічають зв'язок між ступенем перетворення породи та генерацією ВВ, визначають термобаричні показники, літологічні маркери, що вказують на ступінь катагенетичних перетворень. При цьому переважна кількість робіт концентрується навколо перетворень у породах-колекторах, водночас вивченню вторинних змін у глинистих породах і глинистих покришках приділяється набагато менше уваги.

Епігенетичні зміни глинистих мінералів вивчали А.Г. Косовська, В.Д. Шутов (1976), І.Д. Зхус (1979), М.В. Логвиненко (1987), Ж. Милло (1964). Було показано, що в процесі епігенезу різні глинисті мінерали по-різному пристосовуються до умов постійного підвищення температур та тисків.

Значущий внесок у розвиток розуміння процесів, що відбуваються в осадових басейнах різних типів, вніс В.М. Холодов. У контексті нафтогазоносності на прикладі Східнопередкавказького елізійного басейну він показав важливість розуміння процесів, що відбуваються з породою від її утворення до метаморфізації (Холодов, 1983). Для ДДЗ, яка також належить до елізійного типу осадових басейнів, нафтогазоносність, на думку цього дослідника, пов'язана з перерозподілом газоводяних флюїдів, що відтискаються з глинистих порід у пісковики та тектонічні тріщини. Це супроводжується реакціями, що відбуваються на межі різних геохімічних середовищ, з утворенням різноманітних аутигенних мінералів. При цьому значно змінюється хіміко-мінералогічний склад як порід-колекторів, так і глинистих покришок. Водночас В.М. Холодов вважає, що основним джерелом вторинних накладених перетворень у глибоких горизонтах ДДЗ є розчини, що формувались у девонській соленосній формації (Холодов, 2013).

Вплив вторинних процесів на глинисті породи детально вивчався і для інших осадових басейнів світу, зокрема для басейнів Мексиканської затоки (Burst, 1966, 1969), Туреччини (Bozkaya and Yalchin, 2004), Північного моря (Nadeau *et al.*, 2005), північно-східної Канади (Edwards *et al.*, 2014) та інших басейнів (Segonzac, 1970). У результаті встановлено, що за інтенсивного занурення глинисті породи піддаються інтенсивному ущільненню, та при відтісненні елізійних вод відбуваються метасоматичні перетворення у вигляді карбонатизації, каолінізації, слюдизації та піритизації.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У процесі літогенезу змінюється склад та структура глин, їх фізичні та механічні властивості, відбувається поступова трансформація осадів у глинисті породи, а останні в аргіліти та глинисті сланці. Ці перетворення супроводжуються змінами екранувальних властивостей глинистих товщ. Зрозуміло, що при

© Тунік О., 2021

прогнозуванні покладів ВВ необхідно враховувати закономірності змін екранувальних властивостей потенційних глинистих покришок з глибиною.

Глинисті мінерали найбільш складні для вивчення, що визначається їхньою значною дисперсністю, схожістю оптичних ознак складових породи, змінним хімічним складом. Вивчення палеозойських глинистих порід Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) проводились лише фрагментарно (Лукин, 1977). Територія наших досліджень розміщується у Центральній частині ДДЗ, де поклади ВВ приурочені до нижнього карбону. Систематичне вивчення вторинних перетворень глинистих порід цього віку тут не проводились, що й зумовлює актуальність теми досліджень. Крім оцінки впливу таких перетворень на екранувальну здатність глинистих покришок,

вивчення поетапних змін глинистих порід дозволяє виділити індикатори стадій літогенезу та прогнозувати можливі умови формування аномально високих пластових тисків (АВПТ).

Мета дослідження – виявлення основних вторинних (фонових та накладених) епігенетичних змін у глинистих породах нижнього карбону Центральної частини ДДЗ та оцінка їхнього впливу на екранувальні властивості глинистих покришок.

Матеріали і методика досліджень. Об'єктом дослідження є нижньокам'яновугільні глинисті породи (аргіліти) Березівсько-Котелевського та Солохівсько-Диканського валів: Березівське, Більське, Західносолохівське, Коломацьке, Котелевське, Солохівське та Степове родовища (рис. 1).

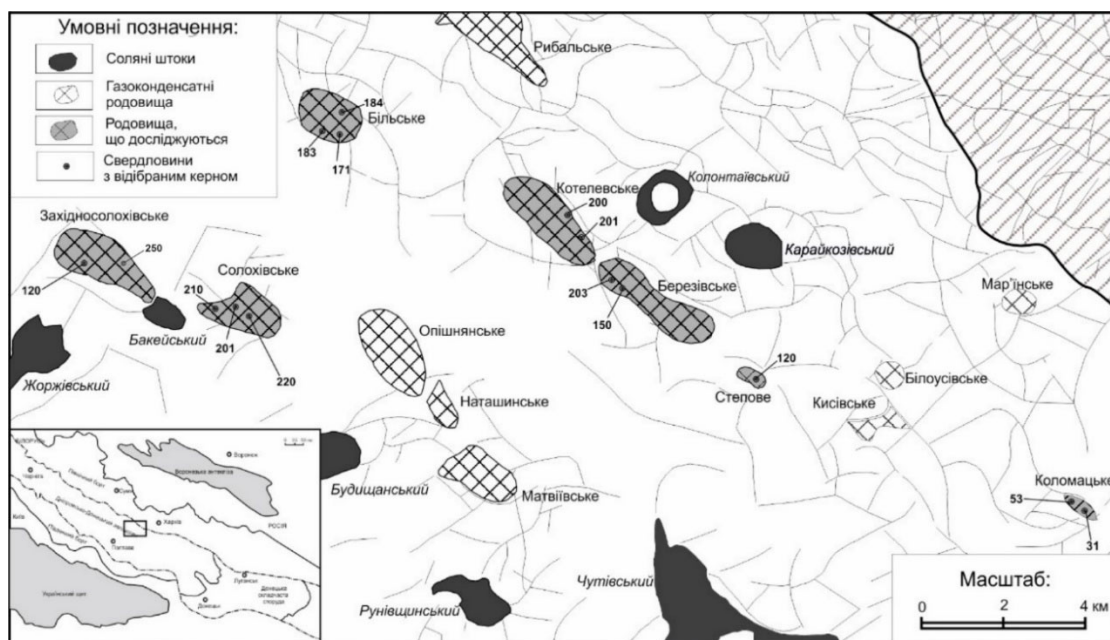


Рис. 1. Оглядова карта району досліджень

Предметом дослідження були зразки керна матеріалу з інтервалу глибин від 3470,3 м (Солохівська 201) до 5817,5 м (Березівська 150) з продуктивних горизонтів від С-4 до В-25–26. Виготовлено 29 прозорих петрографічних шліфів, 9 аншліфів та 26 геохімічних проб, що були вивчені петрографо-мікроскопічними, геохімічними та методами електронної мікроскопії. Дослідження було проведено в науково-дослідній лабораторії мінералого-геохімічних досліджень ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Першим їх етапом була спроба вивчення глинистих порід у прозорих шліфах під поляризаційним мікроскопом, що не дало істотних результатів через тонкодисперсність матеріалу. Тому в подальшому застосовувалися методи геохімічних досліджень та електронної мікроскопії.

Силікатний аналіз (аналіз на основні породотвірні компоненти) проводився на хвильоводисперсійному рентгено-флюорисцентному спектрометрі СРМ-25 для 26 проб. Мікроелементний склад визначався за допомогою рентгеновського спектрометра СЕР, Elvax. Енергодисперсійний рентгено-флюорисцентний аналіз зразків гірських порід з кількісним визначенням вмісту важких елементів (рідкісноземельних металів) було виконано на рентгеновському спектрометрі РФС-РД. Додатково із зразків порід, проби яких було підготовлено для геохімічних досліджень, виготовлено 9 аншліфів, які вивчено із застосуванням

локального рентгеноспектрального елементного аналізу під растровим електронним мікроскопом-мікроналізатором РЕММА-202М з використанням енергодисперсійного спектрометра LinkSystem. Це дозволило вивчити мікроструктуру та уточнити хімічний склад глинистих порід. На основі визначених концентрацій хімічних елементів було розраховано співвідношення глинистих мінералів у зразках/пробах, що дозволило діагностувати вторинні зміни фонових та накладених катагенезу.

Розрахунок відсоткового вмісту основних глинистих компонентів (мінералів) включав у себе комбінацію даних силікатного аналізу та результатів дослідження аншліфів під електронним мікроскопом з використанням енергодисперсійного спектрометра. Було розраховано загальний склад геохімічних проб з врахуванням вмісту води та втрати при прожарюванні.

Для здійснення всіх розрахунків виключно для сухого залишку із загального складу було вилучено воду, а вміст кожного елементного оксиду був нормалізований до загального вмісту речовини 99,6 %.

Наступним етапом було вирахування вмісту сульфідного заліза, що могло бути зв'язано сульфідами або сульфатами (сульфід заліза – пірит). Після вирахування вмісту сульфідного заліза та сірки вмісти всіх залишкових компонентів, що були пов'язані із глинами, знову були нормалізовані до загального вмісту компонентів

99,6 % для розрахунку відсоткового вмісту основних глинистих компонентів.

Значення вмісту СаО є низькі і тому не включені до розрахунків. Вони свідчать про відсутність істотної карбонатизації, отже досліджені породи є безкарбонатними або слабокарбонатними.

Хлорити	Каолініти	Іліти (гідрослюди)
$Al_2O_3/Fe_2O_3=0,66$ $SiO_2/Fe_2O_3=1,00$	$SiO_2/Al_2O_3=1,28$	$SiO_2/K_2O=5,16$ $Al_2O_3/K_2O=3,47$

*при розрахунку коефіцієнтів співвідношень хімічний склад мінералів розраховано на суху речовину (без вмісту води) із загальним вмістом 99,6 %.

Останнім кроком у розрахунках було застосування вищезазначених коефіцієнтів для розрахунку вмісту кожного окремо глинистого мінералу у відсотках.

Для розрахунків було прийнято, що все "залишкове" залізо (після вирахування "сульфідного заліза") зв'язано з хлоритами, калій – з гідрослюдами, залишковий алюміній після всіх урахувань – з каолінітом. "Залишковий" кремнезем після всіх урахувань відповідно був зв'язаний з вмістом алевроліту. Отже, відсотковий вміст глинистих компонентів обчислювався в такому порядку: хлорити – іліти – каолініти – "залишковий" SiO_2 .

Отримані результати з вивчення мінерального складу алевро-глинистих порід порівнювались із даними лабораторних досліджень фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЕВ) (пористість+проникність), що були надані Українським науково-дослідницьким інститутом газу (УкрНДІГаз), м. Харків.

Для інтерпретації отриманих результатів використовувались елементи стадіального аналізу та загальновідомі закономірності еволюції глинистої речовини в літогенезі, що були продемонстровані в роботах М.В. Логвиненка (1987), В.И. Осипова (2001), В.М. Холодова (1983,2013), О.В. Япаскурта (1995).

Результати досліджень. Аргіліти, відібрані із свердловин Березівсько-Котелевського валу, – темно-сірі до чорних, з дрібним слюдистим матеріалом та стягненнями піриту на поверхнях нашарування. Іноді пірит заповнює тріщини або утворює окремі прошарки. Зрідка трапляються вуглисті різновиди (Березівська 203). Часто аргіліти містять алевритову домішку, а деякі зразки мають карбонатну складову (Котелевська 201, Більська 171, 183, 184) та реагують з HCl. Аргіліти міцні, не розмокають у воді (Котелевська 201). Трапляються рештки органіки. У зразках із свердловин Солохівсько-Диканського валу аргіліти темно-сірі та чорні, що переважно не розмокають у воді та не реагують з HCl. Місцями відмічається розсіяний алевритовий матеріал. Породи нечітко шаруваті з тонкими прошарками та лінзами, що збагачені кристалічним піритом. Іноді трапляються включення темно-коричневого

На основі вивчення зразків під електронним мікроскопом було виділено та проаналізовано хімічний склад окремих мінеральних агрегатів, що належали до різних типів глинистих мінералів, та встановлено розрахункові коефіцієнти співвідношень основних породотвірних елементів для груп мінералів: хлориту, каолініту та іліту (гідрослюди)*.

сидериту. У зразках аргілітів з Солохівського родовища відмічається вапнистість і вони реагують з HCl.

Значення пористості та мінеральний склад проаналізованих за допомогою хвильоводисперсійного рентгенофлюорисцентного спектрометра геохімічних проб наведено в табл. 1 (пористість, проникність та розбивку за продуктивними горизонтами наведено за даними УкрНДІГаз) та проілюстровано на графіку (рис. 2).

З наведених даних видно, що найбільші значення пористості 4,4 та 4,8 % зафіксовано в зразках №№ 41504 та 45086, що були відібрані із Солохівського та Західносолохівського родовищ з глибин 4178,6 та 5076,3 м відповідно. Для цих зразків характерні майже однакові частки кожного з глинистих мінералів та алевритового компонента. У цілому наведений графік демонструє прогнозовану тенденцію зменшення пористості глинистих порід з глибиною. На цьому фоні чітко виділяється зразок № 42573 з глибини 5360,1 м Західносолохівського родовища з переважанням у його складі каолініту. Його пористість досягає 2,8 %.

Відзначимо, що пористість вивчених зразків не залежить від значень вмісту розсіяних алевритових компонентів у їх складі. Так, у зразку № 40845 з глибини 3550,5 м Солохівського родовища вміст кварцу сягає 25,66 %, а пористість становить 2,8 %. Водночас у зразку № 49021 з глибини 5917,5 м Березівського родовища з максимальними значеннями вмісту кварцу понад 52 % – значення пористості майже нульові.

Для підтвердження компонентного складу вивчених зразків також було застосовано додатковий метод визначення складу глинистих порід – аналіз співвідношення вмісту калію та торію. Зазвичай геофізики його використовують при проведенні спектрометричного гамма-каротажу з метою визначення типу глинистої компоненти в розрізах, але він має дуже високу кореляцію з результатами досліджень зразків у лабораторіях (Alskari, 2018). Дані вмісту урану і торію, що використовуються для аналізу на крос-плоті (рис. 3), було отримано при визначенні рідкісних елементів за допомогою рентгенівського спектрометра CPM-25.

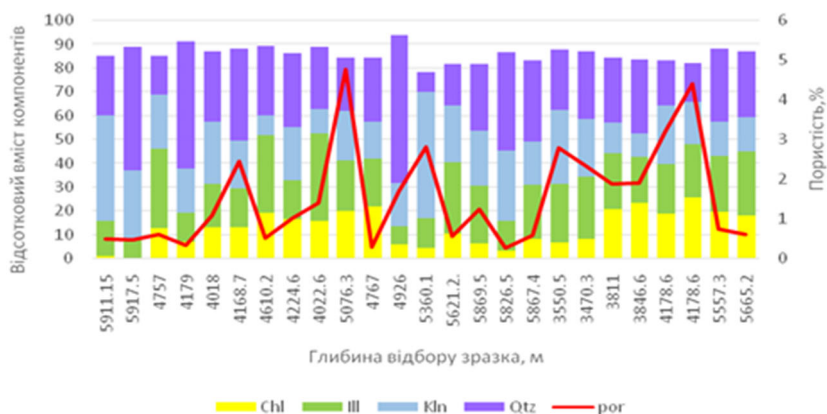


Рис. 2. Компонентний склад глинистих порід та їхня пористість (Chl-хлорит, Ill-іліт, Kln-каолініт, Qtz-кварц)

Таблиця 1

Назва свердловини	№ зразка	Глибина відбору, м	Проникність, 10^{-15} м^2	Пористість, %	ПГ	Розрахункові співвідношення глин. компонентів Хлорит/Іліт/Каолініт/Кварц
Березівська 150	49017	5911,15	не прон.	0,5	В-25-26	0,94/14,46/44,58/25,02
Березівська 150	49021*	5917,5	не визн.	0,5	В-25-26	0,00/8,09/28,96/52,08
Березівська 203	45085	4757	зруйн.	0,6	С-5	12,53/33,38/23,09/16,09
Березівська 203	45085-II	4757	зруйн.	0,6	С-5	г/х аналіз не проводився
Більська 171	29885*	4179	зруйн.	0,3	C_1V_2	6,80/12,34/18,34/53,87
Більська 183	41778	4018	зруйн.	1,1	В-15	12,86/18,36/26,17/29,58
Більська 184	36064*	4168,7	зруйн.	2,4	C_1V_2	13,06/16,20/20,13/38,88
Більська 171	29880	4174	зруйн.	0,2	C_1V_2	г/х аналіз не проводився
Більська 184	36197	4610,2	зруйн.	0,5	В-21-23	19,10/32,64/8,45/28,99
Більська 171	29884	4178	0,06 тр.	2,8	C_1V_2	г/х аналіз не проводився
Більська 171	30051*	4224,6	зруйн.	1,0	В-16н	16,51/16,32/22,41/30,95
Більська 184	36198	4610,7	1,08	9,3	В-21-23	г/х аналіз не проводився
Більська 184	35632	4022,6	зруйн.	1,4	C_1V_2	15,47/36,88/10,50/25,99
Західносолохівська 250	41504	5076,3	0,03 тр.	4,8	В-22 н/В-23	19,61/21,54/20,99/22,23
Західносолохівська 120	44715	4767	зруйн.	0,3	В-19а	21,60/20,14/15,81/26,86
Західносолохівська 250	41502	4926	<0,01	1,7	В-22 в	5,63/7,55/18,23/62,53
Зхідносолохівська 250 (2й ствол)	42573	5360,1	зруйн.	2,8	В-24/В25	4,22/12,64/53,05/8,50
Коломацька 31	34600	5362	зруйн.	0,7	С-4	г/х аналіз не проводився
Коломацька 31	34586	5291	зруйн.	0,6	C_1S_2	г/х аналіз не проводився
Коломацька 53	40484	5554,7	зруйн.	2,5	С-5	г/х аналіз не проводився
Котелевська 200	33411	5621,2	зруйн.	0,6	?	10,34/29,86/24,03/17,44
Котелевська 200	33293	5507,5	зруйн.	0,9	В-16	г/х аналіз не проводився
Котелевська 201	43170*	5869,5	зруйн.	1,2	В-24	6,12/24,42/23,07/28,30
Котелевська 201	43144*	5826,5	<0,01^	0,3	В-23	3,01/12,73/29,61/41,49
Котелевська 201	43167	5867,4	зруйн.	0,6	В-24	8,09/22,77/18,21/34,35
Солохівська 201	40845*	3550,5	зруйн.	2,8	В-16	6,41/24,72/31,05/25,66
Солохівська 201	40840*	3470,3	зруйн.	2,3	В-16	7,97/26,27/24,43/28,40
Солохівська 201	40852*	3811	<0,01 ^	1,9	В-16	20,68/23,46/12,77/27,6
Солохівська 210	42591	3846,6	зруйн.	1,9	C_1V_2	23,34/19,24/9,75/31,23
Солохівська 220	45088	4178,6	зруйн.	3,2	В-22в	18,78/20,73/24,91/18,96
Солохівська 220	45086	4178,6	зруйн.	4,4	В-22в	25,65/22,31/17,73/16,39
Степова 120	47996	5557,3	<0,01тр.	0,7	В-14	19,35/23,73/14,28/30,94
Степова 120	48311	5665,2	<0,01тр.	0,6	—	17,76/26,97/14,68/27,67

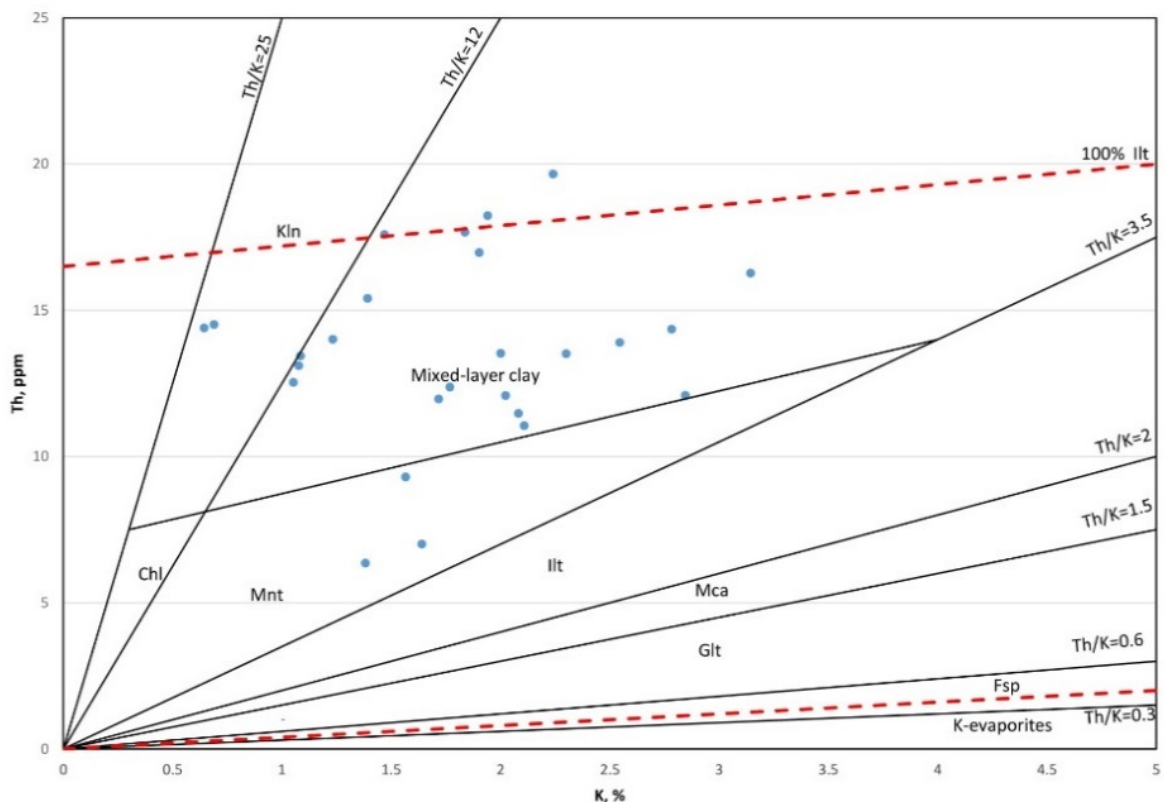


Рис. 3. Крос-плот співвідношення торію до калію (досліджені проби позначено синім кольором)

З наведеного крос-плоту видно, що переважна кількість вивчених зразків має змішаношаровий, а окремі зразки – каолінітовий або монтморилонітовий склад. Варто зазначити, що використання цього методу розраховане на великий масив даних, які звичайно отримують при проведенні каротажу, тому у нашому випадку може збільшуватись похибка через обмежену кількість даних. Разом з тим, на нашу думку, загальна закономірність та напрям трансформації глинистих мінералів проявляється достатньо однозначно: глинисті мінерали перебувають на етапі перетворення у змішано-шаровий модифікації з подальшою каолінітизацією та ілітизацією.

Під час дослідження зразків під електронним мікроскопом було більш детально вивчено структуру, текстуру та мінеральний склад глинистих порід з різних температурних зон:

- вище ізотерми 110 °С;
- в межах температурного інтервалу 110–120 °С;
- нижче ізотерми 120 °С.

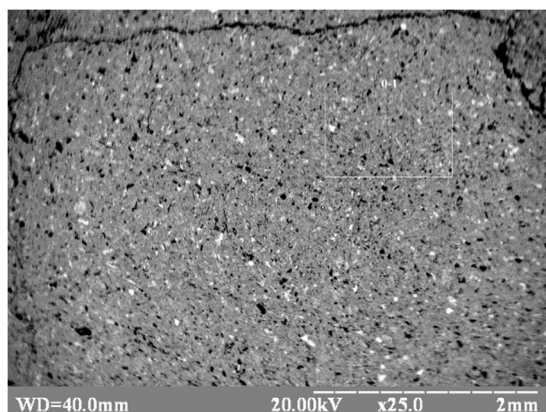
За концепцією дослідників УкрНДІгазу (Зарицький та ін. 2007) температурний інтервал 110–120 °С відповідає гіпотетичному термогеохімічному бар'єру, що зумовлює появу гіпотетичного вторинного катагенетичного флюїдотриву та можливого формування зон АВПТ.

На рис. 4а, б представлено мікрофото аргілітів, на яких видно, що у зразках зі свердловини Солохівська 201, відібраних вище ізотерми 110 °С, відмічається

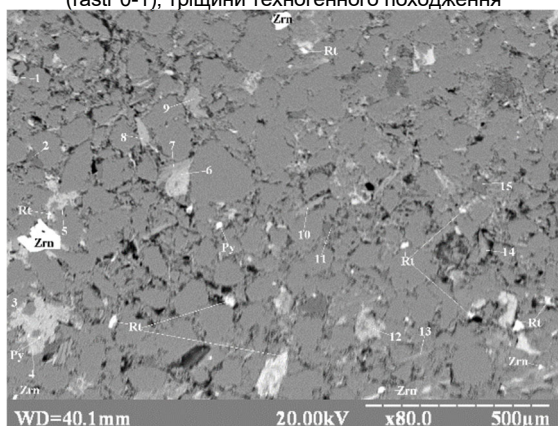
значна мікропористість, у складі переважають змішаношарові модифікації глинистих мінералів та гідрослюди. Також обмежено проявлена піритизація та трапляються поодинокі алотигенні мікрозерна циркону і рутилу. Виділяються дві генерації слюд. Для першої генерації характерна спотворена форма лусок (первинні), що зазнавали впливу тиску, температури та флюїдів, інша генерація має більш досконалу форму, луски орієнтовані по площинам нашарування.

На основі всього вищенаведеного можна зробити висновок, що зразки, які знаходяться вище ізотерми 110 °С, є умовно недоуцільненими, оскільки мають проявлену мікропористість, а їх склад свідчить про процеси, що відбуваються під час фонових літогенезу в результаті поступового занурення товщі. Розрахунковий склад на основі силікатного аналізу (рис. 2) свідчить про помірно перетворену і помірно уцільнену глинисту товщу.

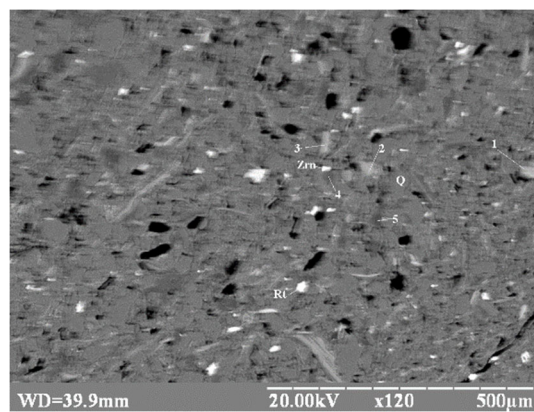
Інші зразки зі свердловин Більська 184 та 171 (рис. 4в, г, д), що були відібрані в зоні температурного інтервалу 110–120 °С, мають строкатіший склад, переважно кварцово-змішано-шаровий, та незначну мікропористість. Такий склад також свідчить про вплив фонових літогенезу на перетворення глинистих порід. Водночас наявність окремих зерен каолініту вказує на їх низькотемпературну метасоматичну каолінізацію. Відмічаються залізисто-карбонатні агрегати, що можуть бути сидеритом (рис. 4е), та піритизація, подекуди з утворенням суцільних прошарків (рис. 4д, ж).



