

**MINERALOGICAL
COLLECTION**

**МІНЕРАЛОГІЧНИЙ
ЗБІРНИК**

№ 76

№ 76

Published since 1947

Виходить з 1947 р.

Ivan Franko
National University of Lviv

Львівський національний
університет імені Івана Франка



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Друкується за ухвалою Вченої Ради
Львівського національного університету
імені Івана Франка.
Протокол № 6/4 від 29.04.2026 р.

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань
телебачення і радіомовлення № 1877
від 30.05.2024 року (Ідентифікатор медіа R30-04914).

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Львівський національний університет імені Івана Франка
(вул. Університетська, 1, м. Львів, 79000, zag_kan@lnu.edu.ua, тел. (032) 239-41-11).
Media entity – Ivan Franko National University of Lviv (79000, Lviv, Universytetska Str., 1,
zag_kan@lnu.edu.ua, tel. (032) 239-41-11).

На підставі наказу Міністерства освіти і науки України № 220 від 21.02.2024 р. (додаток 4)
збірник внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
у галузі природничих наук (спеціальність Е4 – Науки про Землю).
According to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine as of 21.02.2024 N 220
(annex 4), the collection is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine (category “B”)
on natural sciences (specialty E4 – Earth sciences).

Редакційна колегія

Головний редактор:

Павлунь Микола Миколайович, доктор геологічних наук,
професор, Україна

Заступник головного редактора:

Генералова Лариса Володимирівна, кандидат геологічних
наук, доктор філософії, доцент, Україна

Редакційна колегія:

Вовк Олександр Павлович, кандидат геологічних наук,
доцент, Україна

Наумко Ігор Михайлович, доктор геолого-мінералогічних
наук, член-кореспондент НАН України, Україна

Побережський Андрій Володимирович, кандидат геолого-
мінеральних наук, старший науковий співробітник, Україна

Сукач Віталій Васильович, доктор геологічних наук,
старший дослідник, Україна

Ціхонь Сергій Іванович, кандидат геологічних наук, доцент,
Україна

Бомбель Мацей, кандидат наук, професор, Польща

Кшемінська Єва, доктор наук, Польща

Пестшинські Адам, доктор наук, професор, Польща

Editorial Board

Editor-in-Chief:

Pavlun Mykola Mykolayovych, Doctor of Geological
Sciences, Professor, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief:

Heneralova Larysa Volodymyrivna, Candidate of Geological
Sciences, Associate Professor, Ukraine

Editorial Board:

Vovk Oleksandr, PhD in Geology, Associate Professor, Ukraine

Naumko Ihor Mykhailovych, Doctor of Geological
and Mineralogical Sciences, Corresponding Member
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

Poberezskyy Andriy Volodymyrovych, Candidate of Geological
and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Ukraine

Sukach Vitaliy, Doctor of Geological Sciences, Senior
Researcher, Ukraine

Tsikhon Serhii, PhD in Geology, Associate Professor, Ukraine

Maciej Babel, PhD, Associate Professor, Poland

Krzeminska Ewa, Dr hab, Poland

Piestrzynski Adam, Dr hab, Professor, Poland

Адреса редколегії:

Львівський національний університет імені
Івана Франка, геологічний факультет,
вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005
тел. +38 (032) 239 47 00

Editorial office address:

Ivan Franko National University of Lviv,
Faculty of Geology,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005
tel.: +38 (032) 239 47 00

Комп'ютерне верстання Ю. Ковальчук

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ, ВИДАВЦЯ і ВИГОТОВЛЮВАЧА:
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Дата розміщення онлайн: 29.05.2026.

Дата друку: 05.06.2026.

Формат 70x100/16

Ум. друк. арк. 13,81.

Тираж 50 прим. Зам. 0526/578

© Львівський національний
університет імені Івана Франка, 2026

ISSN 2078-6220 (print)

ISSN 2786-6556 (online)



ЗМІСТ

Олександр Вовк, Ігор Наушко

ОСОБЛИВОСТІ КРИСТАЛОГЕНЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІНЕРАЛІВ
ТРИГОНАЛЬНОЇ І ГЕКСАГОНАЛЬНОЇ СИНГОНІЙ
(НА ПРИКЛАДІ КВАРЦУ, КАЛЬЦИТУ І БЕРИЛУ).....8

Мирон Ковальчук, Любов Фігура

ХІМІЧНИЙ СКЛАД І ЛАТЕРАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ІЛЬМЕНІТУ
ТА ЗМІНЕНИХ ЙОГО ВІДМІН НА ДІЛЯНКАХ ЄМИЛІВСЬКА
Ї СЕРЕДНЯ МЕЖИРІЧНОГО РОДОВИЩА ТИТАНУ (ЖИТОМИРСЬКА ОБЛ.).....22

Roman Minkevich, Nataliia Bilyk, Leonid Skakun, Kostiantyn Alferiev

SEISMOGENIC FRICTIONAL MELTING AND ITS ROLE
IN THE REDISTRIBUTION OF MATTER
IN THE METAMORPHIC COMPLEXES OF ZAVALLIA.....35

Микола Павлунь

ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЯ ПРОЦЕСІВ РУДОГЕНЕЗУ
НА РОДОВИЩАХ МОЛІБДЕН-ВОЛЬФРАМОВИХ ФОРМАЦІЙ
ГРЕЙЗЕНОВОЇ ГРУПИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНУ.....43

Ivan Yatsenko, Oksana Stupka, Iryna Buchynska, Viktor Yatsenko

NATIVE ELEMENTS AND METALLIC ALLOYS IN THE MRIYA PIPE,
AZOV BLOCK OF THE UKRAINIAN SHIELD:
INSIGHTS INTO THE MINERALOGY OF THE EARTH'S MANTLE..... 55

Iryna Poberezhska, Dmytrii Biruk, Sviatoslav Kozhushyna, Pavlo Kempa

JOTNIAN SANDSTONES IN MORaine DEPOSITS
OF SOUTH-EASTERN LITHUANIA.....69

Оксана Цільмак, Катерина Бурбан, Альбертина Бучинська, Уляна Борняк

КОЛЕКЦІЯ ГРАФІТУ МІНЕРАЛОГІЧНОГО МУЗЕЮ
ІМЕНІ ЄВГЕНА ЛАЗАРЕНКА У РЕТРОСПЕКТИВІ ОСВОСННЯ
СВІТОВИХ РЕСУРСІВ ГРАФІТУ.....83

Мирослава Яковенко, Олександр Любчак, Юрій Хоха

КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ УТВОРЕННЯ СІРКОВОДНЮ
В ПРОЦЕСАХ ДІАГЕНЕЗУ ТА КАТАГЕНЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ.....95

Святослав Лойко

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ У БІОМІНЕРАЛОГІЇ.....104

ІСТОРІЯ НАУКИ

Олександр Костюк, Інга Попова

КАФЕДРА ПЕТРОГРАФІЇ ЛЬВІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

(ДО 80-РІЧЧЯ ВІД ЧАСУ ЗАСНУВАННЯ)121

Євгенія Сливко, Петро Білоніжка, Лариса Сливко

СТОРИЧНИЙ ЮВІЛЕЙ МАРТИНА МАТВІЙОВИЧА СЛИВКА.....139

ХРОНІКА

Петро Волошин, Сергій Ціхонь, Валентина Марусяк

ЮВІЛЕЙ ЄВГЕНІЇ СЛИВКО.....155

CONTENTS

<i>Oleksandr Vovk, Ihor Naumko</i> FEATURES OF CRYSTAL GENETIC STUDIES OF MINERALS OF THE TRIGONAL AND HEXAGONAL SYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF QUARTZ, CALCITE AND BERYL).....	8
<i>Myron Kovalchuk, Liubov Figura</i> CHEMICAL COMPOSITION AND LATERAL DISTRIBUTION OF ILMENITE AND ITS ALTERED VARIETIES IN THE SITES OF YEMYLVIVSKA AND SEREDNIA OF THE MEZHYRICHNE TITANIUM DEPOSIT (ZHYTOMYR REGION).....	22
<i>Roman Minkevich, Nataliia Bilyk, Leonid Skakun, Kostiantyn Alferiev</i> SEISMOGENIC FRICTIONAL MELTING AND ITS ROLE IN THE REDISTRIBUTION OF MATTER IN THE METAMORPHIC COMPLEXES OF ZAVALLIA.....	35
<i>Mykola Pavlun</i> THERMOBAROGEOCHEMISTRY OF ORE FORMATION PROCESSES IN MOLYBDENUM-TUNGSTEN DEPOSITS OF THE GREISEN GROUP IN CENTRAL KAZAKHSTAN.....	43
<i>Ivan Yatsenko, Oksana Stupka, Iryna Buchynska, Viktor Yatsenko</i> NATIVE ELEMENTS AND METALLIC ALLOYS IN THE MRIYA PIPE, AZOV BLOCK OF THE UKRAINIAN SHIELD: INSIGHTS INTO THE MINERALOGY OF THE EARTH'S MANTLE.....	55
<i>Iryna Poberezhska, Dmytrii Biruk, Sviatoslav Kozhushyna, Pavlo Kempa</i> JOTNIAN SANDSTONES IN MORAIN DEPOSITS OF SOUTH-EASTERN LITHUANIA.....	69
<i>Oksana Tsilmak, Kateryna Burban, Albertyna Buchynska, Uliana Borniak</i> THE GRAPHITE COLLECTION OF THE YEVHEN LAZARENKO MINERALOGICAL MUSEUM IN A RETROSPECTIVE OF THE DEVELOPMENT OF GLOBAL GRAPHITE RESOURCES.....	83
<i>Myroslava Yakovenko, Oleksandr Liubchak, Yurii Khokha</i> KINETIC MODEL OF HYDROGEN SULFIDE GENERATION DURING DIAGENESIS AND CATAGENESIS OF ORGANIC MATTER.....	95
<i>Sviatoslav Loiko</i> MODERN RESEARCH DIRECTIONS IN BIOMINERALOGY.....	104

HISTORY OF SCIENCE

Oleksandr Kostiuk, Inha Popova

DEPARTMENT OF PETROGRAPHY OF THE LVIV UNIVERSITY
(TO THE 80TH ANNIVERSARY OF ITS FOUNDATION).....121

Yevheniia Slyvko, Petro Bilonizhka, Larysa Slyvko

CENTENNIAL ANNIVERSARY OF MARTYN MATVIIIOVYCH SLYVKO..... 139

CHRONICLE

Petro Voloshyn, Serhii Tsikhon, Valentyna Marusiak

ANNIVERSARY OF YEVHENIIA SLYVKO.....155

ОСОБЛИВОСТІ КРИСТАЛОГЕНЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІНЕРАЛІВ ТРИГОНАЛЬНОЇ І ГЕКСАГОНАЛЬНОЇ СИНГОНІЙ (НА ПРИКЛАДІ КВАРЦУ, КАЛЬЦИТУ І БЕРИЛУ)

¹ **Олександр Вовк**, канд. геол. наук,
доцент, доцент кафедри фізичної географії
geologygeochemistry@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1509-0905>

² **Ігор Наумко**, д-р геол. наук,
член-кор. НАН України, професор, зав. відділу геохімії глибинних флюїдів
naumko@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-3735-047X>

¹ Волинський національний університет імені Лесі Українки,
вул. Банкова, 9, Луцьк, Україна, 43025

² Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України,
вул. Наукова, 3а, Львів, Україна, 79060

Проаналізовано особливості кристалогенетичних досліджень тригональних і гексагональних кристалів (кварцу, кальциту, берилу) з використанням установки Браве на підставі літературних, власних і архівних матеріалів. Обґрунтовано доцільність удосконалення запису символів простих форм у тригональних і гексагональних сингоніях шляхом спрощення позначень власне в установці Браве. Доведено, що поєднання гоніометрії, аналізу кристалічної структури і термобарогеохімічних методів (мінералотермометричний аналіз) дає змогу отримувати комплексну інформацію про умови мінералоутворення без порушення цілісності кристалів. Наголошено, що теоретично морфологічно важливі прості форми, зумовлені кристалічною структурою, не несуть генетичної інформації, тоді як їхні реальні співвідношення та ступінь розвитку відображають параметри мінералоутворювального середовища. Виявлено відмінності у морфології та габітусі кристалів кварцу, кальциту й берилу, зумовлені як регіональними особливостями, так і умовами формування, включно з температурою, тиском і динамікою флюїдних потоків. Показано, що еволюція габітусу в процесі кристалізації має закономірний характер і її можна використовувати для реконструкції фізико-хімічних умов утворення та ступеня еродованості родовищ. У підсумку продемонстровано важливість системного підходу й послідовності застосування методів для підвищення інформативності кристаломорфологічних досліджень у генетичному та прикладному аспектах.

Ключові слова: кристалогенезис, кварц, кальцит, берил, тригональна сингонія, гексагональна сингонія, установка Браве, гоніометрія, морфологія кристалів, термобарогеохімія.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.01>

Постановка проблеми. З розвитком рентгеноструктурного аналізу застосування кристаломорфології, головню, для діагностики мінералів певною мірою втратило пріоритетність. Водночас кристаломорфологічні дослідження дають змогу отримувати інформацію про умови мінералоутворення без порушення цілісності кристалів, через що зберігається і навіть посилюється їхнє значення в генетичному аспекті. Це стосується, передусім,

гоніометрії, яка, порівняно з іншими методами вивчення мінеральної речовини, має принципову перевагу – неруйнівність і можливість точного визначення простих форм та співвідношень їхніх розмірів. Цим і визначена першочерговість виконання гоніометричних досліджень у загальній системі вивчення мінералів.

Аналіз кристалічної структури дає змогу визначити перелік теоретично морфологічно важливих простих форм, зумовлених внутрішньою симетрією мінералу. Такі форми можуть реалізовуватися за будь-яких фізико-хімічних умов і самі по собі не несуть генетичної інформації [5]. Натомість варіації у співвідношенні граней, ступінь їхнього розвитку, поява додаткових форм та особливості скульптури граней відображають конкретні параметри середовища кристалізації, і їх можна трактувати як типоморфні ознаки.

Зовнішня форма кристала здатна виконувати роль попереднього індикатора температури його утворення. Водночас для кількісної оцінки температури, тиску й кислотності флюїдного середовища необхідно залучати методи дослідження включень мінералоутворювального середовища, тобто органічно поєднувати кристаломорфологію з термобарогеохімією.

Реальні багатогранники, на відміну від ідеалізованих моделей, можуть відображати симетрію мінералоутворювального середовища і напрями руху флюїдних потоків. Зниження симетрії зовнішньої форми нерідко зумовлене анатомією кристалів. Однак дослідження анатомії пов'язане з руйнуванням багатогранників, тому його слід проводити по завершенню повного комплексу гоніометричних і морфологічних вимірювань.

З огляду на це постає необхідність чіткої систематизації та визначення послідовності застосування методів у межах кристаломорфологічного підходу. Рациональний порядок досліджень має охоплювати відбір матеріалу з фіксацією орієнтування кристалів, гоніометрію, опис скульптури граней, визначення теоретично і практично морфологічно важливих простих форм, статистичний аналіз їхньої поширеності, дослідження морфології реальних багатогранників, аналіз анатомії, вивчення включень флюїдів у кристалах з подальшою кореляцією морфологічних, фізико-хімічних і хімічних даних. Це забезпечує максимальне збереження первинної інформації та підвищує інформативність кристаломорфологічних досліджень у генетичному аспекті. Таку систематизацію на прикладі топазу вже виконано [3]. Однак дослідження тригональних і гексагональних багатогранників, для яких використовують установку Браве, мають певні особливості, виявлення яких і становить актуальність нашого дослідження.

Аналіз досліджень. Тригональні і гексагональні багатогранники мають важливе теоретичне і прикладне значення. До них належать, зокрема, кварц і кальцит – мінерали, виявлені практично в усіх геологічних процесах. Також до гексагональної сингонії належить берил – один із небагатьох мінералів, який може забезпечити вітчизняною сировиною ювелірну промисловість України. Характерні типоморфні ознаки цих мінералів можна застосовувати для пошуків різноманітних корисних копалин.

Для кристалогенетичних досліджень зазначених мінералів застосовують установку Браве. Ця установка відрізняється від установки Міллера тим, що в ній фіксують чотири кристалографічні осі, три з яких збігаються з осями другого порядку, а четверта – з віссю третього, або шостого, порядку, і символи простих форм мають вигляд не $\{hkl\}$ а $\{hkil\}$, причому $i = -(h+k)$. Отже, у цій установці один або кілька символів простої форми матимуть від'ємне значення. Оскільки прийнято ставити знак мінус над символом, то виникають певні незручності: набрані на одному комп'ютері символи на іншому комп'ютері можуть відображатися інакше. Щоб уникнути цих незручностей для авторів і редакторів, пропонується, за аналогією з [12], третій символ замінити на крапку. На рис. 1,а показано основні пояси і прості форми тригональної й гексагональної сингоній, а на рис. 1,б – традиційні

і спрощені символи. Спрощені символи мають вигляд $\{hk.l\}$, де крапка заміняє символ l . Наприклад скаленоедр на кальциті буде мати вигляд $\{21.1\}$. Оскільки, як уже зазначено, $l = -(h+k)$, то значення третього символу становить -3 . Аналогічно можна легко обчислити значення символу l на інших простих формах.

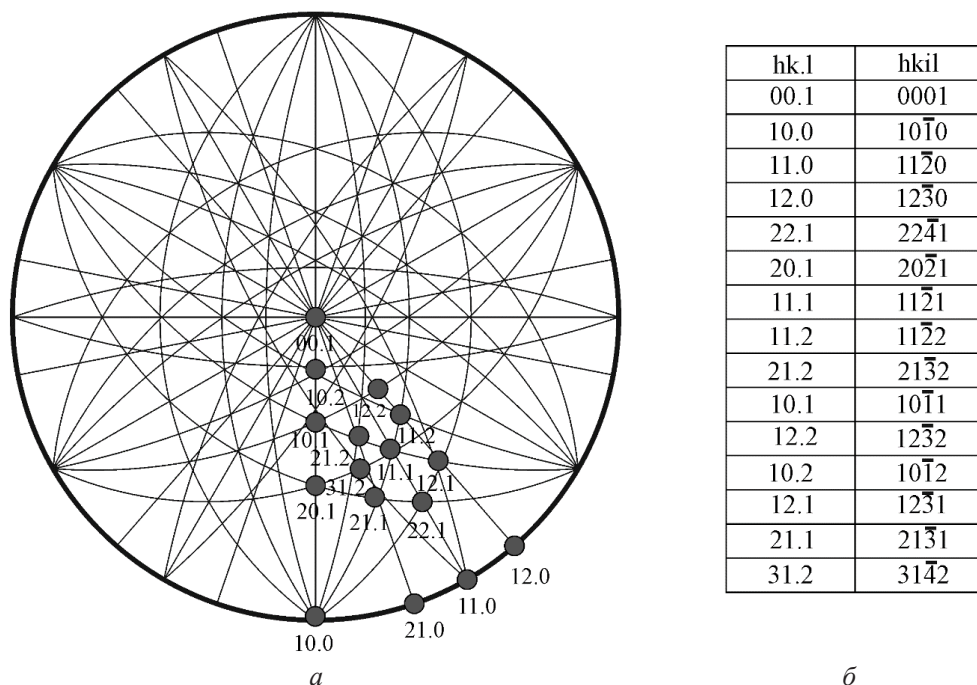


Рис. 1. Головні пояси і прості форми тригональної і гексагональної сингоній:
 а – стереографічна проекція з головними поясами і простими формами тригональної та гексагональної сингоній; б – скорочені та повні символи головних простих форм тригональної та гексагональної сингоній

Зазначимо, що для побудови аксонометричної (як і ортогональної) проекції кристала в програмі Share нема потреби переводити символи простих форм з установки Браве в установку Міллера, просто ігнорують третій символ, а використовують лише hkl . Також кристалогенетичні дослідження кварцу, кальциту і берилу на різних етапах мають свої особливості, які буде розглянуто в пропонованій праці.

Мета роботи – схарактеризувати особливості кристалогенетичних досліджень на всіх етапах для кристалів тригональної й гексагональної сингоній, у яких використовують установку Браве.

Для досягнення мети потрібно було вирішити такі завдання: 1) опрацювати опубліковані, особисті та архівні матеріали з кристаломорфології кварцу, кальциту й берилу; 2) розглянути особливості установки Браве; 3) продемонструвати етапи кристалогенетичних досліджень на прикладі кварцу, кальциту і берилу.

Виклад основного матеріалу. На етапі відбирання матеріалу для досліджень важливо фіксувати орієнтацію кристала, оскільки за співвідношенням розмірів граней тієї самої

простої форми можна визначити напрям руху мінералоутворювальних флюїдів [3, 5, 6]. У нашому випадку установка кристала значення не має. Гоніометричні дослідження найлегше проводити для кварцу. Для цього мінералу в більшості випадків характерні три прості форми: призма $\{10.0\}$ і ромбоєдри $\{10.1\}$ і $\{01.1\}$ (рис. 2), дипіраміда $\{11.1\}$ виявлена рідше, трапецеєдр $\{51.1\}$ – ще рідше [20].

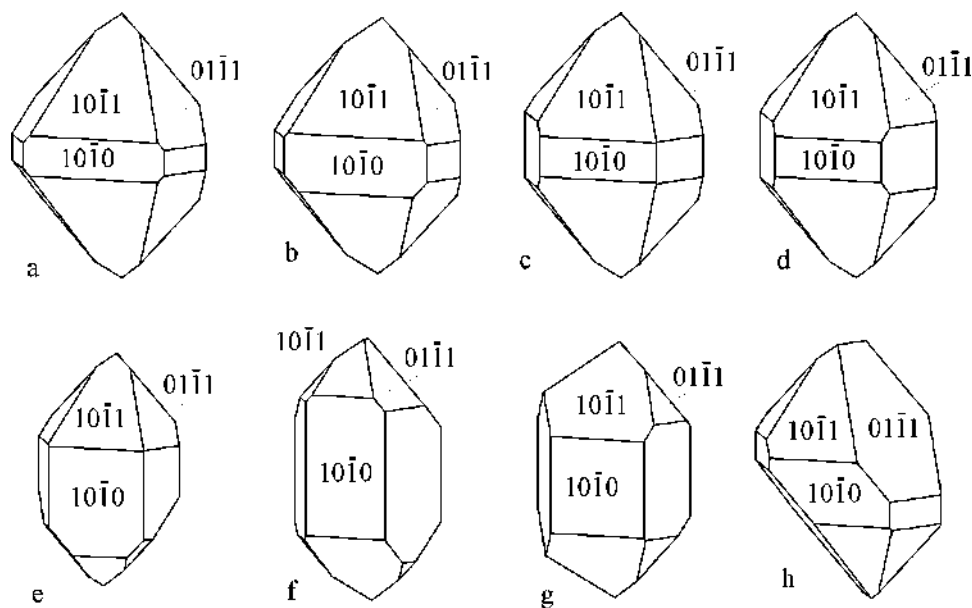


Рис. 2. Кристаломорфологія кварцу з порід Кросненської зони Українських Карпат [20]

У разі відсутності дипіраміди і трапецеєдра нема потреби використовувати двоколовий гоніометр ГД-1, призму і ромбоєдри індексують за зовнішнім виглядом. Незважаючи на малу кількість простих форм, габітус кристалів кварцу вирізняється надзвичайною розмаїтістю. Багатогранники кварцу можуть зовнішньо нагадувати будь-яку сингонію. Їхня видима симетрія може бути як вища, так і нижча за реальну. Види габітусу кристалів кварцу залежно від симетрії мінералоутворювального середовища детально розглянуто в [6].

Кристаломорфологія кальциту значно різноманітніша (рис. 3). На багатогранниках виявлена велика кількість простих форм: $\{10.0\}$, $\{01.2\}$, $\{21.1\}$, $\{00.1\}$, $\{10.1\}$, $\{02.1\}$, $\{40.1\}$, $\{16.0.1\}$, $\{11.0\}$. Кальцит з різних родовищ має різний габітус кристалів [4, 9, 10].

Основними проблемами дослідження кристалогенезису берилу є складність відбору придатних для гоніометрії зразків. Більшість кристалів вкрита фігурами росту й розчинення, що часто унеможливує індексацію [2]. Незважаючи на це, можна виявити відмінності не тільки між багатогранниками берилу з різних родовищ, а й із різних зон того самого родовища (рис. 4)

На етапі аналізу кристалічної структури та порівняння морфологічної важливості теоретично розрахованих простих форм із реальною морфологічною важливістю простих форм на конкретних родовищах проводять аналіз ретикулярної густини [13] з урахуванням поправок Доннея–Харкера [14], визначення F-, S-, K-граней – за допомогою періодичних

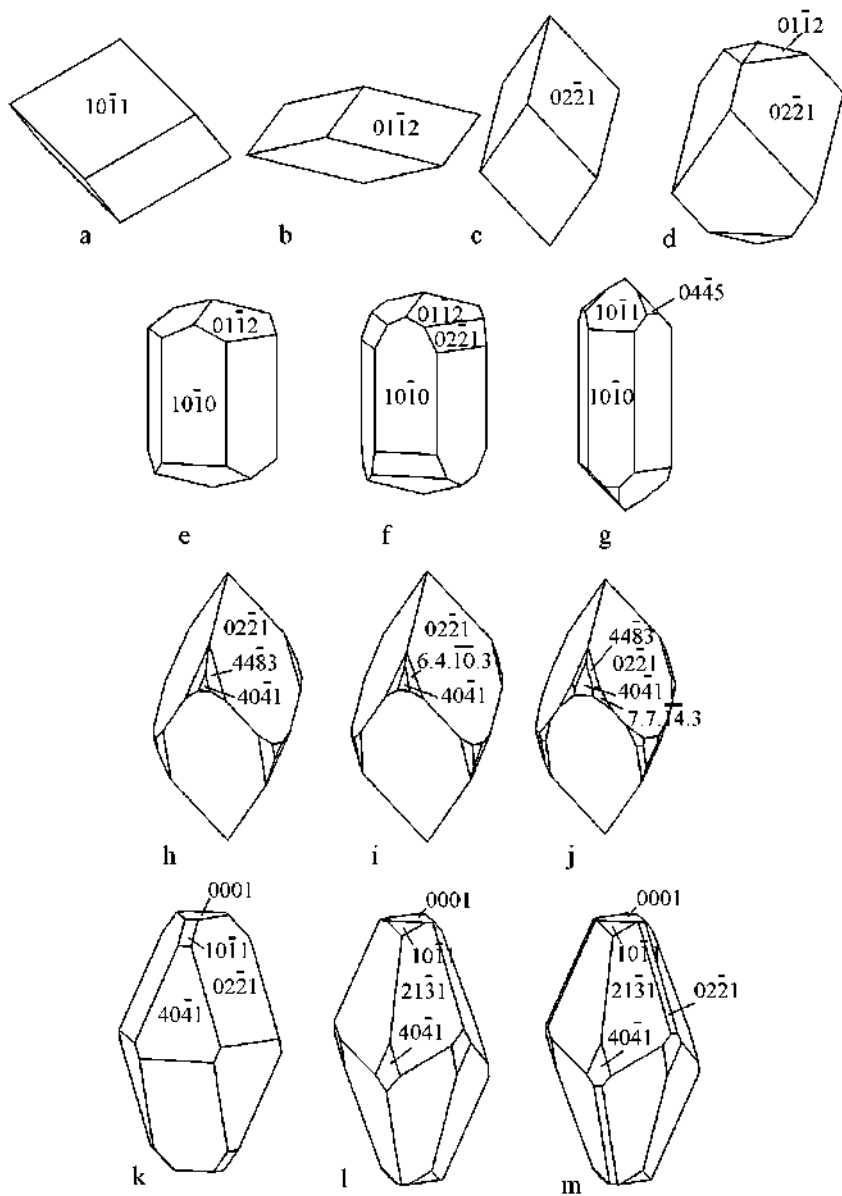


Рис. 3. Кристаломорфологія кальциту з різних родовищ України, за [4]:
a-d – Донбас; e-g – Крим; h-m – сірчані родовища Передкарпаття

ланцюгів зв'язку (PBC-векторів) за [15], визначення симетрії грані – за І. Шафрановським за аналогією з [1].

Розрахунок ретикулярної густини проводять за такою формулою [18]:

$$1/d\{hkl\}^2 = h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2 + 2hk \cos \gamma/ab + 2hl \cos \beta/ac + 2kl \cos \alpha/bc,$$

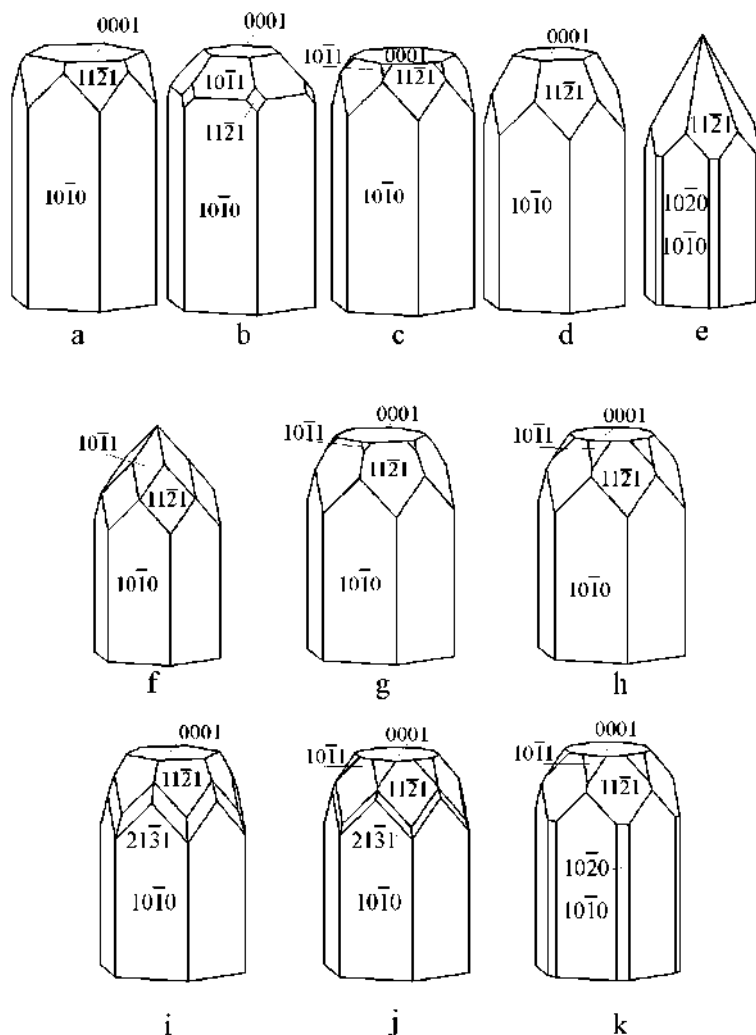


Рис. 4. Кристаломорфологія берилу із камерних пегматитів Коростенського плутону, за [2]:
 a–e – із занірків; f–k – із зони вилуговування

де a, b, c – параметри елементарної комірки; γ, β, α – кути елементарної комірки.
 Для тригональної і гексагональної сингоній ця формула матиме вигляд

$$1/d^2 = 4(h^2 + hk + k^2)/(3a^2) + l^2/c^2$$

В установці Браве для розрахунку використовують символи hkl , символ i ігнорують. З урахуванням поправок Доннея–Харкера, відповідно, множаться й hkl . Так у кварці для розрахунків беруть не $\{00.1\}$, а $\{00.3\}$, позаяк пінакоїд перпендикулярний до гвинтової осі третього порядку. Отже, найбільша ретикулярна густина з урахуванням поправок Доннея–Харкера у кварцу характерна для $\{10.0\}$, $\{10.1\}$, $\{01.1\}$ [14]. Для кальциту найбільша ретикулярна густина у $\{10.0\}$, $\{00.1\}$, $\{10.1\}$, $\{01.2\}$ [12], для берилу – у $\{10.0\}$, $\{10.1\}$, $\{00.1\}$ [2].

PBC-вектори для тригональної і гексагональної сингоній відіграють таку саму роль, як і для всіх інших сингоній. Єдине, про що слід пам'ятати, то це про ігнорування символу i у разі розрахунку символу напрямку. Для кварцу F-гранями є $\{10.0\}$, $\{10.1\}$, $\{01.1\}$ [15], для кальциту – $\{11.0\}$, $\{21.1\}$ [11, 16], для берилу – $\{10.0\}$, $\{00.1\}$ [2].

Найвищу симетрію на кристалах кварцу мають грані призми $\{10.0\}$, кальциту – $\{10.0\}$, $\{10.1\}$, $\{02.1\}$, $\{01.2\}$, берилу – $\{10.0\}$, $\{11.0\}$, $\{00.1\}$ [2]. Саме високосиметричні грані повинні бути морфологічно важливішими за низькосиметричні. Відповідно до аналізу кристалічної структури, морфологічно важливі форми кристалів кальциту (рис. 5) і берилу (рис. 6) відрізняються від реальності. На реальних багатогранниках кварцу, у зв'язку з малою кількістю простих форм, виявлені саме ті прості форми, які зумовлені особливостями кристалічної структури. Відомо, що реальна послідовність морфологічно важливих простих форм відрізняється не тільки для різних родовищ, а і для різних зон та генерацій того самого родовища. Тому наголосимо, що морфологічно важливі (згідно з аналізом кристалічної структури) прості форми повинні виявлятися за будь-яких умов і не несуть генетичної інформації [5].

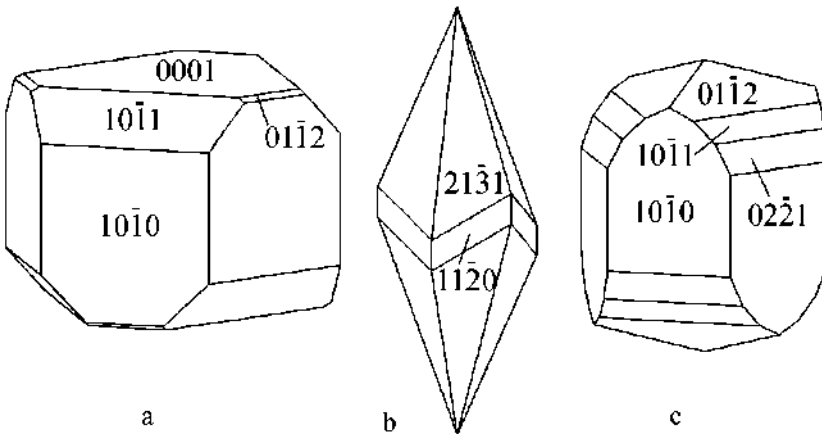


Рис. 5. Багатогранники кальциту, сформовані морфологічно важливими гранями, відповідно до кристалічної структури:

- a* – рівноважна форма кристалу кальциту, відповідно до ретикулярної густини;
b – багатогранник кальциту, утворений F-гранями; *c* – кристал кальциту, утворений високосиметричними простими формами

Зовнішня симетрія реальних кристалів дає змогу не тільки відтворити симетрію мінералоутворювального середовища, а й визначити напрями флюїдних потоків. Тому, незважаючи на невелику кількість простих форм, багатогранники кварцу можуть містити цінну генетичну інформацію (рис. 7). Аналогічні дослідження проведено для топазу [7].

Важливим питанням є еволюція габітусу кристалів з часом. Знаючи, як змінюється форма багатогранника, можна з'ясувати попередню температуру утворення, а також ступінь відслоненості-еродованості родовища.

На рис. 8 показано еволюційну модель для кварцу, на рис. 9 – для кальциту.

Умови утворення кварцу й кальциту в Кросненській зоні Українських Карпат схарактеризовано у праці Г. Занкович [8]. Інформацію про вплив домішок, зокрема, іонів Li^+ на кристаломорфологію кальциту навели Л. Пастеро зі співавторами [19].

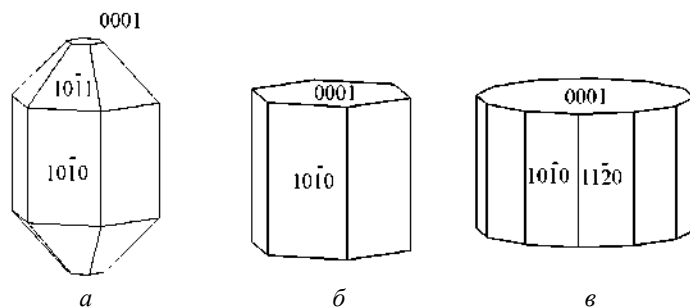


Рис. 6. Морфологія кристалів берилу згідно з різними структурними підходами:
 а – зрівноважена форма за методом Доннея–Харкера; б – істинні F-грані;
 в – форма кристала, що відповідає максимальній симетрії грані

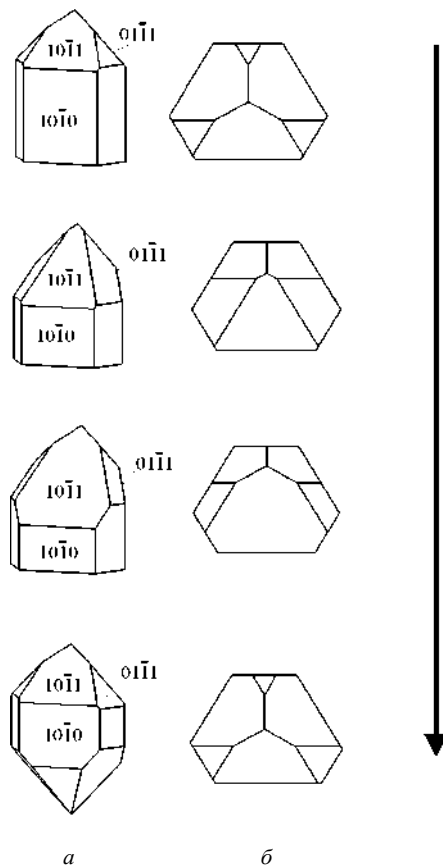


Рис. 7. Багатогранники кварцу з симетрією P [6]:
 а – аксонометрична проекція; б – ортогональна проекція;
 стрілка вказує напрям руху мінералоутворювальних флюїдів

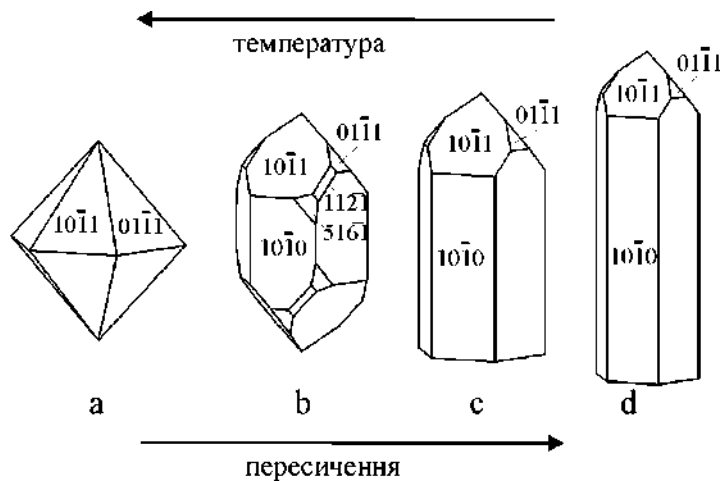


Рис. 8. Еволюція габітусу кристалів кварцу, за [17]

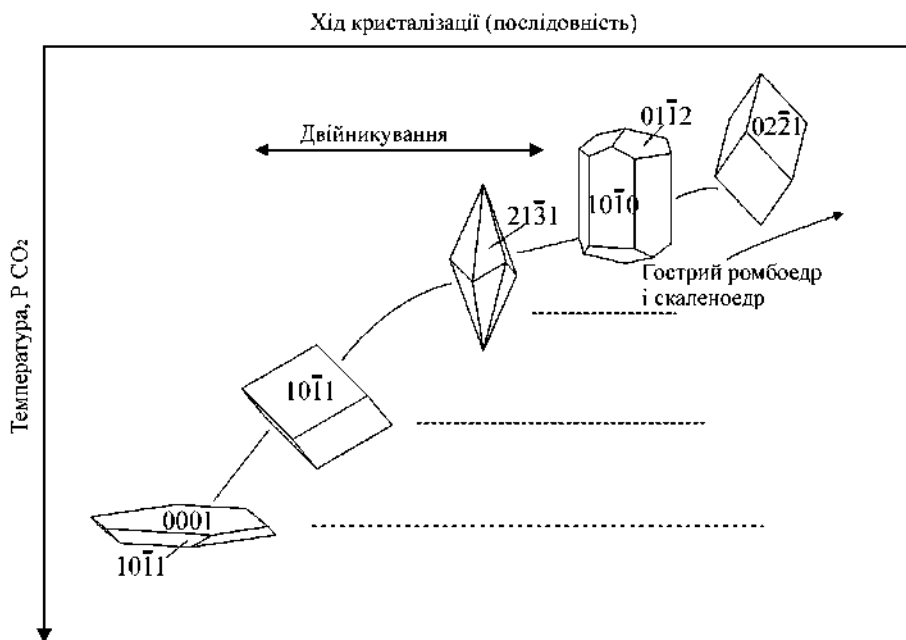


Рис. 9. Еволюція габітусу кристалів кальциту на підставі [17]

Для дослідження анатомії кристалів тригональної й гексагональної сингоній слід пам'ятати про загальну внутрішню симетрію, інших особливостей нема.

Термобарогеохімічні методи (наприклад, метод гомогенізації включень) дають змогу визначити температуру утворення мінералів. Знаючи цю температуру, можна дослідити

залежність габітусу багатогранників від температури. На рис. 10 показано залежність габітусу кристалів берилу й топазу із камерних пегматитів Коростенського плутону від температури.

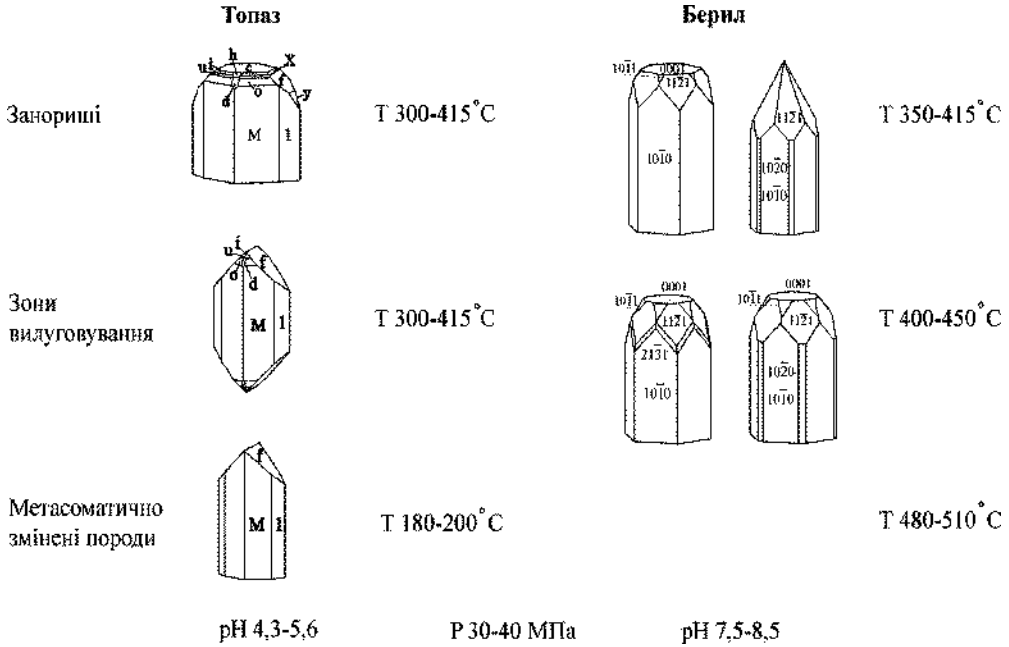


Рис. 10. Залежність габітусу кристалів топазу й берилу із камерних пегматитів Коростенського плутону від умов утворення, за [5]

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Отже, під час написання символів простих форм тригональної і гексагональної сингоній доцільно в тексті третій символ *i* замінити на крапку. Для розрахунку ретикулярної густини та для побудови кристала в програмі Shape третій символ ігнорується.

Кварцу притаманна мала кількість простих форм. На особливу увагу заслуговує довжина габітусу реальних багатогранників. У процесі кристалізації з падінням температури габітус кристалів кварцу часто змінюється від гексагонально-дипірамідального до тригонально-призматичного.

Для кальциту характерна велика кількість простих форм, тому його гоніометричні дослідження досить складні. Габітус багатогранників кальциту з різних родовищ суттєво відрізняється. Еволюція габітусу в процесі кристалізації простежується досить чітко.

Індексувати прості форми берилу досить складно, тому що грані часто вкриті фігурами росту й розчинення. У процесі еволюції з падінням температури кількість простих форм на багатогранниках берилу зменшується.

У майбутньому під час кристаломорфологічних досліджень важливо застосовувати системний підхід і послідовність застосування методів для підвищення інформативності в генетичному і прикладному аспектах, що продемонстровано на прикладі кристалів тригональної й гексагональної сингоній.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вовк О., Наулко І. Зв'язок кристалічної структури з особливостями морфології топазу з камерних пегматитів Волині. *Мінерал. зб. ЛНУ*. 2013. № 63. Вип. 1. С. 52–59.
2. Вовк О., Наулко І. Кристаломорфологія берилу з камерних пегматитів Волині. *Мінерал. зб.* 2013. № 63. Вип. 2. С. 83–90.
3. Вовк О., Наулко І. Генетичне значення кристаломорфологічних досліджень на прикладі топазу. *Мінерал. зб.* 2024. № 74. С. 22–30. <https://doi.org/10.30970/min.74.02>
4. Вовк О., Наулко І., Занкович Г. Регіональні особливості кристаломорфології кальциту деяких родовищ України. *Мінерал. зб.* 2025. № 75. С. 29–42. <https://doi.org/10.30970/min.75.02>
5. Вовк О. П. Кристаломорфологія топазу і берилу камерних пегматитів Коростенського плутону (північно-західна частина Українського щита): Автореф. дис. ... канд. геол. наук (прирівн. до PhD): 04.00.20 / ІГМР ім. М. П. Семененка НАН України. Київ, 2016. 25 с.
6. Вовк О. П., Наулко І. М., Занкович Г. О. Псевдосиметрія кристалів кварцу та її мінералого-генетичне значення. *Мінерал. журн.* 2025. Т. 47. № 1. С. 33–44. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.033>
7. Вовк О. П., Наулко І. М., Павлишин В. І. Генетичне значення зміни співвідношення між гранними формами кристалів топазу з камерних пегматитів Коростенського плутону (Український щит). *Мінерал. журн.* 2022. Т. 44. № 3. С. 40–47. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.040>
8. Занкович Г. О. Геохімія флюїдів прожилково-вкрапленої мінералізації перспективно нафтогазоносних комплексів північно-західної частини Кросненської зони Українських Карпат. Автореф. дис. ... канд. геол. наук (прирівн. до PhD): геохімія / ІГГГК НАН України. Львів, 2016. 25 с.
9. Заціха Б. В., Вовк П. К. Про кальцити зони зчленування Донбасу з Приазов'ям. *Доп. АН УРСР. Сер. Б.* 1969. № 7. С. 586–589.
10. Мінерали Українських Карпат. Борати, арсенати, фосфати, молібдати, сульфати, карбонати, органічні мінерали і мінералоїди / Гол. ред. О. І. Матковський. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. 344 с.
11. Andrew J., Skinner A. J., LaFemina J. P., Jansen H. J. F. Structure and bonding of calcite: A theoretical study. *Amer. Mineralogist*. 1994. Vol. 79. P. 205–214.
12. Aquilano D., Benages-Vilau R., Bruno M., M. Rubboa M., & Massaroa F. R. Positive {hk.l} and negative {hk.l} forms of calcite (CaCO₃) crystal. New open questions from the evaluation of their surface energies. *CrystEngComm*. 2013. Vol. 15. No. 22. P. 4465. <https://doi.org/10.1039/c3ce40203g>
13. Bravais A. Etudes cristallographiques. *Journ. De l'Ecole polytechnique*. 1851. Vol. 34. P. 166–170.
14. Donnay J. D. H., Harker D. A new law of crystal morphology extending the law of Bravais. *Amer. Mineralogist*. 1937. Vol. 23. P. 446–467.
15. Hartman P., Perdok W. On relation between crystal structure and crystal morphology. *Acta Cryst.* 1955. Vol. 8. P. 49–52.
16. Heijnen, W. M. M. *Crystal growth and morphology of calcium oxalates and carbonates*. Utrecht : Instituut voor Aardwetenschappen RUU, 1986. 186 p. URL: <https://research-portal.uu.nl/en/publications/crystal-growth-and-morphology-of-calcium-oxalates-and-carbonates/>
17. Kostov I. Mineralogy. Edinburgh : Oliver & Boyd, 1968. 587 p.
18. Laue M. Zur Theorie der Interferenzen der Röntgenstrahlen. *Annalen der Physik*. 1913. Bd. 346. H. 10. S. 989–1002.

19. Pastero L., Costa E., Bruno M., Rubbo M., Sgualdino G., & Aquilano D. Morphology of calcite (CaCO_3) crystals growing from aqueous solutions in the presence of Li^+ ions. Surface behavior of the {0001} form. *Crystal Growth & Design*. Vol. 4. Is. 3. P. 485–490. DOI:10.1021/cg034217r
20. Vovk O., Naumko I., Zankovych H., Kuzemko Ya. Comparison of morphology of quartz crystals – «Marmarosh diamonds» – from Paleogene Flysch sequences of Krosno (Silesian) Zone, Dukla Zone in Ukrainian Carpathians, and Intra-Carpathian sequences of Western Carpathians. *Mineralia Slovaca* 2022. Vol. 54. Is. 2. P. 163–174. <https://doi.org/10.56623/ms.2022.54.2.3> 54, 2 (2022), 163 – 174

REFERENCES

1. Vovk, O., & Naumko, I. (2013a). Zv'язok krystalichnoi struktury z osoblyvostiamy morfologii topazu z kamernykh pehmatyiv Volyni [The connection between crystal structure and morphology of topaz from Volyn chamber pegmatites]. *Mineralogical Collection*, 63 (1), 52–59.
2. Vovk, O., & Naumko, I. (2013b). Krystalomorfologhiia berylu z kamernykh pehmatyiv Volyni [Crystal morphology of beryl from Volyn chamber pegmatites]. *Mineralogical Review*, 63 (2), 83–90.
3. Vovk, O., & Naumko, I. (2024). Henetychne znachennia krystalomorfologichnykh doslidzhen na prykladi topazu [Genetic significance of crystal morphological studies on the example of topaz]. *Mineralogical Collection*, 74, 22–30. <https://doi.org/10.30970/min.74.02>
4. Vovk, O., Naumko, I., & Zankovych, H. (2025). Rehionalni osoblyvosti krystalomorfologhii kaltsytu deiakykh rodovyshch Ukrainy [Regional features of calcite crystal morphology in some deposits of Ukraine]. *Mineralogical Collection*, 75, 29–42. <https://doi.org/10.30970/min.75.02>
5. Vovk, O. P. (2016). *Krystalomorfologhiia topazu i berylu kamernykh pehmatyiv Korosten'skoho plutonu (pivnichno-zakhidna chastyna Ukrain'skoho shchyt)* [Crystal morphology of topaz and beryl of chamber pegmatites of the Korosten Pluton (north-western part of the Ukrainian Shield)]. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geological Sciences (equivalent to PhD): M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine. Kyiv.
6. Vovk, O. P., Naumko, I. M., & Zankovych, H. O. (2025). Psevdosymetriia krystaliv kvartsu ta yii mineraloho-henetychne znachennia [Pseudosymmetry of quartz crystals and its mineralogical-genetic significance]. *Mineralogical Journal*, 47 (1), 33–44. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.033>
7. Vovk, O. P., Naumko, I. M., & Pavlyshyn, V. I. (2022). Henetychne znachennia zminy spivvidnoshennia mizh hrannymy formamy krystaliv topazu z kamernykh pehmatyiv Korosten'skoho plutonu (Ukrainskyi shchyt) [Genetic significance of variations in the ratio between crystal forms of topaz from chamber pegmatites of the Korosten Pluton (Ukrainian Shield)]. *Mineralogical Journal*, 44 (3), 40–47. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.040>
8. Zankovych, H. O. (2016). *Heokhimiia fliuidiv prozhylkovo-vkraplenoi mineralizatsii perspektyvno naftohazonosnykh kompleksiv pivnichno-zakhidnoi chastyny Krosnenskoï zony Ukrain'skykh Karpat* [Geochemistry of fluids in veinlet-impregnated mineralization of the prospective hydrocarbon-bearing complexes in the northwestern part of the Krosno Zone of the Ukrainian Carpathians]. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geological Sciences (equivalent to PhD): Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the NAS of Ukraine. Lviv.

9. Zatsikha, B. V., & Vovk, P. K. (1969). Pro kaltsyty zony zchlenuvannia Donbasu z Pryazoviam [Calcites of the junction zone between the Donbas and the Azov Region]. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Ser. B*, 7, 586–589.
10. Matkovskiy, O. I. (Ed.) (2003). *Mineraly Ukrainykykh Karpat. Boraty, arsenaty, fosfaty, molibdaty, sulfaty, karbonaty, orhanichni mineraly i mineraloidy* [Minerals of the Ukrainian Carpathians: borates, arsenates, phosphates, molybdates, sulphates, carbonates, organic minerals and mineraloids]. Lviv: Publishing Centre of Ivan Franko National University of Lviv.
11. Andrew, J., Skinner, A. J., LaFemina, J. P., & Jansen, H. J. F. (1994). Structure and bonding of calcite: A theoretical study. *Amer. Mineralogist*, 79, 205–214.
12. Aquilano, D., Benages-Vilau, R., Bruno, M., Rubboa, M., & Massarao, F. R. (2013). Positive {hk.l} and negative {hk.l̄} forms of calcite (CaCO₃) crystal. New open questions from the evaluation of their surface energies. *CrystEngComm*, 15 (22), 4465. <https://doi.org/10.1039/c3ce40203g>
13. Bravais, A. (1851). Etudes cristallographiques. *Journ. De l'Ecole polytechnique*, 34, 166–170.
14. Donnay, J. D. H., & Harker, D. (1937). A new law of crystal morphology extending the law of Bravais. *Amer. Mineralogist*, 23, 446–467.
15. Hartman, P., & Perdok, W. (1955). On relation between crystal structure and crystal morphology. *Acta Cryst.*, 8, 49–52.
16. Heijnen, W. M. M. (1986). *Crystal growth and morphology of calcium oxalates and carbonates*. Utrecht: Instituut voor Aardwetenschappen RUU. URL: <https://research-portal.uu.nl/en/publications/crystal-growth-and-morphology-of-calcium-oxalates-and-carbonates/>
17. Kostov, I. (1968). *Mineralogy*. Edinburgh: Oliver & Boyd.
18. Laue, M. (1913). Zur Theorie der Interferenzen der Röntgenstrahlen. *Annalen der Physik*, 346 (10), 989–1002.
19. Pastero, L., Costa, E., Bruno, M., Rubbo, M., Sgualdino, G., & Aquilano, D. (2004). Morphology of calcite (CaCO₃) crystals growing from aqueous solutions in the presence of Li⁺ ions. Surface behavior of the {0001} form. *Crystal Growth & Design*, 4 (3), 485–490. DOI:10.1021/cg034217r
20. Vovk, O., Naumko, I., Zankovych, H., & Kuzemko, Ya. (2022). Comparison of morphology of quartz crystals – «Marmarosh diamonds» – from Paleogene Flysch sequences of Krosno (Silesian) Zone, Dukla Zone in Ukrainian Carpathians, and Intra-Carpathian sequences of Western Carpathians. *Mineralia Slovaca*, 54 (2), 163–174. <https://doi.org/10.56623/ms.2022.54.2.3> 54, 2 (2022), 163 – 174

FEATURES OF CRYSTAL GENETIC STUDIES OF MINERALS OF THE TRIGONAL AND HEXAGONAL SYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF QUARTZ, CALCITE AND BERYL)

Oleksandr Vovk¹, Ihor Naumko²

geologygeochemistry@gmail.com; naumko@ukr.net

¹ *Lesya Ukrainka Volyn National University,
9, Bankova St., Lutsk, Ukraine, 43025*

² *Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NASU,
3a, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine*

The specific features of crystal genetic studies of trigonal and hexagonal crystals (quartz, calcite, beryl) using the Bravais setting are analysed based on published, original, and archival data. The

expediency of improving the notation of simple forms in trigonal and hexagonal systems by simplifying their symbols within the Bravais setting is substantiated. It is shown that the combination of goniometry, crystal structure analysis, and thermobarogeochemical methods (mineral thermometry) makes it possible to obtain comprehensive information on mineral formation conditions without destroying crystal integrity. It is emphasized that theoretically morphologically important simple forms determined by crystal structure do not carry genetic information, whereas their real ratios and degree of development reflect the parameters of the mineral-forming environment. Differences in the morphology and habit of quartz, calcite, and beryl crystals are revealed, controlled by both regional factors and formation conditions, including temperature, pressure, and fluid flow dynamics. It is demonstrated that the evolution of crystal habit during crystallization follows regular patterns and can be used to reconstruct physicochemical conditions of formation and the degree of erosion of deposits. Overall, the importance of a systematic approach and a consistent sequence of methods is demonstrated for increasing the informativeness of crystal morphological studies in both genetic and applied aspects.

Key words: crystal genesis, quartz, calcite, beryl, trigonal system, hexagonal system, Bravais setting, goniometry, crystal morphology, thermobarogeochemistry.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 550.4:553.3(477.42)

ХІМІЧНИЙ СКЛАД І ЛАТЕРАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ІЛЬМЕНІТУ ТА ЗМІНЕНИХ ЙОГО ВІДМІН НА ДІЛЯНКАХ ЄМИЛІВСЬКА Й СЕРЕДНЯ МЕЖИРІЧНОГО РОДОВИЩА ТИТАНУ (ЖИТОМИРСЬКА ОБЛ.)

Миرون Ковальчук, д-р геол. наук, проф., зав. відділу літології
kms1964@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-9265-9707>

Любов Фігура, канд. геол. наук, старший дослідник, учений секретар
liuba_figura@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-8009-2854>

*Інститут геологічних наук НАН України,
вул. Олесь Гончара, 55б, Київ, Україна, 01601*

Досліджено хімічний склад ільменіту з нижньокрейдових алювіальних каолінових пісків іршанської світи на ділянках Ємилівська й Середня Межирічного родовища титанових руд (Волинський мегаблок Українського щита). Це дало змогу виявити його варіації на різних ділянках і виконати порівняльний аналіз. Кореляційним аналізом визначено напрям і силу кореляційних зв'язків між оксидами, а також спільні закономірності й суттєві відмінності у взаємозв'язках між оксидами. Сильна негативна кореляція між FeO та Fe₂O₃ і позитивна – між TiO₂ та Fe₂O₃ відображає баланс між відновленою й окисненою формами заліза в ільменіті.