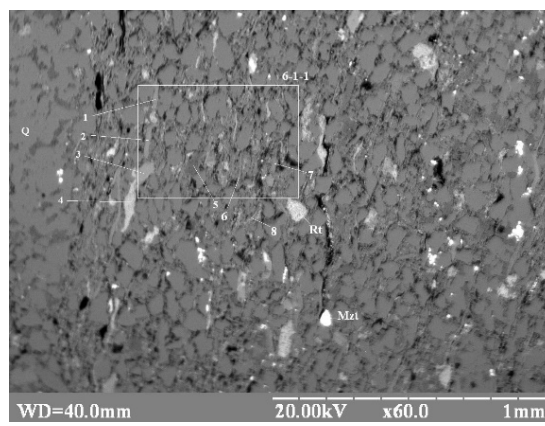
а) Аргіліт, св. Солохівська 201, гл. 3811 м. Мікропористість, каолініт-гідрослюди́стий склад з обмеженою піритизацією (rastr 0-1), тріщини техногенного походження



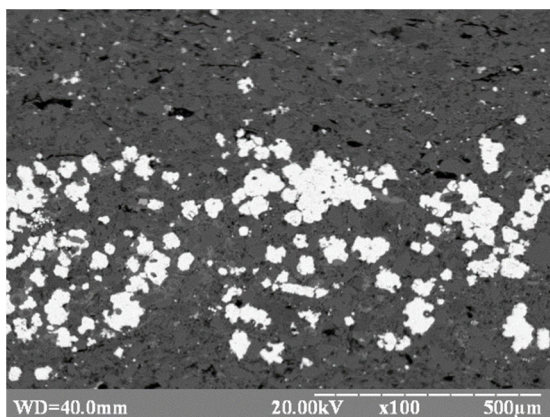
в) Аргіліт алевритистий, св. Більська 171, гл. 4179 м. Т.1; 3;4;5;12 – залізисто-карбонатний агрегат; 2;11;15 – зерна каолініту; 6 – хлорит; 7-10;13;14 – мусковіти



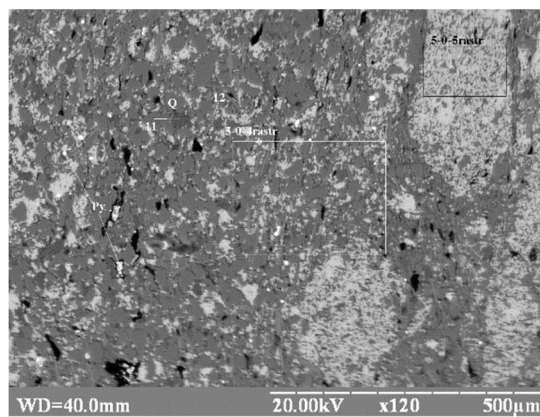
б) Аргіліт, св. Солохівська 201, гл. 3550,5 м. Т. 2; 3 – мусковіт; 4;5 – каолініт



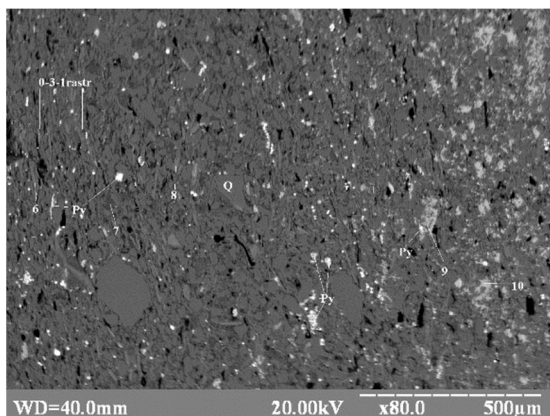
г) Аргіліт алевритистий, св. Більська 184, гл. 4168,7 м. Т. 1;2;6;7 – мусковіт; 3 – калієвий польовий шпат; 4 – залізисто-карбонатний агрегат; 5 – каолініт; 8 – хлоритизований біотит



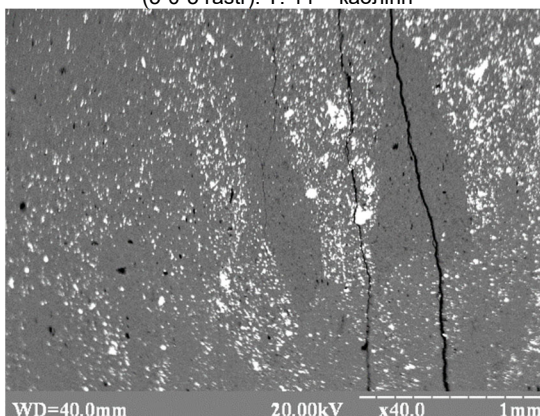
д) Аргіліт алевритистий, св. Більська 171, гл. 4224,6 м. Інтенсивна піритизація (біле)



е) Аргіліт алевритистий, св. Котелевська 201, гл. 5825,5 м. Карбонатизація у вигляді залізисто-карбонатних агрегатів (5-0-5 rastr). Т. 11 – каолінит



є) Аргіліт алевритистий, св. Котелевська 201, гл. 5825,5 м (інший прошарок). Гідрослюдистий, змішано-шаровий та каолінітовий склад (0-3-1 rastr). Т. 6;8 – мусковіт; 7 – каолініт; 9;10 – залізо-карбонатний агрегат



ж) Аргіліт алевритистий, св. Березівська 150, гл. 5917,5 м. Інтенсивна піритизація (біле). Тріщини мають техногенне походження

Рис. 4. Мікрофото аншліфів глинистих порід (Rt-рутил, Py-пірит, Q-кварц, Mzt-монацит, Zrn-циркон)

Фонові перетворення проявляються в ущільненні та дегідратації набухаючих компонентів типу монтморилоніта, який визначався в окремих пробах, і появи змішано-шарових фаз та гідрослюд. Накладені вторинні перетворення фіксуються у вигляді карбонатизації залізисто-карбонатною речовиною (сидеритом), піритизації, каолінізації калієвих польових шпатів та первинних слюд. Процес гідрослюдизації монтморилонітів добре вивчений Д.Ф. Берстом, В.Д. Шутовим та ін. (Холодов, 1983). Важливою ознакою перетворення монтморилоніту в гідрослюду є збільшення вмісту калію (Мілло, 1968). Дійсно, при проведенні геохімічного аналізу нами встановлено, що вміст K_2O у фракціях зростає з глибиною; відповідно вміст Na_2O зменшується, що підтверджує наявність процесів гідрослюдизації на досліджених глибинах.

Процеси сидеритизації та піритизації відбуваються у близьких умовах. Сидерит є одним з головних мінералів-маркерів, який свідчить про вторинні зміни порід у слабковідновлювальній обстановці за наявності в порових розчинах окисненого заліза в кислому або нейтральному середовищі. Не встановлено впливу цих процесів на зміну пористості вивчених порід.

Отже, зразки, відібрані в межах температурного інтервалу 110–120 °С, мають прояви як фонових, так і накладених вторинних перетворень.

Зразки зі свердловин Котелевська 201 та Березівська 150 (рис. 4е, є, ж), що знаходяться нижче ізотерми 120 °С, представлені аргілітами, місцями з алевритовою домішкою змішано-шарового, гідрослюдистого та каолінітового

складу. Відмічаються масивні ділянки карбонатизації залізисто-карбонатною речовиною (сидеритом), а також масивна піритизація та мікропористість.

Загалом проведені дослідження показують, що інтенсивність вторинних фонових і накладених змін збільшується з глибиною, що також відображається залежно від компонентного складу глинистих порід та їх екранувальних властивостей.

Висновки. У результаті проведених досліджень глинистих порід нижнього карбону Центральної частини ДДЗ було вивчено компонентний склад глинистих порід, ідентифіковано найважливіші епігенетичні перетворення та оцінено їх можливий вплив на екранувальні властивості глинистих товщ.

Показано, що вміст розсіяного алевритового матеріалу в глинистих породах не впливав на значення їх пористості.

Встановлено, що вивчені глинисті породи перетворювались під впливом фонових та накладених процесів. Серед фонових ідентифіковано ущільнення порід та гідрослюдизація монтморилоніту через змішано-шарову стадію. До накладених процесів віднесено карбонатизацію (сидеритизацію), каолінітизацію, піритизацію.

Парагенезиси вторинних мінералів свідчать про перебування досліджених порід у зоні мезокатагенезу. Вони не призводять до суттєвого зниження екранувальної здатності глинистих товщ, а також не вказують на можливе формування вторинних метасоматичних флюїдотривів та пов'язаних з ними зон АВПТ на досліджених глибинах.

Серед виявлених вторинних процесів на зміну пористості глинистих порід найбільше впливали фонове ущільнення та накладена метасоматична каолінізація. При цьому ущільнення прогнозовано призводить до зменшення значень пористості. Навпаки, накладена каолінізація збільшує її значення, відповідно зменшуючи екранувальну здатність глинистих порід.

Подальші дослідження планують провести з метою апроксимації отриманих результатів мікроскопічних досліджень через використання спеціального розширеного комплексу геофізичних досліджень, який включає нейтрон-нейтронний, спектрометричний гамма- та нейтронний гамма-каротаж, багатозондову індукцію, літощільнісний каротаж та крос-дипольну акустику.

Роботу виконано на кафедрі геології нафти і газу ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках кафедральної наукової теми 16КП049-08.

Автор висловлює подяку завідувачу кафедри мінералогії, геохімії та петрографії, доктору геологічних наук С.Є. Шнюкову за допомогу в проведенні досліджень у науково-дослідній лабораторії мінералого-геохімічних досліджень ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, а також співробітникам УкрНДІГаз за надання керна матеріалу та результатів визначення фільтраційно-ємнісних властивостей глинистих порід.

Список використаних джерел

- Вассоевич, Н. Б., Либрович, В. Л., Логвиненко, Н. В., Марченко, В. И. (1983). Справочник по литологии. Москва: Недра.
- Еремеев, В.В., Осипов, В.И., Соколов, В.Н. (2001). Глинистые покрывки нефтяных и газовых месторождений. Москва: Наука.
- Зарицкий, О.П., Зиненко, И.И., Лизанец, А.В., Бенько, В.М. (2007). *Патент України 21316*. Київ: Міністерство освіти і науки України. Державний департамент інтелектуальної власності.
- Зхус, И.Д., Бахтин, В.В. (1979). Литогенетические преобразования в зонах аномально высоких пластовых давлений. Москва: Наука.
- Клубова, Т.Т. (1988). Глинистые коллекторы нефти и газа. Москва: Недра.
- Логвиненко, Н.В., Орлова, Л.В. (1987). Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Ленинград: Недра.
- Лукин, А.Е. (1977). Формации и вторичные изменения каменноугольных отложений Днепровско-Донецкой впадины. Москва: Недра.
- Милло, Ж. (1968). Геология глин. Ленинград: Недра.
- Страхов, Н.М. (1960). Основы теории литогенеза. Том 1. Москва: Издательство АН СССР.
- Холодов, В.Н. (1983). Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах. Москва: Наука.
- Холодов, В.Н. (2013). Типы элизионных систем и связанные с ними месторождения полезных ископаемых. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 3, 5-41.
- Япаскерт, О.В. (1994). Стадиальный анализ литогенеза. Москва: Издательство МГУ.
- Alaskari, G. (2018). XRD Evaluation of Clay Minerals in Shaley Formation and Its Comparison With Cross Plotting of Log Data. *Progress in Petrochemical Science*, 1, 64-70. doi:DOI:10.31031/PPS.2018.01.000513
- Bozkaya, O., Yalcin, H. (2004). Diagenetic to low-grade metamorphic evolution of clay mineral assemblages in Paleozoic to early Mesozoic rocks of the Eastern Taurides, Turkey. *Clay Minerals*, 39(4), 481-500. doi:DOI:10.1180/0009855043940149
- Burst, J.F. (1969). Diagenesis of Gulf Coast Clayey Sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG Bulletin*, 53(1), 73-93. doi:https://doi.org/10.1306/5D25C595-16C1-11D7-8645000102C1865D
- Dunoyer De Segonzac, G. (1970). The transformation of clay minerals during diagenesis and low-grade metamorphism: a review. *Sedimentology*, 15(3-4), 281-346. doi:https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1970.tb02190.x
- Edwards, A., Green, S., Connor, S.O., Goodman, W., Emery, A., Heinemann, N. (2014). Shale diagenesis and its impact on pore pressure prediction: A case study along the NE margin of Eastern Canada. *4th Atlantic Conjugate Margins Conference*, 2014, 20-24. St. John's.
- Josh, M., Esteban, L., DellePiane, C., Sarout, J., Dewhurst, D.N., Clennell, M.B. (2012). Laboratory characterisation of shale properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88-89, 107-124. doi:https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.023
- Nadeau, P.H., Bjorkum, P.A., Walderhaug, O. (2005). Petroleum system analysis: Impact of shale diagenesis on reservoir fluid pressure, hydrocarbon migration, and biodegradation risks. *Geological Society London Petroleum Geology Conference*, Series 6, 1267-1274. http://dx.doi.org/10.1144/006126

Dunoyer De Segonzac, G. (1970). The transformation of clay minerals during diagenesis and low-grade metamorphism: a review. *Sedimentology*, 15(3-4), 281-346. doi:https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1970.tb02190.x

Edwards, A., Green, S., Connor, S.O., Goodman, W., Emery, A., Heinemann, N. (2014). Shale diagenesis and its impact on pore pressure prediction: A case study along the NE margin of Eastern Canada. *4th Atlantic Conjugate Margins Conference*, 2014, 20-24. St. John's.

Josh, M., Esteban, L., DellePiane, C., Sarout, J., Dewhurst, D.N., Clennell, M.B. (2012). Laboratory characterisation of shale properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88-89, 107-124. doi:https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.023

Nadeau, P.H., Bjorkum, P.A., Walderhaug, O. (2005). Petroleum system analysis: Impact of shale diagenesis on reservoir fluid pressure, hydrocarbon migration, and biodegradation risks. *Geological Society London Petroleum Geology Conference*, Series 6, 1267-1274. http://dx.doi.org/10.1144/006126

References

- Alaskari, G. (2018). XRD Evaluation of Clay Minerals in Shaley Formation and Its Comparison With Cross Plotting of Log Data. *Progress in Petrochemical Science*, 1, 64-70. doi:DOI:10.31031/PPS.2018.01.000513
- Bozkaya, O., Yalcin, H. (2004). Diagenetic to low-grade metamorphic evolution of clay mineral assemblages in Paleozoic to early Mesozoic rocks of the Eastern Taurides, Turkey. *Clay Minerals*, 39(4), 481-500. doi:DOI:10.1180/0009855043940149
- Burst, J.F. (1969). Diagenesis of Gulf Coast Clayey Sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG Bulletin*, 53(1), 73-93. doi:https://doi.org/10.1306/5D25C595-16C1-11D7-8645000102C1865D
- Dunoyer De Segonzac, G. (1970). The transformation of clay minerals during diagenesis and low-grade metamorphism: a review. *Sedimentology*, 15(3-4), 281-346. doi:https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1970.tb02190.x
- Edwards, A., Green, S., Connor, S.O., Goodman, W., Emery, A., Heinemann, N. (2014). Shale diagenesis and its impact on pore pressure prediction: A case study along the NE margin of Eastern Canada. *4th Atlantic Conjugate Margins Conference*, 2014, 20-24. St. John's.
- Josh, M., Esteban, L., DellePiane, C., Sarout, J., Dewhurst, D.N., Clennell, M.B. (2012). Laboratory characterisation of shale properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88-89, 107-124. doi:https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.023
- Kholodov, V.N. (1983). Postsedimentation transformations in elisional basins. Moscow: Nauka. [in Russian]
- Kholodov, V.N. (2013). Types of elision systems and mineral deposits related to them. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 3, 5-41. [in Russian]
- Klubova, T.T. (1988). Clayey reservoirs of oil and gas. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Logvinenko, N.V., Orlova, L.V. (1987). Occurrence and transformation of terrigenous rocks on the continent and in the ocean. Leningrad: Nedra. [in Russian]
- Lukin, A.Y. (1977). Formation and secondary alterations of Carboniferous sediments within Dnieper-Donets depression. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Millot, J. (1968). Shale geology. Leningrad: Nedra. [in Russian]
- Nadeau, P.H., Bjorkum, P.A., Walderhaug, O. (2005). Petroleum system analysis: Impact of shale diagenesis on reservoir fluid pressure, hydrocarbon migration, and biodegradation risks. *Geological Society London Petroleum Geology Conference*, Series 6, 1267-1274. http://dx.doi.org/10.1144/006126
- Strahov, N.M. (1960). Basics of lithogenesis. Vol. 1. Moscow: Publisher AN USSR. [in Russian]
- Vassoyevich, N.B., Librovich, V.L., Logvinenko, N.V., Marchenko, V.I. (1983). Lithology handbook. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Yapaskurt, O.V. (1994). Multi-stage analysis of lithogenesis. Moscow: Publisher MGU. [in Russian]
- Yeremelev, V.V., Osipov, V.I., Sokolov, V.N. (2001). Shale seals of oil and gas fields. Moscow: Nauka. [in Russian]
- Zarytskiy, O.P., Zinenko, I.I., Lyzanets, A.V., Benko, V.M. (2007). *Patent of Ukraine 21316*. Kyiv: Ministry of Education and Science of Ukraine. StateDepartmentofIntellectualProperty. [in Ukrainian]
- Zhus, I.D., Bahtin, V.V. (1979). Lithogenetic transformations in the abnormally pressured zones. Moscow: Nauka. [in Russian]

Надійшла до редколегії 18.09.21

O. Tunik^{1,2}, PhD student, Petrophysicist,
E-mail: alyonatumik1@gmail.com.

¹Ukrspetsgeologiya LLC,

37/1 V.Tiutunynka Str., Kyiv, 03150, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

INVESTIGATION OF SECONDARY TRANSFORMATIONS WITHIN LOWER CARBONIFEROUS ROCKS OF THE CENTRAL PART OF THE DNIEPER-DONETS DEPRESSION

The article describes the main study results of the secondary transformations effect on the lower Carboniferous shales at depths exceeding 3 000 m. Using silicate, energy-dispersive X-ray fluorescence analysis and electron microscopic studies, the structure and the main rock-forming components in core samples were studied. The study showed the presence of both background and imposed epigenetic changes in the studied core samples. The

intensity and variety of the secondary transformations increase with depth. It has been confirmed that compaction of clay rocks reduces their porosity and improves sealing properties. The presence of scattered siltstone material does not affect the value of porosity. Porosity increases with increasing of kaolinite content which occurred in result of secondary imposed processes. According to the composition of mineral paragenesis, it was found that the studied shales are at the stage of mesocatagenesis. The further research development for the purpose of approximation of microscopic and geochemical data by means of the extended well logging suit was outlined.

Keywords: shales, epigenesis, sealing properties, lower Carboniferous, Dnieper-Donets depression.

О. Туник^{1,2}, асп., геофизик-интерпретатор,

E-mail: alyonatunik1@gmail.com,

¹ООО "Укрспецгеология",

ул. В. Тютюнника, 37/1, Киев, 03150, Украина

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, УНИ "Институт геологии",

ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД НИЖНЕГО КАРБОНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Описаны основные результаты исследования влияния вторичных изменений на нижнекаменноугольные глинистые породы на глубинах, превышающих 3 000 метров. С помощью силикатного, энергодисперсионного рентгено-флуорисцентного анализа и электронно-микроскопических исследований была изучена структура глинистых пород и определены основные породообразующие компоненты в образцах керна. Исследование показало наличие как фоновых, так и наложенных эпигенетических изменений в изученных образцах. Интенсивность и разнообразие проявленных вторичных преобразований увеличивается с глубиной. Подтверждено, что уплотнение глинистых пород уменьшает их пористость и улучшает экранирующую способность. При этом наличие рассеянного алевроитового материала не влияет на значение пористости. Рост пористости и, соответственно, ухудшение качества глинистых покрышек может быть обусловлено наложенным процессом каолинитизации. По составу минеральных парагенезисов установлено, что исследованные глинистые породы находятся на стадии мезокатагенеза. Определено дальнейшее развитие исследований с целью аппроксимации микроскопических и геохимических данных с помощью расширенного комплекса ГИС.

Ключевые слова: глинистые породы, эпигенез, экранирующая способность, нижний карбон, Днепровско-Донецкая впадина.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 330.322:553.04

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.10>Г. Аубакирова¹, д-р экон. наук, проф.,
E-mail: rendykar@gmail.com;Г. Рудько², д-р геол.-минералог. наук,
д-р геогр. наук, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: rudko@dkz.gov.ua;С. Выжва³, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;В. Портнов¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: vs_portnov@mail.ru;Ф. Исатаева¹, PhD, ст. преп.,
E-mail: isataeva.farida@gmail.com;Н. Зимановская⁴, PhD, доц.,
E-mail: nata_zim@mail.ru¹Карагандинский технический университет,
просп. Н. Назарбаева, 56, г. Караганда, 100027, Казахстан;²Государственная комиссия Украины по запасам полезных ископаемых,
ул. Кутузова, 18/7, г. Киев, 01133, Украина;³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина⁴Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
ул. Серикбаева, 19, г. Усть-Каменогорск, 070004, КазахстанДОСТИЖЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ В СТРАНАХ С ТРАНЗИТНОЙ ЭКОНОМИКОЙ:
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

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

Рассмотрена экономика Казахстана – крупнейшая в Центральной Азии, которая на пути к устойчивому экономическому росту адекватно реагирует на системные вызовы и адаптирует опыт передовых стран. Приведены обобщающие показатели результативности государственного регулирования процессов, способствующих росту устойчивости национальной экономики. Выявлены причины слабой вовлеченности предпринимателей и граждан в мероприятия по устойчивому развитию Казахстана. Обосновано, что разработка стратегии устойчивого развития страны и достижение инклюзивного экономического роста требуют координации работы государственных органов, бизнеса и гражданского общества. Показано, что в Казахстане основными драйверами реализации культуры устойчивого развития выступают крупные предприятия и квазигосударственный сектор. Частные предприятия еще не видят возможности извлечения прибыли от интеграции целей устойчивого развития в бизнес-процессы. В работе подчеркивается, что для роста устойчивости слабо диверсифицированной экономики Казахстана упор должен быть сделан на трансформационное преобразование горнодобывающего сектора, имеющего потенциальные возможности сохранить инвестиционную привлекательность как для отечественных, так и зарубежных инвесторов. Основываясь на результатах проведенного исследования, авторы выделяют важнейшие аспекты построения новой модели устойчивого развития в обозримом будущем. Обосновано, что в среднесрочном периоде особую значимость приобретает завершение перехода на международные стандарты геологической отчетности о результатах геологоразведочных работ, что позитивно отразится на глубиной декарбонизации экономики страны.

Ключевые слова: транзитная экономика, Казахстан, государственное регулирование, устойчивость, инвестиции, горнодобывающая промышленность.

Введение. На фоне спада мировой экономики и распространения коронавирусной инфекции, Казахстан сохраняет свои структурные проблемы: чрезмерное участие государства в экономике, высокий уровень внешнего долга по отношению к ВВП, растущая зависимость от сырьевых товаров, низкая производительность труда. Повышает уязвимость национальной экономики значительная роль в сфере производства товаров квазигосударственного сектора, доля которого в валовой добавленной стоимости составляет 19 %, активы более 750 его субъектов оцениваются в 30–40 % ВВП (Данные Бюро..., 2021; Данные Комитета..., 2021). Внедрение Казахстаном стандартов отчетности системы CRIRSCO, участником которой он является, реализуемая политика по стимулированию экспортной диверсификации не привели к существенному снижению доли сырьевых товаров в экспорте, преимущественно формируемом за счет поставок энергетического сырья и металлов на внешние рынки. Страна по-прежнему остро восприимчива к колебаниям спроса и цен на глобальных сырьевых рынках.

Из-за того, что Казахстан относится к самым энергоемким странам (добывающему сектору отведена

половина промышленности, порядка 70 % производства электроэнергии зависят от угля) именно "экологизация" добывающей промышленности обозначена ключевой задачей в достижении устойчивого развития. Казахстан, с 2006 г. входящий в группу стран с доходом, превышающим средний уровень, заинтересован в экономическом прогрессе социальной направленности, который предполагает реализацию целей в области устойчивого развития в соответствии с резолюцией ООН "Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года". Для страны принципиально достижение прогресса в принятии научно-обоснованных стратегий и программ, обеспечивающих безопасность граждан, выборе приоритетных целей при реализации мероприятий по охране окружающей среды, изучение влияния климатических изменений на здоровье населения (Chapman et al., 2016; Galafassi et al., 2017; Diaz et al., 2018).

Постановка проблемы. Казахстан первым в СНГ ратифицировал Парижское соглашение и сконцентрировался на климатической политике, способствующей реализации Целей устойчивого развития.

Казахстан стремится к достижению устойчивости на национальном уровне, грамотной расстановке приоритетов и формулировании целей устойчивого развития в рамках построения новой экономики, базирующейся на современных знаниях и конкурентных инновациях.

Для реализации поставленных целей страна использует накопленный мировой опыт по достижению устойчивости развития, представленный в научной литературе (Ayala-Orozco et al., 2018). Это касается выбора направлений перехода к устойчивому развитию (Ortiz-Moya et al., 2021), характеристик оценивания преимуществ и компромиссов различных целей устойчивого развития (Singh et al., 2017), методических приемов в решении сложных задач в области устойчивости (Kozar et al., 2019). Для Казахстана крайне полезен международный опыт использования многоуровневых сетей в повышении устойчивости развития и результаты обобщающей оценки устойчивости разных решений (человеческих, промышленных, природных) (Schaubroeck, 2018).

Насущные для Казахстана проблемы широко обсуждаются в мировой научной литературе. Например, результаты воздействия на устойчивость энергетического сектора инвестиционной политики энергетического рынка государства (Krzykowski et al., 2021), возрастающая роль инфраструктуры в улучшении климата (Bhattacharyya et al., 2016), особенности управления энергетической инфраструктурой (Goldthau, 2014), обобщение накопленного разными странами опыта в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (Byrnes et al., 2013).

Несмотря на обширность научных исследований в области глобальных экологических оценок (Kowarsch and Jabbour, 2017), влияния на устойчивость предприятия различных организационных изменений (Vedel and Kokshagina, 2021), анализа разнообразных направлений деятельности предприятий, ведущих к устойчивости (Luederitz et al., 2017), оценки значимости низкоуглеродных переходов в планировании, обширного обзора научно-политических программ и партнерства между странами, позволяющих повысить устойчивость общества (Saito, 2017), по мнению авторов, существует потребность в объективной и достоверной оценке роли горнодобывающей промышленности, подтверждающей приоритетность мер по обеспечению устойчивости в обществе и экономике.

Цель исследования: на основе анализа устойчивости экономики Казахстана и ее промышленного сектора, показать новые возможности ее наращивания в среднесрочном периоде в контексте планируемой декарбонизации экономики.

Поскольку высокой привлекательностью для инвесторов отличается горнодобывающая промышленность Казахстана, наиболее актуально изучение мировых достижений в обосновании социальных и экологических обязательств при разработке полезных ископаемых

(Owen and Kemp, 2013), значения для добывающих отраслей прямых иностранных инвестиций (ПИИ) с целью получения максимальных экономических преимуществ посредством инноваций (Hussain et al., 2021). Вступление Казахстана в CRIRSCO требует углубленного исследования нюансов корпоративной социальной ответственности и ее роли в получении социальной лицензии на деятельность в горнодобывающей промышленности (Saenz, 2020), возможного влияния на изменение климата решений инвестиционного арбитража (Boute, 2012). Особый интерес вызывают исследования, посвященные охране здоровья и безопасности работников в горнодобывающих отраслях (Sherin et al., 2020), оценке коммуникаций как актуального нетехнического навыка в области охраны труда, техники безопасности и охраны окружающей среды (Scott and Goncalves, 2021).

Методология. Методология аналитического исследования базируется на общеизвестных концепциях и понятиях, ретроспективной и сравнительной оценке обобщающих показателей Казахстана в достижении устойчивого развития. Научно-методический аппарат включает причинно-следственный и текущий анализ статистических сведений об экономике Казахстана и перспективах ее развития.

Ограничивающим фактором исследования стал недостаток корректных статистических данных, раскрывающих, например, информацию о затратах предприятий на технику безопасности и охрану окружающей среды. Однако, благодаря прозрачности отдельных показателей и нормативно-правовых актов открытого доступа, получены результаты, которые, по мнению авторов, углубят представление о реализации концепции устойчивого развития в странах с транзитной экономикой.

Результаты и обсуждение. Обзор научной литературы наглядно демонстрирует ключевую роль государства в достижении устойчивости развития. Так, в работе (Zhou and Moinuddin, 2017) рекомендован обширный инструментарий для интеграции государством целей устойчивого развития при формировании экономической политики. Возрастающей значимости подотчетности правительства в достижении устойчивости посвящено исследование (Tienhaara, 2019). В работе (Gupta and Mason, 2016) обосновывается необходимость освоения правительством политики транспарентности в отношении экологической устойчивости, авторы (Gheyle and De Ville, 2017) подчеркивают ценность прозрачности проводимой государством политики.

Присоединившись к Глобальному договору ООН и поддержав его ключевые инициативы, Казахстан реализует Цели устойчивого развития, вовлекая государственный аппарат, бизнес и гражданское общество, инвестирует в актуальные цифровые решения и ускоряет переход к зеленой экономике (табл. 1).

Таблица 1

Показатели Казахстана по устойчивому развитию (На защите природы..., 2021)

Показатель	Годы							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Инвестиции, направленные на охрану окружающей среды:								
- всего, млрд тенге	77,5	78,7	62,5	32,2	32,5	80,2	117,4	157,1
- доля в общем объеме инвестиций, %	1,3	1,6	1,2	0,6	1,0	1,0	1,6	1,7
Объем электроэнергии, вырабатываемой объектами ВИЭ:								
- млн кВт·час	499	578	704	927	1100	1350	2400	3364
- прирост, %	15,8	9,1	21,8	31,7	18,7	22,7	77,8	40,2
Доля ВИЭ в общем объеме производства электроэнергии, %	0,58	0,62	0,77	1,00	1,08	1,26	2,30	3,00
Доля переработки, вторичного использования промышленных отходов, %	20,1	21,7	23,1	26,8	30,9	32,2	34,0	35,3
Годовые изменения выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников, %	-4,3	-1,1	-3,4	4,2	3,8	3,8	1,5	1,1

Для продвижения зеленых технологий разработана Концепция перехода к "зеленой экономике", ратифицировано Парижское климатическое соглашение, создано НАО "Международный центр зеленых технологий и инвестиционных проектов". Поддерживая 17 государств, выпустивших в 2020 г. суверенные "зелёные" облигации для финансирования "зелёных" проектов, финансовый центр "Астана" (МФЦА), где действует английское право, участвует в разработке механизма "зеленой" таксономии в Евразийском регионе и стране. К концу 2020 г. кумулятивный объём выпуска "зелёных" облигаций, основная доля в выпуске которых принадлежит энергетическому сектору (35 %), строительной (26 %) и транспортной (19 %) отраслям соответственно. Среди крупнейших эмитентов "зелёных" облигаций выделим США, Китай, Францию, Германию и Нидерланды. МФЦА присоединился к принципам зелёных инвестиций в рамках "Одного пояса – Одного пути" и планирует войти в "глобальную сеть" – Global Green Finance Index (рейтинг GGFI оценивает качество и уровень зелёной финансовой деятельности международных финансовых центров). Утверждение в Казахстане таксономии, соответствующей стандартам международных рынков, к примеру Европейского Союза, не только создаст основы рынка зелёных облигаций, но и расширит возможность разработки механизмов государственного субсидирования зелёных инструментов, став драйвером для мобилизации инвесторов.

Для содействия проектам в области ВИЭ запланировано создание венчурного фонда совместно с Исламской корпорацией развития ICD со стартовой капитализацией 50 млн долл.