Для виокремлення магматичного ільменіту, псевдуриту та лейкоксенованого ільменіту застосовано два підходи: 1) за співвідношенням FeO/Fe₂O₃, що дає змогу швидко класифікувати зерна; 2) за поєднанням зазначеного співвідношення з абсолютними концентраціями FeO та Fe₂O₃, що забезпечує точнішу інтерпретацію. Завдяки такому підходу підтверджено наявність як первинного магматичного ільменіту, так і змінених його відмін, утворених за екзогенних умов. Виконано порівняльний аналіз процесів псевдуритизації й лейкоксенізації ільменіту в межах Ємилівської й Середньої ділянок.

Фрактальний аналіз просторового поширення магматичного ільменіту та його змінених форм засвідчив, що їх розподіл має ознаки самоподібності та структурної організації, а це відображає природні процеси диференціації і вторинної трансформації.

Виконано картографічне моделювання ареалів поширення ільменіту різного хімічного складу та з різним співвідношенням FeO/Fe₂O₃, яке дає змогу визначити ступінь екзогенного перетворення, прогнозувати ареали поширення ільменіту з різними якісними характеристиками, реконструювати умови формування розсипів та оптимізувати промислове освоєння залишкових запасів у межах досліджених ділянок. У запропонованій комплексній моделі інтегровано хімічні, мінералогічні та просторові дані. Це забезпечує глибше розуміння генезису ільменітових розсипищ, їхньої хімічної зональності й потенціалу для промислового розроблення.

Ключові слова: ільменіт, псевдурит, лейкоксенізація, хімічний склад, вторинні зміни, розсипище, латеральний розподіл, кореляційний аналіз, картографування, Межирічне родовище, Український щит.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.02>

Постановка проблеми. Титанові руди включено до затвердженого Радою національної безпеки і оборони України переліку корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки й обороноздатності України. Мінерально-сировинна база титану України достатньо розвинена і перспективна в конкурентній боротьбі на світовому ринку. Межирічне родовище, розташоване у Волинському мегаблоці Українського щита (Житомирська обл.), нині має стратегічне промислове значення для титанової галузі України й водночас є цінним науковим полігоном для дослідження процесів екзогенного рудоутворення в породах різного віку й генезису.

Основним титановмісним мінералом є ільменіт, який за природних умов зазнає змін різного ступеня. Окрім первинного магматичного ільменіту, в алювіальних відкладах поширені його похідні – псевдуритил і лейкоксенізований ільменіт, які утворюються внаслідок вилуговування з мінералу заліза й збагачення титаном.

Необхідність дослідження хімічного складу ільменіту в розсипах зумовлена тим, що хімічний склад ільменіту відображає умови його утворення і трансформацію в системі корінні породи–кора звітрювання–алувіальні відклади, визначає його придатність для виробництва пігментів, металевого титану, феросплавів тощо. Діагностування трансформаційних форм ільменіту й картографування просторового поширення різних відмін мінералу в алювіальних пісках нижньої крейди Ємилівської й Середньої ділянок Межирічного родовища мають наукову і практичну значимість, оскільки дають змогу поєднати якісні характеристики мінералу з просторово-статистичними закономірностями їх розподілу.

Аналіз досліджень. Межирічне родовище ільменіту як поховане розсипне родовище було відкрито 1954 р. під час буріння трьох магістральних ліній у межиріччі Ірша–Тростяниця. Протягом 1971–1975 рр. геологи Іршанського гірничо-збагачувального комбінату провадили геологорозвідувальні роботи на Середній та Ємилівській ділянках родовища. У 1988–1989 рр. виконано дорозвідку й технологічне картування, уточнено геологічну будову та визначено технологічні характеристики ільменітоносних пісків на зазначених ділянках. Експлуатацію Межирічного родовища почали 2001 р. з розробки Ємилівської ділянки, а 2003 р. почали розробляти ділянку Середня. У 2017–2018 рр. виконано повторну геолого-економічну оцінку запасів на ділянках Середня, Ємилівська, Юрська, Осінова і Букинська, що дало змогу схарактеризувати геологічну будову родовища, морфологію рудних тіл, речовинний склад і технологічні властивості руд, а також оцінити гідргеологічні, інженерно–геологічні й гірничотехнічні умови розробки. За результатами повторної геолого-економічної оцінки залишку всіх виявлених запасів корисних копалин Межирічного родовища в межах ділянок Ємилівська й Середня підраховано балансові (категорія В) і позабалансові (категорії В, C_1 , $V+C_1$) запаси.

У 2022–2025 рр. Л. Фігура та М. Ковальчук дослідили рудоносність кори звітрювання, крейдових (апт–нижній альб, турон) і палеоген–четвертинних відкладів Осінової, Букинської, Юрської та Ємилівської ділянок, завдяки чому було створено комплект картографічних матеріалів, що відображають просторовий розподіл ільменіту в зазначених відкладах [7]. У 2025 р. О. Ганжа з колегами стисло схарактеризувала особливості геологічної будови й рудоносність кори звітрювання та продуктивного пласта в межах окремих ділянок родовища (Осінова, Юрська, Середня, Ємилівська, Ісаківська, Південна, Рихтинська, Букинська). Дослідники представили зведені дані щодо гіпсометрії підосви, покрівлі, товщини пластів та середньої концентрації ільменіту для шести ділянок, у тім числі Ємилівської й Середньої.

Від початку розробки родовища триває дослідження якості сировини, зокрема, хімічного складу ільменіту. Однак поза увагою науковців залишилася низка важливих аспектів, як-от варіативність хімічного складу ільменіту, трансформаційні різновиди мінералу,

сформовані за екзогенних умов, просторовий розподіл по-різному змінених зерен ільменіту та ін. Пропонована публікація частково компенсує цю наукову прогалину. Нижче наведено результати комплексного дослідження хімічного складу ільменіту з продуктивних піщаних утворень нижньої крейди в межах ділянок Ємилівська та Середня. Вибір ділянок зумовлений їхнім розташуванням у верхів'ї ранньокрейдової палеодолини, що дає змогу простежити трансформацію хімічного складу ільменіту вниз за палеотечею давньої річкової системи – від Ємилівської ділянки до Середньої.

Основою досліджень є наші напрацювання щодо рудоносності елювіальних і розсипних родовищ ільменіту й картографування просторового поширення ільменіту різного хімічного складу [2–5], а також наукові публікації стосовно змін магматичного ільменіту за екзогенних умов з виокремленням його вторинних відмін – псевдуриту, лейкоксенованого ільменіту, лейкоксену [10; 13]. Фактичним матеріалом слугували результати хімічного аналізу ільменіту, виконані в різні роки виробничими геологічними організаціями. Для визначення взаємозв'язку між оксидами в ільменіті використано статистичні методи кореляції Пірсона, для картування просторового розподілу ільменіту – програмне забезпечення Golden Software Surfer, для з'ясування просторової неоднорідності розсипів на ділянках – фрактальний метод [1] і програмне забезпечення Python 3.11.8.

Метою дослідження є аналіз хімічного складу ільменіту з двох ділянок Межирічного родовища – Ємилівської й Середньої, з'ясування кореляційних зв'язків між оксидами, визначення ступеня зміни ільменітових зерен з виокремленням магматичного ільменіту, псевдуриту та лейкоксенованого ільменіту і просторового поширення цих відмін.

Виклад основного матеріалу. Ємилівська ділянка розташована в південно-західній частині Межирічного родовища і безпосередньо прилягає до західної околиці с. Ємилівка (Коростенський р-н); ділянка Середня є продовженням Ємилівської за палеотечею ранньокрейдової палеодолини і розташована за 0,3 км від північної околиці цього села (рис. 1). У геологічній будові обох ділянок беруть участь докембрійські породи кристалічного фундаменту, кора звітрювання з чіткою вертикальною зональністю, продуктивні континентальні відклади іршанської світи K_1 , узбережно-морські відклади мошно-руднянської світи K_2 і палеоген-четвертинні утворення. Серед магматичних порід переважають анортозити й габро-анортозити, менше розвинені габро, габронорити тощо [7].

Первинні рудні тіла з різним вмістом ільменіту були приурочені до анортозитів, габро-анортозитів та інших різновидів габро. Процеси звітрювання спричинили вивільнення ільменіту з кристалічних порід та утворення рудних тіл у корі звітрювання (здебільшого вони є продовженням рудних тіл фундаменту). Подальші процеси розмивання й перевідкладання елювію призвели до утворення континентальних відкладів іршанської світи, які нині вивопнюють давню поховану річкову палеодолину в корі звітрювання й містять промислові концентрації ільменіту. За результатами досліджень Н. Нестеренко (2018), на ділянках Ємилівська та Середня зафіксовано такий вміст ільменіту, кг/м³: у корі звітрювання – 446,3 та 265,6, відповідно; у делювіальних гравійно-галькових піщаних каолінах – 291,3 та 461,6, в алювіальних перевідкладених каолінах – 45,1 та 426,9, в алювіальних різнозернистих пісках – 666,6 та 356,7 (іршанська світа); у піщано-кремневою горизонті мошно-руднянської світи – 41,5 та 244,6, відповідно.

Простежується значна варіативність вмісту ільменіту залежно від літологічного типу порід, їхнього генезису й віку, що підтверджує складну просторову структуру розподілу мінералу у стратиграфічному розрізі обох ділянок. Продуктивними утвореннями є відклади іршанської світи нижньої крейди (апг–нижній альб). Літологічно це гравійно-галькові піщанисті каоліни, перевідкладені каоліни й різнозернисті каолінисті піски.

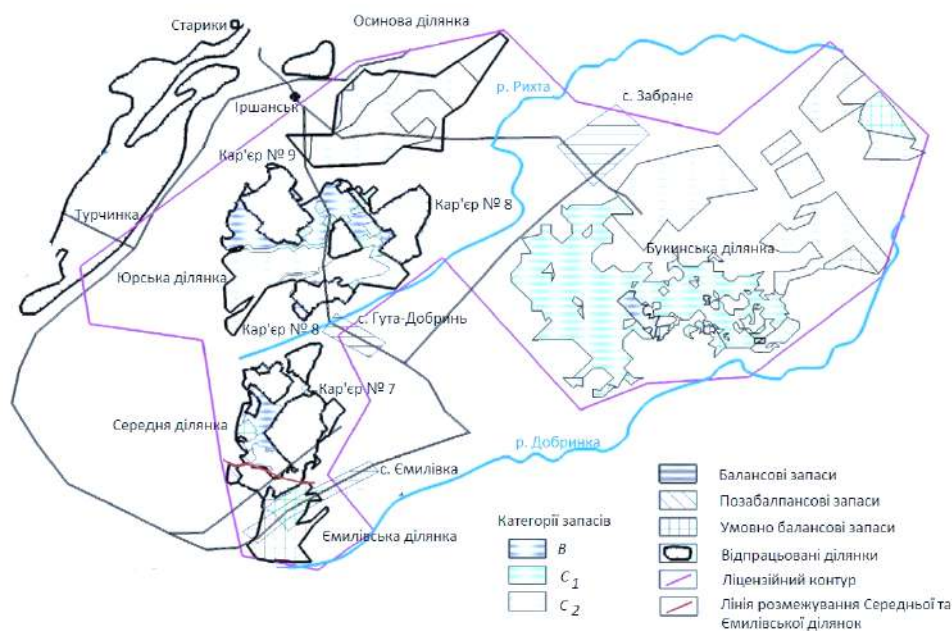


Рис. 1. Схема розташування ділянок Ємилівська і Середня в межах Межиричнього родовища, за Т. Нестеренко (2018)

Ми досліджували хімічний склад ільменіту з піщаних утворень іршанської світи. Піщаним відкладом притаманний невитриманий гранулометричний склад; шаруватість слабка, або ж її просто нема, іноді трапляється коса шаруватість. Ступінь сортування зерен поганій, або ж відклади взагалі несортвані. Товщина піщаних відкладів на ділянці Ємилівська становить 1,3–21,0 м (середнє значення – 11,99 м), на ділянці Середня – 0,5–29,5 м (12,13 м).

Понад 90 % зерен ільменіту сконцентровані в класі крупності $-1,0+0,1$ мм, найбільше – у класі $-0,5+0,1$ мм. Розмір зерен становить головню 0,30–0,56 мм (середнє значення – 0,44 мм). Найбагатші розсили пов'язані з різнозернистими пісками. Колір ільменіту залізо-чорний, часто з темно-коричневим відтінком.

Хімічним аналізом в ільменіті з пісків Ємилівської ділянки визначено такі оксиди, %: TiO_2 – 53,20–56,92 (середнє значення – 55,43); Cr_2O_3 – 0,024–0,031 (0,028); Fe_2O_3 – 10,98–16,97 (14,47); FeO – 23,03–32,04 (25,71); MnO – 0,50–0,87 (0,64); V_2O_5 – 0,179–0,237 (0,207); P_2O_5 – 0,029–0,134 (0,086). Співвідношення FeO/Fe_2O_3 становить 1,35–2,91 (1,74), що засвідчує наявність майже незміненого і слабо зміненого мінералу. У більшості свердловин наявний ільменіт з $FeO/Fe_2O_3 = 1,5–1,9$. У табл. 1 наведено результати кореляційного аналізу хімічного складу ільменіту Ємилівської ділянки.

Як видно з табл. 1, обернені сильні кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO_2 і FeO та між FeO і Fe_2O_3 . Прямі середньої сили кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO_2 і P_2O_5 , FeO і MnO , Fe_2O_3 і Cr_2O_3 , обернений середньої сили – між TiO_2 і MnO . Прямі помірні кореляційні зв'язки наявні між TiO_2 і Fe_2O_3 , FeO і V_2O_5 , обернені помірні – між FeO і Cr_2O_3 , Fe_2O_3 і V_2O_5 , Fe_2O_3 і P_2O_5 , Fe_2O_3 і MnO . Прямі слабкі кореляційні зв'язки наявні між P_2O_5 і V_2O_5 , Cr_2O_3 і V_2O_5 , обернені слабкі – між P_2O_5 і MnO , P_2O_5 і Cr_2O_3 , FeO

Таблиця 1

Матриця кореляційних коефіцієнтів між оксидами в ільменіті з Ємлівської ділянки

Оксиди	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅
TiO ₂	X	-0,84	+0,44	-0,61	+0,17	–	+0,53
FeO	-0,84	X	-0,79	+0,56	-0,45	+0,37	-0,22
Fe ₂ O ₃	+0,44	-0,79	X	-0,42	+0,54	-0,44	-0,34
MnO	-0,61	+0,56	-0,42	X	–	–	-0,28
Cr ₂ O ₃	+0,17	-0,45	+0,54	–	X	+0,23	-0,20
V ₂ O ₅	–	+0,37	-0,44	–	+0,23	X	+0,28
P ₂ O ₅	+0,53	-0,22	-0,34	-0,28	-0,20	+0,28	X

і P₂O₅. Прямий дуже слабкий кореляційний зв'язок наявний між TiO₂ і Cr₂O₃, обернений дуже слабкий – між TiO₂ і V₂O₅. Між MnO і Cr₂O₃ та MnO і V₂O₅ кореляційного зв'язку не виявлено. Сильні обернені зв'язки відображають внутрішню структуру мінералу, середні й помірні – наявність домішкових включень, слабкі – випадкові асоціації, а відсутність кореляції – незалежність елементів.

У хімічному складі ільменіту ділянки Середня діагностовано такі оксиди, %: TiO₂ – 52,53–60,02 (середнє значення – 54,99); Cr₂O₃ – 0,01–0,05 (0,03); Fe₂O₃ – 11,38–20,95 (15,15); FeO – 15,29–32,70 (26,12); MnO – 0,50–0,86 (0,62); V₂O₅ – 0,20–0,25 (0,22); P₂O₅ – 0,03–0,19 (0,08). Співвідношення FeO/Fe₂O₃ становить 0,79–2,85 (1,75), що свідчить про наявність незміненого, слабо зміненого і сильно зміненого мінералу. У більшості свердловин виявлено ільменіт з FeO/Fe₂O₃ = 1,3–1,9. У табл. 2 наведено результати кореляційного аналізу хімічного складу ільменіту ділянки Середня.

Таблиця 2

Матриця кореляційних коефіцієнтів між оксидами в ільменіті з ділянки Середня

Оксиди	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅
TiO ₂	X	-0,89	+0,73	–	+0,48	+0,10	+0,74
FeO	-0,89	X	-0,91	-0,13	-0,50	–	-0,70
Fe ₂ O ₃	+0,73	-0,91	X	+0,18	+0,39	–	+0,55
MnO	–	-0,13	+0,18	X	–	-0,45	+0,10
Cr ₂ O ₃	+0,48	-0,50	+0,39	–	X	-0,10	+0,22
V ₂ O ₅	+0,10	–	–	-0,45	-0,10	X	+0,15
P ₂ O ₅	+0,74	-0,70	+0,55	+0,10	+0,22	+0,15	X

Як видно з табл. 2, обернені сильні кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO₂ і FeO, FeO і Fe₂O₃, FeO і P₂O₅, прямі сильні – між TiO₂ і P₂O₅, TiO₂ і Fe₂O₃. Прямий середньої сили кореляційний зв'язок наявний між Fe₂O₃ і P₂O₅, обернений – між FeO і Cr₂O₃. Прямі помірні кореляційні зв'язки наявні між TiO₂ і Cr₂O₃, Fe₂O₃ і Cr₂O₃, обернені помірні – між V₂O₅ і MnO. Прямий слабкий кореляційний зв'язок наявний між P₂O₅ і Cr₂O₃. Прямі дуже слабкі кореляційні зв'язки зафіксовано між Fe₂O₃ і MnO, P₂O₅ і V₂O₅, TiO₂ і V₂O₅, P₂O₅ і MnO, обернені слабкі – між FeO і MnO, Cr₂O₃ і V₂O₅. Кореляційного зв'язку між вмістом TiO₂ і MnO, FeO і V₂O₅, Fe₂O₃ і V₂O₅, Cr₂O₃ і MnO не виявлено.

Латеральне поширення ільменіту різного хімічного складу на ділянці Ємилівська показано на рис. 2. Отже, ільменіт з найвищим умістом TiO_2 поширений у північно-західній і південно-східній частинах ділянки, а з найнижчим – у північно-східній і південно-західній, з найвищим умістом FeO – на півдні ділянки, а з найнижчим – у північно-західній і південно-східній частинах. Найменше Fe_2O_3 в ільменіті на заході ділянки. Найбільші значення співвідношення FeO/Fe_2O_3 в ільменіті (тобто ільменіт найменше змінений екзогенними процесами) притаманні мінералу з південно-східної частини ділянки. Ільменіт з найвищим умістом P_2O_5 і V_2O_5 поширений у північно-західній і південно-східній частинах ділянки, з найбільшим вмістом MnO – у південній частині, а Cr_2O_3 – у північній (див. рис. 2).

На ділянці Середня латеральне поширення ільменіту різного складу плямисте (рис. 3), що свідчить про складніший просторовий розподіл мінералу порівняно з ділянкою Ємилівська. Однак є певні закономірності, зокрема, ареал ільменіту з найвищим вмістом TiO_2 і Fe_2O_3 розташований у західній частині ділянки. Просторово йому відповідає ареал ільменіту з найнижчим умістом FeO . Ільменіт з найвищим умістом MnO поширений у східній частині ділянки (див. рис. 3).

На підставі наявних даних [6; 8; 10–13], хімічного складу ільменіту з піщаних відкладів та співвідношення в ньому FeO/Fe_2O_3 виокремлено магматичний ільменіт та продукти його зміни. Головним індикатором ступеня змінності розсипного ільменіту за екзогенних умов є співвідношення FeO/Fe_2O_3 , яке відображає баланс між відновленою та окисненою формами заліза. Ми застосували два методи: перший ґрунтується на співвідношенні FeO/Fe_2O_3 в ільменіті, другий – на цьому співвідношенні та абсолютних значеннях FeO і Fe_2O_3 . Перевагами першого методу є простота, відтворюваність, можливість застосування на різних ділянках без додаткових параметрів, а недоліком – відсутність чутливості до локальних хімічних відмінностей мінералу та можливість хибної інтерпретації в разі близьких значень співвідношення. Однак, незважаючи на це, співвідношення FeO/Fe_2O_3 є ключовим індикатором стадії зміни ільменіту. На підставі цього методу в межах ділянок Ємилівська й Середня в піщаних відкладах виокремлено магматичний ільменіт (значення $FeO/Fe_2O_3 > 1,6$), псевдуритил (1,6–1,2) і лейкоксенізований ільменіт ($< 1,2$). Отже, на Ємилівській ділянці магматичний ільменіт становить 63,64 %, а псевдуритил – 36,36 %; на ділянці Середня магматичний ільменіт становить 69,40 %, псевдуритил – 24,48, лейкоксенізований ільменіт – 6,12 %.

У процесі застосування другого методу використано такі критерії: для магматичного ільменіту – $FeO/Fe_2O_3 > 1,6$, $FeO > 25$ %, $Fe_2O_3 < 15$ %, для псевдуритилу – відповідно, 1,2–1,6, 22–25 %, 15–18 %, для лейкоксенізованого ільменіту – $< 1,2$, < 22 %, > 18 %. Високий вміст FeO відповідає магматичному ільменіту, збільшення кількості Fe_2O_3 свідчить про зміни мінералу. Зазначимо, що цей метод продемонстрував вищу точність діагностики, передусім, для змінених форм. Зокрема, на Ємилівській ділянці першим методом частину зерен діагностовано як псевдуритил, а за другим методом – як лейкоксенізований ільменіт. Відповідно до описаних критеріїв, у межах Ємилівської ділянки магматичний ільменіт становить 54,55 %, псевдуритил – 27,27, а лейкоксенізований ільменіт – 18,18 %, на ділянці Середня, відповідно, – 77,56, 16,32 і 6,12 %.

Для оцінки просторової неоднорідності розсипищ використано фрактальний метод, який дає змогу описати складний, нерегулярний розподіл ільменіту і його змінених форм через фрактальну розмірність D . Для магматичного ільменіту та продуктів його зміни визначено таку фрактальну розмірність $D_{\text{арргох}}$: магматичний ільменіт – 1,7–1,9, псевдуритил – 1,3–1,5, лейкоксенізований ільменіт – 1,1–1,3. Отже, для магматичного ільменіту характерні кластеризовані поля й порівняно рівномірний просторовий розподіл;

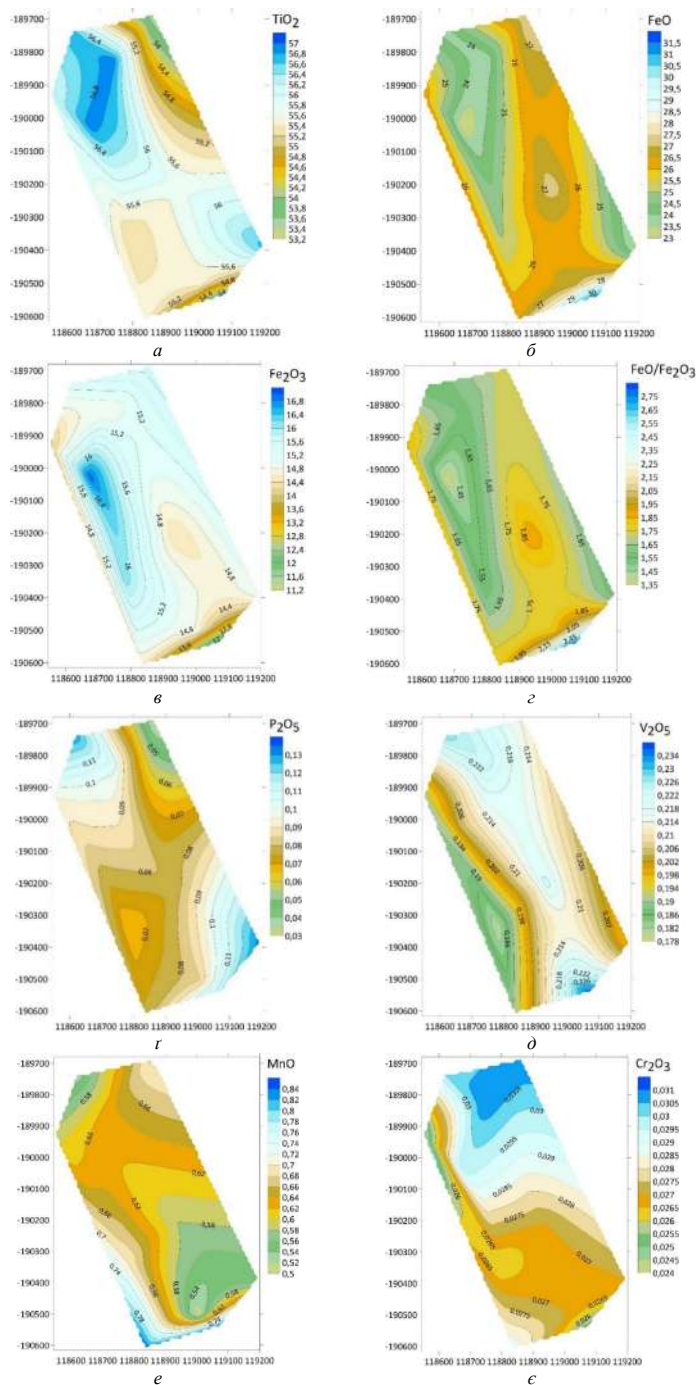


Рис. 2. Латеральне поширення ільменіту різного складу на Ємилівській ділянці
(вміст оксидів у відсотках):
а – TiO_2 ; б – FeO ; в – Fe_2O_3 ; з – $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$; р – P_2O_5 ; д – V_2O_5 ; е – MnO ; є – Cr_2O_3

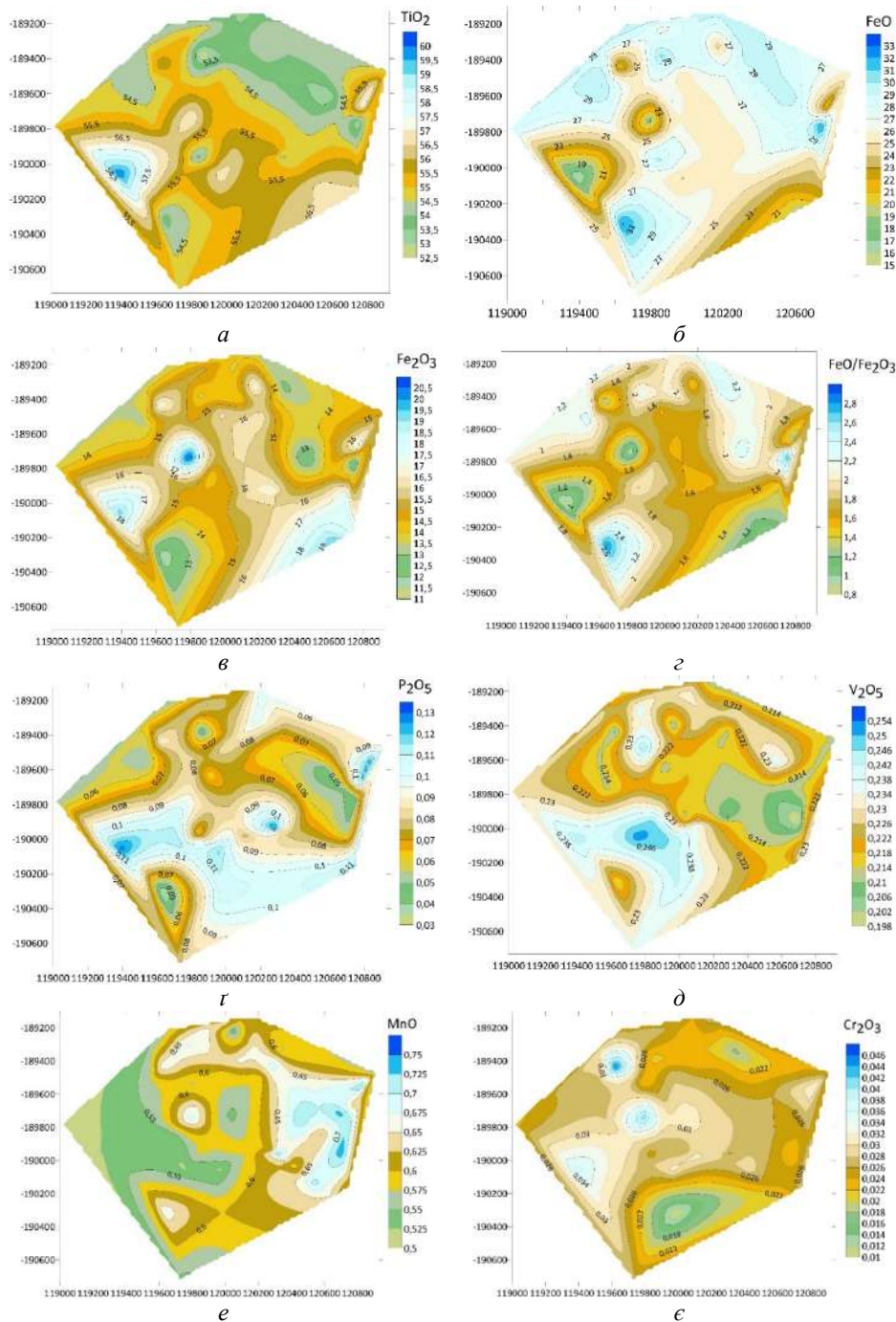


Рис. 3. Латеральне поширення ільменіту різного складу на ділянці Середня (вміст оксидів у відсотках):
 а – TiO_2 ; б – FeO ; в – Fe_2O_3 ; з – FeO/Fe_2O_3 ; р – P_2O_5 ; д – V_2O_5 ; е – MnO ; е – Cr_2O_3

псевдуритил має дисперсний розподіл у локальних зонах; лейкоксенізований ільменіт сконцентрований у піщаних відкладах, причому його зерна розподілені випадково й нерівномірно. Просторове картографування поширення ільменіту та його змінених різновидів на ділянці Середня добре узгоджується з просторовим поширенням ільменіту, у якому є різне співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 4).

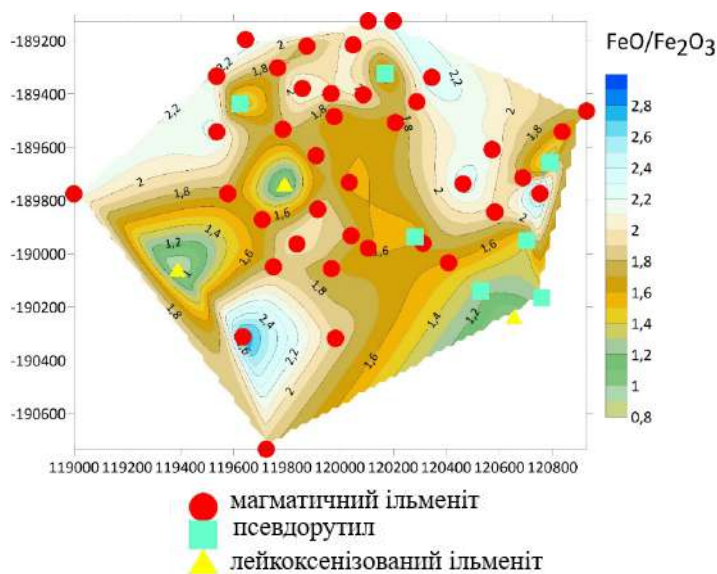


Рис. 4. Карта просторового поширення ільменіту з різним співвідношенням $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, суміщена з картою просторового поширення магматичного ільменіту та змінених його відмін, ділянка Середня

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз хімічного складу ільменіту з піщаних відкладів ділянок Смилівська і Середня Межирічного родовища засвідчив, що ільменіт Смилівської ділянки має стабільний склад, натомість в ільменіті з ділянки Середня зафіксовано ширший діапазон хімічних параметрів, включно з підвищеним вмістом TiO_2 та варіативним співвідношенням $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, ширшим діапазоном мінімальних і максимальних значень вмісту FeO . Вміст P_2O_5 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , MnO загалом подібний, проте на ділянці Середня вміст MnO дещо нижчий, а максимальний вміст Cr_2O_3 дещо більший. На цій же ділянці співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в ільменіті менше від одиниці, що свідчить про наявність більш окисненого ільменіту. Зменшення співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ свідчить про інтенсивність екзогенних перетворень мінералу та зміну його фізико-хімічних властивостей, які впливають на технологічні підходи до збагачення [9].

Порівняльний аналіз напряму і сили кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті на досліджених ділянках засвідчив як спільні, так і контрастні тенденції. Ільменіту Смилівської ділянки притаманна збалансованіша система кореляційних зв'язків між оксидами, тоді як ільменіту ділянки Середня – більш поляризована й інтенсивно диференційована.

За допомогою двох методів на ділянках виокремлено магматичний ільменіт, псевдуритил і лейкоксенізований ільменіт, визначено їхній відсотковий вміст у відкладах. Це має важливе геологічне й промислове значення, оскільки відображає стадії екзогенного перетворення мінералу та визначає його якість як рудної сировини.

Просторове картографування ареалів поширення незміненого й по-різному перетвореного ільменіту є інструментом для реконструкції умов формування розсипищ, промислової оцінки ділянок, виявлення ареалів поширення руд вищої якості. За допомогою таких карт можна оптимізувати гірничі роботи, зосереджуючи їх на ділянках з найціннішою сировиною.

Фрактальний аналіз просторового розподілу магматичного ільменіту, псевдуриту і лейкоксенованого ільменіту на Ємилівській та Середній ділянках засвідчив чітку диференціацію їхніх фрактальних розмірностей. Магматичний ільменіт характеризується порівняно високими значеннями фрактальної розмірності, що відображає кластеризовані поля і збереження елементів первинної магматичної структури навіть у розсипищі. Псевдурит демонструє середні значення цього показника, які відповідають більш дисперсному розподілу зерен, що утворилися внаслідок гіпергенезу в корі звітрювання й були перевідкладені в алювії. Лейкоксенований ільменіт має найнижчі значення фрактальної розмірності, що свідчить про ізольовані прояви та випадковий розподіл його зерен у піщаних відкладах.

Отже, умови формування розсипищ і екзогенної трансформації ільменіту в межах досліджених ділянок були подібні за загальними тенденціями, проте локально відрізнялися за інтенсивністю процесів та структурною неоднорідністю.

Результати дослідження ільменіту з ділянок Ємилівська та Середня засвідчують варіативність хімічного складу мінералу, що відображає як первинні магматичні особливості, так і вторинні зміни. Це узгоджується з результатами зарубіжних науковців [10], які описують універсальну послідовність змін ільменіту за континентальних умов, супроводжувану вилуговуванням заліза та збагаченням титаном: ільменіт → псевдурит → лейкоксен. Китайські вчені досліджували звітрювання ільменіту в районі Гуансі (Guangxi) і дійшли висновку, що утворення псевдуриту й лейкоксену створює умови для сумісної мінералізації з рідкісноземельними елементами [13]. Ми виявили на Межирічному родовищі псевдурит і лейкоксенований ільменіт, що узгоджується з моделлю [13] і може вказувати на ймовірну рідкісноземельну мінералізацію на ділянках поширення цих змінених відмін ільменіту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на застосування високоточних методів мікроаналізу (SEM – сканувальна електронна мікроскопія, EPMA – електронно-зондовий мікроаналіз, LA-ICP-MS – метод лазерної абляції з індуктивно-зв'язаною плазмою і мас-спектрометрією) для деталізації процесів псевдуритизації й лейкоксенізації та дослідження наявності рідкісноземельних елементів у змінених різновидах ільменіту, а також на розвиток фрактального моделювання як інструмента кількісної оцінки неоднорідності й прогнозування просторових меж ільменітовмісних тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білоус О. І., Парфенюк В. О., Безвинний В. П., Слободян Б. І. Застосування фрактального аналізу для кількісної оцінки родовищ критичної мінеральної сировини (на прикладі Полохівського родовища літію). *Мінеральні ресурси України*, 2024. № 3. С. 4–9. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.10-15>
2. Ковальчук М., Фігура Л. Ільменітоносність продуктивних відкладів та якісні параметри ільменіту Тростяницького родовища титанових руд. *Мінералогічний збірник*. 2025. № 74. С. 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03>
3. Ковальчук М. С., Крошко Ю. В. Ільменіт з нижньокрейдових континентальних відкладів Андріївського розсипного родовища титанових руд. *Слобожанський науковий вісник. Серія Природничі науки*. 2025. Вип 2. С. 143–150. <https://doi.org/10.32782/naturalsspu/2025.2.19>

4. Крошко Ю. В., Ковальчук М. С. Ільменіт з кори вивітрювання та нижньокрейдових відкладів Бирзулівського родовища титанових руд. *Мінералогічний журнал*. 2025. Т. 47. № 3. С. 110–124. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.03.110>
5. Крошко Ю. В., Ковальчук М. С. Рудоносність Аврамівського і Західного родовищ (Новомиргородський габро-анортозитовий масив). *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 1. С. 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49>
6. Полетньова О. В. Геохімічні особливості ільменіту з кори вивітрювання та алювіальних розсипів Українського щита. *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 4. С. 35–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.35-40>
7. Фігура Л., Ковальчук М. Рудоносність Ємилівської ділянки Межирічного родовища титанових руд. *Вісник Львівського університету. Серія геологічна*. 2025. Вип. 39. С. 189–204. <https://doi.org/10.30970/vgl.39.15>
8. Харитонов В. М., Харитонов Д. В. Особливості хімічного складу ільменіту Малишевського кайнозойського родовища та деяких докембрійських порід Українського щита. *Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність. Матеріали міжнар. наук. конф. Київ: Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка, 2020. С. 224–226.*
9. Akbar M., Irannejad M., Rezaei B. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effect on physical and surface properties. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 70. P. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.002>
10. BenchChem Technical Support Team. Ilmenite weathering and alteration in continental settings: chemical changes and placer concentration. *Foundational & Exploratory*. 2026. 1198. URL:https://pdf.benchchem.com/1198/Ilmenite_weathering_processes_and_alteration_products.pdf (access date 20/03/2026).
11. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An introduction to the rock-forming minerals. 2nd ed. London: Longman Scientific & Technical, 1992. 696 p.
12. Force E. R. Geology of titanium-mineral deposits. Geological Society of America, Spec. Paper 282. Boulder: GSA, 1991. 112 p. <https://doi.org/10.1130/SPE259>
13. Luo P., Fu W., Guo X., Lu H., Chai M., Hu M., Lu J., Wang X., Xu C. Weathering co-mineralization of placer type ilmenite and ion-adsorption type rare earth elements in Guangxi, China: Nature, origin and exploration implications. *Ore Geology Reviews*. 2023. Vol. 163. Art. 105815. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105815>

REFERENCES

1. Bilous, O. I., Parfeniuk, V. O., Bezvynnyi, V. P., & Slobodian, B. I. (2024). Zastosuvannya fraktalnoho analizu dlia kilkisnoi otsinky rodovyshch krytychnoi mineralnoi syrovyny (na prykladi Polokhivskoho rodovyshcha litiuu) [Application of fractal analysis for quantitative assessment of critical mineral commodities (on example of Polokhivske lithium deposit)]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 3, 4–9. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.10-15>
2. Kovalchuk, M., & Figura, L. (2024). Ilmenitonosnist produktyvnykh vidkladiv ta yakisni parametry ilmenitu Trostianytskoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite-bearing capacity of productive sediments and quality parameters of ilmenite of the Trostianytske titanium ore deposit]. *Mineralohichnyi zbirnyk – Mineralogical Collection*, 74, 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03>
3. Kovalchuk, M. S., & Kroshko, Yu. V. (2025). Ilmenit z nyzhnokreidovykh kontynentalnykh vidkladiv Andriivskoho rozsypnoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite from the lower cretaceous continental deposits of the Andriivsky placer deposit of titanium ores]. *Slobozhanskyi naukovyi visnyk. Seriya Pryrodnychi nauky – Sloboda Scientific journal. Natural Sciences*, 2, 143–150. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.19>

4. Kovalchuk, M. S., & Kroshko, Yu. V. (2025). Ilmenit z kory vyvitriuvannya ta nyzhnokreidovykh vidkladiv Byrzulivskoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite from weathering crust and lower cretaceous sediments of the Byrzulivske titanium ore deposit]. *Mineralohichnyi zhurnal – Mineralogical Journal*, 47 (3), 110–124. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.03.110>
5. Kroshko, Y. V., & Kovalchuk, M. S. (2025). Rudonosnist Avramivskoho i Zakhidnoho rodovyshch (Novomyrhorodskiyi habro-anortozytoviyi masyv) [Ore content of Avramivske and Zakhidne deposits (Novomyrhorod gabbro-anorthosite massif)]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 1, 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49>
6. Polietnova, A. O. (2025). Heokhimichni osoblyvosti ilmenitu z kory vyvitriuvannya ta aliuvialnykh rozsyipiv Ukrainskoho shchyta [Chemical composition as an indicator of ilmenite genesis and titanium raw material quality]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 4, 35–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.35-40>
7. Figura, L., & Kovalchuk, M. (2025). Rudonosnist Yemylivskoi dilianky Mezhyrichnoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ore capacity of the Emylivska section of the Mezhyrichny titanium ore deposit] *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya heolohichna – Vishyk of the Lviv University. Series Geology*, 39, 189–204. <https://doi.org/10.30970/vgl.39.15>
8. Kharitonov, V. M., & Kharitonov, D. V. (2020). Osoblyvosti khimichnoho skladu ilmenitu Malyshevskoho kainozoiskoho rodovyshcha ta deiakykh dokembriiskykh porid Ukrainskoho shchyta [Features of the chemical composition of ilmenite of the Malyshevske Cenozoic deposit and some Precambrian rocks of the Ukrainian shield]. In *Precambrian: rock associations and their ore mineralization. Abstract of Intern. Sci. Conf.* (pp. 224–226). Kyiv: NAS of Ukraine, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation.
9. Akbar, M., Irannejad, M., & Rezaei, B. (2015). Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effect on physical and surface properties. *Minerals Engineering*, 70, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.002>
10. BenchChem Technical Support Team (2026). Ilmenite weathering and alteration in continental settings: chemical changes and placer concentration. *Foundational & Exploratory*. 1198. URL:https://pdf.benchchem.com/1198/Ilmenite_weathering_processes_and_alteration_products.pdf (access date 20/03/2026).
11. Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the rock-forming minerals*. 2nd Ed. London: Longman Scientific & Technical.
12. Force, E. R. (1991). *Geology of titanium-mineral deposits*. Geol. Soc. of America. Spec. Paper 282. Boulder: GSA. <https://doi.org/10.1130/SPE259>
13. Luo, P., Fu, W., Guo, X., Lu, H., Chai, M., Hu, M., Lu, J., Wang, X., & Xu, C. (2023). Weathering co-mineralization of placer type ilmenite and ion-adsorption type rare earth elements in Guangxi, China: Nature, origin and exploration implications. *Ore Geology Reviews*, 163, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105815>

CHEMICAL COMPOSITION AND LATERAL DISTRIBUTION OF ILMENITE AND ITS ALTERED VARIETIES IN THE SITES OF YEMLIVSKA AND SEREDNIA OF THE MEZHRYCHNE TITANIUM DEPOSIT (ZHYTOMYR REGION)

Myron Kovalchuk, Liubov Figura
kms1964@ukr.net; liuba_figura@ukr.net

*Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,
55b, Olesia Honchara St., Kyiv, Ukraine, 01601*

The chemical composition of ilmenite from Lower Cretaceous alluvial kaolin sands of the Irshanska suite in the Yemylivska and Serednia sites of the Mezhyrichne titanium ore deposit (Volynskyi megablock of the Ukrainian Shield) was studied. This made it possible to identify its variations in different areas and perform a comparative analysis. Correlation analysis determined the direction and strength of correlations between oxides in ilmenite, as well as common patterns and significant differences in the relationships between oxides. The strong negative correlation between FeO and Fe₂O₃ and the positive one between TiO₂ and Fe₂O₃ reflects the balance between the reduced and oxidized forms of iron in ilmenite.

Two approaches were used to separate magmatic ilmenite, pseudorutile, and leucoxenized ilmenite: (1) by the FeO/Fe₂O₃ ratio, which allows for rapid classification of grains; (2) by combining the specified ratio with absolute concentrations of FeO and Fe₂O₃, which provides a more accurate interpretation. Thanks to this approach, the presence of both primary magmatic ilmenite and its altered varieties formed under exogenous conditions was confirmed. A comparative analysis of the processes of pseudorutilization and leucoxenization of ilmenite within the Yemylivska and Serednia sites was performed.

Fractal analysis of the spatial distribution of magmatic ilmenite and its altered varieties showed that their distribution has signs of self-similarity and structural organization, which reflects natural processes of differentiation and secondary alteration.

Cartographic modelling of the distribution areas of ilmenite of different chemical composition and with different FeO/Fe₂O₃ ratios was performed, which makes it possible to determine the degree of exogenous transformation, predict the distribution areas of ilmenite with different qualitative characteristics, reconstruct the conditions of placer formation, and optimize the industrial development of residual reserves within the studied areas. The proposed comprehensive model integrates chemical, mineralogical, and spatial data, providing a deeper understanding of the genesis of ilmenite placers, their chemical zoning, and potential for industrial development.

Key words: ilmenite, pseudorutile, leucoxenization, chemical composition, alteration, placer, lateral distribution, correlation analysis, mapping, Mezhyrichne deposit, Ukrainian Shield.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

SEISMOGENIC FRICTIONAL MELTING AND ITS ROLE IN THE REDISTRIBUTION OF MATTER IN THE METAMORPHIC COMPLEXES OF ZAVALLIA

Roman Minkevich, Postgraduate Student of the Faculty of Geology
Roman.Minkevych@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0000-0486-3557>

Nataliia Bilyk, Assistant Professor at the Department of Mineralogy,
Petrography and Geochemistry named after Professor Orest Matkovskiy
nataliya.bilyk@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9684-195X>

Leonid Skakun, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Associate Professor at the Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry
named after Professor Orest Matkovskiy
<https://orcid.org/0000-0002-2338-6562>

Kostiantyn Alferiev, Student of the Faculty of Geology
kostiantyn.alferiev@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0004-2910-1187>

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Using the example of the Zavallivske graphite deposit (Ukrainian Shield), the role of palaeoseismic activity in the formation of hydrothermal systems and ore zones is examined. A marker of ancient earthquakes is pseudotachylites – black vitrified rocks, represented by slip films and thin veins. Pseudotachylites are products of frictional melting in fault zones. Their formation is accompanied by the localisation of thermal energy, rapid cooling and the formation of an amorphous glass-like substance, as confirmed by X-ray diffraction studies.

Microprobe analysis of the pseudotachylites revealed a high SiO₂ content (up to 73.84 wt. %) and significant variations in FeO (from 5.56 to 34.79 wt. %) and MgO (3.62–11.61 wt. %). Calculations of the oxides indicated the presence of water (up to 36 wt. %), which acted as a kind of flux and a melting point depression factor.

The source of water was likely the dehydration of minerals under conditions of rapid heating during seismic events. This is evidence of a close link between friction melting processes and the mobilisation of fluids in the fault zone. As a result, a local environment enriched with volatile components was formed. About 10 % of the volume of the studied rocks consists of fragments of primary rocks and minerals that either did not melt completely or were entrapped by the melt during formation.

Pseudotachylites formed at the transition boundary from plastic to brittle deformation, at depths of 10–12 km, corresponding to the conditions of the amphibolite facies of metamorphism. Mylonites formed below this boundary, and cataclastic rocks – above it. Friction melting processes were accompanied by the dehydration of the surrounding primary rocks, the formation of fluids and fracture systems. The

fluids, in turn, facilitated the migration and redistribution of chemical elements. And the extensive fracture systems facilitated the circulation of hydrothermal solutions and the development of vein-type mineralisation.

Pseudotachylites are an important indicator of palaeoseismic activity and a trigger for hydrothermal processes. Hydrothermal fluids played a significant role in the formation of ore mineralisation at the Zavallivske deposit, particularly in the redistribution of material and the formation of graphite deposits.

Key words: pseudotachylites, friction melting, hydrothermal processes, fluid, graphite, fault zone, Zavallivske deposit, Ukrainian Shield.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.03>

Statement of the problem. Paleoseismic activity is an important factor in the conditions governing the formation of ore zones. One of the indicators of ancient earthquakes is the presence of pseudotachylites in zones of disjunctive deformation. The specificity of the conditions for the formation of pseudotachylites lies in the fact that the process is accompanied by the dehydration of the surrounding rocks. This leads to a redistribution of matter in the contact zones. Analysis of these processes and their influence on the formation of areas with elevated concentrations of ore elements makes it possible to identify certain patterns in the formation of ore zones.

The Zavallivske graphite deposit in the Ukrainian Shield is a region of unique geological significance. The discovery of pseudotachylites here provides grounds for re-evaluating the role of hydrothermal fluids in the formation of graphite. The extensive system of fractures and their diverse mineral fillings indicate variability in both the chemical composition of the fluids and the physical conditions under which the mineral associations formed. Unfortunately, the pseudotachylites of the Ukrainian Shield have not yet been sufficiently studied, making it difficult to fully comprehend their influence on hydrothermal processes, which, in turn, shifts the focus of attention away from research into the fluid component of graphite genesis towards more conservative interpretations.

Review of research. It was not the first time that pseudotachylites had been discovered and studied within the granitic formations of the Vredefort crater in the Republic of South Africa. In particular, the British scientist S. J. Shand described veins of dense black rock in granites in 1916 and first used the term *pseudotachylite* [3]. In 1972, geophysicists and seismologists demonstrated the possibility of rock melting along fault planes and identified the conditions necessary for this [2]. Three years later, the New Zealand structural geologist R. Sibson directly linked pseudotachylites to zones of ancient seismic activity [4].

However, subsequent studies revealed the relatively limited distribution of these formations and the specificity of the conditions for their formation, namely: the limited distribution of pseudotachylites compared to earthquakes [5], anomalous pressure and temperature readings, and the localisation of seismic energy within a narrow layer (often < 2 mm). There is also the problem of preserving samples and their interpretation, as such formations are often not given sufficient attention and are classified as basalts.

In 2021, the journal «Geochemistry, Geophysics, Geosystems» published the findings of a large group of scientists who studied Chilean pseudotachylites and linked their formation to hydrothermal activity [1].

The research purpose of our work is to investigate the influence of the region's seismic activity on hydrothermal activity and, on this basis, to identify the link between the redistribution of matter and the formation of pseudotachylites.

One of the world's largest, and simultaneously the largest in Ukraine and Europe, graphite ore deposit of the same name is located in the vicinity of the village of Zavallia (Holovanivskiyi

District, Kirovohrad Oblast) (Fig. 1). The first studies and development of graphite began here around 100 years ago. Currently, the deposit's production capacity stands at around 30,000 tonnes of graphite per year. The deposit is mined using open-pit methods, and the ore is enriched using the flotation method. Zavallia graphite is high-quality, flaky graphite, with flake sizes ranging from 2 to 4 mm. An associated mineral is an abrasive substance, namely garnet.

The deposit consists of a complex of Precambrian metamorphic rocks dating back approximately 2.5 billion years, which belong to the Khashchuvato-Zavallivska Group of the Bug Series within the Ukrainian Shield. It is represented by a fault zone between carbonate rocks in the southern part (mainly calciphyres) and silicate rocks (predominantly enderbites) in the northern part. Between them lies a sub-lateral zone of graphite-garnet and graphite-pyroxene schists and skarns [6]. Calciphyres, skarnoids, amphibolites, quartzites, magnesian skarns, migmatized granites and granitic pegmatites are also present.

The rocks of the deposit have undergone repeated deformations. The first phase consisted of deformations under conditions of the granulite facies of metamorphism at depths of over 20 km. This was followed by a phase of deformation under amphibolite facies conditions at a depth of 10–12 km. This phase is characterised by a transition from mylonites to cataclastic rocks, and it is with this phase that the formation of pseudotachylites is associated.



Fig. 1. Quarry at the Zavallivske graphite deposit

During field studies at the Zavallivskiy quarry and its surroundings, numerous samples of fractured rocks of various compositions were collected. Among them were samples with thin (several millimetres) black films with a vitreous lustre (Fig. 2).

The material from the selected samples was analysed using a range of methods. X-ray studies were carried out in the X-ray structural analysis laboratory of the Faculty of Geology at Ivan Franko National University of Lviv (analyst A. Dvorianskyi, DRON-3 diffractometer, CuK_α -radiation, $U = 40$ kV, $I = 25$ mA, recording speed – 1 degree/min). Polished sections were prepared for electron probe microanalysis and scanning electron microscopy. Microanalytical studies of the sections were carried out in the Laboratory of Physics and Technology of Nanostructures at the Department of Solid-State Physics, Faculty of Physics, Ivan Franko National University of Lviv (analyst R. Serkiz) using a REMMA-102-02 scanning electron microscope (Sumy, Ukraine), equipped with an EDAR energy-dispersive analyser.



Fig. 2. A block of fractured glassy rock

The diffractograms obtained during X-ray analysis of the selected samples clearly show the absence of peaks. This indicates the amorphous nature of the substance and provides grounds for interpreting it as glass.

Table 1 presents the results of the chemical analysis of pseudotachylite glass. As can be seen from the table, pseudotachylite glass may contain a relatively high proportion of silica – 33.60–73.84 wt. %. There are significant fluctuations in the content of iron and magnesium oxides, and in some samples (where SiO_2 is comparatively lower) the content of these components is quite high: FeO – from 5.56 to 34.79, MgO – from 3.62 to 11.61 wt. %. Recalculations of the analysis results revealed a fairly significant water content in the studied formations – from 12.53 to 36.71 wt. %.

Fragments of primary minerals have been identified in the pseudotachylite samples; these either did not melt completely or were entrapped by the melt during formation. Such fragments account for approximately 10 %. They are predominantly garnet (Fig. 3), as well as biotite, hornblende and pyroxenes.

Table 1

Results of chemical analysis of pseudotachylite glass, wt. %

Components	Sample and analysis number					
	Zv-Ar2-1	Zv-Ar2-3		Zv-Pth		
	12	6	15	1	2	3
SiO ₂	33.60	64.75	66.29	42.04	37.78	38.10
TiO ₂	0.04	0.12	0.05	0.22	0.11	0.04
Al ₂ O ₃	2.52	0.27	0.17	1.46	1.14	1.29
Cr ₂ O ₃	0.33	N. d.*	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.
FeO	18.03	6.55	8.67	34.79	31.32	32.42
MnO	0.43	0.00	0.19	1.07	1.16	1.22
MgO	6.19	5.45	11.61	5.42	4.96	4.50
CaO	1.69	0.04	0.00	0.85	0.86	0.64
Na ₂ O	0.47	0.00	0.27	0.35	0.35	0.45
K ₂ O	0.00	0.22	0.22	0.15	0.11	0.30
Total	63.30	77.40	87.47	86.35	77.79	78.96

Components	Sample and analysis number						
	Zv-Pth						Zv-Ar2-5
	5	8	11	12	14	17	11
SiO ₂	42.21	38.60	42.40	39.92	39.55	34.20	73.84
TiO ₂	0.00	0.05	0.07	0.07	0.00	0.00	N. d.
Al ₂ O ₃	2.35	2.44	1.86	1.53	3.08	0.45	0.02
Cr ₂ O ₃	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	0.00	0.64	N. d.
FeO	31.49	30.92	30.25	34.18	29.99	29.90	5.56
MnO	1.06	0.82	0.99	0.98	0.99	1.15	0.19
MgO	6.58	5.28	7.25	5.65	5.81	3.62	5.94
CaO	0.34	0.13	0.70	0.31	1.38	0.41	0.00
Na ₂ O	0.39	0.29	0.58	0.19	0.69	0.00	0.35
K ₂ O	0.11	0.35	0.00	0.18	0.00	0.06	0.43
Total	84.53	78.88	84.10	83.01	81.49	70.43	86.33

* N. d. – not determined.

An analysis of previous studies and our results suggest the following mechanism for the formation of pseudotachylites. As a result of seismic activity, blocks of primary rocks rapidly shifted relative to one another. This occurred at a depth of approximately 10–12 km, which is typical for the hypocentres of major earthquakes. It is precisely this depth, according to the geothermal gradient, that corresponds to the onset of quartz plasticity and the transition from plastic to brittle deformation. Mylonites form below this threshold, and cataclasites – above it, with pseudotachylites serving as a marker of this transition.

As a result of the rock's extremely rapid displacement, the blocks are subjected to crushing and grinding. This is accompanied by the release of an enormous amount of energy. The concentration of energy within tiny cracks prevents the heat from dissipating quickly, leading to the melting of the material that has been ground to dust. As soon as the seismic displacement ceases, heat generation stops. This leads to the melt cooling very rapidly, resulting in

the formation of an amorphous rock. The presence of a significant amount of water in the system contributes to a reduction in the melting point – from 1,700 to 900 °C.

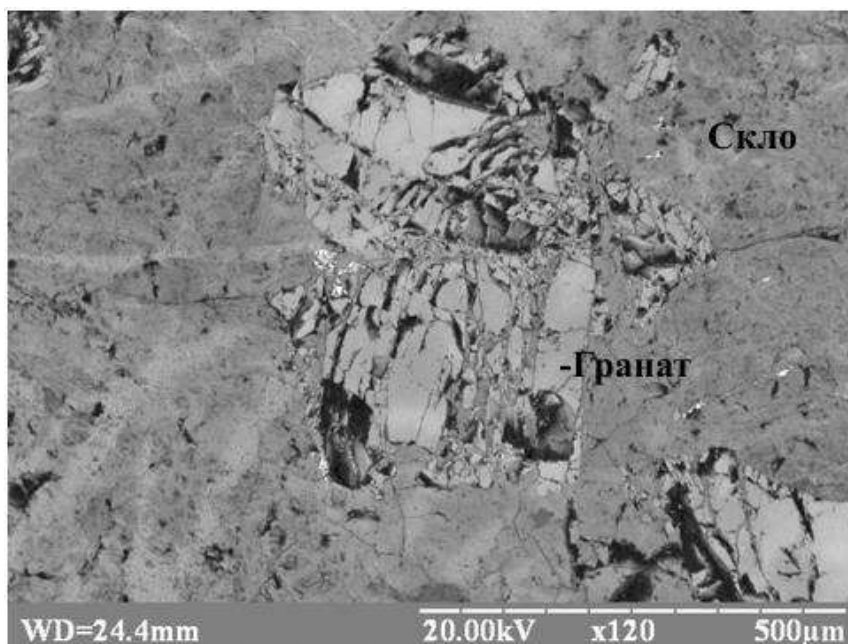


Fig. 3. A fragment of a garnet crystal in pseudotachylite glass

Conclusions and prospects for further research. Pseudotachylites serve as a marker for the uplift of rock complexes and the transition from plastic to brittle deformation. This facilitated the formation of numerous fracture systems necessary for the movement of hydrothermal fluids. Furthermore, the seismic thermal shock contributed to the dehydration of surrounding minerals. The resulting fluids leached certain chemical elements from the host rocks, transported them through the fracture systems and redeposited them as hydrothermal vein associations. This is evidenced by the large number of veins varying in age and mineral composition.