Следуя примеру других стран, Казахстан усиливает региональный контроль за загрязнителями, стимулирует государственно-частное партнерство в управлении зелеными технологиями, мониторит изменение экологических показателей предприятия за счет внедрения экологически чистых методов в производственные процессы (Singh et al., 2021). С 2017 г. внедрен механизм аукционных торгов на объекты ВИЭ, что повысило конкурентность и прозрачность процесса отбора проектов и уменьшило стоимость электроэнергии. Так, в 2020 г. на солнечных и ветровых электростанциях достигнуто снижение стоимости электроэнергии: для СЭС в 2,4 раза, для ВЭС в 1,4 раза от тарифного уровня 2014 г. В рамках программы развития ООН в Казахстане разработаны ветровой и солнечный атласы, что во многом способствовало привлечению в сектор "зеленой" энергии инвесторов из 10 стран.

На текущий момент в стране действует 97 объектов ВИЭ суммарной мощностью 1260 МВт, из них 697 МВт приходится на солнечные электростанции, 336 МВт на ветряные электростанции, 224 МВт на гидро- и биоэлектростанции. В ближайшее время запланирован ввод 19 проектов ВИЭ общей мощностью 1000 МВт на 1,1 млрд долл.

Всего 30 % от общей стоимости ВИЭ в стране финансируется за счет собственных средств предприятий, 70 % привлекаются в виде долгосрочных кредитов у международных финансовых институтов. Крупнейший кредитор – Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР), профинансировавший строительство 13 новых объектов (688 МВт) на 440 млн долл. при партнерской поддержке банков на 120 млн долл. со стороны Зеленого климатического фонда и Фонда чистых технологий.

Ключевой национальной источник финансирования – Банк развития Казахстана (БРК), выделивший в 2014–2020 гг. 82,8 млрд тенге на пять проектов ВИЭ мощностью 295 МВт. Евразийский банк развития (ЕАБР),

одним из акционеров которого является правительство Казахстана, финансировал в 2019 г. 9 новых проектов ВИЭ на 23,2 млрд тенге и 160 млн евро. Впервые в 2019 г. в этот сектор подключился Азиатский банк развития (АБР), выделив 42 млн долл. на строительство двух солнечных электростанций.

Казахстану необходимо, наряду с уменьшением стоимости ВИЭ, снижать риски по этим проектам, поскольку сдерживающим, но не ограничивающим фактором остаются процентные ставки со стороны финансовых институтов. Банки развития предоставляют займы на строительство ВИЭ под процентные ставки 11–13 % годовых, а участники рынка нуждаются в более доступном и долгосрочном финансировании в национальной валюте на уровне 9–10 % годовых.

Несмотря на то, что все проекты в области ВИЭ в Казахстане не финансируются из республиканского бюджета, государство оказывает поддержку в виде гарантированного закупа всего объема электроэнергии ВИЭ по фиксированным тарифам или аукционным ценам, освобождения от оплаты за транспортировку электроэнергии ВИЭ, инвестиционных преференций (Закон Республики Казахстан от 4 июля 2009 года № 165-IV).

В последние годы наблюдаются положительные изменения: в ВИЭ приходят предприятия из традиционной энергетики (добыча нефти и газа, генерация электроэнергии на угольных тепловых электростанциях), усиливается вклад международных институтов развития, софинансирующих казахстанские зеленые проекты, иницируемые частными инвесторами. Так, за 2014–2020 гг. финансирование проектов по ВИЭ инвесторами составило 1,5 млрд долл., за счет чего объем генерации электроэнергии на ВИЭ за 2019–2020 гг. превысил 1 % от всей выработки. Инвесторы активнее вкладывают в строительство солнечных и ветровых парков, составляющих 85 % от всей установленной мощности ВИЭ, 14 % – гидроэнергетика и менее 1 % – биотопливо.

Такие компании, как Shell, Total, Eni, участвующие в разработке крупнейших месторождений нефти и газа в Казахстане, диверсифицируют бизнес в период мирового энергетического перехода от ископаемого топлива в сторону ВИЭ, осваивая сектор возобновляемой энергетики и реализуя совместные проекты в области высокотехнологичных производств. Сыграло роль и намерение международных финансовых институтов, например ЕБРР и АБР, отказаться от финансирования проектов, связанных с углем. На зеленые "дочки" нефтегазовых и горнодобывающих компаний приходится 331,4 МВт, это 20,3 % от всей установленной мощности возобновляемой энергетики в стране. Казахстан поддерживает Европу, США, Россию по переходу к "зеленой" металлургии. Так, Eurasian Resources Group (ERG) планирует строительство крупной ветровой электростанции на 150–200 МВт.

Казахстан одним из первых среди азиатских стран внедрил систему регулирования выбросов парниковых газов. В рамках Парижского соглашения страной заявлен вклад (INDC) – сокращение выбросов парниковых газов к 2030 г. на 15 % от уровня 1990 г. и уменьшение национальных выбросов на 25 %. Впервые нефтегазовые субъекты представили трехуровневую верифицированную отчетность по выбросам парниковых газов в соответствии с инициативой Carbon Disclosure Project (CDP), предполагающей публикацию фактических показателей и планов по достижению прогресса в адаптации к глобальным климатическим изменениям, сопоставления успехов в сфере охраны окружающей среды с позицией конкурентов.

Для выполнения обязательств в рамках Парижского соглашения, Казахстан ввел механизм распределения квот на выбросы парниковых газов. Так, из общего объема квот в 2021 г., составляющего 180 млн тонн, на 218 установок выделены 169 млн тонн, резерв квот на 2021 г. составил 11 млн единиц. При этом, с учетом ежегодного роста общих выбросов парниковых газов и 80 % долей электроэнергии от общих выбросов, предприятия испытывают дефицит квот на единицу выработки продукции.

На текущий момент многие страны усиливают климатическое регулирование. В частности, ЕС выбрал ключевым инструментом ввод углеродного корректирующего пограничного механизма. Казахстан, поставивший цель достичь углеродной нейтральности к 2060 г., в данной ситуации неизбежно столкнется с падением конкурентоспособности экспортных товаров, падением прибыли в нефтегазодобывающей отрасли и потерей экспортных рынков ЕС. В качестве ответной реакции на вводимый в ЕС углеродный налог, Казахстан рассматривает целесообразность объединения отечественной и европейской систем торговли выбросами с дальнейшим совершенствованием законодательной базы в сфере регулирования выбросов парниковых газов, не исключая ввод отечественного углеродного налога.

Присоединившись в 1994 г. к Конвенции ООН о биологическом разнообразии, Казахстан не принял стратегию и план действий по сохранению биоразнообразия на основе международной структуры и не проводит государственную политику по его сохранению. Как итог, в соответствии с Индексом экологической результативности 2020 (EPI), Казахстан занимает 128-е место по сохранению биоразнообразия среди 180 стран мира. В этом вопросе большая ответственность лежит на промышленных предприятиях, деятельность которых связана с загрязнением окружающей среды нефтепродуктами и сероводородом.

Для Казахстана этот аспект также актуален, поскольку в структуре экономики доля промышленности занимает почти треть часть ВВП, страна является ведущим производителем многих сырьевых товаров, занимая лидирующую позицию в объемах добычи металлов и располагая огромными возможностями расширения разработки и добычи полезных ископаемых. Тем более, что с целью наращивания промышленной доли в ВВП страны, Программа устойчивого развития до 2030 г. ООН содержит концепцию устойчивого промышленного развития.

С геологической и экономической точек зрения одной из особенностей ресурсов Казахстана является то, что они зачастую залегают близко к поверхности земли, соответственно разрабатываются дешевым открытым способом. Кроме того, их расположение выгодно для комплексного применения. Так, сочетание месторождений полезных ископаемых Центрального Казахстана (металлы, коксующиеся угли, известняки и огнеупорные глины), находящихся вблизи друг от друга, создает условия для развития как металлургии, так и связанных с ней машиностроения и химической промышленности.

В общем контексте устойчивого развития наиболее обстоятельно исследуются промышленные предприятия – недропользователи, участвующие в решении социально-экологических задач в рамках контрактных обязательств.

Горнодобывающие предприятия Казахстана, будучи крупнейшими работодателями, стремятся к высокой социальной ориентации, развитию бизнеса за счет повышения прозрачности деятельности и соблюдения высоких стандартов корпоративного управления. Наряду с достижением целей по созданию базовой

инфраструктуры, особенно инженерных коммуникаций и транспортно-логистических процессов, телекоммуникационных сервисов, *предприятия, представляющие главным образом квазигосударственный сектор*, принимают на себя ответственность по устойчивому развитию, вкладывают значительные средства в социальные и экологические проекты. Ежегодные отчеты предприятий об устойчивом развитии в формате международного свода стандартов GRI содержат целевые показатели касательно здоровья и охраны труда, гендерного равенства, соблюдения прав человека, сокращения потребления энергии и выбросов. Приверженность предприятий устойчивому развитию проявляется в интеграции экологического аспекта, как в текущую платформу деятельности, так и в её инновационные компоненты. С 2020 г. для достижения глобальных целей ООН в области устойчивого развития и получения международного рейтинга ESG, основные показатели выключены в стратегию и бизнес-планы предприятий, запланировано их последующее внедрение в операционную деятельность. Тем более, что международные инвесторы в будущем не будут финансировать проекты с неблагоприятными ESG-характеристиками.

С позиции достижения устойчивости – особый интерес представляет наращивание инвестиционной привлекательности горнодобывающей отрасли страны, исходя из позитивного влияния любого инвестиционного решения на диверсификацию промышленности в сторону менее энергоемких производств. Так, для достижения более высокого уровня стабильности для инвесторов усовершенствовано законодательство по поддержке ВИЭ в рамках климатической политики. Это позволило увеличить в 10 раз мощности ветровых и солнечных электростанций в 2020 г. (по сравнению с 2015 г.). Для нефтегазового и энергетического секторов Казахстана инвестиции в ВИЭ актуальны как с позиции соблюдения законодательных требований по выбросам парниковых газов во избежание выплат штрафов, так и для обеспечения устойчивости рыночной стоимости предприятий.

В 2020 г. 34 предприятия горно-металлургического сектора внедрили наилучшие доступные энерго- и ресурсосберегающие технологии, по принципу "одного окна". Для предприятий, не соответствующих принципам таких технологий, дорога на зарубежные рынки будет закрыта.

Казахстан, будучи развивающейся страной, не имеющей прямого выхода к морю (РСНВМ), занимает уникальное географическое положение, расположившись между Европой и Азией. Из-за совместных сухопутных границ с Китаем и Россией, Казахстан ограничен в выборе приоритетного направления по привлечению иностранных инвестиций, без которых невозможны посткризисное восстановление и диверсификация экономики. С начала пандемии коронавируса Казахстан столкнулся с финансовым дефицитом и уменьшением иностранных инвестиций, которые дают шанс стране приблизиться к бытовым рынкам в рамках международных цепочек поставок.

За 2005–2019 гг. валовой приток прямых иностранных инвестиций (ПИИ) из 120 стран в Казахстан составил порядка 314 млрд долл., причем основная их часть (65 %) отнесена на горнодобывающий сектор, который в краткосрочном периоде будет основой для восстановления экономики после выхода из кризиса. Благодаря *текущей финансовой стабильности и стратегическому планированию*, горнодобывающие предприятия оказались наиболее устойчивы к отрицательному

воздействию изменчивости спроса и смогли грамотно управлять рисками, проявили гибкость в принятии ответных мер. Наибольшие объемы инвестиции в обрабатывающей промышленности принадлежат металлургической отрасли. Сокращение в 2020 г. валового притока инвестиций в Казахстан от иностранных прямых инвесторов на 32,2 %, с 18,63 млрд долл. до 12,62 млрд долл. обусловлено отчасти пандемией. Для предотвращения в 2020 г. спада валового притока ПИИ в страну, что было вполне ожидаемо, правительство приняло своевременные меры для минимизации негативного эффекта как на действующие бизнес-проекты, так и на проекты, по которым ранее были достигнуты договоренности с инвесторами о начале реализации.

На текущий момент с участием иностранных инвесторов в стране реализуются порядка 200 инвестиционных проектов в несырьевых отраслях экономики. Только в 2019 г. было реализовано 40 крупных проектов с участием иностранных инвесторов на 1,1 млрд долл. с созданием 3,5 тыс. рабочих мест. Крупные иностранные инвесторы отличаются высокой социальной ответственностью и вносят существенный вклад в развитие мест дислокации производств. Так, инвестиции крупнейших промышленных компаний в социальные и инфраструктурные проекты только в 2019 г. превысили 140 млрд тенге. За первое полугодие 2020 г., несмотря на полный перевод подписания инвестиционных контрактов на онлайн-платформу, через www.egov.kz были заключены 20 инвестиционных контрактов на 300 млрд тенге. Из запланированных на 2020 г. к вводу в эксплуатацию иностранными инвесторами 35 крупных проектов на 2,5 млрд долл., выведены на проектную мощность 12 проектов на 799 млн долл.

Инвестиционную привлекательность отрасли геологической разведки углеводородов поддерживают огромные возможности геологоразведки на малоизученных, но перспективных территориях Казахстана, анализ и моделирование нефтегазовых систем основных осадочных бассейнов. Активное проведение геологоразведочных работ в предыдущие годы привело к аккумуляции огромного массива геолого-геофизических сведений, минимизирующих геологические риски при выборе перспективных участков на недропользование.

В стране действует национальный кодекс отчетности "Кодекс Казахстанской ассоциации публичной отчетности о результатах геологоразведочных работ, минеральных ресурсах и минеральных запасах (KAZRC) 2016 г.", соответствующий шаблону отчетности CRIRSCO. На текущий момент недропользователи постепенно переходят на систему KAZRC, создана консалтинговая компания Auroga Minerals Group, оказывающая услуги по подготовке отчетности по стандартам KazRC. Отсутствие в открытой печати сведений о результатах освоения новой системы, не позволило авторам проанализировать сложности адаптации предприятий к новым требованиям, трудности, с которыми они столкнулись в процессе смены советской системы классификации запасов и пути их преодоления.

Казахстан стремится удерживать лидерство в Центрально-Азиатском регионе, обеспечивая реализацию заключенных договоров, активизируя диалог с действующими инвесторами. В стране реализуются реформы с учетом передовых нормативно-правовых инструментов, практик и стандартов стран ОЭСР, интересующихся продвижением горнодобывающей отрасли. Так, рационализированы лицензионные процедуры, упрощен доступ к геологической информации, откорректированы различные аспекты экологической экспертизы и оценки

рисков, вызванных воздействием недропользования на окружающую среду.

В соответствии с новым стандартом ИПДО (Инициатива прозрачности добывающих отраслей), утвержденным в 2019 г. на Глобальной конференции ИПДО в Париже, Казахстан как страна-участница обязана полностью раскрывать положения контрактов на недропользование, заключенных с 1 января 2021 г. Предполагается предоставление информации о доходах государства от транспортировки полезных ископаемых, социальных и квазифискальных расходах, вкладе добывающего сектора в экономику государства и другие сведения. Дальнейшее продвижение Казахстаном ИПДО во многом зависит от того, будет ли страна предоставлять актуальную и доступную геологическую информацию, выдавать лицензии на разведку и добычу в режиме онлайн, интегрировать с другими отчетностями действующих мониторинговых систем отчетность в сфере недропользования.

Для приоритетного развития горнодобывающей отрасли планируются государственные вложения в геолого-геофизические работы по перспективным бассейнам: Аральскому, Сырдарьинскому, Прииртышскому, Шу-Сарысуйскому, Северо-Тургайскому. С целью отслеживания того, покрывает ли залог, предоставленный недропользователем, стоимость ликвидации в полном объеме, разрабатывают надзорный механизм, а также электронный реестр как действующих, так и закрытых или заброшенных горных объектов.

Для поэтапного перехода к обложению налогом, с учетом объемов реализации полезных ископаемых, в Казахстане будут внедрять в налогообложение недропользователей международные стандарты. Для предотвращения возможного роста риска трансфертного ценообразования вначале нововведение будет распространено на полезные ископаемые, реализуемые на прозрачных международных рынках.

Казахстану, как развивающейся экономике с сырьевым уклоном, для преодоления глобального кризиса и достижения целей устойчивого развития, среди прочего, необходимо разработать политику для решения внутренних проблем, препятствующих удержанию и привлечению иностранных инвестиций, создать условия, способствующие притоку иностранных инвестиций, в том числе принять прозрачную налоговую политику, поощряющую иностранные инвестиции. Предприятия, ведущие активную деятельность по привлечению финансирования и продвижения своей продукции на международных финансовых и торговых рынках, должны быть готовы к растущим ожиданиям инвесторов, контрагентов, кредиторов и регуляторов к вопросам устойчивого развития.

Актуальные проблемы устойчивого развития Казахстана. Для полноценного освоения Казахстаном принципов устойчивого развития предстоит решить ряд насущных проблем. К примеру, достижение сохранности биоразнообразия на территории страны, поскольку в 2020 г., по данным рейтинга ООН по сохранности экосистем суши, среди 166 стран Казахстану отведена лишь 113 позиция. Или скажем, необходимо стимулирование энергосбережения компаниями, связанными с передачей электроэнергии, тепла и газа (на чью долю приходится основная доля потерь) посредством включения в их инвестиционные программы расходов на энергосберегающие проекты.

Самой насущной проблемой объектов ВИЭ в Казахстане, наряду с высоким уровнем логистических затрат и низким тарифным уровнем на их поддержку, остаются высокие выплаты по налогу на имущество для

юридических лиц в связи с тем, что 80 % затрат на проекты ВИЭ направляются на приобретение дорогостоящего импортного оборудования для электростанций.

Один из важнейших вопросов – интеграция ВИЭ в сети, размещение возобновляемой энергетики там, где есть потребность в этой электроэнергии: главным образом это касается юга страны, где развиваются новые производства. В Казахстане территорий достаточно, но сети не везде имеют возможность интегрировать такие непостоянные источники энергии, как возобновляемые. Надежды возлагают на внедрение нового для Казахстана инструмента Program-for-Results Financing (PforR), предусматривающего финансирование не по объему освоенных средств, а только в случае достижения конкретных ранее установленных индикаторов, приносящих отраслевой мультипликативный эффект.

Дальнейший рост ВИЭ в стране тормозят: законодательная база, не соответствующая текущему этапу развития ВИЭ; инвестиционные риски, в том числе валютный риск; ограниченность балансирующих мощностей, неконкурентность высоких тарифов на ВИЭ в сравнении с тарифами на традиционную электроэнергию без государственного содействия, слабые меры по стимулированию микрогенерации, трудности интеграции ВИЭ в национальную энергосистему.

Несмотря на то, что руководство 193 стран-членов ООН, утвердивших цели устойчивого развития, приняли одновременно и ключевую ответственность за их достижение, в конечном счете воплощение в жизнь обозначенных целей требует содействие со стороны бизнеса. Для Казахстана остаются актуальными проблемы наращивания вклада бизнеса в устойчивость развития, освоение устойчивых бизнес-моделей для создания бизнес-экосистем. В этом же контексте акцентируется внимание на роли руководителя бизнес-проектов, в частности заинтересованности руководящего менеджмента в достижении социальной устойчивости каждого работающего (*Abid et al., 2020*), изучении возможных изменений ценностей работников, задействованных в социально-экологических бизнес-проектах, реализации инициативы в области ESG.

Основной целевой установкой предпринимательского субъекта является максимизация его вклада в устойчивое развитие, стремление к наращиванию социальной ответственности. Однако пока бизнес не видит для себя получение дополнительной прибыли и других бонусов от интеграции целей устойчивого развития в бизнес-процессы, поскольку для частных предприятий подобная интеграция рассматривается в виде добровольной социальной нагрузки, а не как обязательный бизнес-компонент. Несмотря на предпринимаемые шаги по реализации концепции "Слышащего государства", к обсуждению различных аспектов устойчивого развития

на правительственном уровне, бизнес, как и гражданское общество, пока активно не вовлекаются. Для выявления вклада конкретного субъекта в выполнение принятых обязательств, требуется объективная оценка уровня интеграции целей устойчивого развития в корпоративное управление, бизнес-стратегии и отчетность предприятий. Чтобы перевести цели устойчивого развития в бизнес-стратегию, демонстрируя их значимость по природным ресурсам или благосостоянию работников для поддержания бизнеса, предприятиям необходимо закладывать их в свои планы на предстоящий период в виде конкретных количественных показателей с представлением отчетности об их достижении.

Перспективы построения новой модели устойчивого развития Казахстана. С учетом сырьевой направленности экономики Казахстана, ископаемое топливо еще долгое время будет оставаться частью энергетики. Поступательному развитию возобновляемой энергетики будут способствовать системные меры, направленные на повышение инвестиционной привлекательности сектора, включая создание законодательной базы и внедрение аукционных тарифов с гарантированной долгосрочной покупкой электроэнергии.

Казахстан реализует Программу развития Организации объединенных наций (ПРООН) при финансовой поддержке Глобального экологического фонда (ГЭФ) для содействия инициативе низкоуглеродного развития городов и реализации маломасштабных проектов ВИЭ. Уже разработаны механизмы финансовой поддержки 37 зеленых бизнес-проектов на 10 млн долл., ведущих к экономии энергоресурсов в отраслях городского хозяйства. Разработана методология по включению малых проектов ВИЭ в систему торговли углеродными квотами и технические стандарты/регламенты для технологий ВИЭ, планируется провести технический анализ, на примере конкретной сетевой организации по подключению таких проектов ВИЭ к сетям среднего и низшего класса напряжения.

В среднесрочном периоде страна активизирует действия по стимулированию освоения предприятиями доступных технологий, соответствующих стандартам ОЭСР, продвижению "зеленых" технологий, развитию энергетической утилизации отходов, доведению доли альтернативных и возобновляемых источников в энергобалансе страны до 30 % – в 2030 г. и до 50 % в 2050 г. Ввод 13 гидроэлектростанций, 34 ветровых и 12 солнечных станций позволит достичь двукратного роста объема экологически чистой энергии. Используя новые инструменты, повышающие устойчивость экономики, государство стремится привлечь инвестиции, способствующие долговременному улучшению качества жизни граждан, формированию основ рынка зеленых облигаций, разработке механизмов государственного субсидирования зеленых инструментов (табл. 2).

Таблица 2

Перспективы экологической политики Казахстана (На защите природы..., 2021)

Показатель	Годы				
	2021	2022	2023	2024	2025
Доля электроэнергии от возобновляемых источников энергии, % от общего объема производства	3,3	3,8	4,5	5,3	6,0
Валовой приток прямых иностранных инвестиций, млрд долл.	15,9	23,9	25,1	27,6	30,0
Уровень удовлетворенности населения экологическим качеством жизни, %	63,9	68,0	72,0	76,0	80,0

К 2030 г. в Казахстане выбросы парниковых газов не должны превысить 330 миллионов тонн углекислого газа. Для этого будут задействованы рыночные механизмы: система торговли квотами на выбросы; проекты по сокращению выбросов и поглощению парниковых газов и проекты ВИЭ; развитие рынка "зеленых" финансов.

Для достижения углеродной нейтральности планируется регулировать выбросы парниковых газов за счет восстановления окружающей среды природопользователем; к 2025 г. будут полностью внедрены наилучшие доступные "чистые" технологии, характеризующиеся рациональным использованием ресурсов и минимальными экономически обоснованными эмиссиями; будет

завершен комплексный технологический аудит 50 предприятий – основных загрязнителей; с 2025 г. вводятся в действие требования об обязательном наличии комплексного экологического разрешения.

Используя опыт стран, применяющих водород как передовую технологию для декарбонизации промышленности, Казахстан также планирует использовать его в транспортной сфере и нефтеперерабатывающей промышленности. Проактивная стратегия по декарбонизации ключевых промышленных секторов и энергетической отрасли является единственной возможностью улучшения положения Казахстана в международных производственно-сбытовых цепочках. Достижение целей декарбонизации газоснабжения, связанных с добавлением водорода в добытый природный газ до уровня 25 % от объема газа, направляемого в промышленность, ускорит выполнение обязательств Казахстана по NDC к 2030 г. и целевых установок по переходу к "зеленой" экономике. В отдаленном будущем при наращивании водородной составляющей до 100 % возможно достижение целей международного сообщества в соответствии с Парижским соглашением и полная декарбонизация экономики Казахстана к 2050 г.

Казахстан ориентирован на целенаправленную диверсификацию: выявление секторов со сравнительным преимуществом для предложения их иностранным инвесторам (к примеру, глубокая переработка полезных ископаемых); реформа налоговой политики с созданием привлекательных для инвесторов налоговых систем. Мировая практика накопила бесценный опыт решения сложнейших задач налогового регулирования, который Казахстан берет на вооружение. Речь идет, к примеру, о результатах исследования влияния налога на угольные ресурсы, на электроэнергетику и угольную промышленность Китая.

Основные направления Государственного регулирования поддержки и использования ВИЭ: создание благоприятных условий для строительства и эксплуатации объектов ВИЭ; стимулирование производства электрической и тепловой энергии с использованием ВИЭ; выделение инвестиционных преференций юридическим лицам, которые проектируют, строят и эксплуатируют объекты по использованию ВИЭ; создание благоприятных условий для эффективной интеграции объектов по использованию ВИЭ в единую электроэнергетическую, тепловую систему и рынок электрической и тепловой энергии; содействие выполнению международных обязательств Казахстана по снижению выбросов парниковых газов.

Ключевое организационно-правовое и экономическое направление государственной поддержки при реализации проектов ВИЭ – предоставление *инвестиционных преференций*, в том числе в виде налоговых и таможенных льгот, государственных натуральных грантов, инвестиционной субсидии. Казахстан сделал важный шаг развития ВИЭ, включив отрасль в приоритетные инвестиционные проекты. Инвесторов освобождают от уплаты таможенных пошлин при ввозе дорогостоящего оборудования из-за рубежа, от уплаты налогов (корпоративный подоходный налог на 3 года в случае обновления или расширения производств, земельный налог, налог на имущество для создания новых производств), им предоставляют государственные натурные гранты.

Поскольку в деловой среде Казахстана преобладают государственные предприятия, что сдерживает продвижение местных и иностранных частных компаний, то определенные сдвиги в решении указанного вопроса возлагаются на активизацию приватизационных процессов.

В обозримом будущем активизируются внедрение принципов устойчивого развития в инвестиционные стратегии предприятий, учет в аналитической и инвестиционной деятельности факторов корпоративного управления, социальной и экологической ответственности, что отразится на их репутации. Речь идет о формировании стратегического видения в области ESG и реализации проектов по защите окружающей среды, предотвращению климатических изменений, соблюдению принципов корпоративного управления и прав человека. Исходя из того, что регулирование ESG-факторов в Казахстане, как и во многих странах с развивающейся экономикой, уступает передовым странам, в частности странам Европейского Союза, это повысит результативность управления ESG-рисками, расширит доступ к долгосрочному финансированию и товарным рынкам, оптимизирует подходы к интеграции ESG-факторов в существующие инвестиционные процессы и финансовые показатели предприятий.

Несмотря на прогнозы UNCTAD, согласно которым к 2021 г. глобальный объем ПИИ ожидает уменьшение на 40 % и рецессия продолжится до 2022 г., за счет выгодного геостратегического положения и имеющихся запасов полезных ископаемых, Казахстан не теряет привлекательность у международных инвесторов, планирует перезагрузку институциональной системы по таргетированному привлечению и сопровождению стратегических инвесторов, формированию новых экосистем в отраслях экономики, реализацию инвестиционных проектов.

Именно преимущества текущей финансовой стабильности и стратегическое планирование горнодобывающей отрасли дают надежду на устойчивость бизнеса в перспективе и восстановления экономики Казахстана в постпандемный период. Основой для эффективного привлечения инвестиций в отрасль, невзирая на высокую волатильность сырьевых рынков, станут привлекательный инвестиционный климат, упрощение регулирования сферы недропользования, новый Экологический Кодекс, в котором существенно возросли обязательства за загрязнение окружающей среды по принципу "загрязнитель платит". Для Казахстана, как и для других развивающихся стран, продвижение высоких экологических и социальных стандартов в добывающих отраслях признается приоритетом. Достижение целей устойчивого развития и вовлеченность предприятий в социальные и природоохранные мероприятия способствуют росту международных позиций Казахстана. Принципиально важно адаптировать международный подход к оценке эффективности инвестиций, не только с позиции возвратности вложенных средств, но и общего воздействия на социально-экономическое развитие. Например, индекс Social Return on Investment (SROI), показатель Impact Quotient (IQ), основными параметрами которого являются рост, инклюзивность и инновации.

Новые источники роста, наряду с выходом на лидирующие позиции в системе экономических взаимосвязей Центральной Азии и Прикаспийского региона (Aubakirova, 2020), открывает для Казахстана региональная интеграция. Страна может найти свое место в геоэкономике мира не только вкладом в глобальные энергетически-сырьевые ресурсы. Существуют возможности занять весомые ниши в сфере поставок на мировой рынок продукции низших стадий переработки, в частности полуфабрикатов. В средне- и долгосрочной перспективе Казахстан может выиграть от расширения доступа к внешним рынкам для металлургической и

химической отраслей в рамках ВТО. Это возможно благодаря снижению цены на товары промежуточного импорта и росту конкурентоспособности предприятий, встроенных в глобальные цепочки добавленной стоимости (Issatayeva et al., 2019).

Заключение.

1. Анализ достижений Казахстана в устойчивом развитии с акцентом на его государственном регулировании показал, что низкий уровень диверсификации производства и экспорта вкупе с масштабностью неформального сектора экономики обострили трудности, которые испытывает Казахстан в попытках противостоять новым геополитическим условиям общего кризиса мировой экономики. Несмотря на то, что Казахстан имеет большие возможности для решения актуальных проблем, тем не менее, страна по-прежнему, зависима от экспорта товаров, высока импортозависимость экономики. Внутренний спрос, стимулирование которого поддерживается правительственными мерами, остается ключевым драйвером экономического роста.