Thus, at a depth of about 10–12 km, during the transition from mylonitization to cataclasis, frictional palaeoseismic melting occurred, resulting in the formation of pseudotachylites. The transition to the zone of brittle deformation and the formation of pseudotachylites contributed to the formation of fracture systems and the «initiation» of hydrothermal processes.

One of the main agents of the hydrothermal fluids was carbon, as evidenced by the presence of numerous veins filled with carbonates in the rocks. The active involvement of carbon in the hydrothermal system of the Zavallia ore zone is the factor that compels scientists to pay greater attention to the vein mineralisation of the region, as well as to investigate the influence of hydrothermal systems on the formation of deposits in one of the world's largest graphite fields.

BIBLIOGRAPHY

1. Gomila R., Fondriest M., Jensen E., Spagnuolo E., Masoch S., Mitchell T. M., Magnarini G., Bistacchi A., Mittempergher S., Faulkner D., Cembrano J., Di Toro G. Frictional melting in

- hydrothermal fluid-rich faults: Field and experimental evidence from the Bolfin Fault Zone (Chile). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2021. Vol. 22. Is. 7. 17 p. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021GC009743>
2. McKenzie D., Brune J. N. Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophysical Journal International*. 1972. Vol. 29. Is. 1. P. 65–78. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x>
 3. Shand S. J. The pseudotachylyte of Parijs (Orange Free State), and its relation to «trap-shot-ten gneiss» and «flinty crush-rock». *Quarterly Journal of the Geological Society*. 1916. Vol. 72. P. 198 – 221. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1916.072.01-04.12>
 4. Sibson R. H. Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*. 1975. Vol. 43. Is. 3. P. 775–794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb06195.x>
 5. Sibson R. H., Toy V. G. The habitat of fault-generated pseudotachylyte: presence vs. absence of friction-melt. *Earthquakes: Radiated energy and the physics of faulting. Geophys. Monogr. Ser. Vol. 170* / Eds. R. Abercrombie, A. McGarr, G. Di Toro, H. Kanamori. Washington, D. C., 2006. P. 153–166. <https://doi.org/10.1029/170GM16>
 6. Бурбан К. А., Скакун Л. З. Мінералого-генетична модель Заваллівського родовища графіту. *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2012. № 57. С. 60–63. URL: <https://geology.bulletin.knu.ua/uk/article/view/2009/1736>

REFERENCES

1. Gomila, R., Fondriest, M., Jensen, E., Spagnuolo, E., Masoch, S., Mitchell, T. M., Magnarini, G., Bistacchi, A., Mitterpergher, S., Faulkner, D., Cembrano, J., & Di Toro, G. (2021). Frictional melting in hydrothermal fluid-rich faults: Field and experimental evidence from the Bolfin Fault Zone (Chile). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22 (7). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021GC009743>
2. McKenzie, D., & Brune, J. N. (1972). Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophysical Journal International*, 29 (1), 65–78. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x>
3. Shand, S. J. (1916). The pseudotachylyte of Parijs (Orange Free State), and its relation to «trap-shot-ten gneiss» and «flinty crush-rock». *Quarterly Journal of the Geological Society*, 72, 198–221. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1916.072.01-04.12>
4. Sibson, R. H. (1975). Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*, 43 (3), 775–794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb06195.x>
5. Sibson, R. H., & Toy, V. G. (2006). The habitat of fault-generated pseudotachylyte: presence vs. absence of friction-melt. In R. Abercrombie, A. McGarr, G. Di Toro, H. Kanamori (Eds.), *Earthquakes: Radiated energy and the physics of faulting. Geophys. Monogr. Ser. 170* (pp. 153–166). Washington, D. C. <https://doi.org/10.1029/170GM16>
6. Burban, K. A., & Skakun, L. Z. (2012). Mineraloho-henetychna model Zavallivskoho rodovyshcha hrafitu [Mineralogical and genetic model of the Zavallivske graphite deposit]. *Visnyk KNU imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia – Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 60–63. URL: <https://geology.bulletin.knu.ua/uk/article/view/2009/1736>

СЕЙСМОГЕННЕ ФРИКЦІЙНЕ ПЛАВЛЕННЯ ТА ЙОГО РОЛЬ У ПЕРЕРОЗПОДІЛІ РЕЧОВИНИ В МЕТАМОРФІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ЗАВАЛЛЯ

Роман Мінкевич, Наталія Білик, Леонід Скакун, Костянтин Алфер'єв
Roman.Minkevych@lnu.edu.ua

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005*

На прикладі Заваллівського родовища графіту (Український щит) розглянуто роль палеосейсмічної активності у формуванні гідротермальних систем і рудних зон. Маркером давніх землетрусів є псевдотахіліти – чорні склуваті породи, представлені півками ковзання та прожилками невеликої потужності. Псевдотахіліти – продукти фрикційного плавлення в зонах розломів. Їх утворення супроводжується локалізацією теплової енергії, швидким охолодженням і формуванням аморфної склоподібної речовини, що підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями.

Мікронзондовим аналізом у псевдотахілітах визначено високий вміст SiO_2 (до 73,84 мас. %) та значні коливання FeO (від 5,56 до 34,79 мас. %) і MgO (3,62–11,61 мас. %). Перерахунки оксидів засвідчили наявність води (до 36 мас. %), яка була своєрідним флюсом і певним чинником зниження температури плавлення. Джерелом води, імовірно, були процеси дегідратації мінералів за умов швидкого нагрівання під час сейсмічних подій. Це є доказом тісного зв'язку між процесами фрикційного плавлення та мобілізацією флюїдів у розломній зоні. Унаслідок цього формувалось локальне середовище, збагачене леткими компонентами. Близько 10 % об'єму досліджуваних порід представлено уламками первинних порід і мінералів, які або остаточно не розплавившись, або ж були захоплені розплавом у процесі утворення.

Псевдотахіліти сформувались на межі переходу від пластичних деформацій до крихких, в інтервалі глибин 10–12 км, що відповідає умовам амфіболітової фації метаморфізму. Нижче від цієї межі утворювались мілоніти, вище – катаклазити. Процеси фрикційного плавлення супроводжувались дегідратацією навколишніх первинних порід, утворенням флюїдів і систем тріщинуватості. Флюїди, своєю чергою, забезпечували міграцію й перерозподіл хімічних елементів. А розгалужені системи тріщин сприяли циркуляції гідротермальних розчинів і розвитку прожилкової мінералізації.

Псевдотахіліти – важливий маркер палеосейсмічної активності та тригер гідротермальних процесів. А гідротермальні розчини відігравали суттєву роль у формуванні рудної мінералізації Заваллівського родовища, зокрема, у перерозподілі речовини та утворенні графітових покладів.

Ключові слова: псевдотахіліти, фрикційне плавлення, гідротермальні процеси, флюїд, графіт, розломна зона, Заваллівське родовище, Український щит.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЯ ПРОЦЕСІВ РУДОГЕНЕЗУ НА РОДОВИЩАХ МОЛІБДЕН-ВОЛЬФРАМОВИХ ФОРМАЦІЙ ГРЕЙЗЕНОВОЇ ГРУПИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНУ

Микола Павлунь, д-р геол. наук,
професор кафедри геології корисних копалин і геофізики
mykola.pavlun@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-8634-6576>

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

У Центральному Казахстані молібден-вольфрамове зруденіння грейзенової групи сформувалося під час орогенезу й етапів тектоно-магматичної активізації. Особливе геологічне та металогенічне місце в Центрально-Казахстанській рудній провінції посідає Джунгаро-Балхаська геосинклінальна область. Тут під час пізньогерцинського орогенезу формувалися кислі інтрузії, з якими просторово, структурно і за часом утворення пов'язані всі родовища молібдену й вольфраму. Виділено 18 рудних районів, понад половина яких розташована в Успенській зоні зминання і які пов'язані з грейзенами різних фацій. Розрізняють два морфотипи родовищ – ендоконтакткові жильні та надінтрузивні штокверки.

Грейзени формувалися у фронтальній зоні колони автометасоматитів за участі високотемпературних суттєво газових кислотних розчинів, які зі зниженням температури (>470–300 °С) зазнавали ущільнення й конденсувалися у вигляді післямагматичних дистилатів на глибині від 5–4 до 2,5–1,5 км. Дистилати були збагачені галоїдами, CO₂, H₂O та іншими леткими сполуками.

Відокремлення розплавів-флюїдів від магматичних камер та їх еволюція відбувались або за умови ретроградного закипання магми, або внаслідок поступового відділення розплавів-розчинів – з утворенням розплавів-розчинів з CO₂ і залишкового розплаву-розчину з високощільними галогенними рудоутворювальними флюїдами. Відокремлення від магмо-рудогенерувальної камери відбувалося по-різному. З розвитком контракційної тріщинуватості в надінтрузивних вмісних породах формувався арочний ефект і відбувалось помітне зниження тиску, що сприяло «відсмоктуванню» флюїду з магмо-рудогенерувального джерела з наступною екстракцією рідкісних металів.

Молібден-вольфрамові родовища регіону формувались за пневматолітово-гідротермальних умов протягом п'яти стадій мінералізації з розчинів високої сольової концентрації (>65–27 мас. % NaCl) та високого тиску і значних його флуктуацій (від 165 до 25 МПа).

Ключові слова: вольфрам, молібден, родовище, рудогенез, грейзени, термобарогеохімія, пневматолітово-гідротермальні процеси, пізньогерцинський орогенез, Центральний Казахстан.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.04>

Постановка проблеми. Центральний Казахстан – типова молібден-вольфрамова рудна провінція, родовища якої належать до грейзенової групи. В Україні поки нема родовищ цієї формації, однак виявлено рудопрояви W і Mo на Українському щиті. Щодо вольфраму, то це Пержанське рудне поле, Кочерівська група рудопроїв, Селищенський, Клинівський, Майський рудопрояви та ін. Також на щиті відомо близько 100 проявів молібдену,

серед яких Вирівський молібденітовий рудопрояр, Вербинське флюорит-молібденове родовище, Глушківський молібденіт-шеєлітовий рудопрояр, молібден-поліметалеве зруденіння в пержанських метасоматитах та ін.

Через ці обставини детальні дослідження термобарогеохімії процесів рудогенезу на молібден-вольфрамових об'єктах грейзенової групи в Джунгаро-Балхашші можуть стати в нагоді під час розв'язання проблеми переведення аналогічних рудопроярів України в розряд родовищ.

Аналіз досліджень. Молібден-вольфрамове зруденіння, як довів М. Повилайтіс (1970, 1975, 1976), формується під час орогенезу і етапів тектоно-магматичної активізації (ТМА) земної кори. За характером розвитку геологічних формацій орогенного ряду та їхніми співвідношеннями з тими чи іншими наборами геосинклінальних формацій вирізняють типи металогенічних провінцій, специфіку яких відображає тип ендегенної мінералізації. У геологічній будові досліджуваного регіону суттєву роль відіграють субсеквентні кислі ефузиви порфірової формації й комагматичні інтрузивні утворення гранітоїдного ряду (головні формації орогенного структурного поверху). На підставі зазначеного М. Повилайтіс (1976) та Д. Рундквіст (1977) виділили молібден-вольфрамоворудну провінцію регіону як самостійний центрально-казахстанський металогенічний тип.

У Центрально-Казахстанській мозаїчно-брилової складчастій системі особливе геологічне й металогенічне місце посідає Джунгаро-Балхаська геосинклінально-складчаста область. Примітними її особливостями, як зазначила Н. Маркова (1969), є вкрай обмежений прояв ранньої стадії розвитку герцинід, закладання герцинських складчасто-блокових структур, розділених і ускладнених глибинними розломами, на потужній корі сіалічного типу, розвиток процесів ТМА. З цими процесами пов'язано формування великих покривних полів ефузивних порід різноманітного складу і становлення комагматичних ранньо-, середньо- і пізньогерцинських сіалічних гранітоїдів. Головне металогенічне значення мають інтрузиви пізньогерцинського часу, сформовані в післяорогенну стадію під час інверсії тектонічного режиму за стійких вертикальних брилових рухів земної кори та відшаровування між фундаментом і герцинським структурним поверхом.

Саме з цими інтрузіями складчастого комплексу просторово, структурно і за часом утворення асоціює молібден-вольфрамове зруденіння, як свого часу в працях 1965–1968 рр. переконливо довів Г. Щерба. Цей дослідник виділив у регіоні два типи відповідних родовищ: 1) ендоконтактові зі слабким розвитком площинного лужного метасоматозу і практичною відсутністю дайок (Акчатау, Східний і Північний Коунрад); 2) екзоконтактові з незначним проникненням у граніти, де руди часто асоціюють з дайками кислого складу, частина з яких внутрішньорудні (Коктенколь, Джанет, Нура-Талди, Верхне Кайракти). Родовища, поширені в зонах ендоконтакту гранітних масивів, представлені крутоспадними грейзеновими тілами з кварцовими й іншими жилами виповнення. У зону екзоконтакту грейзени переходять серією зближених жил з біляжилним грейзеновим облямуванням. Потужність таких жил невелика, хоча загальні масштаби штокверків набагато більші, порівняно з власне кварцовожильними. У рудах, окрім кварцу, мінералів Мо, W і Ве, поширені пірит, бісмутин, бісмут, сфалерит, халькопірит, галеніт, з нерудних мінералів – різноманітні слюди (серицит, мусковіт, лепідоліт, цинвальдит), польові шпати, топаз, флюорит, карбонати, сульфати і цеоліти. Поширені різноманітні процеси заміщення різної інтенсивності: вольфрамиту шеєлітом, мікрокліну альбітом та ін.

Мета наукової публікації – розкрити фізико-хімічні умови й динаміку еволюції рудоутворювальних процесів на родовищах провінції, з'ясувати механізми міграції й екстрагування металоносних флюїдів у рудоконтролювальні структури, схарактеризувати агрегатний стан і склад флюїдів, їхню сольову концентрацію, у тім числі на продуктивних

стадіях рудоутворення, розробити схеми стадійності і термобарогеохімічного режиму формування родовищ.

Виклад основного матеріалу. Найбільшою рудоконтрольовальною структурою досліджуваного регіону є Успенська зона зминання, у якій виявлено понад 50 % усіх молібден-вольфрамових родовищ і рудопроявів. Головні родовища провінції згруповано у 18 рудних районів, які пов'язані з грейзенами різних фацій.

Еталонним прикладом пізньогерцинського рудоспряженого акчатауського комплексу і родовища є Акчатауський масив лейкократових гранітів і просторово, структурно і генетично пов'язане з ним однойменне родовище (рис. 1).

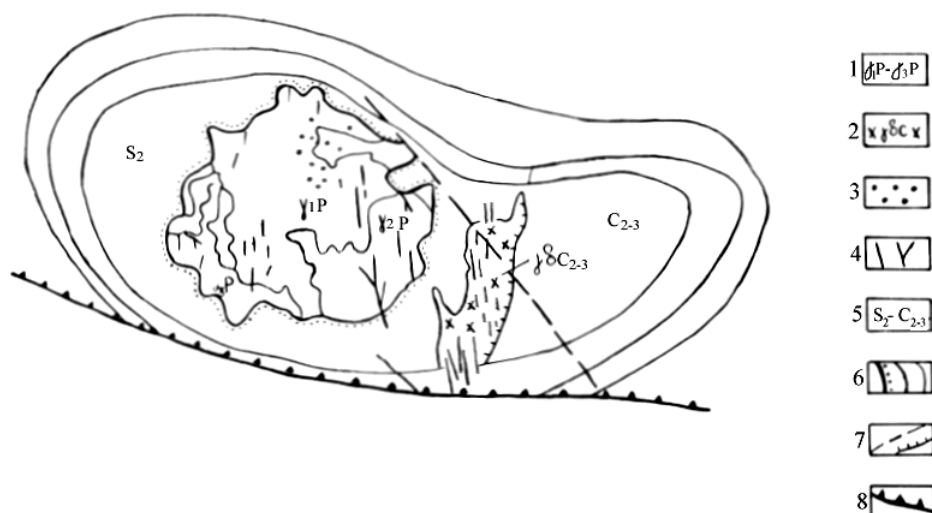


Рис. 1. Схематична геологічна будова, морфологія та геолого-структурна позиція Акчатауського гранітного масиву та однойменного родовища (за В. Бочаровим та ін.):

1 – граніти різних фаз укорінення; 2 – адамеліти; 3 – шлірові тіла пегматитів; 4 – грейзенові тіла й рудоносні кварцові жили; 5 – вмісні породи рами; 6 – межі виходу масиву на денну поверхню і глибинне продовження гранітів за гравіметричними даними; 7 – регіональні й локальні тектонічні розломи; 8 – Акчатауська зона глибинних розломів

Виконані нами протягом 1980–1988 рр. разом з Ю. Дорошенком та Ж. Сімків термобарогеохімічні дослідження флюїдних включень у мінералах дали змогу діагностувати фізико-хімічні умови й динаміку еволюції рудоутворювальних процесів на родовищах провінції та механізми екстрагування й міграції металоносних флюїдів, виконати градієнтний аналіз і визначити концентрацію й тренди термобарогеохімічної зональності розвитку деяких родовищ описуваної формації [2–4; 7].

Формування грейзенів починалося у фронтальній частині колони автотемасоматитів за участі високотемпературних суттєво газових кислотних розчинів, які зі зниженням термобаричного режиму (>475–300 °С) зазнавали ущільнення й конденсувалися як післямагматичні дистилати. Грейзени супроводжувалися супутнім зруденінням у вигляді штюкверкових тіл і ендоконтактових утворень прожилково-жильного морфотипу з нестійким вмістом головних і супутніх корисних компонентів у кислих інтрузіях рудоспряженого акчатауського комплексу. Свого часу у співавторстві з В. Боголеповим ми показали (1982), що ці інтрузії зазнавали інтенсивної контракційної тріщинуватості у зв'язку з розрядженням

ранньомагматичних напружень та їх остиганням, коли відбувалося зменшення об'єму та ендокінетичним шляхом формувалося склепіння і виникав арочний ефект над рудно-магматичним джерелом. Високощільний і дуже агресивний рудоутворювальний флюїд, який складався з газової вуглекислотної і водно-сольової галогенідної частин, переміщувався з розплаву і граніту шляхом магматичної дистиляції [7]. За Г. Щербою (1968), процес відбувався на глибинах становлення магматичних мас – від 5,0–4,0 до 2,0–1,5 км, що забезпечувало достатній масштаб магматичної дистиляції.

Розуцільнення флюїду в надінтрузивній зоні арочного склепіння супроводжувалося помітним зниженням тиску ($-\Delta P$), через що водно-сольовий флюїд ніби «відсмоктувався» з магмо-рудогенерувального джерела з екстрагуванням рідкісних металів [7]. Цей процес суттєво посилювався тоді, коли його відбувалося значно інтенсивніше флюїдовідділення за порівняно високого водовмісту ($C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{вміст}} \geq 4\%$ і більше) – так звані мокрі магми.

Термобарогеохімічний аналіз рудоносних і безрудних гранітоїдних інтрузій засвідчив, що за розплавленими й сингенетичними флюїдними включеннями в порфірових вкрапленнях мінералів гранітів можна визначити PT -параметри, висхідний водовміст і фазовий склад рудно-магматичної системи, у якій водовміст може бути значно нижчий ($<2-3\%$). Ця різниця визначає різний перебіг екстрагування металів у процесі магматичної дистиляції та специфічні механізми відокремлення й міграції металоносних флюїдів у боки і догори від рудно-магматичного джерела. За високого вмісту води й інших летких, як стверджували Ф. Рейф та Є. Бажеев (1982), внутрішній тиск системи стає настільки великий, що неминуча розгерметизація магматичної камери і відщеплення металоносних фаз. Коли ж водовміст низький (так звані сухі магми), то тиск флюїду не досягає межі міцності бокових порід, тому флюїд разом з екстрагованими з силікатного розплаву і граніту металами розсіюється в міжзерновому просторі інтрузиву, що кристалізується. У такий спосіб інтегрована дія двох чинників – арочний ефект і зниження $-\Delta P$ та підвищений вміст водно-сольової рідини ($C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{вміст}} > 4\%$) – забезпечує дуже високу екстракцію розсієних металів шляхом магматичної дистиляції та їх трансакцію в рудовмісні структури грейзеново-жильного типу в ендоконтакті рудоспряженого масиву гранітоїдів чи в надінтрузивні штокверки [7].

Відщеплена від флюїдогенерувального джерела мобільна флюїдна фаза зазнавала інтенсивної гетерогенізації внаслідок нерівноважних термодинамічних умов міграції й була перенасичена леткими компонентами. Цей процес дегазации флюїдної фази, унаслідок якого першочергово фракціонували кислотні компоненти, зумовив зростання її лужності. Тому передовий фронт відщеплених «лужних» флюїдів ранніх пульсацій магмогенерувального вогнища спричинив інтенсивний розвиток ранньої лужної стадії з синхронним розвитком протогенетичного ряду $K-Na$ -фацій метасоматитів – мікроклінізації (Караоба) і подекуди – альбітизації (Коктенколь, Східний Коунрад), як раніше довели в своїх працях О. Беус зі співавт. (1961), Ф. Чухров (1966) та Г. Щерба (1968). Ці метасоматити передували формуванню ранніх власне молібденових парагенезисів родовищ.

Лужні метасоматити почали утворюватися за умов надкритичного пневматолітового стану мінералоутворювальних флюїдів порівняно високої густини за $>475-430\text{ }^\circ\text{C}$. Наступна кристалізація сполучених з ними ранніх молібденових руд пов'язана з трансформацією надкритичних газоподібних розчинів у рідинні. Верхня межа цього переходу визначалася критичними явищами за температури гомогенізації флюїдних включень $450-425-415\text{ }^\circ\text{C}$. Примітно, що в розчинах водних витяжок із сингенетичних флюїдних включень у молібденоносному кварці виявлено значний вміст аніонів HSiO_3^- : до $8-10\text{ мг/250 мл}$, що становить $45-55\text{ экв. \%}$ від сумарної кількості аніонів розчину. Ця обставина добре узгоджується з даними про динаміку регресивно-інверсійних перетворень агрегатного стану мінералоутворювальних флюїдів ранніх стадій мінералізації за відповідного високотемпературного рівня системи, що

можна пояснити тісним геохімічним зв'язком Mo з Si . Адже, як експериментально довели М. Хігаров та Л. Іванов (1965) і С. Коренбаум (1970), молібден задовільно транспортується за надкритичних умов саме у формі кремнієво-молібденової кислоти, а руйнування таких комплексів і початок кристалізації молібденіту відбувається в разі трансформації газоподібних надкритичних флюїдів у рідкі гідротермальні під час зниження температури. Гідротермальні флюїди зазнають неодноразового ретроградного кипіння, що також стимулює синхронну кристалізацію молібденіту. Такі періодичні «епізоди пневматолізу» у власне гідротермальному мінералоутворенні на родовищах описуваної провінції відбувалися за 440–425–395–375–360 °С. Наприкінці стадії формування власне молібденових руд масштаби й інтенсивність ранньої лужної «хвилі» закономірно знижувалися. Наступна інверсія режиму лужності–кислотності, пов'язана зі становленням інтратрудних дайок, призвела до зміни «реліктів» лужного метасоматозу етапом кислотного вилугування – грейзенізацією. Еволюційно-інверсійна зміна типів метасоматозу знову відбувалася під час переходу мінералоутворювальних розчинів із надкритичного пневматолітового стану в гідротермальний. Як засвідчили наші дослідження 1980–1984 років та роботи О. Бризгаліна (1976), з цим за 435–430 °С пов'язаний початок руйнування хлоридно-натрових і гідроксофторидних комплексних сполук та кристалізація промислово цінних мінералів – молібденіту, вольфрамиту, флюориту, берилу, бісмутину продуктивної комплексної рідкіснометалевої стадії (R_c), яка тривала до 270 °С. Ці процеси відображає схема стадійності і термобарогеохімічного режиму процесу рудоутворення на родовищі Акчатау (рис. 2).

Дослідження засвідчили, що агрегатний стан флюїдів на родовищах змінювався неодноразово, проте загалом усі вони належать до пневматолітово-гідротермальних утворень. Мінералоутворювана діяльність газоподібних розчинів виявлена тільки у ранній період рудогенезу, коли починали кристалізуватися мінеральні парагенезиси молібденіт-кварцової і комплексної рідкіснометалевої стадії, або ж услід за вкоріненням інтрузивних дайок, які здебільшого передували R_c -стадії. Верхня температурна межа гетерогенного стану розчинів, з якими пов'язаний початок розпаду транспортіваних комплексних сполук металів і кристалізації їхніх мінералів, визначений критичними явищами і становить для відповідних морфоструктурних типів родовищ 445–440–435–425 °С (жильні ендоконтактів тіла), для надінтрузивних штокверків вона не перевищує 425 °С. Продуктивні мінеральні комплекси кристалізувалися здебільшого за >440–300 °С на тлі флуктуацій тиску від 165 до 40 МПа. Тільки інтенсивна шеелітова мінералізація Верхньо-Кайрактинського штокверку сформувалася за нижчої температури – 380–260 °С. Це не заперечує її постеріорного розвитку по більш ранньому й високотемпературному вольфрамиту R_c -стадії.

Однак праці Г. Бедрова (1961), В. Чернова (1984) та наші термобарогеохімічні дослідження засвідчують, що частина шееліту є продуктом постеріорного розвитку по реліктовому вольфрамиту комплексної рідкіснометалевої стадії і кристалізації шееліту з первинно збагачених кальцієм розчинів самостійної шееліт-кварцової стадії мінералізації.

Відповісти ж на питання, яка частка кальцію була в первинних гідротермах шееліт-кварцової стадії і скільки його ще треба було вилучити з бокових порід унаслідок циркуляції цих розчинів у тріщинному каркасі штокверку для формування шеелітового зруденіння – поки що проблематично.

Характерною особливістю деяких найбільших родовищ молібденіт-вольфрамової формації є їхнє розташування дуже далеко від апікальної частини ще не розкритих інтрузивів. Таку позицію займає, зокрема, родовище Верхнє Кайракти. Тут рудоспрямований масив акчатауських гранітів розташований на глибині близько 4 км, а параметрична свердловина засвідчила, що до глибини > 1 км вміст шееліту не зменшується. Можливо, родовище доцільніше зачислити до шеелітоносних штокверків вольфрамової формації [1].

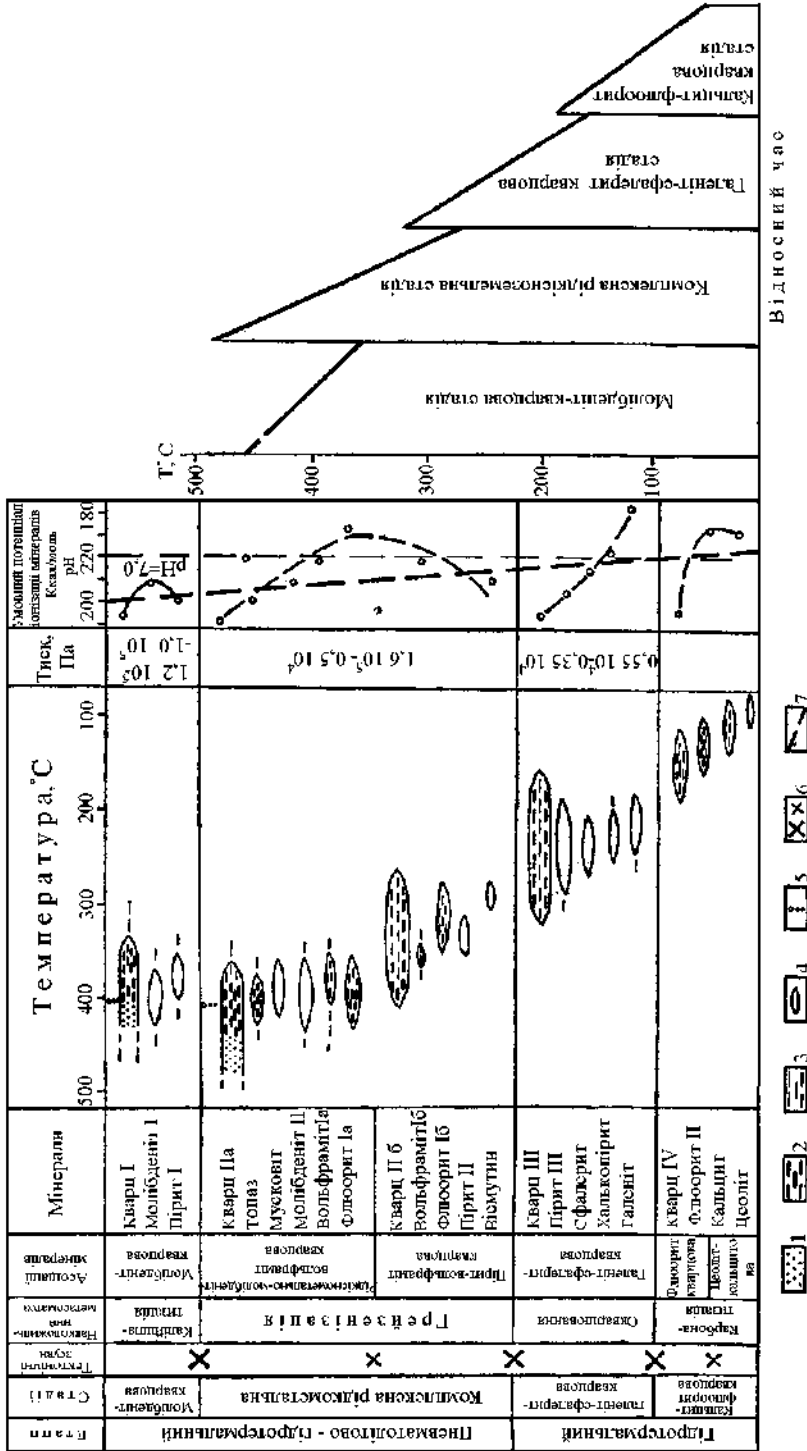


Рис. 2. Схема стадійності і термобарогеохімічного режиму процесу мінералоутворення на Акачуському молібден-вольфрамовому родовищі.

Температурні інтервали, визначені за томотензією включень мінералоутворювальних розчинів у станах: 1 – газовому, 2 – критичному (конденсація), 3 – рідкому, 4 – передбачувані температурні інтервали за даними декрепітації; 5 – явища періодичного кипіння розчинів; 6 – між- і внутрішньостадійні тектонічні порушення; 7 – тенденція зміни кислотно-лужних властивостей розчинів у процесі мінералоутворення

Значення термостатованості рудномагматичних систем ($\Delta T/100$ м) на родовищах різного морфоструктурного типу становить 30–20 °C/100 м (Акчатауське), 25–15 (Східний Коунрад), 25–20 (жильна Караоба). Для штокверків цей градієнт значно менший і зіставний з горизонтальним градієнтом на жильних родовищах: 10–8 (Верхнє Кайракти), 12–10 °C/100 м (Коктенколь). З урахуванням просторової зміни температури і наведених значень термостатованості рудномагматичних систем визначено температурний діапазон кристалізації промислово цінних мінералів, °C: молібденіт I – 425–390, молібденіт II – 445–400, вольфраміт – 435–350, бісмутин – 245–275 (Акчатау), молібденіт – 440–380 (Караоба), 430–375 (Коктенколь), 425–390 (Джанет), 415–350 (Байназар), 405–385 (Верхнє Кайракти), 400–350 (Східний Коунрад), 400–320 (Нура-Талди).

Вольфраміт на всіх родовищах, крім Акчатауського, формувався здебільшого за $T = 400\text{--}280$ °C, шееліт – 350–260 °C.

Ці оптимальні значення температури кристалізації головних промислових мінералів украй примітні з погляду їхнього практичного застосування для локального прогнозування та оцінки зруденіння. У праці Т. Сушевської зі співавт. (2001), яка вивчала склад газових компонентів флюїдів на Акчатау, зазначено про радикальне переважання CO_2 над N_2 і CH_4 , що добре корелює з наявними матеріалами. Автори розкрили наявність своєрідних окисно-відновних умов у ділянці існування буфера Ni–NiO. Його існування саме в інтервалі 450–300 °C для нас особливо важливе, оскільки він забезпечував у розчинах рівень концентрації Fe^{2+} і Mn^{2+} , необхідний для утворення вольфраміту [5; 6]. З іншого боку, його наявність і регуляція концентрації в розчинах Fe і Mn у зазначеному температурному інтервалі експериментально посилює адекватність і відповідність визначених нами значень температури кристалізації цінних мінералів у рудах родовищ формації за флюїдними включеннями в мінералах. Аналогічні окисно-відновні умови характерні для продуктивних стадій формації в інших регіонах, наприклад, на родовищі Сіновес у Чехії.

Мінераутворювальні розчини власне гідротермального етапу, коли кристалізувалися сульфідно(поліметалево)-кварцові мінеральні парагенезиси післяпродуктивних стадій, мали температуру 320–75 °C, перебували від тиском від 50 до 25 МПа і були насичені CO_2 .

Аналіз складу водних і газових витяжок із розчинів включень засвідчив, що під час раннього, високотемпературного пневматолітово-гідротермального періоду найактивніша роль належала Cl, F, CO_2 і, частково (Акчатауське родовище), – бору. Для власне гідротермальних середньо-низькотемпературних процесів ці компоненти майже не характерні, або ж їх узагалі нема, хіба що в період кристалізації поліметалево(Pb+Zn)-кварцових асоціацій, коли знову активізувався CO_2 . Загалом же особливості хімізму розчинів ранніх продуктивних етапів рудоутворення полягають у лужно-галогенному складі (Cl–K–Na для молібденіт-кварцової стадії і F–Cl–K–Na для рідкіснометалевої) зі змінним, однак повсюдним умістом гідросилікат-іона. За середньотемпературних умов суттєву роль відіграє CO_2 , тоді ж з'являється гідрокарбонат-іон. «Наскрізним» іоном є Na^+ , що дає підстави припускати його важливу роль у формуванні комплексних сполук не тільки Mo і W, а й Zn та Pb.

За даними газового аналізу, у розчинах були наявні CO_2 (70–77 %), граничні вуглеводні (14–19) і N_2 (8–12 %).

Під час утворення рідкіснометалевих парагенезисів розчини залишалися висококонцентрованими (їхня концентрація на деяких родовищах навіть зростала внаслідок нових пульсацій магматичного вогнища й укорінення інтарудних дайок) і мали F–Cl– K^+ – Na^+ склад за помітного зниження частки HCO_3^- . Для флюїдів характерний різний уміст катіонів–аніонів, що наочно виявляється під час аналізу співвідношень головних іонів з розвитком процесу рудоутворення. У водних витяжках із розчинів включень молібденіт-кварцової стадії (мінералізація – 11–15 мг/250 мл, рН – від 6 до 4 за рН бідистилату

5,8–6,0) зафіксовано такі співвідношення, %-екв.: $\text{Na}^+/\text{K}^+ - 9,0-3,0$; $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+) - 0,07-0,04$; $\text{F}^-/\text{Cl}^- - 0,16-0,03$; $\text{HSiO}_3^-/(\text{F}^-+\text{Cl}^-) - 1,6-0,2$. Для розчинів флюїдних включень із кварцу рідкіснометалево-кварцової стадії (мінералізація водних витяжок – від 7,6–10,8 до 16,3–16,9 мг/250 мл, рН – 5,5–6,5, рН бідистиляту – 5,8–6,2) зафіксоване помітне зростання кількості F^- і K^+ , що зумовлює дещо інші значення наведених співвідношень: $\text{Na}^+/\text{K}^+ -$ від 8,0–6,8 до 5,4–4,3; $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+) - 0,30-0,02$; $\text{F}^-/\text{Cl}^- - 0,43-0,25$; $\text{HSiO}_3^-/(\text{F}^-+\text{Cl}^-) - 0,55-0,15$. У цих розчинах вміст CO_2 досягає 88 %, що узгоджується з експериментальними дослідженнями тричленної системи $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$. Як засвідчили наші дослідження разом з Ж. Сімків (1988), зазначені співвідношення близько-аналогічні для відповідних стадій родовищ різного морфоструктурного типу (конвергентність складу).

Вміст головного газового компонента – CO_2 – збільшується від ранніх до пізніх стадій, максимальний його вміст (до 97 об. %) притаманний періоду формування післяпродуктивного сульфідного комплексу, що позначається на наявності включень рідкого й газоподібного CO_2 (рис. 3).

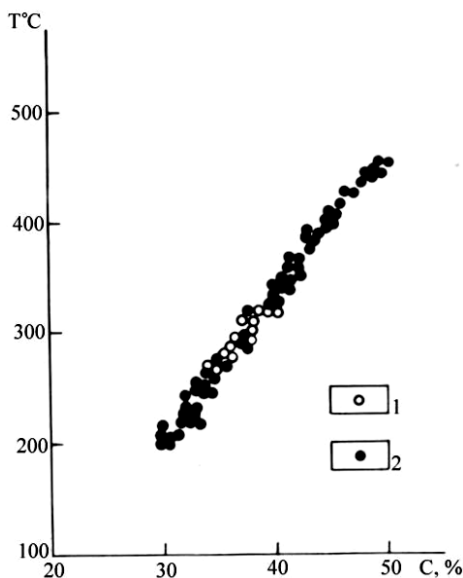


Рис. 3. Варіації сольової концентрації розчинів включень на молібден-вольфрамових родовищах Центрального Казахстану:

1 – молібденіт-кварцова стадія; 2 – рідкіснометалево-молібденіт-вольфраміт-кварцова стадія

Сумарна кількість N_2 і деяких інертних газів змінюється від 2 до 12 об. %, вміст CH_4 і гомологів невеликий, він теж зменшується від ранніх до пізніх стадій мінералізації. Наявна концентрація солей у розчинах виявляється найвищою на ендоконтактних родовищах: для молібденіт-кварцової стадії змінюється від 42 до 26 мас. % NaCl , для рідкіснометалевої – від 65 до 27 мас. % NaCl , на інших родовищах коливається від 47–26 до 21–2 мас. % NaCl . Ця особливість сольової концентрації флюїдів продуктивних стадій виявляється у фазовому складі сингенетичних включень: вони містять до 14–17 розчинних солей хлоридів Na і K та інших, наразі не діагностованих сполук («гідротермальна ропа», за М. Єрмаковим), у тім числі нерозчинних рудних мінералів (зокрема, вольфраміту). Такі

розчини чітко вирізняються серед розчинів включень мінералів інших стадій, наприклад, післяпродуктивних, де превалюють включення з CO_2 (рис. 4–6).

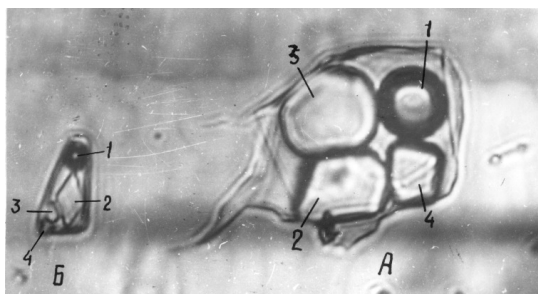


Рис. 4. Група сингенетичних газорідких багатофазових включень у кварці, $\times 600$

A: 1 – газ; 2–4 – солі; *Б:* 1 – газ; 2–4 – солі (2 – кристал KCl)



Рис. 5. Газорідке та вуглекислотноводне включення у кварці, $\times 450$

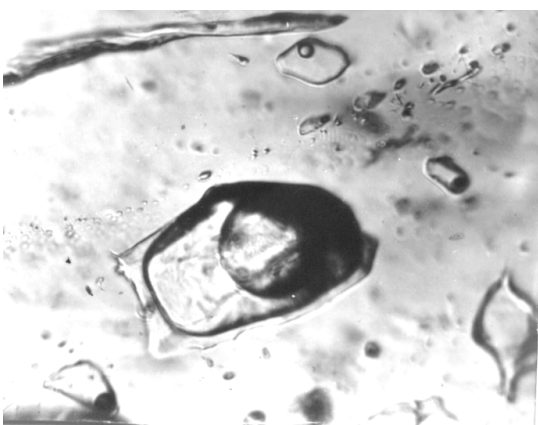


Рис. 6. Вуглекислотноводне включення з ореолами газорідких включень у флюориті, $\times 450$

Загалом термодинамічно-регресивний стадійний процес рудоутворення на родовищах розвивався дискретно-інверсійно. Розвиткові кожної стадії передували тектонічні рухи, які часто супроводжувалися вкоріненням дайок аплітів, граніт-аплітів, мікрогранітів, граніт-порфірів, лампрофірів, особливо на різночасових стадіях на родовищі Нура-Талди. Вони енергетично підтримували рудний процес і стимулювали так звані процеси реювенації нових порцій розчинів, з якими, як зазначав М. Єрмаков (1972), на родовищах пов'язані своєрідні епізоди пневматолізу (ретроградного кипіння) у власне гідротермальному процесі. Температура процесу рудоутворення на різних стадіях змінювалася стрибкоподібно:

вона була вищою на початку кожної наступної стадії порівняно з кінцем попередньої. Водночас за повсюдного зниження температури від ранніх стадій до пізніх, а в межах стадії – від її початку до кінця на Акчатауському родовищі початок другої (за часом прояву) рідкісметалевої стадії – навіть порівняно з початком ранньої молібденової – є більш високотемпературним. Це пов'язано, вірогідно, із надзвичайно високою сольовою концентрацією флюїдів другої пульсації магмогенерувального вогнища і вкоріненням інтарудних дайок граніт-аплітів. Загалом же на інших родовищах формації такі стрибки теж спричинені укоріненням внутрішньорудних дайок (здебільшого на ранніх стадіях) і пульсаційним надходженням рудоутворювальних розчинів у рудолокалізуючі структури. Це відбувалося на тлі зменшення енергетичних показників рудно-магматичної системи і щораз більшого залучення в процеси рудоутворення порівняно холодних вадозних інфільтраційних вод глибинної циркуляції, особливо під час укорінення рудоспряжених інтрузій акчатауського комплексу в палеоводорясні гідрогеологічні басейни земної кори того часу. Це, до речі, може забезпечити перехід порівняно «сухих» магм у порівняно «мокрі» і стимулюватиме магматичну дистиляцію й екстрагування галоїдами рудної речовини.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У геологічній історії і фізико-хімічних умовах утворення родовищ молібден-вольфрамової формації є дуже багато спільного, що дає підстави трактувати їх як результат діяльності причинно-взаємопов'язаних і закономірно виявлених рудно-магматичних процесів, сполучених у часі та просторі зі становленням алохтонних масивів аляскітових гранітів верхньогерцинського акчатауського комплексу. Стосовно ж виявленої тенденції зниження високотемпературних процесів рудоутворення і загальної сольової концентрації розчинів від ендоконтактових до надінтрузивних родовищ, то вона, з одного боку, може бути зумовлена різною глибиною формування рудоспряжених гранітних масивів і зруденіння в жорстких каркасних (жильні ендоконтактові родовища) і лінійних рухомих (Успенська зона зминання, штокверки) геотектонічних структурах земної кори Центрального Казахстану, а з іншого, – може свідчити про різну інтенсивність денудаційних процесів у післяпермський час. Таке передбачення підтверджується тим, що в процесі формування ендоконтактовий тип мінералізації «росте» догори і переходить в екзоконтакт, а екзоконтактовий – вниз, дуже часто досягаючи апікальних частин рудогенерувальних інтрузій. На сучасному ерозійному зрізі кожний з морфоструктурних типів може мати самостійне значення або ж формує перехідний – жильно-штокверковий тип.

Отже, родовища молібден-вольфрамової формації грейзенової групи Центрального Казахстану – це високотемпературні пневматолітово-гідротермальні й високобаричні утворення. Для продуктивних стадій рудоутворення характерна висока сольова концентрація флюїдів – понад 65 мас. % NaCl для ендоконтактового морфотипу і порівняно менша – для штокверкового. На післяпродуктивній стадії активна рудоутворювальна роль належала CO₂. На завершальній стадії кристалізувалися карбонати й цеоліти.

На теренах України родовищ молібден-вольфрамової формації поки не виявлено, однак є численні рудопрояви вольфраму і молібдену на Українському щиті. Відомо, що ці метали належать до групи рідкісних і мають унікальні фізичні й хімічні властивості. У руслі сучасних світових тенденцій важливо всебічно досліджувати вже відомі на території України прояви вольфрамової й молібденової мінералізації та провадити відповідні розшукові роботи для виявлення нових проявів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазько Є. М. Ендогенні рудні формації : навч. посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2004. 119 с.

2. Лазько Є. М., Ляхов Ю. В., Павлунь М. М., Пізніур А. В., Попівняк І. В. Термобарогеохімія в прикладній геології (пошуки, розвідка та експлуатація родовищ). *Мінерал. зб.* 1992. № 45. Вип. 2. С. 15–21.
3. Павлунь М. Досвід великомасштабного термобарогеохімічного прогнозування грейзенового молібден-вольфрамового зруденіння герцинід Джунгаро-Балхаштя (Центральний Казахстан). *Мінерал. зб.* 2002. № 51. Вип. 2. С. 22–33.
4. Павлунь М. М. Фізико-хімічні умови формування молібден-вольфрамового родовища Коктенколь в Центральному Казахстані. *Зб. наук. праць УкрДГПІ.* 2002. № 1–2. С. 124–127.
5. Eugster H. P. Granites and hydrothermal ore deposits: a geochemical framework. *Mineralogical Magazine.* 1985. Vol. 49. Iss. 350. P. 7–23. URL: chrome- https://www.ruff.net/doclib/MinMag/Volume_49/49-350-7.pdf
6. Norman D. I., Moore J. N., Yonaka B., Musgrave J. Gaseous species in fluid inclusions: A tracer of fluids and indicator of fluid processes. *Proc. XXI Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Stanford University, California, 1996. P. 233–240.
7. Pavlun N. N., Piznyur A. V., Zinchuk N. N. Evolution of the endogenous ore-bearing fluids (according to minerals' inclusions). *Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Meeting,* London, UK, 1999. P. 144–153.

REFERENCES

1. Lazko, Ye. M. (2004). *Endohenni rudni formatsii [Endogenous ore formations]*. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv.
2. Lazko, Ye. M., Liakhov, Yu. V., Pavlun, M. M., Pizniur, A. V., & Popivniak, I. V. (1992). *Termobarogeokhimiia v prykladnii heolohii (poshuky, rozvidka ta ekspluatatsiia rodovyshch) [Thermobarogeochemistry in applied geology (prospecting, exploration and exploitation of deposits)]*. *Mineralogical Collection*, 45 (2), 15–21.
3. Pavlun, M. M. (2002). *Dosvid velykomasshtabnoho termobarogeokhimiichnoho prohozuvannia hreizenovoho molibden-volframovoho zrudenninnya hertsynid Dzhungharo-Balkhashshia (Tsentralnyi Kazakhstan) [Experience of large-scale thermobarogeochemical forecasting of greisen molybdenum-tungsten mineralization in Hercynides of Dzhoungaro-Balkhash region (Central Kazakhstan)]*. *Mineralogical Collection*, 51 (2), 22–33.
4. Pavlun, M. M. (2002). *Fyzyko-khimichni umovy formuvannia molibden-volframovoho rodovyshcha Koktenkol v Tsentralnomu Kazakhstani [Physicochemical conditions of formation of the Koktenkol molybdenum-tungsten deposit in Central Kazakhstan]*. *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State Geological Exploration Institute*, 1–2, 124–127.
5. Eugster, H. P. (1985). *Granites and hydrothermal ore deposits: a geochemical framework*. *Mineralogical Magazine*, 49 (350), 7–23. URL: chrome- https://www.ruff.net/doclib/MinMag/Volume_49/49-350-7.pdf
6. Norman, D. I., Moore, J. N., Yonaka, B., & Musgrave, J. (1996). *Gaseous species in fluid inclusions: A tracer of fluids and indicator of fluid processes*. In *Proc. XXI Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (pp. 233–240). Stanford University, California.
7. Pavlun, N. N., Piznyur, A. V., & Zinchuk, N. N. (1999). *Evolution of the endogenous ore-bearing fluids (according to minerals' inclusions)*. In *Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Meeting* (pp. 144–153). London, UK.

THERMOBAROGEOCHEMISTRY OF ORE FORMATION PROCESSES IN MOLYBDENUM-TUNGSTEN DEPOSITS OF THE GREISEN GROUP IN CENTRAL KAZAKHSTAN

Mykola Pavlun

mykola.pavlun@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Molybdenum-tungsten mineralization of the greisen group in Central Kazakhstan was formed during orogenesis and stages of tectono-magmatic activation. The Dzhungar-Balkhash geosyncline region occupies a special geological and metallogenic place in the Central Kazakhstan ore province. Here, during the Late Hercynian orogenesis, acidic intrusions were formed, with which all molybdenum and tungsten deposits are spatially, structurally, and in terms of time of formation connected. 18 ore regions have been identified, more than half of which are located in the Uspenska zone of crush and are associated with greisens of various facies. There are two morphotypes of deposits – endomorphic veined and supraintrusive stockworks.

Greisens were formed in the frontal zone of the autometasomatites column with the participation of high-temperature, essentially gaseous acid solutions, which, with a decrease in temperature (>470–300 °C), underwent compaction and condensed in the form of post-magmatic distillates at a depth of 5–4 to 2.5–1.5 km. The distillates were enriched in halides, CO₂, H₂O, and other volatile compounds.

The separation of melts-fluids from magma chambers and their evolution occurred either under the condition of retrograde boiling of magma, or as a result of the gradual separation of melts-solutions – with the formation of melts-solutions with CO₂ and a residual melt-solution with high-density halogen ore-forming fluids. Separation from the magma-ore generating chamber occurred in different ways. During the development of contractional fracturing in supraintrusive host rocks, an arch effect was formed and a noticeable decrease in pressure occurred, which contributed to the «suction» of fluid from the magma-ore-generating source with subsequent extraction of rare metals.

Molybdenum-tungsten deposits in the region have been formed under pneumatolytic-hydrothermal conditions during five stages of mineralization from solutions of high salt concentration (>65–27 wt. % NaCl) and high pressure and its significant fluctuations (from 165 to 25 MPa).

Key words: tungsten, molybdenum, deposit, ore formation, greisens, thermobarogeochemistry, pneumatolytic-hydrothermal processes, Late Hercynian orogenesis, Central Kazakhstan.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

NATIVE ELEMENTS AND METALLIC ALLOYS IN THE MRIYA PIPE, AZOV BLOCK OF THE UKRAINIAN SHIELD: INSIGHTS INTO THE MINERALOGY OF THE EARTH'S MANTLE

¹ **Ivan Yatsenko**, Candidate of Geol. Sci., Senior Research Scientist
yatsenko.ivan1000@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7972-1702>

¹ **Oksana Stupka**, Candidate of Geol. Sci., Senior Research Scientist
stupkaoksana@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5871-0249>

¹ **Iryna Buchynska**, Candidate of Geol. Sci., Senior Research Scientist
ibuchynska@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-8154-4485>

² **Viktor Yatsenko**, Candidate of Geol.-Mineral. Sci.,
Laboratory Director, Department of Mineral Resources and Nuclear Energy
vgyatsenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3498-3466>

¹ Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of National Academy of Sciences of Ukraine,

3a, Naukova St., Lviv, Ukraine, 79060

² State Institution «The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine»,

34a, Acad. Palladin Av., Kyiv, Ukraine, 03142

This study examines the occurrence, composition, and origin of native metals and some other highly reduced mineral phases in kimberlite–lamproite magmatic systems, with particular emphasis on the Mriya pipe (Azov Block, the Ukrainian Shield). Native metals are extremely rare in crustal rocks due to relatively high oxygen fugacity, but are more typical of deep mantle environments. Their presence therefore, provides important insights into reduced conditions and deep geodynamic processes. SEM/EDS investigations reveal a diverse assemblage of native metals, including Pb, Sb–Pb, Sn–Pb, Cu–Zn, Fe, and Si–Ti–Fe phases. These occur both as individual grains with spherical, fluidal, and irregular morphologies, and as inclusions within titanium–manganese–iron–silicate (TMIS) spherules and Ti³⁺-bearing corundum.

Textural features and phase relationships indicate crystallization from melts under highly reducing conditions, most likely during rapid adiabatic cooling in gas-charged flows associated with explosive volcanic activity. Integration of new data with previously published results demonstrates that certain components of the highly reduced mantle mineral association (HRMMA), such as TMIS spherules, Pb-dominated and Cu–Zn particles, are characteristic of kimberlite-like formations. The identification of similar mineral assemblages in some sedimentary deposits on the Ukraine, lacking evidence of weathering, supports their interpretation as primary pyroclastic material capable of scattering over a considerable distance.

Possible genetic models are considered, including deep mantle sources, plume-related transport, and formation under the influence of reduced $\text{CH}_4\text{-H}_2$ fluids, with some hypotheses suggesting origins in the lower mantle or near the core–mantle boundary. The results underscore the significance of HRMMA minerals as potential indicators in diamond exploration and contribute to a better understanding of the formation and preservation of highly reduced mineral systems in the Earth's interior.

Key words: native metals, metallic alloys, highly reduced phases, spherules, mantle, corundum, diamond, kimberlites, the Ukrainian Shield.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.05>

Statement of the problem. Native metals are extremely rare in the rocks of the Earth's crust that are accessible for study. In contrast, native phases are very common in extraterrestrial material. Native phases of Fe, Ni–Fe, Co–Fe, Cu, Mo, Nb, Pt, and platinum group elements (PGE), as well as highly reduced oxygen-free minerals (phosphides, nitrides, carbides, and diamond) have been found in various types of meteorites [10]. Native metals, including Ni–Fe, Ni, Cu, Cu–Zn, Cu–Ni–Zn–Fe, FeC, $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$, and $(\text{Fe,Ni,Co})_3\text{P}$, have been identified in samples of Lunar basalts and regolith delivered by the Apollo missions [4].

The geological processes associated with the formation of the Earth's lithosphere are characterised by high oxygen activity (oxygen fugacity $-f\text{O}_2$), which is inconsistent with the stability of native elements. Thus, the majority of known sedimentary, metamorphic, and igneous rocks are devoid of metallic phases, with the exception of the highly stable metals Au, Ag, and PGE. In the Earth's mantle, oxygen fugacity is thought to decrease with depth down to the iron-wüstite (IW) buffer and below [7]. This change in oxygen fugacity with depth likely explains the fact that known occurrences of native metals on Earth are associated with ultramafic and mafic rocks of mantle origin, including chromites, picrites, and kimberlites [1; 5; 7; 9; 13–18], and occasionally with basalts [2; 19].

Traditionally, in kimberlite geology, the main focus has been on typical kimberlite minerals, known as kimberlite indicator minerals (KIMs). Exotic native phases from kimberlites, on the other hand, were studied only in an episodic manner. However, the discovery of inclusions of ferropericlase, native metals (Pb, Ni, Fe), carbides, and nitrides in certain varieties of diamonds has provided new data to advance kimberlite geology [7; 8; 11]. Several researchers have suggested that the presence of inclusions of highly reduced phases implies a deep origin for these diamonds (the base of the upper mantle and lower mantle), known as super-deep diamonds. A deeper origin for kimberlites has also been proposed. A model for the formation of proto-kimberlite melt at the base of the lower mantle was presented by S. E. Haggerty [6]. Thin films, including 15 native metals dominated by Fe, Ni, Pd, Au, Ag, Pb, Sn, Sb, and their intermetallic alloys, have been discovered on the surface of diamond crystals from various kimberlite provinces, which is another confirmation of the syngenetic relationship between diamonds and native metals [9]. These observations highlight the importance of studying native metals and oxygen-free minerals for a better understanding of the nature of kimberlites and the diamonds they contain.

We have previously reported on the discovery of native metals in kimberlites and lamproites of the Ukrainian Shield, and in kimberlites of the Arkhangelsk and Yakutsk provinces [15; 21; 22]. The metals occur as individual aggregates of Fe, Cu, Zn, Cu–Zn, Pb, Sb–Pb, Sn–Pb, and Au phases, and also as inclusions of Fe^0 in titanium-manganese-iron-silicate (TMIS) spherules, Mn-Fe in calcium-silicate (CS) spherules, and Si–Ti–Fe in Ti^{3+} -bearing corundum (Fig. 1). All highly reduced mineral objects, including native metals, spherules, as well as associated moissanite SiC and quosongite WC, were termed as a highly reduced mantle mineral association (HRMMA). In this article, we present new results from the study of native metals from the Mriya

pipe (Azov Block of the Ukrainian Shield), as this is the most representative occurrence with a complete suite of HRMMA [22].

Analysis of previous research. There are only a few reports of native metal discoveries in kimberlites. J. B. Dawson [3] provided information on the discovery of Ni-Fe, Fe⁰ (in SiC), PGE, Ag, and Cu in kimberlites from various diamond provinces around the world.

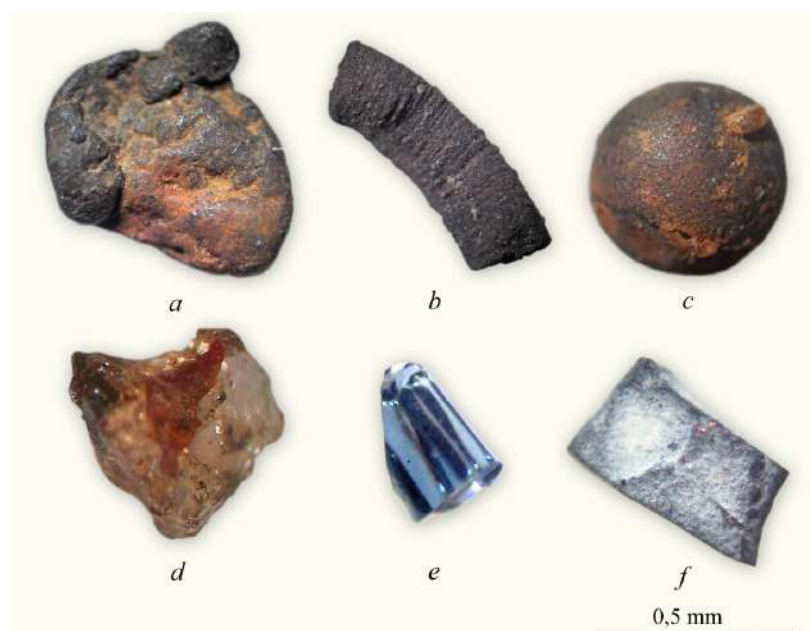


Fig. 1. Association of highly reduced mineral formations from the Mriya pipe: *a* – native lead (Pb); *b* – Zn-Cu alloy; *c* – titanium-manganese-iron-silicate (TMIS) spherule; *d* – Ti³⁺-bearing corundum; *e* – moissanite; *f* – qusongite

V. K. Marshyntsev first described TMIS, CS, and magnetite-wustite-iron (MW-I) spherules with Fe⁰ inclusions in the Mir, Udachnaya, and Aikhal pipes. The same suite of spherules, as well as Sb-Pb spherules, was discovered in the Catoca and Thiuzo pipe, Angola-Congo diamond province.

Findings of TMIS, MW-I spherules containing Fe⁰, grains of native Cu, and corundum with Si-Cr-Fe inclusions from the kimberlites of the Karpinskogo-1 pipe in the Arkhangelsk Province have been reported in previous studies [22].