2. В общей сложности концепции и программы Казахстана в сфере устойчивого развития ориентированы на повышение качества жизни граждан, инновационный прогресс, трансформацию экономики, гарантии национальной безопасности, создание высокоэффективного государства. Для интегрирования устойчивости в государственную политику, роста понимания того, что устойчивость бизнеса становится конкурентным преимуществом и цели устойчивого развития должны переходить в стратегию руководства предприятия, Казахстан активизирует международные диалоги по продвижению инноваций, консолидации энергетической политики, адаптации передовой зарубежной практики.

3. Основной вывод заключается в том, что в построении новой модели устойчивого развития ключевую роль играет государственное управление горнодобывающей отраслью с наращиванием ее инвестиционной привлекательности, ускорением адаптации Казахстана к принципам *CR/RSO*, внедрением мер фискального и регуляторного стимулирования геологоразведки. Среди наибольших трудностей, с которыми столкнулся Казахстан, выделены недостаточная обоснованность управленческих решений по моделированию эффективного клиентоориентированного бизнеса горнодобывающей промышленности, проблемы в привлечении бизнеса для решения насущных вопросов устойчивости государства. Реальное продвижение к достижению целей устойчивого развития требует конкретизации задач, методов оценки масштабов требуемых изменений, усиления прозрачности видения проблемных вопросов и расширенной бизнес-интеграции.

4. В горнодобывающей отрасли Казахстан должен ориентироваться на мобилизацию институционального капитала со стороны крупных международных финансовых организаций, совершенствовать условия для привлечения "умных инвестиций" с мультипликативным эффектом в конкурентоспособных отраслях. Поскольку в отрасли накоплен потенциал проектного финансирования, то акцент должен быть сделан на продвижении проектов, формировании пакетных отраслевых предложений для профильных инвесторов, что предполагает государственное содействие, качественную отложенную инфраструктуру в местах планируемой локализации.

5. Располагая огромными углеводородными запасами и полезными ископаемыми, Казахстан имеет потенциал прежде всего относительно энергетики и ВИЭ, освоения передовых "зеленых" технологий. Поскольку экономическая модель Казахстана еще слабо

адаптирована к международным экологическим стандартам, система государственного планирования не имеет стратегической экологической оценки программ и концепций развития. Несмотря на попытки разработки Стратегии устойчивого и низкоуглеродного развития Казахстана, где цели экологического, социально-экономического продвижения взаимоувязаны и согласованы с долгосрочными планами по развитию электроэнергетики и смежных отраслей, в среднесрочном периоде экология еще не признана национальным приоритетом.

6. Казахстан входит в десятку ведущих стран-экспортеров углеводородного сырья и минеральных ресурсов, что накладывает дополнительную ответственность перед мировым сообществом за исполнение международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в рамках Парижского соглашения, внедрение принципов "зеленой" экономики в систему стратегического развития. В контексте продвижения к национальным целям и построения новой модели устойчивого развития Казахстан должен ориентироваться на интегрированные действия, планирование и постановку четких задач на всех уровнях управления. В противном случае, помимо наращивания репутационных рисков и падения инвестиционной привлекательности, в среднесрочном периоде нерешенные экологические проблемы будут способствовать появлению барьеров для сырьевого экспорта.

Список использованной литературы

- Данные Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. (2021). Получено 01.03.2021 с <https://stat.gov.kz>
- Данные Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан. (2021). Получено 02.04.2021 с <http://stat.gov.kz/>
- На защите природы: инвестиции в охрану окружающей среды выросли на 34% за год. (2021). Получено 18.04.2021 с <http://www.energyprom.kz/ru/a/monitoring/na-zashite-prirody-investicii-na-okhranu-okruzhayushej-sredy-vyrosli-na-34-za-god>
- Закон Республики Казахстан от 4 июля 2009 года №165-IV "О поддержке использования возобновляемых источников энергии" (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.04.2021 г.). (2021). Получено 13.06.2021 с https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30445263 (дата обращения 13.06.2021).
- Abid, G., Ahmed, S., Saman Elahi, N., Ilyas, S. (2020). Antecedents and mechanism of employee well-being for social sustainability: A sequential mediation. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.06.011>
- Aubakirova, G. (2020). Transformational Change in the Economy of Kazakhstan. *Studies of Russian Economic Development*, 31(1), 113-119. <https://doi.org/10.1134/S1075700720010037>
- Ayala-Orozco, B., Rosell, J., Merçon, J., Bueno, I., Alatorre-Frenk, G., Langle-Flores, Lobato, A. et al. (2018). Challenges and strategies in place-based multi-stakeholder collaboration for sustainability: learning from experiences in the global south. *Sustainability*, 10(9), 3217. <https://doi.org/10.3390/su10093217>
- Bhattacharyya, A., Meltzer, J.P., Oppenheim, J., Qureshi, Z., Stern, N. (2016). Delivering on better infrastructure for better development and better climate. Brookings Institutions, Washington DC.
- Boute, A. (2012). Combating climate change through investment arbitration. *Fordham International Law Journal*, 35(3), 613-614. <https://ir.lawnet.fordham.edu/ilj/vol35/iss3/7>
- Byrnes, L., Brown, C., Foster, J., Wagner, L.D. (2013). Australian renewable energy policy: barriers and challenges. *Renew Energy*, 60, 711-721. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.024>
- Chapman, R., Howden-Chapman, P., Capon, A. (2016). Understanding the systemic nature of cities to improve health and climate change mitigation. *Environment International*, 94, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.014>
- Diaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martin-Lopez, B., Watson, R., Molnar, T., Shirayama, Z. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359 (6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Galafassi, D., Tim M. Daw, Munyi, L., Brown, K., Barnaud, C., Fazey, I. (2017). Learning about social-ecological trade-offs. *Ecology and Society*, 22 (1), 1-27. <https://doi.org/10.5751/ES-08920-220102>
- Gheyle, N., De Ville, F. (2017). How much is enough? Explaining the continuous transparency conflict in TTIP. *Politics and Governance*, 5 (3), 16-28. <https://doi.org/10.17645/pag.v5i3.1024>
- Goldthau, A. (2014). Rethinking the governance of energy infrastructure: Scale, decentralization and polycentrism. *Energy Research and Social Science*, 1, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.009>

- Gupta, A., Mason, M. (2016). Disclosing or obscuring? The politics of transparency in global climate governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 18, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.11.004>
- Hussain, M., Bashir, M.F., Shahzad, U. (2021). Do foreign direct investments help to bolster economic growth? New insights from Asian and Middle East economies. *World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, 17(1), 62-84. <https://doi.org/10.1108/WJEMSD-10-2019-0085>
- Issatayeva, F.M., Rudko, G.I., Portnov, V.S. (2019). Technical and economic substantiation of developing Kuzmury copper deposit (Kazakhstan). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 9-24. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/3>
- Kowarsch, M., Jabbour, J. (2017). Solution-oriented global environmental assessments: opportunities and challenges. *Environmental Science & Policy*, 77, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.013>
- Kozar, R., Galang, E., Alip, A., Sedhain, J., Subramanian, S., Saito, O. (2019). Multi-level networks for sustainability solutions: the case of the International Partnership for the Satoyama Initiative. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 39, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.09.002>
- Krzykowski, M., Mariański, M., Zięty, J. (2021). Principle of reasonable and legitimate expectations in international law as a premise for investments in the energy sector. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 21, 75-91. <https://doi.org/10.1007/s10784-020-09471-x>
- Luederitz, C., Abson, D.J., Audet, R., Lang, D.J. (2017). Many pathways toward sustainability: not conflict but co-learning between transition narratives. *Sustainability Science*, 12, 393-407. <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0414-0>
- Ortiz-Moya, F., Kataoka Y., Saito O. et al. (2021). Sustainable transitions towards a resilient and decentralised future: Japan's Circulating and Ecological Sphere (CES). *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00941-y>
- Owen, J., Kemp, D. (2013). Social licence and mining: a critical perspective. *Resources Policy*, 38 (1), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.016>
- Saenz, C. (2020). Corporate social responsibility fit helps to earn the social license to operate in the mining industry. *Resources Policy*. Available online 23 September. 101814. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101814>
- Saito, O. (2017). Future science-policy agendas and partnerships for building a sustainable society in harmony with nature. *Sustainability Science*, 12, 895-899. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0475-8>
- Schaubroeck, T. (2018). Towards a general sustainability assessment of human/industrial and nature-based solutions. *Sustainability Science*, 13, 1185-1191. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0559-0>
- Scott, L., Goncalves, A. (2021). The role of semiotics in health, safety, and environment communication in South African mining and its influence on organizational culture. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* [online], 121 (2), 57-62. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1289/2021>
- Sherin, S., Ur Rehman, Z., Hussain, S., Muhammad, N., Bilal, T. (2020). Assessment and Quantification of Risks Associated with Small Scale Mining, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 11(3), 65-69. <https://doi.org/10.46660/ijeeeg.Vol11.Iss3.2020.478>
- Singh, C., Singh, D., Khamba, J.S. (2021). In quest of green practices in manufacturing industries through literature review. *World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, 17 (1), 30-50. <https://doi.org/10.1108/WJEMSD-02-2019-0014>
- Singh, G.G., Cisneros-Montemayor, A.M., Swartz, W., Cheung, W., Guy, J.A., Kenny, T.A., McOwen, C.J., Asch, R., Geffert, J.L., Wabnitz, CCC, Sumaila, R., Hanich, Q., Ota, Y. (2017). A rapid assessment of co-benefits and trade-offs among sustainable development goals. *Mar Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.030>
- Tienhaara, K. (2019). Beyond accountability: alternative rationales for transparency in global trade politics. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 09-05, 112-124. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1661230>
- Vedel, J.B., Kokshagina, O. (2021). How firms undertake organizational changes to shift to more-exploratory strategies: A process perspective. *Research Policy*, 50 (1). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104118>
- Zhou, X., Moinuddin, M. (2017). Sustainable Development Goals Interlinkages and Network Analysis: A practical tool for SDG integration and policy coherence. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa, Japan.
- References**
- Abid, G., Ahmed, S., Saman Elahi, N., Ilyas, S. (2020). Antecedents and mechanism of employee well-being for social sustainability: A sequential mediation. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.06.011>
- Aubakirova, G. (2020). Transformational Change in the Economy of Kazakhstan. *Studies of Russian Economic Development*, 31(1), 113-119. <https://doi.org/10.1134/S1075700720010037>
- Ayala-Orozco, B., Rosell, J., Merçon, J., Bueno, I., Alatorre-Frenk, G., Langle-Flores, Lobato, A. et al. (2018). Challenges and strategies in place-based multi-stakeholder collaboration for sustainability: learning from experiences in the global south. *Sustainability*, 10(9), 3217. <https://doi.org/10.3390/su10093217>
- Bhattacharyya, A., Meltzer, J.P., Oppenheim, J., Qureshi, Z., Stern, N. (2016). Delivering on better infrastructure for better development and better climate. Brookings Institutions, Washington DC.
- Boute, A. (2012). Combating climate change through investment arbitration. *Fordham International Law Journal*, 35(3), 613-614. <https://ir.lawnet.fordham.edu/ilj/vol35/iss3/7>
- Byrnes, L., Brown, C., Foster, J., Wagner, LD (2013). Australian renewable energy policy: barriers and challenges. *Renew Energy*, 60, 711-721. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.024>
- Chapman, R., Howden-Chapman, P., Capon, A. (2016). Understanding the systemic nature of cities to improve health and climate change mitigation. *Environment International*, 94, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.014>
- Dannyye Byuro natsionalnoy statistiki Agentstva po strategicheskomyu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. (2021). Retrieved 01.03.2021 from <https://stat.gov.kz>
- Dannyye Komiteta po statistike Ministerstva natsionalnoy ekonomiki Respubliki Kazakhstan. (2021). Retrieved 02.04.2021 from <http://stat.gov.kz/>
- Diaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martin-Lopez, B., Watson, R., Molnar, T., Shirayama, Z. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359 (6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Galafassi, D., Tim M. Daw, Munyi, L., Brown, K., Barnaud, C., Fazey, I. (2017). Learning about social-ecological trade-offs. *Ecology and Society*, 22 (1), 1-27. <https://doi.org/10.5751/ES-08920-220102>
- Gheyle, N., De Ville, F. (2017). How much is enough? Explaining the continuous transparency conflict in TTIP. *Politics and Governance*, 5 (3), 16-28. <https://doi.org/10.17645/pag.v5i3.1024>
- Goldthau, A. (2014). Rethinking the governance of energy infrastructure: Scale, decentralization and polycentrism. *Energy Research and Social Science*, 1, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.009>
- Gupta, A., Mason, M. (2016). Disclosing or obscuring? The politics of transparency in global climate governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 18, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.11.004>
- Hussain, M., Bashir, M.F., Shahzad, U. (2021). Do foreign direct investments help to bolster economic growth? New insights from Asian and Middle East economies. *World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, 17(1), 62-84. <https://doi.org/10.1108/WJEMSD-10-2019-0085>
- Issatayeva, F.M., Rudko, G.I., Portnov, V.S. (2019). Technical and economic substantiation of developing Kuzmury copper deposit (Kazakhstan). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 9-24. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/3>
- Kowarsch, M., Jabbour, J. (2017). Solution-oriented global environmental assessments: opportunities and challenges. *Environmental Science & Policy*, 77, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.013>
- Kozar, R., Galang, E., Alip, A., Sedhain, J., Subramanian, S., Saito, O. (2019). Multi-level networks for sustainability solutions: the case of the International Partnership for the Satoyama Initiative. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 39, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.09.002>
- Krzykowski, M., Mariański, M., Zięty, J. (2021). Principle of reasonable and legitimate expectations in international law as a premise for investments in the energy sector. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 21, 75-91. <https://doi.org/10.1007/s10784-020-09471-x>
- Luederitz, C., Abson, D.J., Audet, R., Lang, D.J. (2017). Many pathways toward sustainability: not conflict but co-learning between transition narratives. *Sustainability Science*, 12, 393-407. <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0414-0>
- Na zashchite prirody: investitsii v okhranu okruzhayushchey sredy vyrosli na 34% za god. (2021). Retrieved 18.04.2021 from <http://www.energyprom.kz/ru/a/monitoring/na-zashchite-prirody-investitsii-na-okhranu-okruzhayushchey-sredy-vyrosli-na-34-za-god>
- Ortiz-Moya, F., Kataoka Y., Saito O. et al. (2021). Sustainable transitions towards a resilient and decentralised future: Japan's Circulating and Ecological Sphere (CES). *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00941-y>
- Owen, J., Kemp, D. (2013). Social licence and mining: a critical perspective. *Resources Policy*, 38 (1), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.016>
- Saenz, C. (2020). Corporate social responsibility fit helps to earn the social license to operate in the mining industry. *Resources Policy*. Available online 23 September. 101814. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101814>
- Saito, O. (2017). Future science-policy agendas and partnerships for building a sustainable society in harmony with nature. *Sustainability Science*, 12, 895-899. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0475-8>
- Schaubroeck, T. (2018). Towards a general sustainability assessment of human/industrial and nature-based solutions. *Sustainability Science*, 13, 1185-1191. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0559-0>
- Scott, L., Goncalves, A. (2021). The role of semiotics in health, safety, and environment communication in South African mining and its influence on organizational culture. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* [online], 121 (2), 57-62. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1289/2021>
- Sherin, S., Ur Rehman, Z., Hussain, S., Muhammad, N., Bilal, T. (2020). Assessment and Quantification of Risks Associated with Small Scale Mining, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 11(3), 65-69. <https://doi.org/10.46660/ijeeeg.Vol11.Iss3.2020.478>
- Singh, C., Singh, D., Khamba, J.S. (2021). In quest of green practices in manufacturing industries through literature review. *World Journal of*

Entrepreneurship, Management and Sustainable Development, 17 (1), 30-50. <https://doi.org/10.1108/WJEMSD-02-2019-0014>

Singh, G.G., Cisneros-Montemayor, A. M., Swartz, W., Cheung, W., Guy, J.A., Kenny, T.A., McOwen, C.J., Asch, R., Geffert, J.L., Wabnitz, C.C., Sumaila, R., Hanich, Q., Ota, Y. (2017). A rapid assessment of co-benefits and trade-offs among sustainable development goals. *Mar Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.030>

Tienhaara, K. (2019). Beyond accountability: alternative rationales for transparency in global trade politics. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 09-05, 112-124. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1661230>

Vedel, J.B., Kokshagina, O. (2021). How firms undertake organizational changes to shift to more-exploratory strategies: A process perspective. *Research Policy*, 50 (1). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104118>

Zakon Respubliki Kazakhstan ot 4 iyulya 2009 goda №165-IV "O podderzhke ispolzovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii" (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 01.04.2021 g.). (2021). Retrieved 13.06.2021 from https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30445263

Zhou, X., Moinuddin, M. (2017). Sustainable Development Goals Interlinkages and Network Analysis: A practical tool for SDG integration and policy coherence. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa, Japan.

Надійшла до редколегії 07.10.21

G. Aubakirova¹, Dr. Sci. (Econ.), Prof.,

E-mail: rendykar@gmail.com;

G. Rudko², Dr. Sci. (Geol.-Min.), Dr. Sci. (Geogr.), Dr. Sci. (Techn.), Prof.,

E-mail: rudko@dkz.gov.ua;

S. Vyzhva³, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

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

V. Portnov¹, Dr. Sci. (Techn.), Prof.,

E-mail: vs_portnov@mail.ru;

F. Isataeva¹, PhD, Senior Teacher,

E-mail: isataeva.farida@gmail.com;

N. Zimanovskaya⁴, PhD, Associate Professor,

E-mail: nata_zim@mail.ru

¹Karaganda Technical University,

56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, 100027, Kazakhstan;

State Commission of Ukraine on Mineral Reserves,

18/7 Kutuzova Str., Kiev, 01133, Ukraine;

³Taras Shevchenko National University of Kyiv,

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

⁴East Kazakhstan state technical university named. D. Serikbaev,

19 Serikbaeva Str., Ust Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan

ACHIEVING SUSTAINABILITY IN COUNTRIES WITH ECONOMIES IN TRANSITION: NEW OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

The article examines Kazakhstan, the largest economy in Central Asia, which, on the way to sustainable economic growth, adequately responds to systemic challenges and adapts the experience of advanced countries. The generalizing indicators of the effectiveness of state regulation of the processes contributing to the growth of the stability of the national economy are given. The reasons for the weak involvement of entrepreneurs and citizens in measures for the sustainable development of Kazakhstan have been identified. It has been substantiated that the development of a strategy for the country's sustainable development and the achievement of inclusive economic growth require coordination of the work of government bodies, business and civil society. It is shown that in Kazakhstan the main drivers for the implementation of the culture of sustainable development are large enterprises and the quasi-public sector. Private enterprises do not yet see the opportunity to profit from integrating sustainable development goals into business processes. The paper emphasizes that in order to increase the stability of the poorly diversified economy of Kazakhstan, emphasis should be placed on the transformation of the mining sector, which has the potential to maintain investment attractiveness, both for domestic and foreign investors. Based on the results of the study, the authors highlight the most important aspects of building a new model of sustainable development in the foreseeable future.

Keywords: transition economy, Kazakhstan, state regulation, sustainability, investment, mining industry.

G. Аубакірова¹, д-р екон. наук, проф.,

E-mail: rendykar@gmail.com;

Г. Рудько², д-р геол.-мінералог. наук,

д-р геогр. наук, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: rudko@dkz.gov.ua;

С. Вижва³, д-р геол. наук, проф.,

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

В. Портнов¹, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: vs_portnov@mail.ru;

Ф. Ісатаєва¹, PhD, ст. викл.,

E-mail: isataeva.farida@gmail.com;

Н. Зімановська⁴, PhD, доц.,

E-mail: nata_zim@mail.ru

¹Карагандинський технічний університет,

пр. Н. Назарбаєва, 56, м. Караганда, 100027, Казахстан;

²Державна комісія України по запасах корисних копалин,

вул. Кутузова, 18/7, м. Київ, 01133, Україна;

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

⁴Східно-Казахстанський державний технічний університет ім. Д. Серікбаєва,

вул. Д.Серікбаєва, 19, м. Усть-Каменогорськ, 070004, Республіка Казахстан

ДОСЯГНЕННЯ СТІЙКОСТІ В КРАЇНАХ З ПЕРЕХІДНОЮ ЕКОНОМІКОЮ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Розглянуто економіку Казахстану – найбільшу в Центральній Азії, яка на шляху до стійкого економічного зростання адекватно реагує на системні виклики і адаптує досвід передових країн. Наведено узагальнюючі показники результативності державного регулювання процесів, які сприяють зростанню стійкості національної економіки. Виявлено причини слабкої залученості підприємств і громадян до заходів зі сталого розвитку Казахстану. Обґрунтовано, що розробка стратегії сталого розвитку країни та досягнення інклюзивного економічного зростання вимагають координації роботи державних органів, бізнесу та громадянського суспільства. Показано, що в Казахстані основними драйверами реалізації культури сталого розвитку виступають великі підприємства і квазідержавний сектор. Приватні підприємства ще не бачать можливості отримання прибутку від інтеграції цілей сталого розвитку в бізнес-процеси. У роботі підкреслюється, що для зростання стійкості слабо диверсифікованої економіки Казахстану наголос повинен бути зроблений на трансформаційне перетворення гірничодобувного сектору, що має потенційні можливості зберегти інвестиційну привабливість як для вітчизняних, так і зарубіжних інвесторів. Ґрунтуючись на результатах проведеного дослідження, автори виділяють найважливіші аспекти побудови нової моделі сталого розвитку в доступному для огляду майбутньому. Обґрунтовано, що в середньостроковому періоді особливого значення набуває завершення переходу на міжнародні стандарти геологічної звітності про результати геологорозвідувальних робіт, що позитивно відіб'ється на глибокій декарбонізації економіки країни.

Ключові слова: транзитна економіка, Казахстан, державне регулювання, стійкість, інвестиції, гірничодобувна промисловість.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.10>

Z. Mekti¹, Dr in Mining Engineering,
E-mail: mektizohir@yahoo.fr;
A. Boutemedjet¹, Dr in Mining Engineering,
E-mail: boutemedjetassia@yahoo.fr;
O. Sekiou², Dr in Immunology,
E-mail: o.sekiou@cre.dz;
S. Berdoudi¹, Dr in Mining Engineering,
E-mail: berdoudisaid@yahoo.fr;
A. Chaib¹, Dr in Mining Engineering,
E-mail: achaib_as@yahoo.fr;
F. Kouider³, MSc in Chemical Engineering,
E-mail: kouiderfareskul016@gmail.com;
A. Rahmani³, MSc in Chemical Engineering,
E-mail: Abdun81@gmail.com;
A. Benselhou², PhD in Ecology and Environment Protection,
E-mail: benselhou@yahoo.fr;

¹Laboratory of Valorization of Mining Resources and Environment, Mining Department,
Badji Mokhtar University, Annaba, Algeria;

²Environmental Research Center (C.R.E), Annaba, Algeria;

³Faculty of Engineering, Built Environment & IT, SEGi University, Malaysia

AIRBORNE PARTICULATE MATTER POLLUTION GENERATED BY PHOSPHATE EXPORT AT THE PORT OF ANNABA

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

For several decades, airborne particulate matter (PM) pollution has become one of the major concerns of policymakers across the globe, due to its adverse effects on climate, human health, environment and various socio-economic sectors. The process of phosphate export in bulk is one of the main source generating air pollutants, such as PM emissions of different shapes, concentrations and particle sizes, which can cause respiratory diseases. The objective of this work is to determine the dust level generated by the processes of unloading, storage and loading of phosphate in bulk to ships, by the company of the port installation at the port of Annaba (East of Algeria).

The PM measurement campaign was carried out according to the NF X 43-014. It was performed on 08 sampling points located at the port of Annaba and in a periphery with a radius of up to 2.3 km. The recorded results show very high levels of dust in 05 samples series largely exceeding the acceptable threshold (1000 mg/m³/day). The level of heavy metals in dust was evaluated by the analysis of Atomic Absorption Spectrometry. EDAX analysis showed that the phosphate PM have an angular morphology elongated particles and hook-shaped.

Keywords: Health risk, Heavy metals, Environment, Impacts, Northeast of Algeria.

Introduction. Natural phosphates comprise more than 200 mineralogical species (Fisher, Jerome, 1973). However, the most abundant ones belong to the apatite family (Raguin, 1961). Phosphate ores are defined according to their P₂O₅ content or in terms of the percentage of tricalcium phosphate (TPL or BPL: Bone Phosphate Lime) which is really the basic phosphate product (1 TPL = 2.185 P₂O₅). It also presents a very varied field of use on an industrial scale, of which 80 to 90% of the production is used in fertilizers and in the manufacture of phosphoric acid (Dumon, 1980). In Algeria and in the Djebel-Onk region (Tebessa), the phosphate ore, is exploited by the phosphate mining company (SOMIPHOS), a subsidiary of the national company "FERPHOS Group" headquartered in Annaba. In 2018, the Somiphos Company exported 1.8 million tons of phosphate; it aims in the following years to produce and export 5 million tons.

The ore mined and processed in the Djebel-Onk factory is then shipped to the Annaba Port installation (IPA), either by rail (320 km) or by road transport. The entire production is exported as raw material to several countries around the world (Office DED, 2019). However, the production process of Phosphate generates environmental impacts such as gas emissions (CO₂, NO_x, SO₂), especially PM emissions at all levels of production, mainly in the port of Annaba, where the process is underway to export phosphate (Benselhou et al., 2020). PM generated by the phosphate export operation (Unloading, Storage, Loading) is the main air pollutant and contributes to respiratory illnesses for company employees

as well as employees around the port installation. Several studies have been carried out previously concerning the impact of dust emitted during the extraction, processing, transport and export of phosphate (Berman, 1969) and (Pan, 2002). Nevertheless, this work is the first in Algeria, which studied the PM emissions in the air, due to the activities of the Somiphos Company, in particular, exports of phosphate at the port of Annaba.

According to the legal definition, dust is a solid particle with an aerodynamic diameter of less than 100 micrometers or whose falling speed is less than 0.25 meters per second (Article R. 4222-3 of the Labor Code). Dust suspended in the air presents serious health risks, especially if this dust contains a certain amount of heavy metals (Zn, Pb, Cu, As, Cr, U, Ni ...) (Benselhou et al., 2015). The particles size largely determines the extent of the hazard. Particles larger than 10 µm cannot be inhaled and therefore only affect external organs, they are mainly responsible for skin and eye irritation, conjunctivitis and eye infections (Romdhane, 2017; Giannadaki et al., 2014; Merlen, 2015). Particles less than 10 microns can be inhaled but are generally stopped in the nose, mouth and upper respiratory tract; they then trigger conditions such as asthma, tracheitis, pneumonia, allergic rhinitis and silicosis. However, when the fine particles enter the lower respiratory tract and reach the bloodstream, they can affect all internal organs and cause cardiovascular disorders. According to an assessment conducted in 2014 using a global model, exposure to dust particles would have

caused 400,000 premature deaths due to cardiopulmonary diseases within the population aged over 30 years (Gian-nadaki et al., 2014).

The main objective of this study is to measure the level of dust generated by the phosphate export process using the Owen Gauge method, and then to characterize the dust, such as size and shape of particles, chemical composition, the presence of heavy metals, the impact on the environment, and even the effect of weather conditions.

Material and Methods. Emission of dust into the atmosphere is generally a discontinuous phenomenon in terms of flow. Depending on the size, granulometry and nature of the particles and weather conditions (wind, temperature, and humidity), the particles have a more or less long residence time in the atmosphere and will be eliminated according to two processes of separate atmospheric deposits (Kharytonov et al., 2016):

- Dry deposition (gravity, by Brownian motion or by impaction and interception);
- Wet deposition (leaching during rainfall or trapping by cloudy water drops).

The collection in this study is carried out by means of precipitation collectors of the Owen gauge type, this method is of standard NF X 43-014 (Merlen, 2015). Owen gauge type collectors (Fig. 1) consist of a funnel and a 25 liters polyethylene collection bottle.

The whole system is inserted into a tripod serving as a support, the collection height (head of the funnel) is located 1.5 meters from the ground, and sometimes the plastic clips are used to fix the bottles to the vertical metal frames of the installation and the phosphate loading gantries.

Monitoring program. The monitoring network consists of eight (08) sampling stations arranged to cover the entire field of the port installation and its periphery (Fig. 2a and b); namely the unloading hall of the wagons (Station S1), the unloading hangar for phosphate storage trucks (Station S2). Small Ship Loading Gantry, dock 15 (Station S3), Technical Services (Station S4), Small Ship Loading Gantry, dock 17 (Station S5), Train Station outside the harbour at 700 m

(Station S6), Ibn-Sina Hospital at 1200 m (Station S7), and finally the Church of Saint Valentine at 2.3 km (Station S8). The phosphate dust-monitoring network at the company is a permanent network. In the present study and for the sampling and quantification of sedimentable dust, we favoured the period between the ends of March 2019 until the beginning of July 2019, the period is divided into three measurement campaigns, and each campaign lasts 30 days of exposure. This period was chosen for two reasons: the first reason that the weather is dry in this month, which facilitates the dust flight, the second reason that in this period the company exported more than 230.000T of phosphate and about 250.000T between unloading and storage.

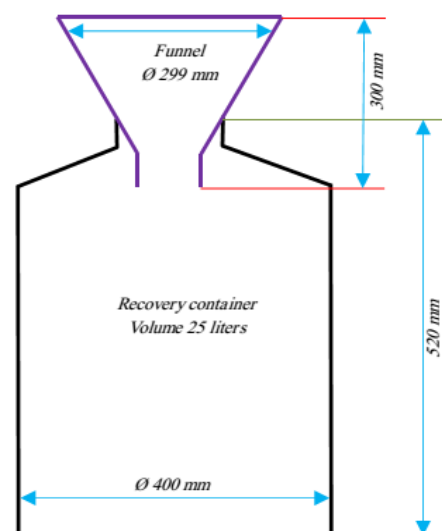


Fig. 1. Presentation of the measuring device, the precipitation collectors, Owen gauge

Measurements process. The schedule of environmental monitoring conducted during the period mentioned before is presented in Table 1.

Table 1

The sampling follow-up schedule						
Years	2019					
Months	March	April	May	June	July	
Company	01		02		03	
Process	30 March installation	29 April removal	01 May installation	30 May removal	02 June installation	01 July removal
N ^{br} of days	30 days		30 days		30 days	

Analysis and expression of results. The analysis of sedimentable dust is carried out in accordance with standard NF X 43-014. The amount of water collected in the gauges during the measurement period is filtered, the filtrate is dried at 105°C for a given time, and then weighed in order to determine the mass and assess the amount of dust contained in each gauge. The results are expressed in milligrams of dust deposited per square meter and per day (mg/m²/d).

The wind roses recorded over the three months of measurements (Fig. 3) generally have the same characteristics. The winds was considered as non-measurable or zero (<5 m/s), measured during the three measurement campaigns are relatively homogeneous, varying from 20.8% to 25.8% of the observations made over the period and in this case, the fallout is not influenced. The prevailing winds (10 to 38 m/s) are predominant and come mainly from the south-west quarter. Winds from the northeast (0° to 60°), are very

poorly represented during periods of exposure. Therefore, the measurement stations, especially S6, S7 and S8, are less subject to the phenomena of atmospheric deposition of PM due to their location.

Results and Discussion. Once the weight of the dust from each sample has been determined, it is necessary to calculate the major dust content in mg/m²/day, according to the following relationship, given by the AFNOR standard.

$$P = \frac{m}{10^3} \times \frac{10^4}{S} \times \frac{730}{t} = 7300 \frac{m}{St} \quad (\text{Henni-Chebra et al., 2011}),$$

P – major dust content (mg/m²/day); t – duration of exposure in hours (with the average duration of one month = 730 hours); m – mass in milligrams of PM; S – exposure surface, the bottom of the Owen gauge in cm².

Table 2 presents the results of atmospheric deposition of dust, measured by means of precipitation collectors on the Annaba's port installations and their peripheries, and Fig. 4 shows the data visually.

Table 2

PM fallout in mg/m ² /day								
Mouths	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
April	23215	19740	14802	6102	15200	305	195	81
May	22102	19304	12300	7204	18321	297	245	62
June	19900	18810	12200	7600	17287	220	452	54

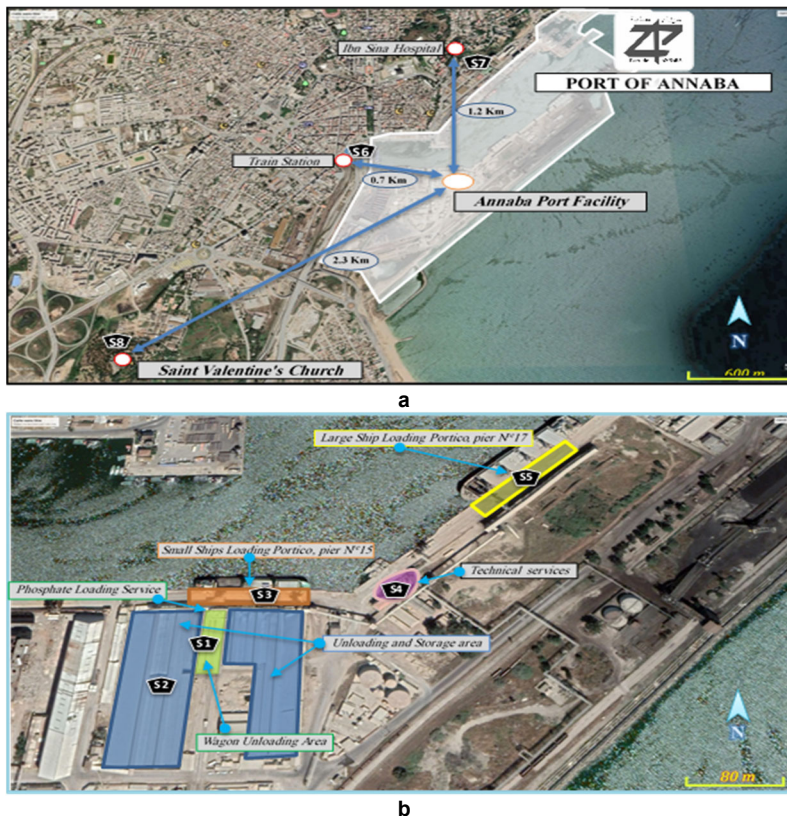


Fig. 2. (a) - Location of measurement stations. (b) - Location of the study area and sites
Wind conditions data. Low wind speed will be associated with low dispersion of particles in the entourage

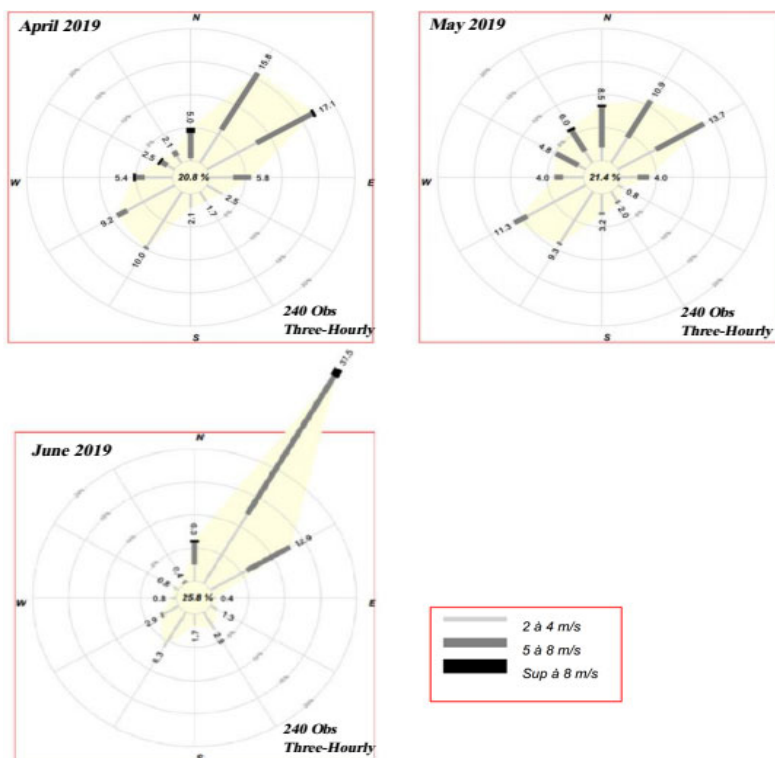


Fig. 3. Wind regimes recorded during the periods of exposure of the gauges

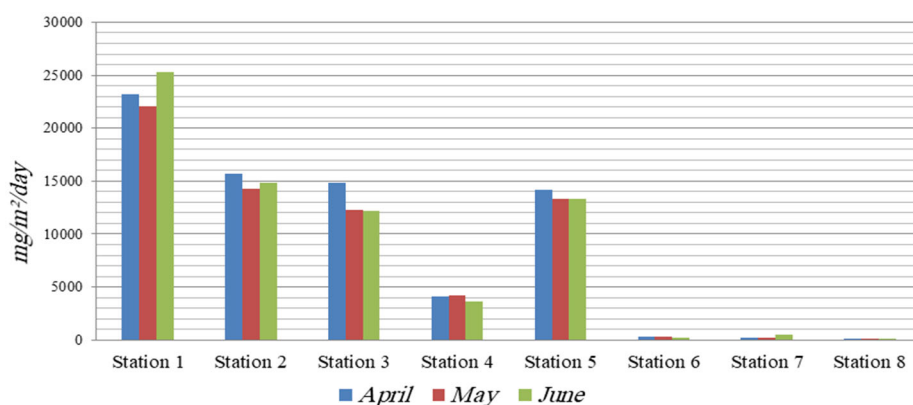


Fig. 4. Dust level evolution

The results obtained are illustrated in Fig. 5, for the evolution of the dust content of the eight series, where it is found that station 1 records the highest dust content. Sampling is well above the acceptable threshold set by the AFNOR standard (1000 mg/m²/day), with the exception of stations S6, S7 and S8, which have low rates. The high rate at the other stations is mainly due to the location of the gauges in heavily dusted areas. The wagon hall (station S1) receives more than 4,500 tons of phosphate every day and without stopping, while storage is carried out periodically in a stock. Loading of phosphate into ships at the two docks (15 and 17); is occasional, which explains the low level of dust accumulation at station S1. The quantities of dust collected in stations S6, S7 and S8 are lower than the reference value set by the AFNOR standard, this result is justified by the distance of the stations from areas producing dust. Despite the

location of station S7; on the axis of the prevailing north-easterly winds, according to data provided by the meteorological station of Annaba; but the rate does not exceed 452 mg/m²/day, this is due to its presence at a high level above sea level, the propagation of dust has not been affected by winds throughout the period of this study, especially stations S6, S7 and S8. The table below shows the limited dust level of 350 mg/m²/day, according to TA Luft.

PM chemical composition. To determine the origin of the PM collected in the eight (08) monitoring points, we carried out chemical analysis of the samples by the XRF; all the samples are mixed; homogenized and analyzed. The result of the chemical composition of the dust collected on the Owen gauge, are compared with that given by the laboratory of the Djebel Onk phosphate complex (Table 3).

Dust reference value (mg/m²/d) (Kharytonov et al., 2017)

Class	Value in mg/m ² /d
Low dustiness	0-200
Medium dustiness	200-300
High dustiness	>350

Table 2

Chemical composition of PM phosphate samples

Elements	P ₂ O ₅	CO ₂	SO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	F	Cl (ppm)
PM of phosphate	29.31	6.93	2.80	50.8	1.67	0.32	0.33	1.27	0.071	2.16	3.56	553
Djebel-Onk phosphate	30.22	6.86	3.00	52.3	0.83	0.12	0.50	1.35	0.078	3.21	4.02	449

Table 3

The comparison of the values of the composition of PM of phosphate; shows a correlation with the chemical composition of Djebel-Onk phosphate. Stations S1, S2, S3, S4 and S5 are located in the unloading, storage and loading areas, the dust even comes from truck traffic, especially at station S4. The quantity collected at stations S6, S7 and S8, is so negligible that it does not affect the chemical composition of the aggregate sample. These results clearly prove that the PM collected in the installations is generated by the process of unloading, storage and unloading of phosphate.

Determination of particle size distributions. The particle size distribution of the phosphate dust sample, is obtained from the analysis by laser diffraction (Fig. 5), the result of the analysis showed that, more than 90% of the particles are with a smaller diameter at 118 µm; 50% of the particles are with a diameter less than 13.3 µm, and 10% of the particles have a diameter of less than 5.5 µm.

These results favour deep pulmonary deposition [8]. PM10 (particles with an aerodynamic diameter of less than 10 µm) are of major concern today, as they are small enough to penetrate deep into the lungs (WHO 2013). Particle size can behave in the human body as follows:

- Chest dust: mass fraction of inhaled particles enter the larynx (<30 µm);
- Alveolar dust: mass fraction of inhaled particles penetrate the non-ciliated airways (<15 µm). These fractions are included in the ISO 7708 standard and in the Afnor X43-100 standard (Betelli et al., 2012).

Phosphate PM Morphology. The shape of PM in general can promote flight and decrease the sedimentation rate of a particle: a flat particle behaves like a leaf during its fall and will therefore settle more slowly than a spherical particle (Imen Bel Hadj, 2013). The fall speed is a function of the aerodynamic diameter. PM of phosphate captured at the port of Annaba have different morphology and irregular shape (Fig. 6).

The angular shape of the particle surface is mainly due to the mechanical preparation of phosphates at the Djebel-Onk plant, unlike natural particles, where the surface is smooth and the grains are spherical in shape. For particles of irregular shape, relative movement becomes difficult due to the presence of more points of contact between them. If they are elongated and hook-shaped particles, it will be more complicated because they tend to form bridges by interlocking particles (Gil et al., 2013).

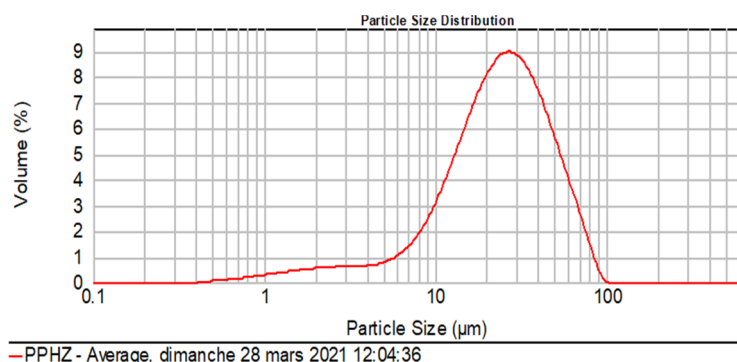


Fig. 5. PM particle size by laser diffraction

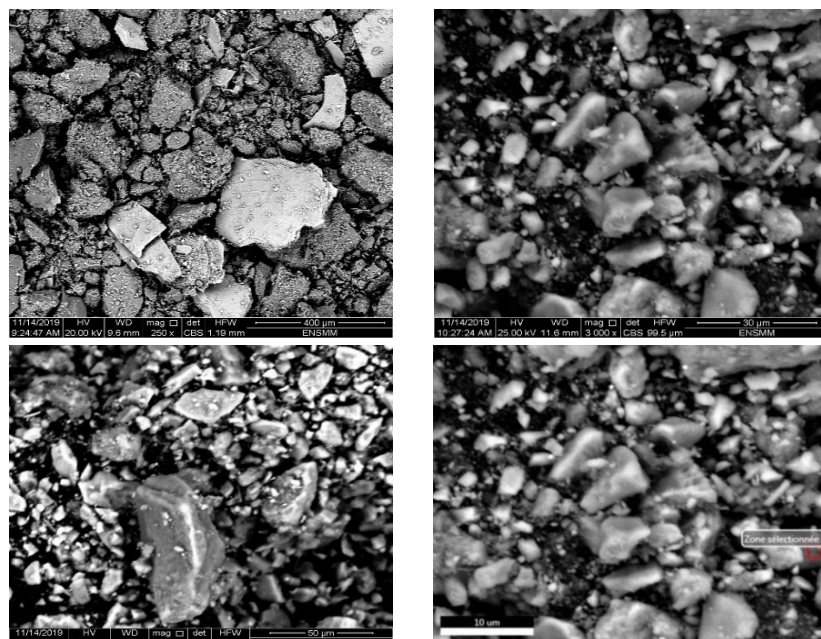


Fig. 6. Phosphate dust morphology, by X-ray microanalysis coupled with a scanning electron microscope (SEM / EDX)

Heavy metals content in phosphate dust. From a purely scientific and technical point of view, heavy metals can be defined as: Any metal with a density greater than 5 g/cm^3 . Any metal with a high atomic number, generally higher than that of Sodium ($Z=11$), presenting a danger to the environment and to humans. Any metal that can be toxic to biological systems. In environmental sciences, the heavy metals associated with the concepts of pollution and toxicity are generally: arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), manganese (Mn), nickel (Ni),

lead (Pb), tin (Sn), and zinc (Zn). In our study, the composition of heavy metals and some trace metallic elements was determined by atomic absorption spectrometry (Table 4).

The results of the metal concentrations measured for the eight stations present different values, those, which are higher than the German limit values, and those that are lower. We observe that the guide values for the metals of Cadmium (Cd) and mercury (Hg) have been exceeded. The limit value of Cd is $2 \text{ } \mu\text{g/m}^2/\text{d}$, on the other hand, the recorded values varied between 8.7 and $1.2 \text{ } \mu\text{g/m}^2/\text{d}$.

Table 4

Daily and surface concentration of metals detected ($\mu\text{g/m}^2/\text{d}$) - German TA Luft 2002
(Henni-Chebra et al., 2015)

Element	Cd	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni	Mn	Hg	Co	Sb
Limit $\mu\text{g/m}^2/\text{d}$	2	400	100	100	250	15	15	1	15	100
S1	8.3	113.2	15.8	23.4	122.2	13.5	11.3	3.2	2.2	12.4
S2	8.7	111.3	16.7	25.1	124.8	14.5	10.9	2.2	1.4	13.8
S3	7.6	102.2	10.2	20.1	121.1	5.4	12.3	3.4	3.3	14.3
S4	5.3	72.5	7.5	14.2	113.4	8.8	8.4	4.1	2.9	10.7
S5	5.6	80.4	9.6	10.0	115.7	9.1	--	--	2.8	8.2
S6	3.2	20.1	--	--	100.4	--	--	2.1	2.1	4.2
S7	1.2	--	--	2.4	5.2	--	3.4	0.1	1.4	3.2
S8	--	13	--	--	1.2	--	--	0.3	1.2	--

The limit value of Hg according to the German standard, is $1 \text{ } \mu\text{g/m}^2/\text{d}$, but the results of the latter's analyzes vary between 3.2 and $0.3 \text{ } \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ in the eight measuring stations. The values

of Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Mn, Co and Sb are below the limit of quantification. The points most exposed to fallout from the site (station S1, S2 and S3) have the highest levels of heavy metals.

The toxicity of mercury mainly affects cerebral functions (mercury is neurotoxic), renal functions (nephrotoxic), the endocrine system; mercury is suspected to be an endocrine disruptor and cell life disruptor. It was recently shown (2007) that even at low doses, it has a cytotoxic effect on central nervous system stem cells (as well as low doses of lead or parquât) (Li *et al.*, 2007). It can affect cell division; mercury is suspected of being able to induce or co-induce certain cancers (For example, cases of leukemia have been observed in Japan concomitantly in Minamata). In animal models, it can induce alterations in the blood, apoptosis (Sharma *et al.*, 2005; Waalkes *et al.*, 2000.; Nagashima *et al.*, 1997), and chromosomal aberrations. Cadmium poisoning can occur either acutely or chronically, with lesions mainly in the lungs, bones and kidneys. Cadmium has no physiological role in the human body (Nishijo *et al.*, 2004.; Nordberg *et al.*, 2002.; Benselhoub *et al.*, 2015). The metal itself and its compounds are extremely toxic, even at low concentrations, and tend to accumulate in living organisms and ecosystems (Orlowski *et al.*, 1998).

Usually to control dust emissions; several methods can be applied. For phosphate dust the method is special, because the product must not be touched by humidity, otherwise it will be contaminated, therefore it is strictly forbidden to spray the dust with water especially at the unloading points of trucks and wagons, at the level of the loading gantries of the ships. The most effective methods for reducing phosphate dust are:

- Complete cover of the product conveyor belts;
- Unloading of trucks and wagons in well closed and airtight sheds, to prevent dust from escaping outside the installation;
- Installation of baghouse dust collectors at ship loading gantries;
- Spraying the road with water;
- Complete cover of the product conveyor belts;
- Unloading of trucks and wagons in well closed and airtight sheds, to prevent dust from escaping outside the installation;
- Installation of baghouse dust collectors at ship loading gantries;
- Spraying the road with water to prevent dust from flying away during the passage of trucks.

Conclusions. Undoubtedly, the process of exporting phosphate in the port of Annaba, leads to a rate of dust emissions that exceed all international standards. What is certain is that the effects and consequences of these emissions on humans and the environment are disastrous. It is likely in the future, there will be a thorough study, dealing with the effects of these emissions on man, the environment, fauna and flora.

Based on the results obtained in this study, the following conclusions can be listed:

- The sedimentable PM measurement campaign gave very variable levels of dust during the eight sampling stations. Stations S1, S2, S3, S4 and S5 greatly exceed the acceptable threshold (1000 mg/m²/day) defined by the AFNOR standard, with a very low dust level for station S6, S7 and S8. This difference in dust level is mainly due to the distance between the collection points and the source of the dust.
- The chemical composition of the PM determined by the XRF shows a correlation between the chemical composition of the PM samples from the stations and the chemical composition of the phosphate from the Djebel-Onk plant located in Tebessa.
- The particle size distribution of PM, determined by laser diffraction, shows that more than 90% of particles with a diameter less than 118 µm, 50% of particles with a diameter less than 13.3 µm and 10% of particles have a diameter less

than 5.5 µm. These results promote deep lung deposition upon inhalation of PM by humans.

- PM of phosphate captured at the port of Annaba have other morphology and irregular shape of different size. The angular shape of the particle surface is mainly due to the mechanical preparation of phosphates at the Djebel-Onk phosphate plant, unlike natural particles where the surface is smooth and the grains are spherical in shape.

- The results of the analysis by atomic absorption spectrometry presents an excess in the values of Cadmium (Cd) and mercury (Hg), the levels of the latter are higher than the German limit values (TA Luft 2002).

References

- Benselhoub, A., Kanli, A.I. (2020). Environmental Impacts of Air Pollution on Human Health in Annaba Region (Northeast of Algeria). In *Toxic Chemical and Biological Agents*, pp. 209-216. Springer, Dordrecht.
- Benselhoub, A., Kharytonov, M., Bouabdallah, S., Bounouala, M., Idres, A., Boukelloul, M.L. (2015). Bioecological assessment of soil pollution with heavy metals in Annaba (Algeria). *Studia Universitatis "Vasile Goldis" Arad. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 25(1), 17.
- Benselhoub, A., Kharytonov, M., Bounouala, M., Chaabia, R., Badjoudj, S. (2015). Estimation of soil's sorption capacity to heavy metals in Algerian megacities: case of Algiers and Annaba. *INIMATEH-Agricultural Engineering*, 46(2).
- Betelli, L., Simon, X., Hartmann, A., Géhin, É., Duquenne, P. (2012). Développement et évaluation d'une méthode de quantification de Thermoactinomyces vulgaris dans l'air, par PCR temps réel.
- Chiazze, L., Watkins, D.K., Fryar, C. (1992). A case-control study of malignant and non-malignant respiratory disease among employees of a fibre-glass manufacturing facility. *Ibid.*, 49, 326-331.
- Di Benedetto, M. (1997). Le métal lourd Axe "Génie des Procédés". Centre SPIN, Ecole des Mines, Saint-Etienne.
- Giannadaki, D., Pozzer, A., Lelieveld, J. (2014). Modélisation des effets mondiaux de la poussière du désert en suspension dans l'air sur la qualité de l'air et la mortalité prématurée. *Chimie et physique atmosphériques*, 14 (2), 957-968.
- Gil, M., Schott, D., Arauzo, I., Teruel, E. (2013). Comportement de manipulation de deux biomasses broyées: peuplier SRF et tiges de maïs. *Fuel Process Technol.*, 112, 76-85.
- Henni-Chebra, K., Bougara, A., Halla, A. (2009). Impact des retombées de poussières causées par l'industrie cimentière sur l'environnement.
- Henni-Chebra, K., Bougara, A., Hallal, A. (2015). Estimation des particules de poussières causées par l'industrie cimentière par les plaques métalliques. *Nature & Technology*, (12), 2.
- Khadidja Henni-Chebra, Abdelkader Bougara, El-Hadj Kadri (2011). Détermination du niveau d'empoussièrement engendrée par la fabrication du ciment. *XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011*.
- Kharytonov, M., Benselhoub, A., Klimkina, I., Bouhedja, A., Idres, A., Aissi, A. (2016). Air pollution mapping in the Wilaya of Annaba (NE of Algeria). *Mining Science*, 23.
- Kharytonov, M., Benselhoub, A., Kryukovska, R., Klimkina I., I. Bouhedja, A., Bouabdallah, S., Vasylyeva, T. (2017). Risk assessment of aerotechnogenic pollution generated by industrial enterprises in Algeria and Ukraine.
- Li, Z., Dong, T., Proschel, C., Noble, M. (2007). Chemically diverse toxicants converge on Fyn and c-Cbl to disrupt precursor cell function. *PLoS Biol.*, 5 (2): e35.
- Merlen, R. (2015). La biosurveillance: outil de surveillance de l'impact sur l'environnement des émissions atmosphériques industrielles et d'évaluation des risques sanitaires, 2268-3798.
- Nagashima, Kazuo. (1997). A Review of Experimental Methylmercury Toxicity in Rats: Neuropathology and Evidence for Apoptosis [archive]. *Toxicologic Pathology*, 25.6, 624-631.
- Nishijo, M., Satarug, S., Honda, R., Tsuritani, I., Aoshima, K. (2004). The gender differences in health effects of environmental cadmium exposure and potential mechanisms. *Mol. Cell. Biochem.*, 255 (1-2), 87-92.
- Nordberg, G., Jin, T., Bernard, A., Fierens, S., Buchet, J.P., Ye, T. (2002). Low bone density and renal dysfunction following environmental cadmium exposure in China. *Ambio.*, 31(6), 478-481.
- Orlowski, C., Piotrowski, J.K., Subdys, J.K., Gross, A. (1998). Urinary cadmium as indicator of renal cadmium in humans: an autopsy study. *Hum. Exp. Toxicol.*, 17 (6), 302-306.
- Romdhane, S.B. (2017). Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis. *Doctoral dissertation*, Université Sorbonne Paris Cité ; Université des lettres, arts et sciences sociales-Tunis I. Faculté des sciences humaines et sociales.
- Sharma, Mukesh Kumar, et al. (2005). Modification of mercury-induced biochemical alterations in blood of Swiss albino mice by Spirulina fusiformis. *Environmental toxicology and pharmacology*, 20.2, 289-296.
- Waalkes, M.P. et al. (2000). Metals and disorders of cell accumulation: modulation of apoptosis and cell proliferation. *Toxicological Sciences*, 56.2, 255-261.

Надійшла до редколегії 11.05.21

З. Мекті¹,
E-mail: mektizohir@yahoo.fr;
А. Бутемеджет¹,
E-mail: boutemedjetassia@yahoo.fr;
О. Секи²,
E-mail: o.sekiou@cre.dz;
С. Бердуди¹,
E-mail: berdoudisaid@yahoo.fr;
А. Шайб¹,
E-mail: achaib_as@yahoo.fr;
Ф. Куйдер³,
E-mail: kouiderfareskul016@gmail.com;
А. Рахмани³,
E-mail: Abdun81@gmail.com;
А. Бенселгуб²,
E-mail: benseihoub@yahoo.fr;

¹Лабораторія валоризації гірничих ресурсів та навколишнього середовища, Гірничодобувний відділ, Університет Баджі Мохтара, Аннаба, Алжир;

²Дослідницький центр навколишнього середовища (С.Р.Е), Аннаба, Алжир;

³Інженерний факультет, Навколишнє середовище та інформаційні технології, Університет SEGi, Малайзія

ЗАБРУДНЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИМИ ЧАСТИНКАМИ, ЩО ПОВ'ЯЗАНЕ З ЕКСПОРТОМ ФОСФАТУ У ПОРТУ АННАБА

Протягом кількох останніх десятиліть забруднення твердими частинками повітря (ТЧ) стає однією з основних проблем політиків у всьому світі через його несприятливий вплив на клімат, здоров'я людей, навколишнє середовище та різні соціально-економічні сектори. Процес експорту фосфатів у великих обсягах є одним з основних джерел, що генерують забруднювачі повітря, такі як викиди твердих частинок різної форми, концентрації та розміру, які можуть спричинити захворювання органів дихання. Метою даної роботи є визначення рівня запиленості, що утворюється в процесі розвантаження, зберігання та завантаження фосфату навалом на судна портовою установкою в порту Аннаба (схід Алжиру).

Вимірювання ТЧ відбувалось відповідно до NF X 43-014, воно проводилось на 08 точках відбору проб, розташованих у порту Аннаба та на периферії з радіусом до 2,3 км. Отримані результати показали дуже високий рівень пилу під час вивчення серії зразків 05, що значно перевищує допустимий поріг (1000 мг/м³/добу). Рівень важких металів у пилу було оцінено за допомогою атомно-абсорбційного спектрометричного аналізу. Аналіз EDAX показав, що фосфатні ТЧ мають кутову морфологію з видовженими частинками та гачкоподібною формою.

Ключові слова: ризик для здоров'я, важкі метали, докілья, вплив, північний схід Алжиру.

З. Мекті¹,
E-mail: mektizohir@yahoo.fr;
А. Бутемеджет¹,
E-mail: boutemedjetassia@yahoo.fr;
О. Секи²,
E-mail: o.sekiou@cre.dz;
С. Бердуди¹,
E-mail: berdoudisaid@yahoo.fr;
А. Шайб¹,
E-mail: achaib_as@yahoo.fr;
Ф. Куйдер³,
E-mail: kouiderfareskul016@gmail.com;
А. Рахмани³,
E-mail: Abdun81@gmail.com;
А. Бенселгуб²,
E-mail: benseihoub@yahoo.fr;

¹Лабораторія валоризації горних ресурсів та оточуючої середовища, Горнодобувальний відділ, Університет Баджі Мохтара, Аннаба, Алжир;

²Ісследовательський центр оточуючої середовища (С.Р.Е), Аннаба, Алжир;

³Інженерний факультет, Оточуюча середовище та інформаційні технології, Університет SEGi, Малайзія

ЗАГРЯЗНЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИМИ ЧАСТИЦАМИ, СВ'ЯЗАННЕ З ЕКСПОРТОМ ФОСФАТА В ПОРТУ АННАБА

На протязі останніх десятиліть забруднення твердими частинками повітря (ТЧ) стає однією з основних проблем політиків у всьому світі через його несприятливий вплив на клімат, здоров'я людей, оточуюче середовище та різні соціально-економічні сектори. Процес експорту фосфатів у великих обсягах є одним з основних джерел, що генерують забруднювачі повітря, такі як викиди твердих частинок різної форми, концентрації та розміру, які можуть спричинити захворювання органів дихання. Метою даної роботи є визначення рівня запиленості, що утворюється в процесі розвантаження, зберігання та завантаження фосфату навалом на судна портовою установкою в порту Аннаба (схід Алжиру).