Spherules of pure gold have been discovered in Tertiary lamproites in Spain and in the lamproites of the Mriya pipe in the Ukrainian Shield.

Native metals, including Sb-Pb, Cu, Au, and Al, were discovered in the Ukrainian Shield by O. I. Tishchenko in the Pivdenna and Nadiya pipes, Azov Block [20]. In our previous studies, we reported on native metals discovered in another explosive volcanic structure of the Ukrainian Shield [15; 22]: TMIS spherules with Fe⁰, grains of native Fe, and Cu-Zn alloy in the Zelenyi Hai pipe; TMIS spherules with Fe⁰ and particles of Cu-Zn alloy in the Gruz'ka-Pivnichna pipes; TMIS lapilli with Fe⁰ in the Shchors kimberlite dyke; TMIS spherules with Fe⁰, CS spherules with Fe⁰ or Mn-Fe inclusions, MW-I spherules, native Cu, and native Zn in the Pivdenna kimberlite pipe.

It is also worth mentioning other well-known occurrences of native metals and associated ultra-reduced phases associated with ultramafic and mafic rocks. HRMMA discovered in podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet, includes PGE metal alloys (Os–Ir, Os–Ir–Ru, Pt–Fe, and Ir–Ni–Fe), base-metal alloys (Fe–Ni–Cr, and Fe–Co), native elements (Fe, Ni, Cr, Au, Cu and Si), diamond, moissanite, and iron silicide (Fe–Si) [1]. Ti³⁺-bearing corundum with a number of highly reduced phases including native Ti, Fe–Cr, Fe–Si, Ti–Si–P, Ti–B–N–C phases, as well as zamboite FeTiSi₂, osbornite TiN, khamrabae-vite TiC, jingsuiite TiB₂, badengzhuite TiP, zhiqininite TiSi₂ and qusongite WC are also present [13; 14].

W. L. Griffin and co-authors carried out detailed studies of highly reduced minerals from Cretaceous pyroclastic rocks on Mt. Carmel, Northern Israel. This mineral assemblage includes diamond, wustite FeO, MW-I spherules, native V, and Ti³⁺-bearing corundum with entrapped ultra-reduced phases TiC, TiN, SiC, CrSi₂, and various Fe–Ti–Zr–(Si, P) melt derivatives [5].

Zhang Z. and co-authors reported the discovery of native gold, native copper, native zinc and moissanite grains in a picrite lava in the Lijiang area within the Emeishan large igneous province, SW China. The authors suggest that this is xenogenic material introduced into the picrite melt from the mantle with a rising plume [18].

Native metals are found in basalts from various regions. For example, Paleocene basalts from Disko Island, Greenland, contain native Fe [2]; native Fe and Cu are found in Vendian (Ediacaran) flood-basalts of Volyn, Ukraine [19].

The research purpose was to study individual particles of native metals and inclusions of native metal phases in TMIS spherules and Ti³⁺-bearing corundum from the volcanoclastic facies of the Mriya pipe, as well as to summarise published information on native metal finds from kimberlites.

Presentation of the main material. The Mriya pipe is one of a series of lamproite volcanic bodies located in the western part of the Azov Block of the Ukrainian Shield. The Mriya pipe dates back to the Paleoproterozoic and is emplaced in the plagiogneisses and amphibolites of the Drahunsk Unit (AR₁). It is oval in plan, with dimensions of 350 × 500 m, and cup-shaped in cross-section. The main body of the pipe is filled with intrusive lamproites, with an olivine-hornblende-phlogopite composition. The upper part is made up of altered clayey-carbonate volcanoclastic rocks with xenoliths of granites, micaceous hornblendites, olivineites, and dunites with a size of 5–7 cm. The thickness of the volcanoclastic facies deposits is approximately 30 m.

A 500 kg sample of volcanoclastic rock was picked from a depth of 20 m in borehole No. 189A, which has a diameter of 1300 mm. Metal grains were hand-picked from the heavy mineral concentrates using a binocular microscope.

Microanalytical studies were undertaken to examine the compositions and textural characteristics of the metallic phases and the mineral aggregates in which they are hosted.

The inner textures of the spherules were observed using a REMMA-102-02 scanning electron microscope (SEM) at the Ivan Franko National University of Lviv. SEM equipped with a W-cathode. Images were taken using back-scattered electron (BSE) mode. Chemical compositions were obtained using an EDAR energy-dispersive spectrometer (EDS) equipped in the SEM. The optimum operating conditions were an acceleration voltage of 20 kV, a sample current of 1 nA, and a beam diameter of 0.1 μm. The instrument was calibrated in accordance with the NERMA.GEO1.25.10.74GT mineralogy standards. Additionally, at the start of the measurements, the system was fine-calibrated using Cu. Magallanes 3.2 software was used to analyse the spectra.

The HRMMA particles recovered from the Mriya pipe volcanoclastic rocks (see Fig. 1) include spherule-like metal particles, TMIS spherules, Ti^{3+} -bearing corundum aggregates, quosongite WC, and moissanite SiC.

Native metals found in the Mriya pipe can be divided into two groups. Some of them form individual grains (Pb, Pb–Sb, Cu–Zn), whereas others are incorporated into the glass matrix as inclusions in TMIS spherules (Fe^0) and Ti^{3+} -bearing corundum aggregates (Si–Ti–Fe).

Native Pb and Pb-dominated alloys occur as spherule-like particles with plastic and fluidal forms (Fig. 1, *a*; Fig. 2, *a–d*). Some particles are heterophase, with Pb and Sb–Pb phases (Fig. 3, *a*) or Sn and Pb phases (Table 1). Others consist solely of Pb (Fig. 3, *b*). The metal of some particles may contain fine angular fragments of rutile, corundum, and undetermined carbon (see Fig. 3, *b*). These angular carbon fragments exhibit positive relief on the polished surface. It is therefore more likely that this is a diamond rather than graphite or amorphous carbon.

Cu–Zn alloy particles with variable composition (Table 2) form individual grains demonstrating a variety of shapes: spherical, cylindrical, lamellar, irregular, and so on (see Fig. 1, *b* and Fig. 2, *e, f*).

Fe^0 inclusions in the TMIS glass spherules are spherical in shape. The size of the inclusions varies greatly, ranging from a few micrometres to hundreds of micrometres, forming the metallic core of the spherules (Fig. 3, *c*; Fig. 4; Table 3). The glass of the spherules may also contain a phase of skeletal crystals of titanium-manganese-iron oxides [3].

Si–Ti–Fe inclusions in corundum usually form a shape close to spherical. The inclusions typically consist of two–three phases with different proportions of components (see Fig. 3, *d*; Fig. 5; Table 3).

Carbides and nitrides, like native metals, carbides and nitrides can form individual grains or occur as inclusions within the corundum aggregate.

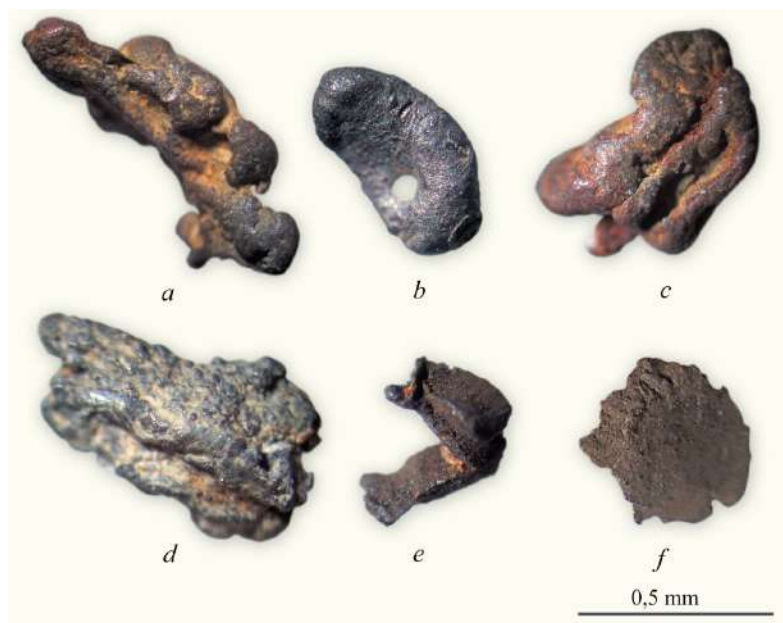


Fig. 2. Particles of native metals from the Mriya pipe: *a–d* – Sb–Pb alloy; *e, f* – Zn–Cu alloy

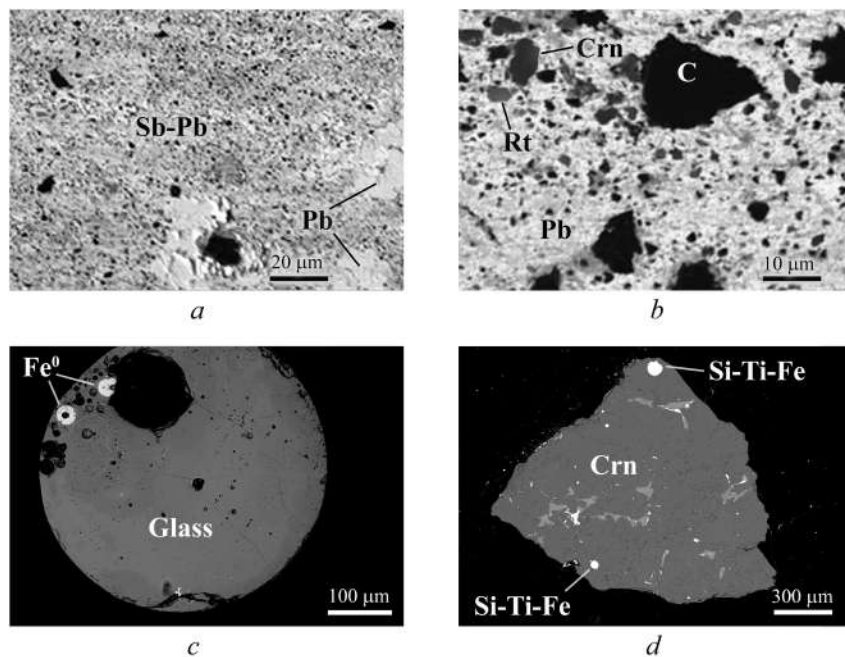


Fig. 3. Characteristic textures of individual metallic particles and inclusions of native metals, BSE-image: *a* – Sb–Pb ground mass with Pb segregations; *b* – Sb–Pb ground mass with inclusions of rutile (Rt), corundum (Crn), and unidentified carbon phase (C) – graphite (?), diamond (?); *c* – spherule composed of titanium-manganese-iron-silicate (glass with spherical aggregates of native iron (Fe⁰); *d* – Ti³⁺-bearing corundum with inclusions of the Si–Ti–Fe phases

Table 1
Composition of Pb, Sb-Pb, and Sn-Pb particles from the Mriya pipe, wt. %*

Sample Lab. No	Spot No	Ti	Fe	Cu	Ag	Sn	As	Sb	Pb	Cd	S	Total
FZ2-46	1	–	–	–	–	100.00	–	–	–	–	–	100.00
	2	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
FZ2-51	3	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
	4	–	–	–	–	–	–	82.08	17.92	–	–	100.00
FZ2-52	1	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
VG-12m	28	–	–	–	–	–	–	3.29	96.71	–	–	100.00
	31	–	–	–	–	–	–	12,67	87.33	–	–	100.00
VG-13m	33	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
	34	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
	35	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
VG-14	36	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00

Continuation of table 1

K09-11	1	–	–	–	0.03	81.94	6.21	0.00	11.82	–	–	100.00
K09-14	1	–	–	–	0.81	0.17	24.28	0.00	74.74	–	–	100.00
PUT-101	1	–	–	–	–	–	–	22.01	73.42	1.25	3.32	100.00
	2	–	–	–	–	–	–	21.28	77.47	1.25	–	100.00
KR3-34	3	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
KR3-36	5	–	–	–	–	100.00	–	–	–	–	–	100.00
	6	–	–	–	–	28.56	–	–	71.44	–	–	100.00
	7	–	30.42	–	–	69.58	–	–	–	–	–	100.00
KR3-37	8	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
MR-4-5	4	2.95	3.13	3.59	–	–	–	7.25	83.08	–	–	100.00
	5	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
MR-12	1	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
MR-16	1	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–	100.00
MR-17	3	–	–	–	–	–	–	7.87	92.13	–	–	100.00
MR-30	1	–	–	1.52	–	–	–	50.27	48.22	–	–	100.00

*Here and below in tables 2 and 3 – analyses by SEM/EDS; «–» (dash) – means beyond of the detection limit.

Qusongite and moissanite occur as individual angular grains. Qusongite is metallic grey in colour, transparent moissanite is coloured in shades of blue and green (see Fig. 1, e, f).

Osbornite TiN and khamrabaevite TiC are phases trapped within corundum and form near-spherical inclusions. These phases usually form individual inclusions, although khamrabaevite can also occur as a separate phase within Si–Ti–Fe inclusions.

Table 2

Composition of Cu-Zn particles from the Mriya pipe, wt. %

Sample Lab. No	Si	Ti	Fe	Cu	Zn	Sn	Total
KAR2-7	–	–	0.87	64.25	34.88	–	100.00
IYMR-19	–	–	–	87.84	7.87	4.29	100.00
IYMR-21	0.76	2.23	–	85.22	11.79	–	100.00
IYMR-23	–	–	–	65.97	34.03	–	100.00
IYMR-25	–	–	–	84.60	15.40	–	100.00
IYMR-31	–	–	–	66.33	33.67	–	100.00
IYMR-32	–	–	–	91.28	8.72	–	100.00
IYMR-33	–	–	–	56.93	43.07	–	100.00

HRMMA from kimberlite-lamproite formations exhibits distinctive features when compared to those from known non-kimberlite-type magmatic occurrences. Some highly reduced mineral formations are common to the majority of known occurrences represented by various types of igneous rocks: diamond, moissanite, Ti³⁺-bearing corundum, MW-I spherules with Fe⁰, Fe⁰ grains, and wustite [1; 2; 5; 13; 14; 17].



Fig. 4. Micrographs of titanium-manganese-iron-silicate (TMIS) spherules

Table 3

Composition of Fe⁰ and Si-Ti-Fe inclusions from the Mriya pipe, wt. %

Type of inclusion	Sample Lab. No	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	K	P	Total	
Inclusion in TMIS spherules	FP-8	–	1.05	0.29	–	98.50	–	–	–	–	0.15	100.00	
	8SH12	0.76	0.19	0.82	0.23	97.18	–	0.66	0.03	0.12	–	100.00	
Inclusions in corundum	SP3-1-2	21.34	25.95	–	2.65	48.02	2.04	–	–	–	–	100.00	
	SP3-1-3	15.37	4.33	–	1.75	78.50	0.05	–	–	–	–	100.00	
		15.99	5.03	–	1.81	77.17	–	–	–	–	–	100.00	
		20.31	29.41	–	1.87	48.02	0.39	–	–	–	–	100.00	
		20.01	28.38	–	2.09	49.17	0.35	–	–	–	–	100.00	
		23.02	6.90	–	2.24	67.55	0.29	–	–	–	–	100.00	
	22.49	6.52	–	2.31	68.42	0.26	–	–	–	–	100.00		
	SP3-1-4	16.28	4.00	–	1.53	78.19	–	–	–	–	–	–	100.00
		19.25	29.41	–	1.12	48.95	–	–	–	–	–	1.27	100.00
	KR2-16	21.39	7.22	–	1.27	69.06	1.07	–	–	–	–	–	100.00

Fig. 5. Micrographs of Ti³⁺-bearing corundum

However, others, including TMIS spherules, CS spherules, and Sb–Pb spherule-like particles, are found only in kimberlite-lampoite explosive structures [15; 20; 21]. Finds of Cu–Zn alloys and possibly native Au, Cu, and Zn also appear to be associated with kimberlite rocks in general

and with diamonds in particular. Native Pb, Sb, Cu–Zn, and Au on the surface of diamonds and as inclusions within diamonds from kimberlites are also consistent with these observations [9].

Surprisingly, kimberlite-associated varieties of HRMMA, including diamond, TMIS spherules, CS spherules, MW-I spherules, moissanite, Ti³⁺-bearing corundum, Pb, Sb–Pb, and Au, have been found in sediments of the Vendian (Ediacaran), Cretaceous, Palaeogene, and Neogene sediments in some regions of the Ukraine [22]. It is important to note that these particles show no signs of mechanical or chemical weathering, taking into account that some of them are highly unstable to weathering (CS spherules, Pb, Sb–Pb).

These highly reduced particles may be pyroclastic rather than epiclastic. It is considered that, with rare exceptions, kimberlite pyroclastic deposits are absent beyond the crater rim [12]. It is possible that the explosive stages carrying HRMMA were relatively more energetic, which allowed them to be scattered by air over considerable distances. If this assumption is correct, then a new approach to searching for diamond deposits based on primary pyroclastic HRMMA aureoles may be viable.

The origin of native metals and other components of the HRMMA from kimberlite-lamproite rocks is an open question. Glassy TMIS spherules and spherule-like metal particles can be considered as similar objects belonging to the same class, representing droplets of solidified melt. It is likely that the fine-crystalline aggregate of Ti³⁺-bearing corundum, which was formed not as a rock constituent but as a hardened fragment of an Al-supersaturated melt, can also be attributed to this class [5]. The shape of the mineral particles and the presence of skeletal crystalline phases imply the formation of glassy and metallic spherules, and likely corundum, from melts in gaseous flows undergoing rapid adiabatic cooling [15].

Furthermore, this flow must be sufficiently free of fragmented material. Thus, the hypothetical spherule-bearing flow and the catastrophic process of intrusion of fragmentary kimberlite material carrying ash, macro- and microcrystals, peletal lapilli, xenoliths, and other incidental material must have substantial differences. Another question is how to reconcile the differing chemistry, redox, and temperature conditions of the formation of the initial kimberlite melt and the parent melts for the glass spherules and Ti³⁺-bearing corundum [15]. The survival of highly reduced melts within a relatively oxidised kimberlite melt seems problematic also. In essence, we must acknowledge the existence of isolated reservoirs containing metal-, TMIS-, and Al-enriched melts. The question is: where might these form, and how are they related to kimberlite-lamproite volcanism?

Previous models have proposed that native metals were formed in magmatic rocks as a result of interaction with carbonaceous deposits at shallow depths. In most recent publications, highly reduced minerals are interpreted as xenogenic mantle material introduced by rising plumes [1; 2; 11; 13–15; 17; 18]. Zhang R. Y. and co-authors suggest that some super-reducing and ultrahigh-pressure phases were transported by mantle convection from the base of the upper mantle and the mantle transition zone [17]. F. V. Kaminsky claims that super-deep diamonds containing inclusions of metals, carbides, nitrides, and ultrahigh-pressure phases were formed in the lower mantle and thus allows for the possibility of migration of highly reduced material from the mantle basement to shallow levels [7].

According to the concept developed by V. L. Griffin and his co-authors, CH₄-H₂ fluids rising into the upper mantle are responsible for the formation of ultra-reduced phases in magmas of mantle origin. This phenomenon is regarded as a fundamental process [5].

In our previous studies, we adopted a working hypothesis in which HRMMA were formed at the core-mantle boundary [22]. A theoretical model for the formation of TMIS melts (with Fe⁰) in the ultra-low-velocity zone (D'' layer), as a result of thermochemical interaction, was proposed [15].

Conclusions and prospects for further research. The study has shown that the volcanoclastic rocks filling the upper part of the Mriya pipe contain native metal phases, including Pb, Sb–Pb, Sn–Pb, As–Pb, Cu–Zn, Au, Fe, and Si–Ti–Fe. Pb-bearing, Cu–Zn alloys and Au occur as individual grains of spherical, plastic, and fluidal shapes. Native Fe forms spherical phases within the glass of titanium-manganese-iron-silicate (TMIS) spherules. Si–Ti–Fe phases occur as spherical aggregates trapped in Ti^{3+} -bearing corundum. An assemblage of highly reduced minerals, including diamond, qusonгите, moissanite, osbornite, and khamrabaevite, has also been recognized.

A comparison of the highly reduced minerals studied from the Mriya pipe and other kimberlite-lamproitic structures with known occurrences of highly reduced minerals from various magmatic rocks around the world has shown that components such as TMIS spherules, Pb-dominated and Cu–Zn spherule-like particles are typical exclusively for kimberlite-like formations. The same assemblage of highly reduced minerals, supplemented by CS spherules, MW-I spherules, Ti^{3+} -bearing corundum, and moissanite, was also found in sedimentary deposits from various locations in the Ukraine. All these minerals can be interpreted as pyroclastic particles produced by kimberlite explosions. If this hypothesis is correct, the highly reduced minerals could be used as indicator minerals for the search for primary diamond deposits.

Acknowledgments. Authors would like to acknowledge the staff of Ivan Franko National University of Lviv [S. Bekesha] for providing a collection of samples and R. Serkiz for assistance in analytical research.

BIBLIOGRAPHY

1. Bai W., Robinson P. T., Fang Q., Yang J., Yan B., Zhang Z., Hu X.-F., Zhou M.-F., Malpas J. The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38. P. 585–598. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.3.585>
2. Bird J. M., Weathers M. S. Native iron occurrences of Disko Island, Greenland. *The Journal of Geology*. 1977. Vol. 85. No. 3. P. 359–371. <https://doi.org/10.1086/628305>
3. Dawson J. B. Kimberlites and their xenoliths. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1980. 252 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67742-7>
4. Frondel J. W. Lunar mineralogy. New York and London : John Wiley & Sons, 1975. 323 p. <https://doi.org/10.1180/minmag.1976.040.315.24>
5. Griffin W. L., Bindi L., Cámara F., Ma C., Gain S. E. M., Saunders M., Alard O., Huang J.-X., Shaw J., Meredith C., Toledo V., O'Reilly S. Y. Interactions of magmas and highly reduced fluids during intraplate volcanism, Mt Carmel, Israel: implications for mantle redox states and global carbon cycles. *Gondwana Research*. 2024. Vol. 128. P. 14–54. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.10.013>
6. Haggerty S. E. Superkimberlites: a geodynamic diamond window to the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. Vol. 122. No. 1–2. P. 57–69. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90051-5)
7. Kaminsky F. V. The Earth's lower mantle composition and structure. Cham : Springer, 2017. 331 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55684-0_1
8. Lorenzon S., Wenz M., Nimis P., Jacobsen S. D., Pasqualetto L., Pamato M. G., Novella D., Zhang D., Anzolini C., Regier M., Stachel T., Pearson D. G., Harris J. W., Nestola F. Dual origin of ferropericlase inclusions within super-deep diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*. 2023. Vol. 608. Art. 118081. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118081>
9. Makeyev V. A., Kriulina G. Yu. Metal films on the surfaces and within diamond crystals from Arkhangelskaya and Yakutian diamond provinces. *Geology of Ore Deposits*. 2012. Vol. 54. P. 663–673. <https://doi.org/10.1134/S1075701512080107>

10. Rubin A. E. Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics & Planetary Science*. 1997. Vol. 32. P. 231–247. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01262.x>
11. Smith E. M., Shirey S. B., Nestola F., Bullock E. S., Wang J., Richardson S. H., Wang W. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*. 2016. Vol. 354. No. 6318. P. 1403–1405. <https://doi.org/10.1126/science.aal1303>
12. Sparks R. S. J., Baker L., Brown R. J., Field M., Schumacher J., Stripp J., Walters A. Dynamical constraints on kimberlite volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. Vol. 155. P. 18–48. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.02.010>
13. Xiong F., Xu X., Mugnaioli E., Gemmi M., Wirth R., Grew E. S., Robinson P. T., Yang J. Badengzhuite, TiP, and zhiqininite, TiSi₂, two new minerals from the Luobusa ophiolite, Tibet, China: evidence for super-reduced mantle-derived fluids? *European Journal of Mineralogy*. 2020. Vol. 32. P. 557–574. <https://doi.org/10.5194/ejm-32-557-2020>
14. Xu X. Z., Yang J. S., Robinson P. T., Xiong F. H., Ba D. Z., Guo G. L. Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusa ophiolite, Tibet. *Gondwana Research*. 2015. Vol. 27. No. 2. P. 686–700. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.010>
15. Yatsenko I., Poberezhskyy A., Stupka O., Bekesha S. Geochemical characteristics of spherules from the Pivdenna kimberlite pipe, East Azov region (Ukraine): implications for their sources and origin. *Geological Quarterly*. 2023. Vol. 67. Art. 6. <https://doi.org/10.7306/gq.1676>
16. Zappettini E. O., Santos J. O. S. Micro-inclusions in corundum from Puesto La Peña Complex Ouachitites, Mendoza, Argentina: a window to the mantle. *Canadian Journal of Mineralogy and Petrology*. 2024. Vol. 62. No. 1. P. 43–60. <https://doi.org/10.3749/2300010>
17. Zhang R. Y., Yang J. S., Ernst W. G., Jahn B. M., Iizuka Y., Guo G. L. Discovery of in situ super-reducing, ultrahigh-pressure phases in the Luobusa ophiolitic chromitites, Tibet: new insights into the deep upper mantle and mantle transition zone. *American Mineralogist*. 2016. Vol. 101. No. 6. P. 1285–1294. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5436>
18. Zhang Z., Mao J., Wang F., Pirajno F. Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province, SW China. *American Mineralogist*. 2006. Vol. 91. No. 7. P. 1178–1183. <https://doi.org/10.2138/am.2006.1888>
19. Лазаренко Є. К., Матковський О. І., Винар О. М., Шашкіна В. П., Гнатів Г. М. Мінералогія вивержених комплексів Західної Волині. Львів : Вид-во Львів. ун-ту, 1960. 510 с.
20. Тищенко О. І. Нова знахідка самородного алюмінію в Україні. *Мінералогічний журнал*. 2005. Т. 27. № 1. С. 38–43. URL: http://mineraljournal.org.ua/sites/default/files/sites/default/files/1_2005%20108%20s.pdf
21. Яценко І., Яценко Г., Бекеша С., Білик Н., Варичев О., Дручок Л. Ендогенні Ti-Mn-Fe-силікатні сферули із експлозивних структур та вулканогенно-осадових формацій України. *Мінералогічний збірник*. 2012. № 62. Вип. 1. С. 83–101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2012_62_1_10
22. Яценко І. Г. Силікатно-металеві сферули експлозивно-осадових формацій України (генетичний та прогностно-розшуковий аспекти) : дисертація на здобуття наук. ступеня канд. геол. наук. Львів, 2016. 181 с. URL: http://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/06/Yatsenko_dis.pdf

REFERENCES

1. Bai, W., Robinson, P. T., Fang, Q., Yang, J., Yan, B., Zhang, Z., Hu, X.-F., Zhou, M.-F., & Malpas, J. (2000). The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Canadian Mineralogist*, 38, 585–598. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.3.585>

2. Bird, J. M., & Weathers, M. S. (1977). Native iron occurrences of Disko Island, Greenland. *The Journal of Geology*, 85 (3), 359–371. <https://doi.org/10.1086/628305>
3. Dawson, J. B. (1980). *Kimberlites and their xenoliths*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67742-7>
4. Frondel, J. W. (1975). *Lunar mineralogy*. New York and London: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1180/minmag.1976.040.315.24>
5. Griffin, W. L., Bindi, L., Cámara, F., Ma, C., Gain, S. E. M., Saunders, M., Alard, O., Huang, J.-X., Shaw, J., Meredith, C., Toledo, V., & O'Reilly, S. Y. (2024). Interactions of magmas and highly reduced fluids during intraplate volcanism, Mt Carmel, Israel: Implications for mantle redox states and global carbon cycles. *Gondwana Research*, 128, 14–54. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.10.013>
6. Haggerty, S. E. (1994). Superkimberlites: A geodynamic diamond window to the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters*, 122 (1–2), 57–69. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90051-5)
7. Kaminsky, F. V. (2017). *The Earth's lower mantle composition and structure*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55684-0_1
8. Lorenzon, S., Wenz, M., Nimis, P., Jacobsen, S. D., Pasqualetto, L., Pamato, M. G., Novella, D., Zhang, D., Anzolini, C., Regier, M., Stachel, T., Pearson, D. G., Harris, J. W., & Nestola, F. (2023). Dual origin of ferropericlase inclusions within super-deep diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 608, 118081. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118081>
9. Makeyev, V. A., & Kriulina, G. Yu. (2012). Metal films on the surfaces and within diamond crystals from Arkhangelskaya and Yakutian diamond provinces. *Geology of Ore Deposits*, 54, 663–673. <https://doi.org/10.1134/S1075701512080107>
10. Rubin, A. E. (1997). Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics & Planetary Science*, 32, 231–247. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01262.x>
11. Smith, E. M., Shirey, S. B., Nestola, F., Bullock, E. S., Wang, J., Richardson, S. H., & Wang, W. (2016). Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, 354 (6318), 1403–1405. <https://doi.org/10.1126/science.aal1303>
12. Sparks, R. S. J., Baker, L., Brown, R. J., Field, M., Schumacher, J., Stripp, J., & Walters, A. (2006). Dynamical constraints on kimberlite volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 18–48. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.02.010>
13. Xiong, F., Xu, X., Mugnaioli, E., Gemmi, M., Wirth, R., Grew, E. S., Robinson, P. T., & Yang, J. (2020). Badengzhuite, TiP, and zhiqinite, TiSi₂, two new minerals from the Luobusa ophiolite, Tibet, China: Evidence for super-reduced mantle-derived fluids? *European Journal of Mineralogy*, 32, 557–574. <https://doi.org/10.5194/ejm-32-557-2020>
14. Xu, X. Z., Yang, J. S., Robinson, P. T., Xiong, F. H., Ba, D. Z., & Guo, G. L. (2015). Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusa ophiolite, Tibet. *Gondwana Research*, 27 (2), 686–700. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.010>
15. Yatsenko, I., Poberezhskyy, A., Stupka, O., & Bekesha, S. (2023). Geochemical characteristics of spherules from the Pivdenna kimberlite pipe, East Azov region (Ukraine): Implications for their sources and origin. *Geological Quarterly*, 67, 6. <https://doi.org/10.7306/gq.1676>
16. Zappettini, E. O., & Santos, J. O. S. (2024). Micro-inclusions in corundum from Puesto La Peña Complex Ouchitites, Mendoza, Argentina: A window to the mantle. *Canadian Journal of Mineralogy and Petrology*, 62 (1), 43–60. <https://doi.org/10.3749/2300010>
17. Zhang, R. Y., Yang, J. S., Ernst, W. G., Jahn, B. M., Iizuka, Y., & Guo, G. L. (2016). Discovery of in situ super-reducing, ultrahigh-pressure phases in the Luobusa ophiolitic chromitites, Tibet: New insights into the deep upper mantle and mantle transition zone. *American Mineralogist*, 101 (6), 1285–1294. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5436>