Вимірювання ТЧ відбувалось відповідно до NF X 43-014, воно проводилось на 08 точках відбору проб, розташованих у порту Аннаба та на периферії з радіусом до 2,3 км. Отримані результати показали дуже високий рівень пилу при вивченні серії образців 05, що значно перевищує допустимий поріг (1000 мг/м³/добу). Рівень важких металів у пилу було оцінено за допомогою атомно-абсорбційного спектрометричного аналізу. Аналіз EDAX показав, що фосфатні ТЧ мають кутову морфологію з видовженими частинками та гачкоподібною формою.

Ключові слова: ризик для здоров'я, важкі метали, оточуюче середовище, вплив, північний схід Алжиру.

УДК 624.15:631.431.6

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.11>

D. Chomko, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: Dimath@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
F. Chomko, Assoc. Prof.,
E-mail: Chomkofv@ukr.net;
N. Cherkashyna, Senior Lecturer,
E-mail: n.i.cherkashyna@karazin.ua;
V.N. Karazin Kharkiv National University,
4 Svobody Sqv., Kharkiv, 61022, Ukraine;
V. Taranov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
O.V. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy,
School of Geotechnics, 17, Marshal Bazhanov st., Kharkiv, 61000, Ukraine;
G. Seifeldin, PhD (Tech.), Assoc. Prof.,
Khartoum University, Sudan

STUDYING SWELLING SOILS BY MULTIDIMENSIONAL STATISTICAL ANALYSIS METHODS AS THE BASIS FOR ENGINEERING STRUCTURES FOUNDATIONS IN SUDAN

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

A new way to study swollen soils as the basis for foundations by methods of mathematical statistics, including cluster, factor and correlation-regression analyses has been proposed in the article. Normative values of the strength characteristics of these soils depending on their physical properties and degree of swelling, application limits, predominant factors and correlations between different indicators of soil properties have been established according to the results of these analyzes. A method of the study area zoning, leading to possible differential application of soils normative characteristics, as well as proposals for designing foundations on swollen soils have been developed. The methods were tested on the soils of Sudan.

Keywords: swelling soils, physical properties, degree of swelling, bearing capacity, zoning of the territory, foundations, cluster, factor and correlation-regression analyzes, predominant factors and correlation dependencies.

Problem formulation. Sudan has the largest distribution area of swollen soils among African countries - about 25 million hectares. This is primarily the territory of Greater Khartoum (the capital) and the state of El Jaseera (the area between the White and Blue Nile). Intensive construction is underway here and, therefore, the issue of using swollen soils as a basis for foundations is very important.

Mass construction in Khartoum is reduced to building of relatively light two-, three-storey cottages and industrial structures. No special soil studies and foundation calculations are expected. After a few years these structures, built on swollen soils, begin to deform because of such a practice. Table 1 shows different types of damage to engineering structures due to negative manifestations of swollen soils properties. Fig. 1 and 2 illustrate typical examples of these structures' destruction.

The cost of repairing and restoring the structural elements of buildings is very high, the annual damage is estimated at tens of millions of Sudanese pounds. This is the case of the Asalyaya factory. The cost of its repairing is so

high that it is recommended to move it to another site, composed of non-swollen soils.

Therefore, an acute issue now is to improve the existing and to develop new highly efficient computational and theoretical solutions to be used in the design, construction and operation of buildings and structures erected on swollen soils.

Analysis of publications and identification of unresolved issues

Many researchers (Elsayed, 1999; Potts and Zdrakovis, 2001; Poulus, 2001; El Turabi, 1993; Hussein et al., 1993; Sorochan, 1989; Shutenko et al., 1989, etc.) studied engineering and geological properties of the swollen soils in this region in natural and disturbed conditions. Depending on the distribution region, swollen soils in Sudan have different names: black tropical clays, black cotton soils, "margalitic soils", "reguri". A term "expansive soil" has recently been increasingly used in Sudan. According to local experts, it is more in line with the nature of the soil. These soils are highly swollen soils ($\epsilon_{osw} \geq 0.12$). According to some researchers, the ground surface rises by 50–60 cm during the rainy season (*Proceeding of the ...*, 1983).

Information on damage to engineering structures in Sudan

Table 1

	Engineering structure	Location	Number of floors	Year of construction	Type of foundation
1.	University of Jazzira, a detached house	State of Jazeera, Town of Wad Medani	2	1975	Monolithic
2.	"Druzhiba" cotton spinning factory	State of Jazeera, Town of Hasahisa	2	~70-s	Monolithic
3.	Administrative building of the Rahad project	State of Jazeera	1	1977	Tape
4.	Asalyaya factory, separate buildings	White Nile State	3	2014	Monolithic
5.	Administrative building of the soil study corporation	State of Jazeera, Town of Wad Medani	2	1968	Monolithic
6.	Presidential Palace, Library	The city of Khartoum	2	1995	Tape
7.	Laboratory building, Ribat University	The city of Khartoum	4	2002	Monolithic
8.	"Druzhiba" cotton spinning factory	State of Jazeera, Town of Hasahisa	2	2011	Tape

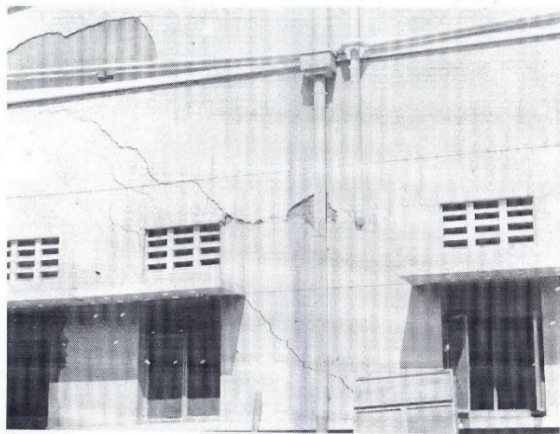


Fig. 1. Destruction of a brick wall

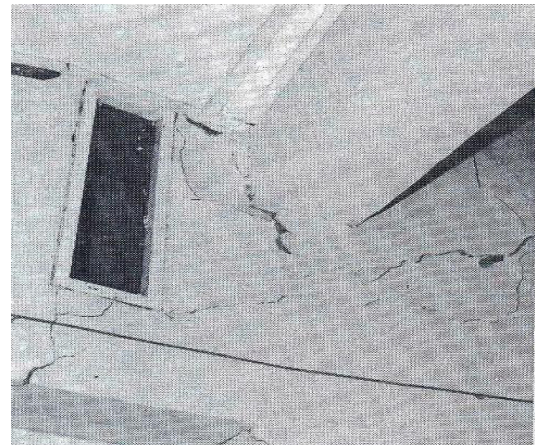


Fig. 2. A fragment of a brick wall's destruction ("Druzhba" cotton spinning factory, №8)

A number of papers are devoted to the design and construction of buildings and structures on Sudan's swollen soils and elimination of their negative impact (Elsayed, 1999; El Turabi, 1993; Seifeldin, 2007, 2008; Sorochan, 1989; Taranov, 2008, 2014; Chomko D.F. et al., 2002, 2012, 2004, 2014 and Chomko F.V. et al., 2014; Shutenko et al., 1989).

However, there is no literature on determining the similarity of physical and mechanical properties of swollen soils by methods of multidimensional statistical analysis and forecasting their change in Sudan.

The purpose of the research is to develop new calculation methods for creation of bases and foundations in special engineering and geological conditions (on swollen soils), ensuring efficient construction and operation of buildings and other engineering structures. To do this, the following problems should be solved:

1. To analyse regional construction features and methods of designing bases and foundations in Sudan;
 - to determine physical and mechanical properties of swollen soils in the state of El Jazeera in Mesopotamia (the area between the White and Blue Nile);
 - to establish development zones of different types of soils according to these properties;
 - to find a generalized model of the process by which to establish the main dependences of the swelling forces on the indicators, determining the state and properties of them, using modern knowledge about the nature of Sudan's soils swelling.
2. To determine the most significant factors, operating in the study area, by physical and mechanical properties of swollen soils;
 - to draw maps-schemes of factor loads on the basis of positive and negative load factors.
3. To identify areas with similar engineering and geological processes.
4. To identify physical characteristics of swollen soils with the greatest impact on mechanical ones.
5. To establish reliable regression dependences between physical and mechanical properties;
 - to make tables of normative values of soils durability characteristics as functions of physical characteristics and a degree of swelling.
6. To get reliable regression equations to calculate deformations of raising bases and foundations.

The subject of the research is engineering-geological, hydrogeological, natural-climatic and physical-mechanical factors of swollen soils, affecting the reliability of the system "bases - foundations of buildings and engineering structures".

Main results. To achieve these goals, 57 engineering and geological wells were drilled in 11 areas with swollen soils in the cities of Khartoum and Jeziri (Khartoum Elm., Khartoum Bur., Khartoum Ria, Khartoum Soba, Khartoum Jbra, Khartoum Nile, Khartoum Elamar, Je' Singh., Jazeera Madan, Jazeera Manag and Jazeera Elnishch.) (Fig. 3). Soil samples from different depths were taken from each well at almost the same time. Physical and mechanical properties were studied at the engineering and geological laboratory of Ribat University in Khartoum.

Table 2 shows the results of physical and mechanical properties of soils study.

Various analytical methods and mathematical modeling are now used to determine similar physical and mechanical properties of swollen soils on new construction sites and areas where the destruction of buildings and structures has already taken place.

Physical-mechanical properties of swollen soils are the end product of the influence of not one, but a whole set of natural and man-made processes (conditions of formation, flooding, anthropogenic load, etc.). These processes affect the interrelated change in soil properties and the nature of the relationships between them. But these links are not stored in "pure" data sets. Paired correlations between the observed values of variables actually make it impossible to determine the similarity of physical and mechanical properties and which processes are decisive in changes in the engineering and geological properties of swollen soils.

To determine similar properties of swollen soils in different parts of the study area, we used cluster analysis, and to identify processes that are decisive in changes in the engineering and geological properties of these soils - factor analysis. These research methods were developed by (Davis, 1990 and Jereskog et al., 1980). In hydrogeological and engineering-geological research they were widely used by (Reshetov, 2004; Seifeldin, 2007, 2008; Taranov, 2008, 2014; Chomko D.F. et al., 2002, 2012, 2004, 2014 and Chomko F.V. et al., 2014).

The essence of the agglomerative (unifying) cluster procedure is a step-by-step calculation of the Euclidean distance between all pairs of soil samples in different areas and combination of the pair at each step for which a minimum of this distance has been achieved. In our case, it is combining soils physical and mechanical characteristics. Engineering and geological surveys in Khartoum and El Jazeera were used to implement this technique. The sample consisted of 57 test soil samples and included the following predictors: γ , w , w_L , w_p , l_p , ϕ , c , ϵ_{sw} , p_{sw} , w_{sw} (thus, each soil sample was interpreted as a point in ten-dimensional space).

Based on the results of cluster analysis of the general data matrix, a diagram of Euclidean distances of the consolidation was constructed step by step (Fig. 4), as well as a dendrogram (Fig. 5) - a one-dimensional graph containing information about the location and numbers of objects and wells, interrelationships between different soil samples. Fig. 4 shows that all samples were combined in 56 steps with a minimum consolidation distance (Euclidean distance) in the first step of 0.000 and a maximum of 292,628 in the last step.

Considering the tree-like hierarchical structure in Fig. 5, it follows that it can be divided into seven clusters (see symbols), split into smaller subclusters. The first four clusters

(counting from right to left) are consolidated at short distances, from 0.000 to 99.812, which allows us to speak about the homogeneous properties of these soils. The soils of clusters 5–7 differ from the soils of the first four clusters and from each other: the Euclidean distances at which the consolidation took place, more than 125, indicate a noticeable difference in their physical and mechanical characteristics.

A taxonomy was performed to clarify the results - a hierarchical clustering of two equal matrices (obtained by dividing the total), characterizing the soils of Khartoum region and peripheral areas, which clearly shows a significant difference in their Euclidean distances.

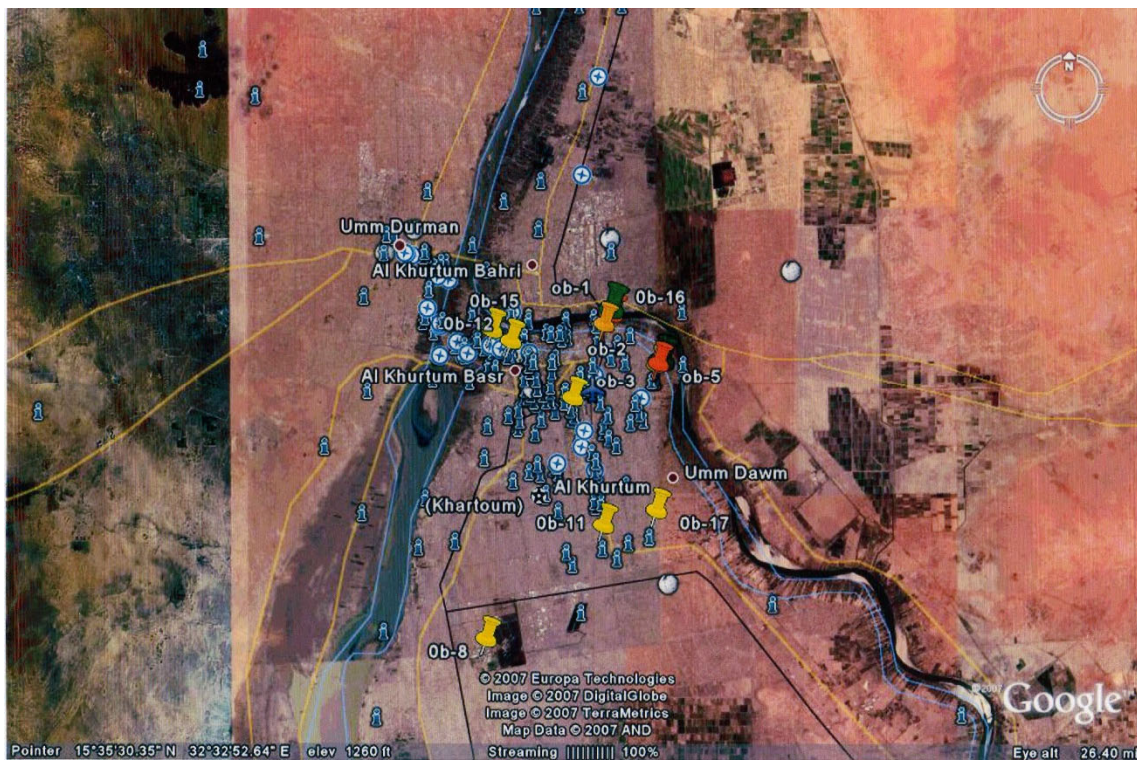


Fig. 3. A fragment of the space map of El Jazeera, where the buttons indicate the places of drilling wells and soil sampling

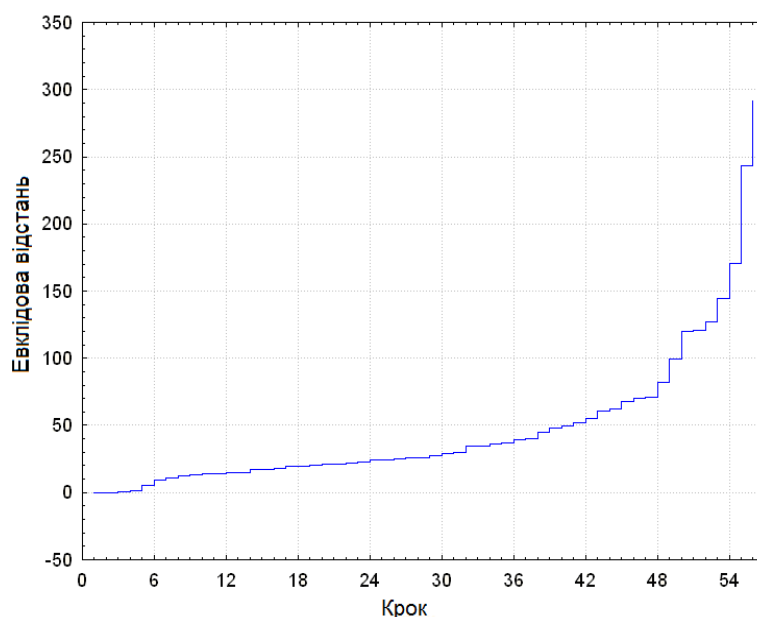


Fig. 4. Diagram of stepwise consolidating distances

Table 2

Physical and mechanical properties of soils

Area	No of well	Sampling depth	Specific gravity	Upper limit	Lower limit	Natural moisture	Plasticity number	Internal friction angle	Adhesion	Swelling pressure	Load bearing capacity
Khart(Elm) №1	1	2	19,1	58,0	22,8	16,6	35,2	33,0	20,0	120	146
Khart(Elm) №3	5	2	19,0	71,2	32,4	19,6	38,8	29,0	30,0	170	146
Khart Xapт (Bur) №8	1	2	19,2	101,0	24,0	20,1	77,5	28,0	30,0	205	156
Khart (Bur -2) №12	1	2	19,2	101,9	24,5	20,1	77,4	28,0	30,0	205	156
Khart (Bur -3) №13	1	2	19,1	53,8	15,2	12,0	38,6	28,0	25,0	143	156
Khart(Elm) №1	2	3	19,8	59,1	23,4	18,8	35,7	26,0	15,0	122	162
Khart(Elm) №1	6	3	18,9	57,1	21,7	17,6	35,4	27,0	35,0	128	162
Khart(Elm) №1	3	3	19,2	59,5	23,6	18,6	35,9	31,0	18,0	132	162
Khart (Ria) №4	5	3	17,4	59,5	25,0	18,9	34,5	32,1	18,7	136	169
Khart (Bur) №8	2	3	19,5	74,7	22,0	20,2	52,7	29,0	20,0	167	169
Khart (Soba) №10	2	3	19,4	62,7	21,3	17,4	41,4	29,0	25,0	157	153
Khart (Nile) №11	5	3	19,4	50,8	24,0	20,3	26,8	31,0	15,0	131	145
Khart (Nile) №11	4	3	19,5	56,6	24,8	20,3	31,8	27,0	40,0	136	145
Khart (Nile) №11	1	3	19,0	51,8	21,6	21,1	30,2	28,0	25,0	132	145
Khart (Bur -2) №12	2	3	19,5	74,7	22,0	20,2	52,7	29,0	20,0	167	156
Khart (Bur-3) №13	2	3	19,4	77,0	17,4	10,6	59,6	30,0	20,0	152	164
Khart(Elm) №1	7	4	19,3	106,1	31,5	21,0	74,6	31,0	35,0	200	171
Khart(Elm) №1	5	4	18,9	68,3	19,8	15,8	48,5	30,0	15,0	136	171
Khart (Bur) №8	3	4	19,3	53,9	22,0	19,7	31,9	22,0	50,0	125	169
Khart (Bur -2) №12	3	4	19,3	53,9	22,0	19,7	31,9	22,0	50,0	172	156
Khart (Bur-3) №13	3	4	19,0	65,7	17,9	11,5	47,8	25,0	30,0	151	179
Khart(Elm) №1	7	9	19,1	115,5	35,4	19,9	80,1	28,0	35,0	191	182
Khart (Soba) №10	1	9	19,2	80,9	17,3	16,8	63,6	24,0	30,0	168	180
Khart (Soba) №10	2	10	19,5	75,6	19,7	15,8	55,9	30,0	40,0	159	180
Khart (Nile) №11	3	10	19,6	51,9	24,0	21,1	27,9	23,0	30,0	139	169
Khart (Nile) №11	6	10	19,5	53,3	23,0	19,8	30,3	26,0	50,0	140	169
Khart (Soba) №10	4	12	19,5	83,4	18,8	15,0	64,6	32,0	20,0	127	180
Khart (Nile) №11	2	6	19,3	58,6	28,1	22,0	30,5	30,0	20,0	176	158
d'Jezz (Singh) №6	2	1	18,2	81,0	35,0	18,0	46,0	17,0	26,5	315	170
d'Jezz (Madan) №2	3	2	20,1	52,0	16,0	11,4	36,0	19,0	30,0	105	187
d'Jezz (Madan) №2	7	2	19,3	73,0	18,0	18,6	55,0	22,0	50,0	140	186
d'Jezz (Singh) №6	1	2	18,3	84,0	31,0	23,0	53,0	35,0	13,0	315	204
d'Jezz (Manag) №16	2	2	20,1	59,0	25,0	20,1	34,0	14,0	165,0	274	231
d'Jezz (Manag) №16	1	2	20,0	46,0	20,0	17,0	26,0	21,0	110,0	274	186
Khart(Elm) №19	3	2	20,6	69,0	25,0	19,5	44,0	9,0	129,0	131	194
Khart(Elm) №19	4	2	20,1	77,0	26,0	20,1	51,0	23,0	99,0	175	198
Khart(Elm-2) №20	9	2	19,3	54,0	24,0	14,1	30,0	37,0	51,6	220	201
Khart(Elm -2) №20	2	2	19,7	90,0	30,0	20,8	60,0	18,0	95,8	60	169
d'Jezz (Elnishch) №23	2	2	18,0	47,0	19,0	24,0	28,0	6,0	115,0	80	153
d'Jezz (Madan) №2	5	3	19,2	51,0	13,0	14,1	38,0	16,0	16,5	200	145
d'Jezz (Singh) №6	3	3	19,6	82,0	32,0	21,0	50,0	29,0	40,0	107	145
d'Jezz (Singh) №6	1	3	18,8	82,0	31,0	20,0	51,0	38,0	10,0	350	145
d'Jezz (Elnishch) №22	4	3	21,1	49,0	20,0	16,0	29,0	27,0	45,0	200	156
d'Jezz (Elnishch) №22	5	3	21,4	56,0	20,0	15,6	36,0	14,0	120,0	240	164
Khart (Elamar) №9	1	4	19,1	80,9	45,5	21,0	35,4	30,0	30,0	175	171
Khart (Elamar) №9	2	4	19,1	80,9	45,5	21,0	35,4	30,0	30,0	183	171
d'Jezz (Elnishch) №22	5	6	19,8	46,0	24,0	24,4	22,0	26,0	70,0	183	169
d'Jezz (Elnishch) №22	1	4	18,8	85,0	31,0	24,0	54,0	17,0	75,0	250	156
d'Jezz (Elnishch) №22	2	4	20,0	49,0	22,0	24,0	27,0	6,0	102,0	210	179
d'Jezz (Elnishch) №22	4	4	19,8	67,0	27,0	23,8	40,0	22,0	95,0	250	182
Khart (Jbra) №18	3	5	19,6	57,0	19,0	10,0	38,0	4,0	18,5	170	156
Khart (Jbra) №18	1	5	19,6	56,0	20,0	10,0	36,0	26,0	6,2	105	179
d'Jezz (Manag) №7	5	5	19,8	88,0	29,0	20,5	59,0	14,0	23,0	150	182
d'Jezz (Elnishch) №22	1	5	18,8	53,0	26,0	17,0	27,0	37,0	10,0	180	180
d'Jezz (Elnishch) №22	3	5	19,0	61,0	30,0	23,0	31,0	15,0	100,0	300	180
d'Jezz (Singh) №6	1	6	20,0	74,0	30,0	20,0	44,0	15,0	14,0	150	169
d'Jezz (Singh) №6	2	6	20,4	70,0	33,0	25,0	37,0	9,0	13,5	190	169

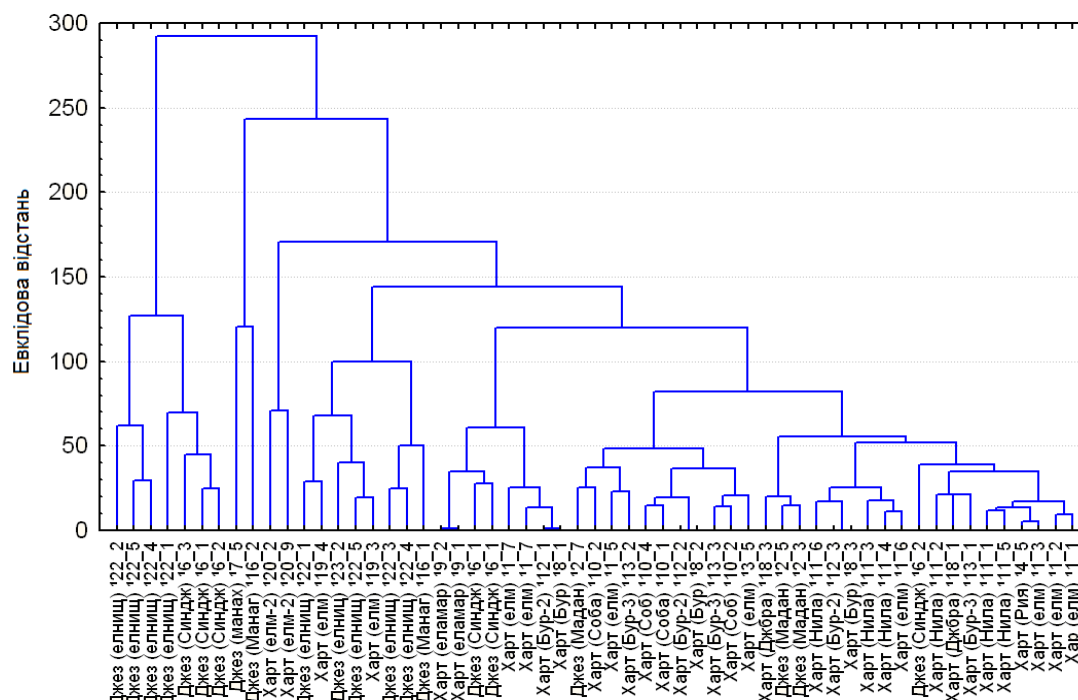


Fig. 5. Dendrogram combining 57 objects (10 parameters)

In Fig. 6 all points of soil sampling are plotted on the map of Mesopotamia. The cluster of objects in Khartoum and the adjacent area is noteworthy. This is explained, apparently by the factor of capitalism, by their sparseness in the rest of Mesopotamia. However, there is a visible trend, suggesting that the study area can be "divided" into two zones: Northern El Jazeera with Greater Khartoum where the soils are more homogeneous (the first four clusters), and Southern Mesopotamia where the soils are very different (clusters five - seven). Obviously, the boundary (dotted line) between these zones is quite conditional due to the lack of data because of a relatively small volume of construction in the agricultural part of the region.

At the next stage of data processing the overall matrix was subjected to factor analysis.

This method is one of the most effective means of identifying patterns hidden in data sets. As a rule, in engineering geology, there is no possibility to directly observe and measure factor processes. They can be judged only by the final results of the processes manifestation that are reflected in the values of different physical and mechanical characteristics of soils.

The factor analysis is a very effective means of compressing information by moving from the original data to new

variables - factors. There is a minimum number of new factors that are linear combinations of the source data, and these new variables contain the same amount of information.

According to the results of factor analysis (R-modification) of the initial matrix, a number of factors which account for 100% of the total effect on the indicators of physical and technical properties of swollen soils have been identified. Only three factors make a significant contribution, their weight after the rotation of the matrix being more than 10%. They reflect the contribution of each of the factors to the total variance of the sample.

In addition, factor analysis revealed characteristic elements of physical and technical characteristics of swollen soils in each of the factors (Table 2).

The first factor (weight 22.65%) contains the following soil properties: natural moisture (bond strength 0.738074), plasticity number (bond strength 0.728427) and lower limit (bond strength 0.400961). Other elements do not make a significant contribution to this factor due to their bonding. Characteristic elements of the first factor are natural humidity, the amount of plasticity and the lower limit.

Table 3

Factor loads after rotation (R-modification)

Elements	Factors		
	F 1	F 2	F 3
Specific weight	-0,068978	0,037214	0,138759
Top limit	-0,191672	-0,512390	-0,042167
Low limit	0,400961	0,093466	0,891289
Natural humidity	0,738074	0,100484	0,137497
Plasticity number	0,724027	-0,172343	-0,070449
Angle of internal friction	0,048338	0,045934	0,966581
Adhesion	-0,002466	0,717359	0,142884
Swelling pressure	0,171705	-0,748681	-0,038446
Swelling humidity	0,039216	0,158950	0,195642
Number of wells	57	57	57
Value of factors, %	22,65	15,09	10,50

The second factor (weight 15.09%) includes swelling pressure (bond strength -0.748681), adhesion (0.717359) and upper limit (-0.512390). The swelling pressure and the upper limit are included in this factor with a negative bond strength. Other elements do not significantly contribute to this factor due to the bonding strength. Characteristic elements of the second factor are the pressure of swelling and adhesion.

The third factor (weight 10.50%) includes the angle of internal friction (bond strength 0.966581) and the lower limit (0.891289), which are the characteristic elements of this factor.

The characteristic elements of each factor are used to compile the regression equation, determining the characteristics of soil strength φ and c in different zones of Mesopotamia.

To analyze the obtained factors distribution on the territory of Mesopotamia, the load of each of them on all wells was determined, using Q-modification of factor analysis.

This allowed to draw a map-scheme of factor loads. Distribution of these three factors values in the territory of Mesopotamia is shown in Fig. 6.

Analyzing the joint distribution of all three factors in Mesopotamia, several areas where two or three factors act simultaneously, can be identified. Thus, the first and second factors intersect in the area of sites № 18 and № 10 in Khartoum. The same is true between № 5 and № 22 in El Jazeera. In the area of sites № 3, № 20 and № 19 in Khartoum, the second and third factors intersect.

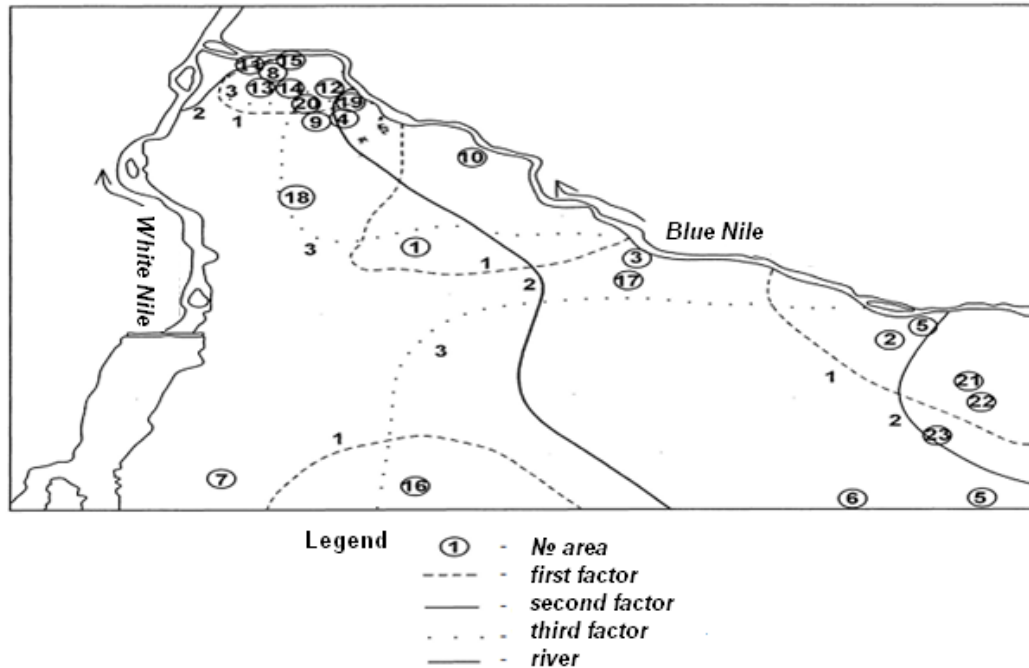


Fig. 6. Factor distribution scheme

The intersection of the same factors is observed in the area between sites № 3 and № 16 in El Jazeera. The first and third factors intersect in the area of site № 9 in Khartoum. The intersection of the same factors is observed in the area between sites № 3 and № 5. This indicates the similarity of engineering and geological processes in these areas.

At the final stage the regression equation was obtained to determine the characteristics of soil strength in the first zone (correlation coefficients are equal to 0.95 and 0.545,

respectively) by the method of stepwise regression analysis, using characteristic elements.

$$\varphi = 13.86 \cdot \gamma - 0.014 \cdot I_r - 237.48;$$

$$c = 17.23 \cdot \gamma + 0.133 \cdot I_r - 300.45.$$

Using these expressions, the values of the internal friction angle φ and the specific adhesion c due to the degree of soil swelling were calculated. The obtained results are given in Table 4 and can be used in the design of buildings and structures in Greater Khartoum and Northern El Jazeera.

Table 4

Normative values of expansive soil characteristics in Greater Khartoum and Northern El Jazeera

Degree of swelling	$I_p, \%$	Index	$\gamma, \text{кН/м}^3$											
			18,2	18,4	18,6	18,8	19	19,2	19,4	19,6	19,8	20	20,2	20,4
Low	<20	φ	15	17	20	23	26	28	31	34	37	39	42	45
		c	16	19	23	26	29	33	36	40	43	47	50	54
Average	20–35	φ	14	17	20	23	25	28	31	34	36	39	42	45
		c	17	20	24	27	31	34	37	41	44	48	51	55
High	350	φ	14	17	20	22	25	28	31	34	36	39	42	45
		c	19	22	26	29	33	36	39	43	46	50	53	57
Very high	>50	φ	14	17	20	22	25	28	31	33	36	39	42	44
		c	20	23	27	30	34	37	40	44	47	51	54	58

A detailed regression analysis of different predictors interdependence was also performed, the results of which can also be used in design practice. In particular, we obtained the equation to calculate the angle of internal friction φ and

specific adhesion c as a function of the porosity coefficient (e) and the percentage content (k) in swollen soils (expansive soil) of clay fractions with a diameter of 0.002 mm. In addition, a regression equation (in the common form for a foreign user)

to determine the relative swelling ϵ_{sw} and swelling pressure p_{sw} was built. It can be used in test calculations of deformations of bases and foundations rise:

$$\epsilon_{sw} = 0.130wL + 0.172w - 4.932;$$

$$p_{sw} = -0.905wL + 1.244wL + 0.892w + 61.951.$$

Conclusions. 1. The cluster analysis method, based on the construction of diagrams of Euclidean distances and dendrograms of objects association, has found that physical and mechanical properties of soils in the state of El Jaseera in Mesopotamia (the area between the White and Blue Nile) change in the direction from north to south. According to the results of the study, it is proposed to divide the whole region into two unequal zones.

2. According to the results of a factor analysis, the most significant factors, operating in the study area, are identified. This allowed to make maps-schemes of factor loads on the basis of positive and negative load factors. Analyzing the joint distribution of three factors in Mesopotamia, we can identify several areas where two or three factors act simultaneously. This indicates the similarity of engineering and geological processes that take place in these areas.

3. The results of a factor analysis of experimental data revealed physical characteristics of soils, which have the greatest impact on mechanical ones. Such predictors for zone I, covering about 80% of the territory of Mesopotamia, are the specific gravity γ and the number of plasticity I_r .

4. Multiple step-by-step regression analysis of these physical and mechanical properties of the swellable soils of Mesopotamia in zone I, allowed to establish reliable regression dependences between the angle of internal friction φ and the number of plasticity I_r . With the help of these dependencies, tables of normative values of soil strength characteristics as a function of physical characteristics and degree of swelling were compiled. They are recommended for practical application in foundations design of low-rise buildings and structures in Greater Khartoum and Northern El Jaseera.

5. Reliable regression equations have been obtained. They differ from those used in foreign practice by numerical coefficients, making it possible to calculate deformations of the rise of bases and foundations.

References / Список використаних джерел

- Amjadi, A., Chomko, D.F., Rahbar, E. (2014). Case Record of Multivariate Statistical Analysis in the Groundwater Study of the Western Part of Iran (The Zagros Mountains). *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 4(2s). Text Road Publication. Retrieved from www.textroad.com.
- Chomko, D.F., Chomko, F.V., Seifeldin, G. Kh., Taranov, V.G. (2012). Experience of applying cluster analysis in study of swelling soils of Sudan. *Bulletin of V.N. Karasin Kharkiv National University*, 1033. [in Russian]
- Chomko, D.F., Koshliakov, O.Ye., Chomko, F.V., Udalov I.V., Chomko, R.F. (2017). Ukrainian-Russian-English dictionary-reference book of hydrogeological terms. Kyiv: Publ.house "Kyiv university". [in Ukrainian]
- Chomko, D.F., Reshetov, I.K., Chomko, F.V., Chomko, R.F. (2002). Multi-dimensional statistical analysis in the study of man-made groundwater pollution. *Geological Journal*, 2. [in Russian]
- Chomko, D.F., Reshetov, I.K., Chomko, F.V., Chomko, R.F. (2004). Multi-dimensional statistical analysis in hydrogeology. Kyiv: Publ.house "Kyiv university" [in Ukrainian]
- Chomko, F.V., Chomko, D.F., Taranov, V.G. (2014). Complex application of multidimensional statistical analysis in studies of swollen soils as the basis of foundations. *Bulletin of Kharkiv National University*, 1128. [in Ukrainian]
- Davis, D.S. (1990). Statistical analysis of data in geology. Moscow: Nedra. [in Russian]
- El Turabi, M.A. (1993). A Study on Expansive Soils in Sudan. U of K., Khartoum, Sudan.
- Elsayed, A.E. (1999). Soil Mechanics. Cairo: Scientific House Corporation.
- Jereskog, K.G., Klován, D.I., Rejment, R.A. (1980). Geological factor analysis. Leningrad: Nedra. [in Russian]
- Nthesis, F. (1985). Submitted for Degree of M.Sc. Civil Engineering BRRI, U of K., Khartoum, Sudan.
- Potts, D.V. and Zdrakovic, L. (2001). Finite Element Analysis on Geotechnical engineering Application. Publisher: Thomas Telford, London.
- Poulus, H.G. (2001) Piled Rafts in Swelling or Consolidating Soils. *Journal of Geotechnical Engineering* Vjl., 119, 2.
- Proceeding of the Seminar on Expansive Clay Soils Problem in Sudan. (1983). University of Khartoum.
- Seifeldin, G.H., Taranov, V.G. (2008). Foundations on the swelling soils of Sudan. Municipal economy utilities. Kharkiv: NAME. [in Russian]
- Seifeldin, G.H. (2007). Radiography of the swelling soils of the Sudan. Municipal economy utilities. Kharkiv: NAME.
- Seifeldin, G.H., Taranov, V.G., Chomko, F.V. (2008). Application of multi-dimensional statistical analysis in the study of swelling soils of Sudan. *Bulletin of Kharkiv National University*, 824. [in Russian]
- Shutenko, L.N., Gilman, A.D., Lupan, Yu.T. (1989). Bases and foundations. Kiev. [in Russian]
- Sorochan, E.A. (1989). Construction of structures on swollen soils. Moscow: Stroyizdat. [in Russian]
- Taranov, V.G., Alexandrovich, V.A., Luchkovsky, I.Ya. et al. (2014). Peculiarities of the "structure-foundation" system's behavior under static and dynamic loads. *World of Geotechnics*, 1. Retrieved from: <http://nbuv.gov.ua>.

Надійшла до редколегії 01.08.21

Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: Dimath@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
Ф. Чомко, доц.,
E-mail: Chomkovf@ukr.net;
Н. Черкашина, ст. викл.,
E-mail: n.i.cherkashina@karazina.ua,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Факультет іноземних мов, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна;
В. Таранов, д-р техн. наук, проф.,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
Факультет геотехніки, вул. Марш. Бажанова, 17, м. Харків, 61000, Україна;
Г. Сейфельдін, д-р філософії, канд. техн. наук, доц.,
Хартумський університет, м. Хартум, Судан

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ БАГАТОВИМІРНОГО СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ НАБРЯКАЮЧИХ ҐРУНТІВ ЯК ОСНОВИ ФУНДАМЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД У СУДАНІ

Запропоновано новий спосіб дослідження набрякаючих ґрунтів як основи фундаментів методами математичної статистики, що включає кластерний, факторний і кореляційно-регресійний аналізи. За результатами цих аналізів встановлено нормативні значення характеристик міцності цих ґрунтів залежно від їх фізичних властивостей і ступеня набрякання, меж застосування, переважальні фактори і кореляційні залежності між різними показниками властивостей ґрунтів. Запропоновано спосіб зонування досліджуваної території, що призводить до можливості диференційного застосування нормативних характеристик ґрунтів. Розроблено пропозиції з проектування основ і фундаментів на набрякаючих ґрунтах. Методи опробовано на ґрунтах Судану.

Ключові слова: набрякаючі ґрунти; фізичні властивості; ступінь набрякання; несуча здатність; зонування території; фундаменти; кластерний, факторний і кореляційно-регресійний аналізи; переважальні фактори і кореляційні залежності.

Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: Dimath@ukr.net,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
НИИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
Ф. Чомко, доц.,
E-mail: Chomkofv@ukr.net;
Н. Черкашина, ст. преп.,
E-mail: n.i.cherkashina@karazina.ua,
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина;
В. Таранов, д-р техн. наук, проф.,
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова,
ул. Марш. Бажанова, 17, г. Харьков, 61000, Украина;
Г. Сейфельдин, д-р философии, канд. техн. наук, доц.,
Хартумский университет, г. Хартум, Судан

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ КАК ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СУДАНЕ

Предложен новый способ исследования набухающих грунтов как основания фундаментов методами математической статистики, включающей кластерный, факторный и корреляционно-регрессионный анализы. По результатам этих анализов установлены нормативные значения характеристик прочности этих грунтов в зависимости от их физических свойств и степени набухания, границы применения, преобладающие факторы и корреляционные зависимости между разными показателями свойств грунтов. Предложен способ зонирования исследуемой территории, что позволяет дифференцировано применять нормативные характеристики грунтов. Разработаны предложения по проектированию оснований и фундаментов на набухающих грунтах. Методы испытаны на грунтах Судана.
Ключевые слова: набухающие грунты; физические свойства; степень набухания; несущая способность; зонирование территории; фундаменты; кластерный, факторный и корреляционно-регрессионный анализы; преобладающие факторы и корреляционные зависимости.

УДК 624.15

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.12>

С. Бортник^{1,6}, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;
О. Ободовський¹, д-р геогр. наук, проф.;
П. Гершевський², д-р геогр. наук, проф.;
Я. Шманьда³, д-р геогр. наук, проф.;
М. Луц⁴, д-р геогр. наук, проф.;
М. Хабель⁵, д-р філософії;
К. Вітковський⁶, д-р філософії;
Н. Погорільчук¹, канд. геогр. наук, доц.;
¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна;
²Інститут географії та просторового розвитку, Польська академія наук,
м. Торунь, Республіка Польща;
³Педагогічний університет імені Комісії національної освіти
м. Краків, Республіка Польща;
⁴Ягеллонський університет, м. Краків, Республіка Польща;
⁵Університет Казимира Великого, м. Бидгощ, Республіка Польща;
⁶Університет Яна Кохановського, м. Кельце, Республіка Польща

РЕАКЦІЯ БАГАТОРУКАВНИХ РІЧКОВИХ СИСТЕМ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

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

Експлуатація гідроелектростанцій (ГЕС) є однією з основних причин трансформації річкового стоку. Зміна гідрологічного режиму впливає на ряд інших процесів, що відбуваються в руслі річки, у тому числі на трансформацію її геоморфологічних особливостей. Висвітлено вплив Канівської та Влоцлавецької гребель на гідрологічний режим Середнього Дніпра та Нижньої Вісли. За допомогою методу ІНА (Indicators of Hydrologic Alteration) та RVA (The Range of Variability Approach) визначено характер та масштаби змін режиму стоку річок Дніпра та Вісли, які спричинені функціонуванням гребель. Продемонстровано, що робота ГЕС, особливо в каскаді, є причиною змін рівня, швидкості та варіативності потоку. Оцінено, як зміна умов стоку у зв'язку з дефіцитом наносів вплинула на трансформацію річищ Вісли та Дніпра на ділянках, розташованих нижче від гребель ГЕС. За нашими результатами досліджень, реакція річкової системи на зміни режиму течії, зумовлена роботою Канівської та Влоцлавецької ГЕС, полягала у: 1) зміні ширини та глибини річищ; 2) зміні розмірів форм, що розділяють окремі протоки; 3) фіксації багаторукавної річкової системи. Більш динамічні потоки води за рахунок роботи ГЕС модифікують і пришвидшують природний процес еволюції звивистої річкової системи в багаторукавну, спричиняючи ерозію і звуження основних річищ. Як наслідок, бічні русла (протоки та відгалуження) займають вище гіпсометричне положення над основним руслом. Разом з тим вирівнювання потоку води в руслах спричиняє зниження рівня води і зникнення потоку в бічних руслах. У результаті розростаються острови, раніше розділені цими протоками. Сполучаючись між собою, вони утворюють широкі міжруслові форми.

Ключові слова: гідроелектростанція, гребля, ерозія, річкова система, русло, еволюція багаторукавних русел, річка Дніпро, річка Вісла.

В усьому світі греблі, в першу чергу ті, на яких збудовані ГЕС, значною мірою впливають на річкові системи. Найважливішим ефектом роботи гідроелектростанцій є трансформація гідрологічного режиму річки (Richter et al., 1996; Vörösmarty et al., 1997; Peeg et al., 2003; Gao et al., 2012; Zhang et al., 2015). У Європі 92 % річкового стоку трансформовано греблями (Nilsson et al., 2005). Крім впливу на режим стоку води, робота ГЕС також порушує безперервність транспортування уламкових наносів, що, у свою чергу, впливає на хід ерозійно-аккумулятивних процесів у руслі річки та на заплавах, викликаючи таким чином зміни прояву руслових процесів у річковій системі (Church, 1995; Kondlof, 1997; Babiński, 2002; Walling, Fang, 2003).

Геоморфологічним ефектом роботи гідроелектростанцій найчастіше є поглиблення та звуження русла річок нижче гребель (особливо на пригребельних ділянках) у результаті глибинної ерозії (Williams, Wolman, 1984; Brandt, 2000; Magilligan, Nislow, 2005; Graf, 2006; Obodovsky et al., 2006; Słowik et al., 2018). Звуження русла також може відбуватися як результат накопичення алювію вздовж його берегів (Dean et al., 2016). Причиною скупчення алювію є велика кількість завислих речовин, що надходять у русло головної річки з водами її приток, або ж зниження рівня води, що зумовлює надлишок матеріалу, який транспортується річкою. Розширення русла річки може відбуватися внаслідок бічної ерозії, якщо породи дна стримують поглиблення річки або в субстраті дна є стійкі до ерозії відклади (Williams, Wolman, 1984;

Chien, 1985; Gierszewski et al., 2020). Еволюція річкових систем під впливом гребель відбувається в різних напрямках – від розширеного до блокуючого, звивистого або багаторукавного русла (Rinaldi, 2003; Wang et al., 2007; David et al., 2016; Słowik et al., 2018).

Оскільки реакція багаторукавних річкових систем на ерозію, спричинену роботою ГЕС, ще недостатньо вивчена, дослідження впливу цих споруд на руслові процеси було проведено на прикладі рік Вісли та Дніпра. Порівняльний аналіз руслових систем цих річок показує, що обидві вони репрезентують багаторукавну систему русел (Gierszewski et al., 2020; Szymańska et al., 2021). Метою статті є дослідити зміни в положенні та структурі річищ цих двох річок, у тому числі виявити форми, які переважно розділяють русло на рукави, що спричинено роботою гідроелектростанцій. Зміни параметрів течії Дніпра та Вісли, викликані роботою Канівської (Дніпро) та Влоцлавецької (Вісла) гідроелектростанцій, представлені за допомогою індексів ІНА (Richter et al., 1996).

Територія досліджень. Для досягнення мети дослідження було обрано дві ділянки спостереження. Перша – це фрагмент дна долини Вісли нижче греблі у Влоцлаву, а друга – фрагмент дна долини Дніпра нижче греблі Канівської ГЕС (рис. 1).

Гребля Канівської ГЕС є другою (за течією) у Дніпровському каскаді водосховищ. Вона була споруджена у 1972 р. Об'єм і мінливість витрат води з водосховища залежить від добового та тижневого режиму роботи греблі (Denisowa et al., 1989). Водне господарство та

функціонування екосистеми Канівського водосховища визначаються, насамперед, об'ємом та режимом приливу води з верхньої частини каскаду (Київське водосховище) та річки Десна, яка є найбільшою притокою р. Дніпро на ділянці між Київською і Канівською греблями. Режим роботи Канівської гідроелектростанції змінювався двічі (Obodovskyi et al., 2020). У перший період, з 1973 по 1990 р., ГЕС діяла у так званому піковому режимі, і активувалася лише під час найбільшої потреби в електроенергії (рис. 2а). У другому періоді, який розпочався в 1990 р. і триває донині, Канівська ГЕС працює в річковій системі з екологічними витратами приблизно $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ з піковими їх збільшеннями, що відбуваються лише за найбільшої потреби в електроенергії (рис. 2а).

Влоцлавецьку ГЕС введено в експлуатацію в 1969 р. Функціонування водосховища та греблі у Влоцлавку

визначається насамперед гідрологічним режимом Вісли. Це пов'язано з відсутністю значних притоків, високою пропускну здатністю, швидким водообміном (у середньому 6 днів) та обмеженими можливостями її гідравлічного впливу (Gierszewski, 2018). Режим експлуатації Влоцлавецької ГЕС змінювався двічі. У перший період, з січня 1970 р. по лютий 2002 р., електростанція працювала в піковому режимі – двічі на добу. Решту часу доби ГЕС працювала в проточному режимі (рис. 2б). Другий період, що характеризувався проточною експлуатацією греблі, тривав з лютого 2002 р. Його запровадження було пов'язане з імплементацією положень водного законодавства Республіки Польща від 18 липня 2001 р. Відтоді ГЕС функціонує безперервно протягом частини року в проточному (взимку та навесні) та інтервенційному режимах (літо та осінь) (рис. 2б).

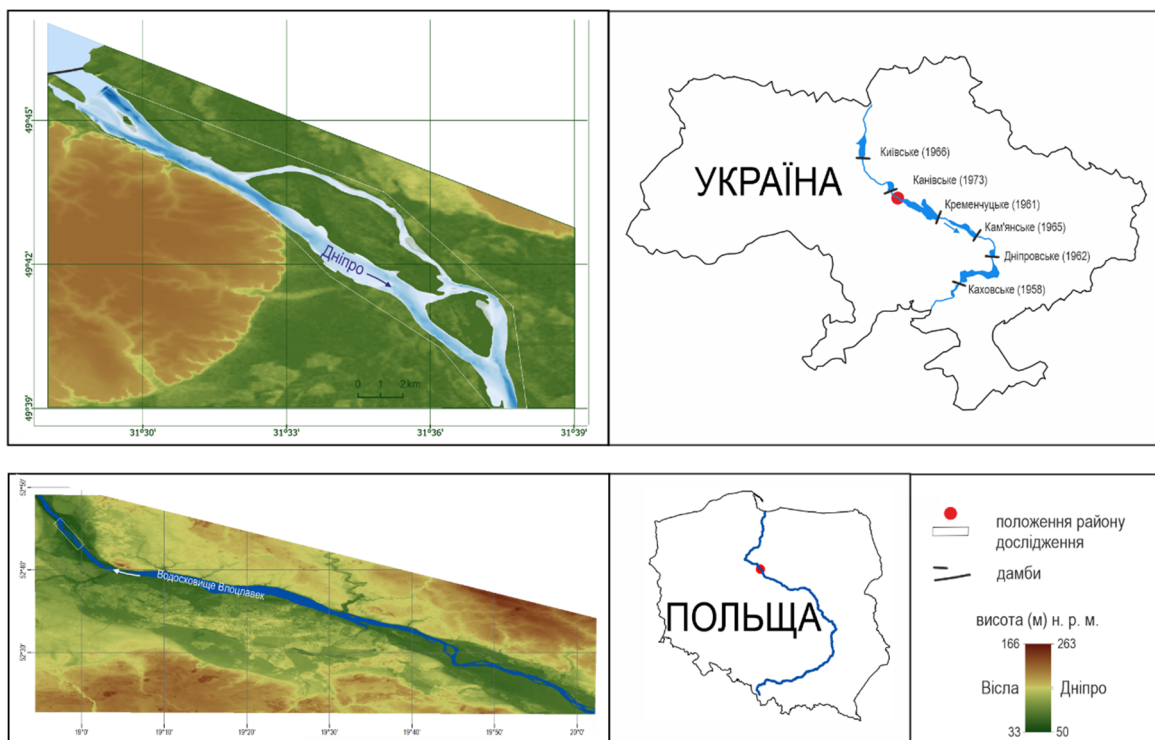


Рис. 1. Розташування ділянок дослідження

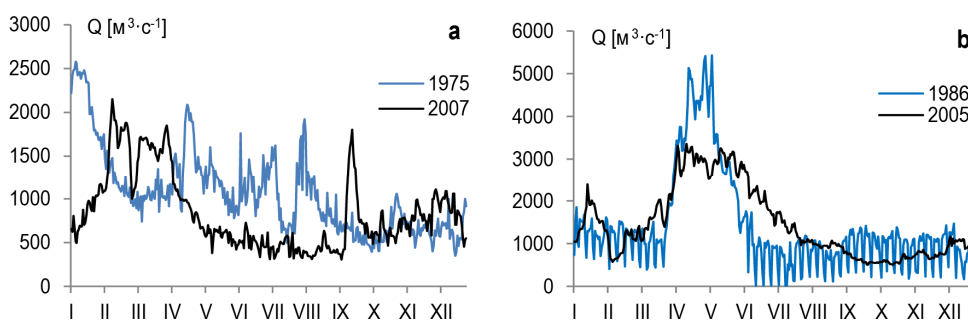


Рис. 2. Приклади гідрографів потоку в різних режимах роботи гідроелектростанцій:

а – Вісла нижче греблі у Влоцлавку (1975 р. – піковий режим проходження витрат, 2007 р. – проточний режим);
б – Дніпро нижче греблі в Каневі (1986 р. – піковий режим проходження витрат, 2005 р. – проточний режим)

Матеріали та методи дослідження. Вплив гребель на розмір і характер трансформації річкового потоку вивчався багатьма авторами за допомогою різноманітних гідрологічних показників (Olden, Poff, 2003; Magilligan, Nislow, 2005; Poff et al., 2007; Gao et al., 2009; Torabi

Haghighi, Kløve 2013; Wang et al., 2016; Li et al., 2017). У нашому дослідженні ми використовували індикатори гідрологічних змін (IHA) (Richter et al., 1996).

Зміни в положенні русла Дніпра були проаналізовані нами за три періоди: до будівництва водосховища,

відразу після зміни режиму роботи греблі з пікового на проточний і в наш час. З метою стандартизації рівнів води було створено три карти руслової системи на основі батиметричних карт, складених у 1961, 1980 та 2015 рр. (рис. 3). Базовою картою для дослідження стала батиметрична карта, укладена за власними даними, вимірними в польових умовах 25–27 липня 2015 р. Архівні батиметричні дані за 1961 та 1980 рр. отримано за даними, опублікованими у вигляді

навігаційних карт Кременчуцького водосховища у масштабі 1 : 25 000. Матеріали 1961 р. опубліковані в 1962 р. Міністерством морського флоту Союзу Радянських Соціалістичних Республік (СРСР), а матеріали за 1980 р. опубліковані в 1981 р. Дніпровським басейновим управлінням водних шляхів. Рівневий режим русла був стандартизований для середнього рівня води гідропоста Канів, що становить 80,7 м над рівнем моря.

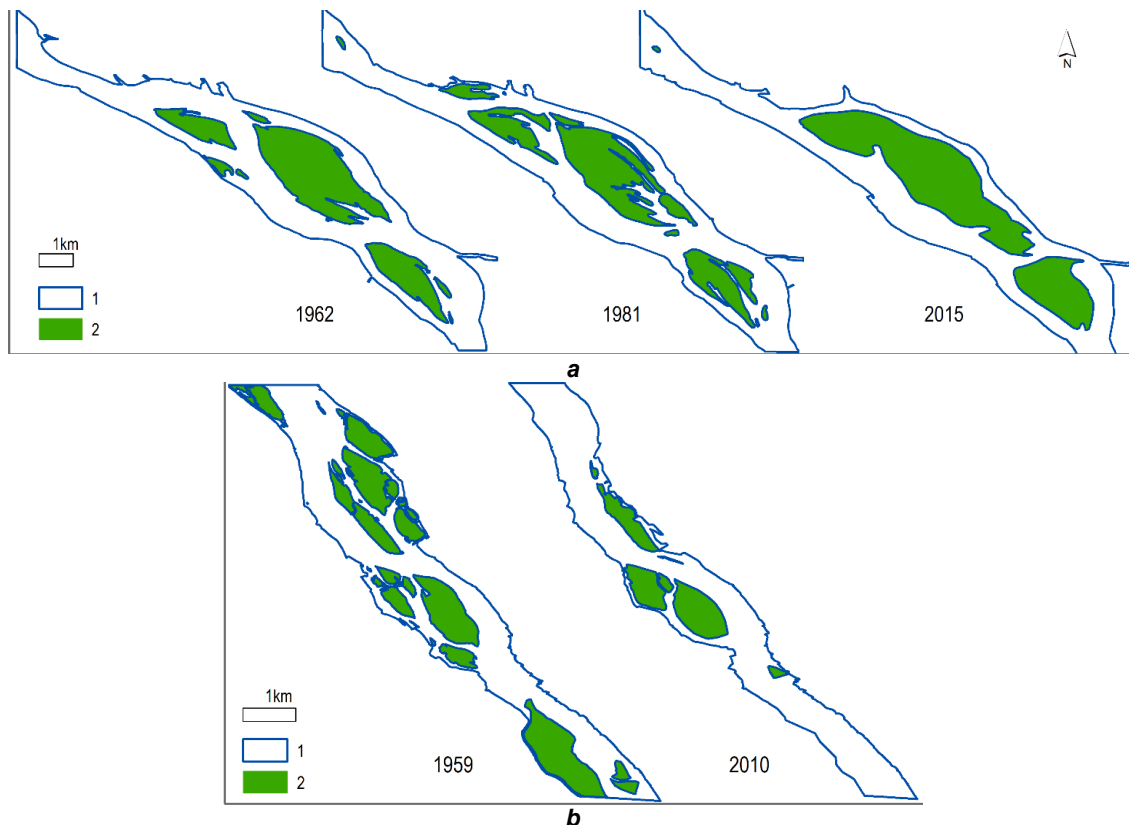


Рис. 3. Зміни в положенні русла Дніпра нижче греблі Канівської ГЕС (а) та русла Вісли нижче греблі "Влоцлавек" (б): 1 – русло річки, 2 – міжруслова форма

Значення індексів ІНА, що характеризують витрати води у Дніпрі в перерізі Канівської греблі, порівнювались нами з витратами Десни (гідропост Літки) в 1985–2013 рр.

Вплив греблі Влоцлавецької ГЕС на Віслу було досліджено шляхом порівняння характеристик її течії за період 1970–2015 рр. за даними гідропоста, розташованого перед греблею водосховища в Кемпі Польській, з характеристиками течії гідропоста Влоцлавека, розташованого в 4,4 км нижче греблі.

Разом з тим варто відмітити, що обидві річки відрізняються за розміром і характером трансформації потоку при проходженні через гідротехнічні споруди.

З метою підтвердження висловленого було оцінено зміни положення та структури русла Дніпра за допомогою програми ArcGIS 10.4. (рис. 3а). Аналіз змін русла Вісли за час функціонування греблі у Влоцлавку проведено на ділянці від 10 до 19 км нижче греблі (рис. 3б).

Для порівняльних досліджень вищевказаних ділянок річок було використано аерофотознімки 1959 р. (до будівництва греблі) та 2010 р. (40 років після побудови греблі) у масштабі 1 : 10 000 та 1 : 26 000 відповідно. Типи і розміри руслових форм, що розділяють русла, визначались на основі значення безрозмірного параметра довжини (L/w) і безрозмірного параметра ширини (w'/w). Для

їх розрахунку було проведено вимірювання: довжини форми (L), ширини русла (w) і ширини форм, що розділяють русло (w'). Далі, при аналізі значень безрозмірних параметрів довжини та ширини було виділено дві групи міжруслових форм: 1) острови та 2) міжруслові форми (Brice, Blodgett, 1978; Szymańska, Luc, 2010).

Результати дослідження.

Трансформація потоків. Робота ГЕС у Каневі та Влоцлавку мало вплинула на трансформацію середньомісячних витрат. Про це свідчать низькі значення коефіцієнта гідрологічної зміни (ГЗ) (рис. 4). Вплив Канівського водосховища із січня до кінця березня збільшував стік Дніпра і дещо зменшував його у травні. У випадку річки Вісла, вплив водосховища відзначався нижчими значеннями середніх місячних витрат нижче греблі.

Вважається, що греблі та водосховища мають особливо сильний вплив на режим високих і низьких витрат. Однак це значною мірою залежить від параметрів і функцій, які виконують ці об'єкти (Magilligan and Nislow, 2005; FitzHugh and Vogel, 2011). Результати аналізу показали, що вплив Канівської ГЕС на трансформацію маловоддя більший, ніж у випадку ГЕС у Влоцлавку. Робота гідроелектростанції в умовах пікового режиму характеризувалася значним зниженням величини найнижчих витрат у

році. Цей напрямок змін також вплинув на значну трансформацію базової течії, яка за Канівською греблею нижча, ніж у гідрометричному профілі еталонної річки (рис. 4). Проточна експлуатація Канівської греблі дозволила зберегти природні характеристики течії Дніпра під час найбільших повеней, тобто у квітні та травні. Відмічено зниження частоти максимумів потоку в діапазоні, визначеному методом RVA. У разі 1- і 3-денних максимумів вона компенсується більшою частотою їх появи вище верхньої межі RVA, а в разі 7- і 30-денних максимумів – нижче нижньої межі. Отже, можна зробити висновок, що робота ГЕС в піковому режимі спричиняє незначне збільшення частоти великих короточасних піків водного потоку. Аналіз впливу греблі у Влоцлавку на хід проходження повені показав, що медіани максимальних витрат, за винятком 1-денного максимуму, були вищими на профілі Кемпа Польська, розташованому перед водосховищем.

Серед усіх проаналізованих індексів ІНА параметри IV і V груп характеризують кількість і тривалість періодів (імпульсів) низьких потоків ($Q < 25\%$) та періодів (імпульсів) високих потоків ($Q > 75\%$) та динаміку їх змін (рис. 4).

Значна трансформація параметрів гідрологічного режиму спостерігається на багатьох річках, де працюють гідроелектростанції (Magilligan and Nislow, 2005; Richter et al., 2006; Pyron and Neumann, 2008; Costigan and Daniels, 2012; Zhang et al., 2016; Timpe and Kaplan, 2017).

Експлуатація гідроелектростанції в Каневі спричинила збільшення кількості періодів, які характеризувалися високими і низькими потоками, в шість разів під греблею, порівняно з еталонним гідрометричним профілем на Десні. Проте їхня тривалість була в 23 та 12 разів меншою відповідно. Щодо експлуатації ГЕС у Влоцлавку, то кількість періодів, які характеризувалися високими потоками, була лише вдвічі більшою, а у випадку низьких – втричі, порівняно з ділянкою Вісли над водосховищем. Середня тривалість цих періодів також скоротилася на 4 і 3 дні відповідно. Коефіцієнт НА для цієї групи параметрів досягає високих значень, що свідчить про суттєву трансформацію особливостей гідрологічного режиму. Значна зміна параметрів, що характеризують динаміку течії, пов'язана з періодом роботи ГЕС у піковому режимі. Це відображається на значеннях медіанної швидкості збільшення і зменшення течії та кількості цих змін. Вплив греблі у Каневі збільшував течію Дніпра приблизно в п'ять разів, а у випадку впливу греблі у Влоцлавку на течію Вісли – у два рази (рис. 5). Про значну трансформацію цих параметрів свідчать коефіцієнти НА, які в межах, встановлених RVA, досягають максимальних значень (рис. 4). Хід медіанного збільшення добового потоку відображає момент зміни режиму роботи ГЕС з пікового на проточний, що спостерігається на Дніпрі під Канівською греблею (рис. 5а).

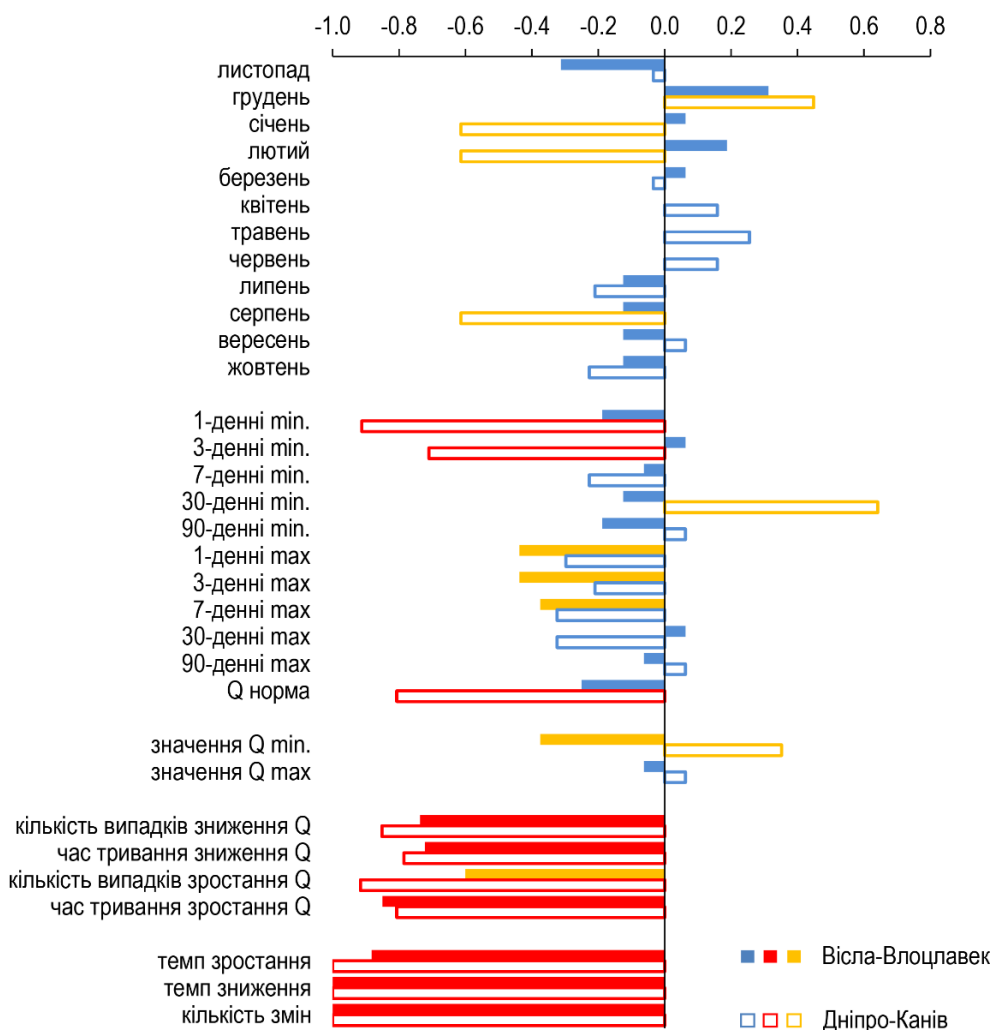


Рис. 4. Значення коефіцієнта гідрологічної трансформації (НА) для 32 показників гідрологічної трансформації (ІНА) під час роботи гідроелектростанції у Влоцлавку в 1970–2015 рр. та в Каневі в 1985–2013 рр. Синій колір відображає низьку конверсію, помаранчевий – середню конверсію, червоний – високу конверсію

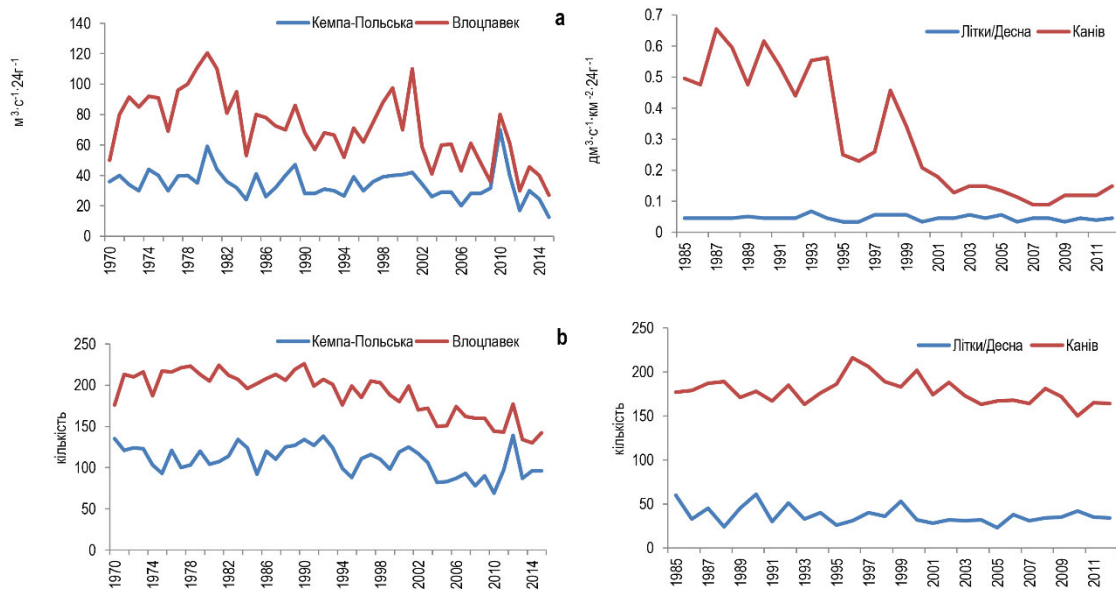


Рис. 5. Змінність медіанної швидкості зростання витрат води (а) та кількості інверсій течії (б) у 1970–2015 рр. (Вісла) та 1985–2013 рр. (Дніпро)

Зміни в будові русла. Будова та форми русла Дніпра на досліджуваній ділянці показано на рис. За станом на 1962 р. – до будівництва греблі, 1981 р. – після будівництва греблі та 2015 р. – після зміни режиму роботи Канівської гідроелектростанції. Зміни структури русла Дніпровської річкової системи досліджували шляхом вимірювання ширини руслових проток та форм, що їх розділяють у два періоди: 1962–1990 рр. (період з урахуванням років роботи ГЕС у піковому режимі); 1991–2015 рр. (період, включаючи роки роботи електростанції в проточному режимі). Детальні результати цих досліджень опубліковані в статтях (Obodovskyj et al., 2001, 2002, 2004, 2006, 2020; Szmańda et al., 2021). Встановлено, що у нижньому б'єфі ділянки русла Дніпра домінують видовжені форми. В еволюції руслової системи можна спостерігати загальну тенденцію до збільшення площі руслових форм, що розділяють протоки.

Розташування русла Вісли до (1959 р.) і після (2010 р.) будівництва греблі, на відрізок від 10 до 20 км нижче греблі у Влоцлавку, показано на рис. 3b. Результати морфометричного аналізу річкових форм у вивченій частині долини Вісли як у 1959, так і в 2010 р., детально описані у статтях (Gierszewski et al., 2015, 2020). На їх основі можна зробити висновок, що до будівництва греблі у Влоцлавку у руслі Вісли домінували річкові острови. Серед форм, що розділяють протоки, переважали видовжені та вузькі. Після понад 40 років експлуатації Влоцлавецької ГЕС кількість форм, розташованих у руслі річки нижче греблі, зменшилася майже в сім разів, а їхня загальна площа – вдвічі. Тут все ще домінують острови, які стали коротшими і ширшими. Середня ширина проток дещо зросла.

Обговорення результатів. Інтерпретуючи результати аналізу змін структури і плану русла Дніпра, слід зазначити, що до будівництва греблі (до 1970-х рр.) зміни в системі багаторукавного русла Дніпра полягали в основному у: 1) розширенні русла із стабілізованим балансом ерозії та накопичення наносів; 2) розчленуванні більших форм на дрібніші, що змінюють своє положення вздовж течії річки; 3) повільній надбудові руслових форм, переважно з піщаними відкладами (Szmańda et al., 2021). Після побудови греблі, коли ГЕС працювала у піковому режимі, тобто в 1970–1980-х рр., головне русло

Дніпра повільно поглиблювалося, що сприяло його звуженню і певному спрямленню на ділянці до 10 км нижче греблі. Острови були збільшені та розширені піщаними наносами, а бічні русла проток обміліли. Через зміни режиму роботи ГЕС на проточно-інтервенційний після 1990 р. водний режим було вирівняно. Це призвело до зникнення потоку в бічних руслах і значного збільшення площі форм, які їх розділяють.

У руслах проток, що омивають острови, та на ділянках перед островами відбулося накопичення наносів, що призвело до їх обміління та розширення. На 10 км нижче греблі за течією домінувала донна ерозія, а далі за течією – акумуляція наносів (Obodovskyj et al., 2006). У результаті накопичення наносів у бічних руслах, що відбувається внаслідок дії численних штучних хвиль, викликаних роботою ГЕС, острови сполучаються, об'єднуються, утворюючи широкі міжруслові форми.

Зміни кількості, розташування та морфології руслових і міжруслових форм на аналізованій ділянці долини Вісли зумовлені кількома причинами. Перша – це наслідки руслорегулювальних робіт, проведених на цій ділянці річки в період, що передував будівництву Влоцлавецької греблі (передусім будівництві гребель у бічних руслах), що призвело до їх прискореного заповнення алювієм. Як наслідок – частина островів і міжруслових ділянок сполучилися із заплавою. Однак зменшення кількості островів на цій ділянці русла слід пов'язати насамперед з інтенсивним його розмивом, особливо в тій частині, де сила і швидкість потоку найбільша. Поглиблення та звуження основного річища також призвело до зменшення глибини води в бічних руслах, гирлові частини яких в результаті виявились "припіднятими" щодо основного русла. В окремих випадках вони відмирили, приєднуючись до островів. Деякі острови були з'єднані із заплавою. Наявність великої кількості матеріалу, як наслідок посилення руслової ерозії, сприяла об'єднанню менших островів у більші, про що свідчить збільшення площі їх поверхні. Інша причина, що впливає на зміну параметрів русла на цій ділянці Вісли, пов'язана з геологічною будовою території. Наявність стійких до розмиву відкладів на дні русла призвела до уповільнення глибинної ерозії з одночасним збільшенням

активності бічної ерозії. Цей процес пов'язаний з бічним розширенням русла на досліджуваній ділянці Вісли.

Висновки. Розмір і характер трансформації гідрологічного режиму річок Дніпра та Вісли, спричинені роботою гідроелектростанцій у Каневі та Влоцлавку, є різними. Умови та рівень стоку в окремі місяці, а також величини мінімального і максимального стоків змінювалися незначно. Найбільша трансформація як параметрів потоку, так і системи русел (проток) відбулася, коли обидві гідроелектростанції працювали в піковому режимі. Тоді було помітним значне збільшення швидкості та середньодобових витрат води, а також фрагментація форм, що розділяють русла, у поєднанні із сильним глибинним русловим розмивом. Зміна режиму роботи гідроелектростанцій зменшила мінливість рівня водних потоків нижче гребель.

За результатами досліджень можна зробити висновок, що реакція флювіальних систем на зміни режиму течії Дніпра та Вісли внаслідок роботи ГЕС, полягала у зміні: 1) ширини та глибини русла; 2) типу і розміру форм, що розділяють русла (протоки); 3) типу річкової системи. Під впливом роботи ГЕС у початковий період після її будівництва настав період поглиблення русла багаторукавних річок, а також укрупнення шляхом з'єднання малих руслових форм у більші. Інтенсифікація умов стоку, викликана роботою ГЕС, модифікує та динамізує процес еволюції багаторукавної річкової системи через ерозійне врізання головних русел, внаслідок чого бічні русла (протоки) займають вище положення над ними. Наступне регулювання (вирівнювання) витрат через втручання роботи ГЕС у проточну систему призводить до зниження рівня води в основних руслах і припинення потоку в бічних руслах. Як наслідок – острови, розділені цими протоками, з'єднуються, утворюючи міжруслові форми. На прикладі положення річища Вісли нижче греблі у Влоцлавку слід підкреслити, що на його еволюцію також вплинуло регулювання річки, здійснене незадовго до будівництва греблі. В обох випадках період експлуатації гідроелектростанції пов'язаний з процесом ущільнення багаторукавної річкової системи. Така консолідація полягає в розширенні форм, що розділяють русла і сполучають острови в межах заплави, шляхом зникнення течії в бічних руслах.

Список використаних джерел / Reference

- Babiński, Z. (2002). Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych: ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego "Włocławek". Wyd. Akademia Bydgoska im. Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz.
- Bejarano, M., Sordo-Ward, A., Alonso, C., Nilsson, C. (2017). Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. *J. Hydrol.*, 550, 186–200.
- Brand, S.A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40, 375–401.
- Chien, N. (1985). Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surf. Proc. Land.*, 10, 143–159.
- Church, M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time scales. *Regul. Rivers Res. Manag.*, 11, 3–22.
- Costigan, K.H., Daniels M.D. (2012). Damming the prairie: human alteration of Great Plains rivers regimes. *J. Hydrol.*, 444–445, 90–99.
- David, M., Labenne, A., Carozza, J.-M., Valette, P. (2016). Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne river (Toulouse, SW France) over a 130-year period: contribution of mixed multiple factor analysis (MFAmix). *Geomorphology*, 258, 21–39.
- Dean, D.J., Topping, D.J., Schmidt, J.C., Griffiths, R.E., Sabol, T.A. (2016). Sediment supply versus local hydraulic controls on sediment transport and storage in a river with large sediment loads. *J. Geophys. Res.-Earth Surf.*, 121, 82–110.
- Denisova, A., Timchenko, V., Nahshyna, E., Novikov, B., Riabov, A., Bass, A. (1989). Hydrology and hydrochemistry of the Dnieper and its reservoirs. Naukova dumka, Kyiv. [in Ukrainian]
- FitzHugh, T.W., Vogel, R.M., (2011). The impact of dams on flood flows in the United States. *River Res. App.*, 27(10), 1192–1215.
- Gao, B., Yang, D., Zhao, T., Yang, H. (2012). Changes in the eco-flow metrics of the upper Yangtze River from 1961 to 2008. *J. Hydrol.*, 448–449, 30–38.
- Gao, Y., Vogel, R.M., Kroll, C.N., Poff, N.L., Olden, J.D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *J. Hydrol.*, 374, 136–147.
- Gierszewski, P. (2018). Hydromorfologiczne uwarunkowania funkcjonowania geosystemu Zbiornika Włocławskiego. *Prace Geograficzne*, 268. IGI PAN, Warszawa.
- Gierszewski, P., Szymańska, J., Luc, M. (2015). Zmiany układu koryt Wisły spowodowane funkcjonowaniem stopnia wodnego „Włocławek” na podstawie analizy zdjęć lotniczych. *Przegląd Geograficzny*, 87, 3, 517–533.
- Gierszewski, P.J., Habel, M., Szymańska, J., Luc, M. (2020). Evaluating effects of dam operation on flow regimes and riverbed adaptation to those changes. *Science of the Total Environment*, 710, 136202.
- Graf, W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79(3–4), 336–360.
- Grant, G.E., Schmidt, J.C., Lewis S.L. (2003). A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In: O'Connor, J.E., Grant, G.E. (Eds.) *A Peculiar River American*. Geophysical Union, Washington DC, 209–225.
- International Commission of Large Dams (ICOLD). (2007). *World Register of Dams*, Paris, France.
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environ. Manag.*, 21(4), 533–551.
- Li, D., Long, D., Zhao, J., Lu, H., Hong, Y. (2017). Observed changes in flow regimes in the Mekong River Basin. *J. Hydrol.*, 551, 217–232.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71, 61–78.
- Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308, 405–408.
- Obodovskij, A. (2002). Some methodological aspects of research of channel processes in the lower reaches (on the example of the Dnieper hydroelectric power stations). *Hydrology, Hydrochemistry and hydroecology*, 4, 106–111. [in Ukrainian]
- Obodovskij, A., Hrebin, V. (2001). Organization of monitoring of hydrological regime and channel processes of the Dnieper in the area of Kaniv Reserve. *Nature conservation in Ukraine*, 7, 1, 59–64. [in Ukrainian]
- Obodovskij, O., Hrebin, V., Onyshchuk, V., Pohorilchuk, N. (2006). Features of the development of channel processes in the waters of the lower reaches of the Kaniv hydroelectric power station. *Water management of Ukraine*, 5, 46–52. [in Ukrainian]
- Obodovskij, O., Habel, M., Szatten, D., Rozlach, Z., Babinski, Z., Maerker, M. (2020). Assessment of the Dnieper Alluvial Riverbed Stability Affected by Intervention Discharge Downstream of Kaniv Dam. *Water*, 12, 1104.
- Olden, J.D., Poff, N.L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.*, 19, 101–121.
- Pegg, M., Pierce, C., Roy, A. (2003). Hydrological alteration along the Missouri River Basin: a time series approach. *Aquat. Sci.*, 65, 63–72.
- Poff, N.L., Olden, J.D., Merritt, D.M., Pepin, D.M. (2007). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104, 5732–5737.
- Pyron, M., Neumann, K. (2008). Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA. *River Res. Appl.*, 24, 1175–1184.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv. Biol.*, 10, 1163–1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R., Braun, D.P. (1997). How much water does a river need? *Freshw. Biol.*, 37, 231–249.
- Richter, B.D., Warner, A.T., Meyer, J.L., Lutz, K. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Res. Appl.*, 22, 297–318.
- Rinaldi, M. (2003). Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surf. Proc. Land.*, 28, 587–608.
- Słowik, M., Dezso, J., Marciniak, A., Toth, G., Kovacs, J. (2018). Evolution of river planforms downstream of dams: Effect of dam construction or earlier human-induced changes? *Earth Surf. Proc. Land.*, 43, 2045–2063.
- Smith, D.G., Smith, N.D. (1980). Sedimentation in anastomosed river system: example from alluvial valley Near Banff, Alberta. *J. Sedimentary Petrol.*, 50(1), 157–164.
- Szymańska, J.B., Gierszewski, P.J., Habel, M., Luc, M., Witkowski, K., Bortnyk, S., Obodovskij, O. (2021). Response of the Dnieper river fluvial system to the river erosion caused by the operation of the Kaniv hydro-electric power plant (Ukraine). *Catena*, 202, 105265.
- Timpe, K., Kaplan, D. (2017). The changing hydrology of a dammed Amazon. *Sci. Adv.*, 3(11), e1700611.
- TNC (The Nature Conservancy). (2001). *Indicators of Hydrologic Alteration User's Manual*.
- Torabi Haghighi, A., Kløve, B. (2013). Development of a general river regime index (RRI) for intra-annual flow variation based on the unit river concept and flow variation endpoints. *J. Hydrol.*, 503, 169–177.
- Vörösmarty, C.J., Sharma, K.P., Fekete, B.M., Copeland, A.H., Holden, J., Marble, J., Lough, J.A. (1997). The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 26, 210–219.
- Walling, D.E., Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global Planet. Change*, 39, 111–126.
- Wang, Y., Rhoads, B.L., Wang, D. (2016). Assessment of the flow regime alterations in the middle reach of the Yangtze River associated with dam construction: potential ecological implications. *Hydrol. Process.*, 30, 3949–396.

Williams, G.P., Wolman, M.G. (1984). Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. *Geological Survey Professional Paper*, 1286.

Zhang, Q., Gu, X., Singh, V.P., Xu, C.Y., Kong, D., Xiao, M., Chen, X. (2015). Homogenization of precipitation and flow regimes across China: changing properties, causes and implications. *J. Hydrol.*, 530, 462–475.

Zhang, Z., Huang, Y., Huang, J. (2016). Hydrologic alteration associated with dam construction in a medium-sized coastal watershed of Southeast China. *Water*, 8, 317.

Надійшла до редколегії 20.09.21

S. Bortnyk^{1,6}, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;
O. Obodovskyi¹, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.;

P. Gerszewski², Dr. hab.;

J. Szmanda³, Dr. hab.;

M. Luc⁴, Dr. hab.;

M. Habel⁵, PhD.;

K. Witkowski³, PhD.;

N. Pohorilchuk¹, PhD (Geogr.);

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

²Institute of Geography and Spatial Development,
Polish Academy of Sciences, Toruń, Poland;

³Pedagogical University, Krakow, Poland;

⁴Jagellonian University, Krakow, Poland;

⁵Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland;

⁶Jan Kochanowski University, Kielce, Poland

THE REACTION OF ANASTOMOSING RIVER FLUVIAL SYSTEMS TO THE OPERATION OF A HYDROELECTRIC POWER PLANT

The operation of the hydroelectric power plant is one of the main reasons for the transformation of river runoff. The change in the hydrological regime affects several other processes taking place in the river channel, including the transformation of its geomorphological features. The article presents the impact of the Kaniv and Włocławek dams on the hydrological regime of the middle Dnieper River and the lower Vistula River. The nature and magnitude of changes in the Dnieper and The Vistula rivers flow regime caused by the functioning of the dams were determined using IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) and the RVA (The Range of Variability Approach) method. It was demonstrated that the operation of the hydroelectric power plant especially in the hydropeaking system is the cause of a large flow alteration in respect of the frequency and duration of low- and high-flow pulses and the rate and frequency of change in the flow. It was assessed how the change in flow conditions in connection with the deficit of sediments affected the transformation of the Vistula and Dnieper river channels downstream of the dams. Based on our results, the reaction of the fluvial system to changes in the flow regime caused by the operation of the Kaniv and Włocławek hydroelectric power plants consisted in: 1) changing the width and depth of channels; 2) changing the size of the forms separating channels; 3) fixation of the anastomosing fluvial system. More dynamic water flows due to the operation of hydroelectric power plants modify and dynamize the natural process of evolution of a fluvial system into an anastomosing system by causing the incision and narrowing of the main channels, because of which the side channels occupy a higher position above them. On the other hand, the equalization of the water flow in the channels causes a decrease in the water level and the disappearance of the flow in the side channels. As a result, the islands separated by these channels merge and inter-channel areas are formed.

Keywords: hydroelectric power plant, fluvial system, anastomosing river evolution, dam, erosion, Dnieper River, Vistula River.

С. Бортник^{1,6}, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;

О. Ободовский¹, д-р геогр. наук, проф.;

П. Гершевский², д-р габилитованный;

Я. Шмандя³, д-р габилитованный;

М. Луц⁴, д-р габилитованный;

М. Хабель⁵, д-р философии;

К. Витковский³, д-р философии;

Н. Погорильчук¹, канд. геогр. наук, доц.;

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, г. Киев, Украина;

²Институт географии и пространственного развития,
Польская академия наук, г. Торунь, Республика Польша;

³Педагогический университет имени Комиссии национального образования,
г. Краков, Республика Польша;

⁴Ягеллонский университет, г. Краков, Республика Польша;

⁵Университет Казимира Великого, г. Быдгощ, Республика Польша;

⁶Университет Яна Кухановского, г. Кельце, Республика Польша

РЕАКЦИЯ МНОГОРУКАВНЫХ РЕЧНЫХ СИСТЕМ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Эксплуатация гидроэлектростанции (ГЭС) является одной из основных причин трансформации речного стока. Изменение гидрологического режима влияет на ряд процессов, которые происходят в русле реки, в том числе на трансформацию ее геоморфологических особенностей. В статье освещено влияние Каневской и Влоцлавской дамб на гидрологический режим Среднего Днепра и Нижней Вислы. При помощи методов IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) и RVA (The Range of Variability Approach) определены характер и режим стока Днепра и Вислы, вызванные функционированием соответствующих дамб. Продемонстрировано, что работа ГЭС, особенно в каскаде, является причиной изменений уровня, скорости и вариативности потока. Оценено, как изменение условий стока, в связи с дефицитом наносов, повлияло на трансформацию русел Вислы и Днепра на участках, расположенных ниже дамб ГЭС. Полученные нами результаты показали, что реакция речной системы на изменение режима течения, обусловленного работой Каневской и Влоцлавской ГЭС, состоит в: 1) изменении ширины и глубины русла; 2) изменении размеров форм, которые разделяют отдельные протоки; 3) фиксации многорукавной речной системы. Более динамичные за счет работы ГЭС потоки воды модифицируют и ускоряют природный процесс эволюции извилистой речной системы в многорукавную, вызывая эрозию и сужение основных русел. Как следствие, боковые русла (протоки и разветвления) занимают более высокое гипсометрическое положение над основным руслом. Вместе с тем выравнивание потока воды в руслах вызывает и исчезновение потока в боковых руслах. В результате разрастаются острова, разделенные ранее этими потоками. Соединяясь между собой, они образуют широкие междуречные пространства и формы.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, дамба, эрозия, речная система, русло, эволюция многорукавных русел, река Днепр, река Висла.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 4(95)

Комп'ютерна обробка статей – О. О. Козіонова

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 13,72. Наклад 300. Зам. № 221-10340.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.
Підписано до друку 29.12.2021

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
E-mail: vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
[http: vpc.knu.ua](http://vpc.knu.ua)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02