18. Zhang, Z., Mao, J., Wang, F., & Pirajno, F. (2006). Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province, SW China. *American Mineralogist*, 91 (7), 1178–1183. <https://doi.org/10.2138/am.2006.1888>
19. Lazarenko, Ye. K., Matkovskiy, O. I., Vynar, O. M., Shashkina, V. P., & Hnativ, H. M. (1960). *Mineralohiia vyverzhenykh kompleksiv Zakhidnoi Volyni* [Mineralogy of igneous complexes of Western Volyn]. Lviv: Lviv University Publishing House.
20. Tishchenko, O. I. (2005). Nova znakhidka samorodnoho aliuminiu v Ukraini [A new finding of native aluminum in Ukraine]. *Mineralogichnyi zhurnal – Mineralogical Journal*, 27 (1), 38–43. URL: http://mineraljournal.org.ua/sites/default/files/sites/default/files/1_2005%20108%20s.pdf
21. Yatsenko, I., Yatsenko, G., Bekesha, S., Bilyk, N., Varychev, O., & Druchok, L. (2012). Endohenni Ti-Mn-Fe-sylikatni sferuly iz eksplozivnykh struktur ta vulkanohenko-osadovykh formatsii Ukrainy [Endogenous Ti-Mn-Fe-silicate spherules from explosive structures and volcanic-sedimentary formations of Ukraine]. *Mineralohichnyi zbirnyk – Mineralogical Review*, 62 (1), 83–101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2012_62_1_10
22. Yatsenko, I. H. (2016). *Sylikatno-metalevi sferuly eksplozivno-osadovykh formatsii Ukrainy (henetychnyi ta prohnozno-rozshukovy aspekti)* [Silicate-metal spherules of explosive-sedimentary formations of Ukraine (genetic and prognostic-prospecting aspects)] (Ph. D. thesis). Lviv. URL: http://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/06/Yatsenko_dis.pdf

САМОРОДНІ ЕЛЕМЕНТИ І МЕТАЛЕВІ СПЛАВИ ІЗ ТРУБКИ «МРІЯ», ПРИАЗОВСЬКИЙ БЛОК УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА: ЗАГЛИБЛЕННЯ В МІНЕРАЛОГІЮ МАНТІЇ ЗЕМЛІ

Іван Яценко¹, Оксана Ступка¹, Ірина Бучинська¹, Віктор Яценко²
yatsenko.ivan1000@gmail.com

¹Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України,
вул. Наукова, 3а, Львів, Україна, 79060

²ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»,
просп. акад. Палладіна, 34а, Київ, Україна, 03142

Схарактеризовано поширення, склад і походження самородних металів та високовідновлених мінеральних фаз у кімберліт-лампроїтових магматичних системах з акцентом на трубці «Мрія» (Приазовський блок Українського щита). Самородні метали надзвичайно рідкісні в земній корі через відносно високу фугітивність кисню, натомість вони більше характерні для умов глибокої мантиї. Тому їхня наявність у магматичних породах є свідченням відновних умов і певних геодинамічних процесів у мантиї Землі. За допомогою методів сканувальної електронної мікроскопії й енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (SEM/EDS) виявлено різноманітний набір природних металів, у тім числі фази Pb, Sb–Pb, Sn–Pb, Cu–Zn, Fe та Si–Ti–Fe. Вони представлені як окремими зернами зі сферичною, сферулоподібною та флюїдальною морфологією, так і у вигляді сферичних включень у титан-манган-залізо-силікатних (ТМЗС) сферулах і корунді, що містить домішку Ti³⁺ і високовідновлені мінерали.

Текстурні особливості й фазові взаємовідношення у високовідновлених частинках є доказом кристалізації з розплавів за високовідновлювальних умов, найімовірніше, під час швидкого адіабатичного охолодження в газонаповнених потоках, пов'язаних із вибуховою вулканічною активністю. Інтеграція нових даних з раніше опублікованими результатами засвідчує, що певні компоненти високовідновленої мантийної мінеральної асоціації (ВВММА) – ТМЗС сферули та Pb, Sb–Pb і Cu–Zn сферулоподібні частинки – характерні винятково для кімберлітоподібних порід. Виявлення таких мінеральних асоціацій в осадкових відкладах без ознак звітрювання в деяких

регіонах України свідчить про те, що це частинки пірокластичного походження, які мають здатність розсіюватися на значній площі.

Проаналізовано вірогідні моделі походження ВВММА, які охоплюють перенесення мантійними плюмами, формування під впливом відновлювальних $\text{CH}_4\text{-H}_2$ мантійних флюїдів; деякі гіпотези пов'язані з можливістю формування в нижній мантії або на межі ядро–мантія.

Мінерали ВВММА, без сумніву, є потенційними індикаторами під час пошуків діамантів. Вони сприяють кращому розумінню геодинаміки формування і збереження високовідновлених мінеральних систем у надрах Землі.

Ключові слова: самородні метали, металеві сплави, високовідновлені фази, сферули, мантія, корунд, діамант, кімберліти, Український щит.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

JOTNIAN SANDSTONES IN MORaine DEPOSITS OF SOUTH-EASTERN LITHUANIA

Iryna Poberezhska, *Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry named after Professor Orest Matkovskiy*
iryna.poberezhska@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5020-8326>

Dmytrii Biruk, *Postgraduate Student of the Faculty of Geology*
Dmytrii.Biruk@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0005-7129-2244>

Sviatoslav Kozhushyna, *3rd year Student of the Faculty of Geology*
Sviatoslav.Kozhushyna@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0004-0770-6046>

Pavlo Kempa, *3rd year Student of the Faculty of Geology*
Pavlo.Kempa@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0008-4867-6268>

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

The article presents the results of a comprehensive lithological and paleogeographical study of erratic fragments discovered in the Skersabalai quarry (Vilnius district, Lithuania). The relevance of the study lies in the necessity of detailing the reconstructions of glacial stream dynamics during the last Weichselian (Nemunas) glaciation, specifically its maximum Grūda stage. The primary focus is on red Jotnian quartzite sandstones, which serve as key indicator boulders.

Mineralogical and petrographic analysis identified these rocks as medium-grained quartz arenites, which are derivatives of the Mesoproterozoic Jotnian deposits from the Satakunta formation (Finland) and the Bothnian Sea basin. Diagnostic features include a regenerative structure, the presence of chloritized siliceous fragments, and specific turbidization of quartz cores. It is demonstrated that the high textural maturity of these rocks is associated with their formation within the extensive paleoriver systems of the Fennoscandian Shield.

A crucial scientific confirmation of the Bothnian-Åland transport vector is the established paragenetic association of rocks in the Skersabalai quarry. Alongside the sandstones, a complex of igneous (red granites, rhyolite porphyries) and metamorphic rocks (gneisses, amphibolites, migmatites of the Svecofennian belt) was identified. The presence of epidotized granites with garnet indicates deep glacial erosion of the Fennoscandian crystalline basement. Simultaneously, findings of Palaeozoic sedimentary rocks (Ordovician and Silurian limestones) and an intact coral testify to the incorporation of material from the Baltic region's sedimentary cover during the glacier's transit through Estonia.

The totality of the described findings proves that the eastern branch of the Bothnian ice stream passed through eastern Lithuania. The authors reconstructed the full transport trajectory: from formation in the Scandinavian Mountains and the entrapment of Jotnian rocks in the Gulf of Bothnia to the accumulation

of material in south-eastern Lithuania after transit through the Baltic basin. The results obtained are of significant importance for refining the stratigraphy of Quaternary deposits and the dynamics of Pleistocene glaciations in the Baltic region.

Key words: erratic clasts, Jotnian quartzite sandstone, southeastern Lithuania, Vistula glaciation, Fennoscandian Shield, quartz, zircon, regeneration cement.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.06>

Problem Statement. The glaciations of the last ice age have different names according to the historical tradition of these regions: Fraser (in the Pacific Cordillera in North America), Wisconsin (in central North America), Devensian (in the British Isles), Midland (in Ireland), Würm (in the Alps), Meridian (in Venezuela), Vistula (in northern Central Europe and Northern Europe), Valdai (in Eastern Europe), Zyryan (in Siberia), Yankiue (in Chile), Otiran (in New Zealand) [10; 11; 21]. The Vistula glaciation, known in Lithuania as the Nemunas, is the last major ice age, which ended about 11–12 thousand years ago. It lasted from about 115,000 to 11,700 years ago. The most severe phase (maximum glaciation) occurred between 20,000 and 18,000 years ago. A huge ice sheet extended from the Scandinavian Mountains [4] to the eastern coast of Schleswig-Holstein, Central Germany and Northwestern Russia; it covered Scandinavia, Northern Germany, Poland and part of Great Britain. In Northern Europe, it is the last of the glaciers of the Pleistocene ice age.

The Scandinavian shield was the centre of glaciation. Erosion processes took place, the glacier worked as an abrasive, mechanically cleaning the surface layers of rocks. The ice sheet, up to 3 km thick, literally «scraped out» loose rocks and weathered granites under its own weight. «Ram foreheads» were formed: masses of ice smoothed the rocks, turning them into characteristic sloping hills with smooth tops. Ice flows deepened tectonic faults, creating deep valleys, which after the glacier melted were filled with the sea (fjords of Norway and the Baltic Sea basin). After the ice melted, isostatic processes occurred – the Fennoscandian Shield began to «float» due to the removal of colossal pressure. This uplift continues today (in places up to 1 cm per year), due to which the area of Sweden and Finland is gradually increasing [17; 19].

The south-eastern part of Lithuania is unique as it marks the maximum limit of the last glaciation, locally referred to as the Grūda Stage (correlated with the Branderburg Phase in the regional stratigraphic scheme [2; 7; 16].

The extreme border of the Vistula (Niamun) glacier ran along the foot of the Medininka Upland. The territories to the southeast of it (for example, near Vilnius) were not covered by ice during this period, but were in the permafrost zone. The relief here is dominated by moraine ridges, sand plains formed by meltwater flows that washed sand from under the edge of the glacier, eskers and kami. The typical hilly-lake landscape of Lithuania is the result of the melting of ice remnants that were buried under a layer of soil. Of particular interest from the point of view of geology are the fragments of rocks that were brought by the glacier and deposited after its melting. This is of scientific interest for determining the primary sources of material supply, the conditions of its transfer, the directions of glacier movement, the area of glaciation, etc. [9]. In geological and glaciological literature, such fragments are called erratic (erraticus in Latin means «wandering») [23].

Research analysis. The primary material for the research was rock samples of erratic fragments, which were found in the Skėrsabalyai quarry in the Vilnius district of Lithuania. This is a technological area operating in an open-pit mining method. The facility specializes in the extraction of sand-gravel mixture (SGM) and other sedimentary non-metallic rocks, which are used as aggregates in construction. During the processing of the extracted mixture, large fragments of various rocks, once brought by the glacier, are separated. Among them, red quartzite sandstones were found.

The rocks identified as erratic clasts in the south-eastern part of Lithuania belong to different genetic types and have different age dating. By origin, they are igneous (acidic plutonic and volcanic), metamorphic and sedimentary rocks. Among the acidic rocks, the most common are heterogeneous granites of predominantly red color: biotite granite, muscovite granite, epidotized granite with garnet, pegmatite granite. Volcanic rocks of acidic composition – rhyolite quartz porphyries – were also recorded at the sampling site. Among the erratic clasts of metamorphic origin, epidote-amphibolite schist, amphibolite gneiss, migmatite, quartzite, marble was identified. Sedimentary rocks are represented by various types. Among them, carbonate (hemogenic ferruginous limestone, heterogeneous ferruginous dolomite, coral of the genus *Heliolites*), siliceous (spongolite) and clastic formations (quartzite sandstones) have been identified [15]. Such a variety of rocks in one place is a classic sign of moraine material, where the glacier «mixed» rocks from different parts of Fennoscandia.

Further studies have made it possible to determine that the found red quartzite sandstones belong to the Jotnian deposits. Jotnian sandstone is the oldest known sedimentary rock in the Baltic region that has not undergone metamorphism. These are the oldest cover rocks, common in the southern, southwestern and eastern parts of the Fennoscandian Shield, where they are preserved in grabens (Western Onega, Satakunta, Muhos, etc.) and are represented by quartzite sandstones with subordinate clay shales (Western Onega, Satakunta, Dalarna, Gävle, Trysil in Norway, Nordingra, Tersky coast, etc.), less often by quartzites (Almasakra), siltstones and clay shales (Muhos), which are composed of strata 500–1000 m thick. They are adjacent to somewhat earlier Subjotnian and Hoglandian acidic effusive rocks with subordinate tuffs and sedimentary formations (Dalarna, Hogland Island) and corresponding granites [18]. They occur as relics of unmetamorphosed sedimentary cover rocks on the washed-out folded structures of metamorphosed Precambrian geosynclinal formations.

In the modern International Chronostratigraphic Scale, the term «Jotnian» is officially absent; it is a regional name for the deposits of the Fennoscandian Shield, which belong to the Mesoproterozoic eon. The stratigraphic position of these deposits is the Late Mesoproterozoic, which corresponds to the international period of Stenian (Stenian) MP3 or S; age is 1200–1100 million years ago.

The aim of our work was to study the erratic fragments of quartzite sandstone found in the Skėrsabalyai quarry in the Vilnius region of Lithuania and to determine its original sources.

Terminological aspects. The most accurate term for a strong sandstone with quartz cement is quartzite sandstone – the more commonly used term in Ukrainian geology. In such sandstone, the spaces between the quartz grains are filled with secondary regeneration quartz cement, with indentation cementation. This is not yet fully metamorphic quartzite, but it is already stronger than ordinary sandstone. Metasandstone is a genetic term that directly indicates that the rock was sandstone, but underwent changes under the influence of pressure or temperature. Quartz arenite – (Quartz-rich sandstone) – in English-language literature and modern lithology, this term denotes a clastic rock of psammite dimension with a high content of quartz grains (over 90–95 %) and a small amount of matrix («cement») between them.

Description of the main material. Macroscopic description. The studied quartz sandstones have a rich red-brown colour, which is due to the presence of iron oxides in the rock composition, most likely hematite, which border the quartz grains with a thin film and fill the space between them. The structure of the rocks is psammite (sandy), fine-medium-grained, the rock is well sorted, quartz grains fit tightly to each other. The texture is massive, homogeneous. Rock fragments have an uneven fracture. Visually, quartz dominates the rock (over 90 %); The luster on the fracture is barely noticeable, matte, in some places the glass luster characteristic of quartz is observed (Fig. 1).

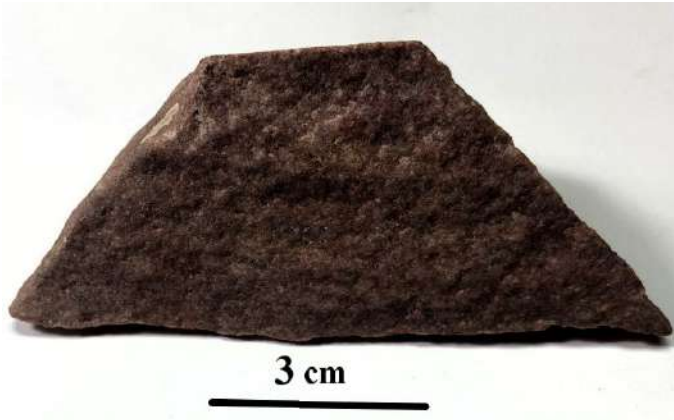


Fig. 1. Erratic fragment of red-brown quartzite sandstone

Microscopic description. The rock is composed of quartz (Q), its content in the framework is 95–97 %, according to the refractive index – IV group (according to V. Lodochnikov); the grains are colourless, their contours are outlined by a thin brownish-brown border of hematite. Under cross polarized light (XPL), grey, light grey to white colours of interference of the first order are observed ($n_g - n_p = 0.007-0.009$) [22]. A wavy attenuation characteristic of quartz grains is noted: the colour of the grain is heterogeneous, it seems to «flow». This is a sign of internal stresses in the crystal lattice of quartz, obtained in the parent rock or during tectonic processes.

Grain size. The bulk of the clastic material has a size of 0.2–0.8 mm, the medium-grained fraction (0.25–0.50 mm) prevails. The average value is ~ 0.43 mm.

Character of cementation. A thin dark border of iron oxides is clearly visible in many quartz crystals, which forms «phantom» contours and fixes the primary shape of the grains before the beginning of the cementation process. Most grains have a high degree of rolling, which indicates long-term transport in the aquatic environment (Fig. 2). Behind this border, secondary quartz grows, which has the same optical orientation as the main grain; the size of the regeneration borders is 0.02–0.04 mm. Thus, regeneration cement was formed, which completely eliminated porosity, turning the rock into a dense drain quartzite sandstone. After the cement growth, the quartz grains seemed to grow together with the formation of a mosaic, practically non-porous structure. This explains the high strength of the studied rock. Toothed and depressed contacts are clearly visible. The grains are so tightly fitted to each other that the boundaries between the regeneration borders of neighbouring grains merge into a single mosaic.

Iron oxides (hematite, hydrogoethite) precipitated from solutions simultaneously with the growth of quartz cement or immediately before it (see Fig. 2, b). A thin ferruginous «shirt» covers the primary grain, and pure regeneration quartz grows on top of it, which makes the rock visually red-brown.

Degree of sorting. To assess the sorting, we used the sorting coefficient S_o (according to the Trask method). The grain size ranges from 0.2 to 0.8 mm, the average size is 0.43 mm, which corresponds to medium-grained sandstone; standard deviation $\sigma \approx 0.21$; coefficient of variation $V = 48.8$ %. For the calculation according to the Trask method ($S_o = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$) we defined the quartiles:

Q_1 (25 % samples) ≈ 0.25 mm; Q_3 (75 % samples) ≈ 0.65 mm.

$$S_o = \sqrt{0.65 / 0.25} = \sqrt{2.6} \approx 1.61.$$

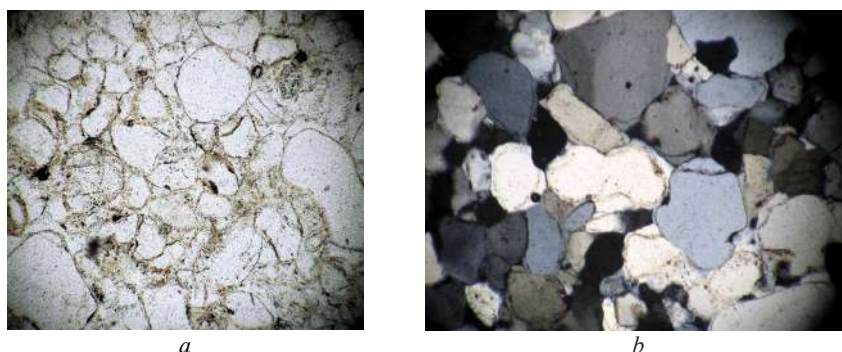


Fig. 2. Quartzite sandstone with regeneration cement: *a* – PPL; *b* – XPL; $\times 75$

If $S_o < 2.5$, the rock is considered well sorted, i.e. an index of 1.61 indicates a fairly high degree of sorting, which is typical for mature quartz sandstones [24]. For Jotnian deposits, such a high purity of quartz indicates that before burial the sediment underwent multiple washings, which «cleaned» all unstable minerals, except for rare orthoclase grains.

Most quartz grains look dusty or speckled, since, as it turned out, they contain thousands of microscopic vacuoles with a gas-liquid phase. Such turbidization (clouding) of quartz by small gas-liquid inclusions is characteristic of Scandinavian Jotnian rocks. Linear structures are traced inside the grains – these are secondary chains of inclusions that «healed» microcracks in quartz even before it became part of the sandstone. This is a typical feature of quartz from ancient granite massifs.

In quartzite sandstones, tabular grains of pelitic alkali feldspar (group II in terms of refractive index) [22] are present, the size of which is on average 0.2 mm. The yellowish cloudy colour of the grains in plane polarized light (PPL) is a manifestation of the processes of pelitization, during which the smallest particles of clay minerals replace alkali feldspar, making it opaque and «dirty» compared to pure transparent quartz. The size of feldspar grains of 0.2 mm with an average quartz grain size of 0.4–0.8 mm corresponds to hydraulic equivalence: alkali feldspar is less stable and more easily subject to mechanical wear; therefore, its grains are usually smaller than quartz in the described rock. Since there is no microcline lattice, and the grains are pelitized and have a yellowish tint, this is most likely orthoclase (it is less stable than microcline and undergoes pelitization more quickly).

The composition of the studied quartzite sandstones contains lithoids – fragments of siliceous rocks – quartzites or flints [24], 0.2–0.5 mm in size, which have a rounded shape, which confirms the good sorting of the rocks and indicates intensive processing of the material (for example, in coastal marine conditions or during long-term river transportation), when less stable minerals were destroyed, and quartz and siliceous fragments acquired a rounded shape. The fraction 0.2–0.5 mm fits well into the general granulometric spectrum of rocks, which makes these fragments part of the grain framework. Some fragments of siliceous rocks have a greenish tint in plane polarised light (Fig. 3) – this is a very characteristic detail for the Jotnian sandstones, which were formed due to the erosion of older Archean-Proterozoic strata, for example, series of the greenstone belts type. This colour is most likely due to the presence of small chlorite flakes, which give the rocks a uniform grey-green colour. In the context of Jotnian age, such green flints are often the product of redeposition of the products of destruction of older volcanic or metasedimentary rocks.

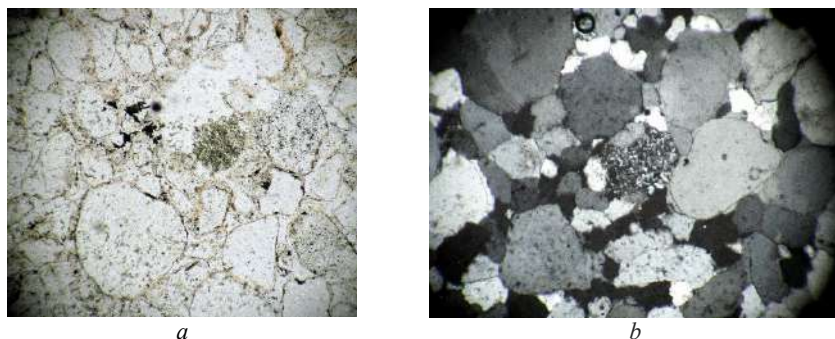


Fig. 3. Fragment of greenish siliceous rock in quartzite sandstone: *a* – PPL; *b* – XPL; $\times 75$

Among the accessory minerals in the studied rocks, zircon was found – a mineral of group VII, under cross polarised light with high interference colours of the II and III orders of the spectra according to the Michel-Lévy colour nomogram [22], the extinction is straight. This is a stable accessory mineral, very characteristic of sandstones formed as a result of the destruction of the Rapakivi granites, the main foundation for the Jotunheimen in Finland. Both independent zircon grains and its inclusions in quartz are present. The grains have an elongated-rounded shape, size – from 0.08 to 0.10 mm, clearly of terrigenous origin (released during the destruction of parent rocks) (see Fig. 2, *a*). Since zircon is heavier than quartz (its density is 4.6 g/cm³ versus 2.6 g/cm³ in quartz), it precipitates together with quartz grains, which are two to three times larger than zircon, which perfectly corresponds to the law of hydraulic equivalence. Zircon inclusions in quartz are 0.02–0.04 mm in size. This is primary zircon that crystallized together with quartz in the parent rocks, granites or gneisses of the basement. The grains have a subisometric and slightly elongated shape with rounded edges (Fig. 4). Rolled zircon grains with an elongation factor of 2 to 3 (length to width ratio of about 2:1 or 3:1) are a characteristic feature of grains from ancient metamorphic or igneous complexes that have undergone prolonged transportation. Zircon is one of the hardest minerals (7.5 on the Mohs scale); to give it a perfectly rounded shape, a huge amount of work is required by the aquatic environment, probably multiple redepositions in the coastal zone.

The studied rocks contain idiomorphic crystals of ore minerals of a clear geometric shape. There are square grains ranging in size from 0.04 to 0.10 mm and triangular grains ranging in size from 0.10 to 0.12 mm. Presumably, they are of authigenic origin (they could have grown directly in the sandstone during diagenesis), since their edges are perfectly sharp. A brown shell is formed around some ore minerals – «limonite halo» – a halo of secondary iron oxides and hydroxides, which suggests the presence of iron in the minerals (pyrite, magnetite?). Such shells are formed under the influence of oxygen and groundwater: iron in the mineral is oxidized with the formation of goethite or limonite. This is a common phenomenon for ancient sandstones that have undergone weathering. The formation of a brown halo around pyrite grains indicates its gradual replacement by limonite; if the ore mineral is magnetite, it is transformed into hematite or hydrogoethite. It is precisely such microscopic iron oxide inclusions, which diverge from the ore grains or are contained in the cement, that give the Jotnian quartzite sandstones their characteristic pink-red or brick colour. The presence of such idiomorphic grains with decay products around them is a classic sign of mineralogically mature Proterozoic sediments.

Alternating areas with quartz grains of different sizes were found in the sections of the studied rocks; such microlayering is an important indicator of the dynamics of the sedimentary environment. The energy of the flow changed: larger grains (0.6–0.8 mm) were deposited during

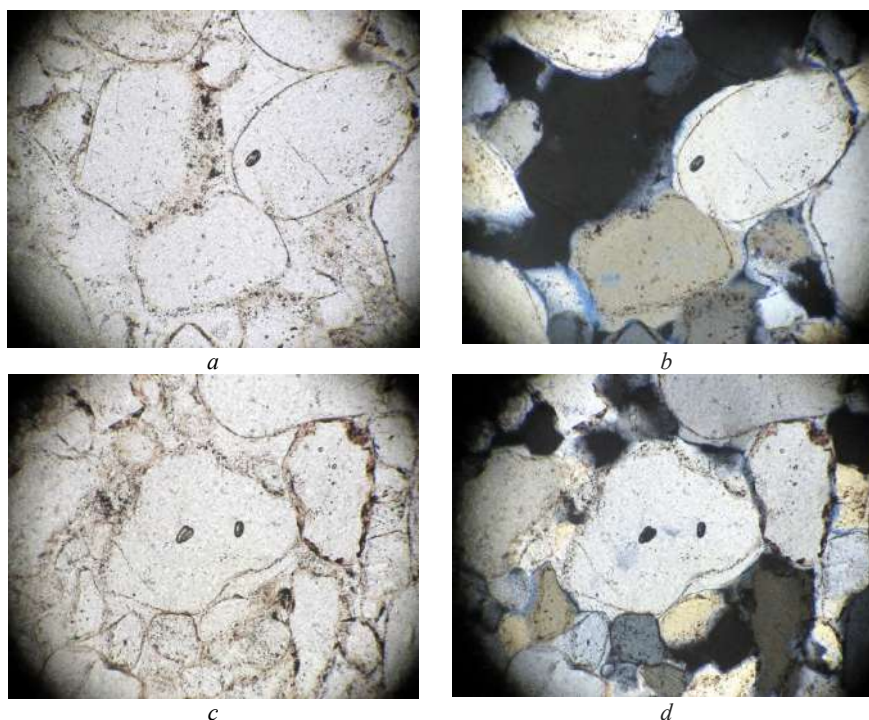


Fig. 4. Zircon inclusions in quartz in quartzite sandstone: *a, c* – PPL; *b, d* – XPL; $\times 100$

the peak of the activity of the aquatic environment, while smaller ones (0.2–0.4 mm) were deposited during the lull. The constant change in the speed of the water flow led to the sorting of the material by mass and size. In areas with large grains, the pores were larger, so they often recorded wider regeneration borders (up to 0.04 mm), while in fine-grained areas, cementation occurred faster through free space.

Thus, the results of microscopic analysis show that quartzite sandstones, selected in the Skėrsabalyai quarry of Vilnius district of Lithuania, are medium-grained quartz arenites (quartzite sandstones) with a regeneration structure. The structure of the rocks is heterogeneous with a predominance of the medium-grained fraction, the grain size ranges from 0.2 to 0.8 mm (average – 0.43 mm). The texture is massive, in places micro-layered: micro-layers of grains with sizes of 0.2–0.4 and 0.6–0.8 mm alternate. The clastic part of the rock is mainly quartz, and the quartz grains are from semi-rolled to well-rolled; There are single grains of pelitic plagioclase (size – 0.2 mm), rolled fragments of siliceous rocks (0.2–0.5 mm), rolled grains of accessory zircon (0.1 mm) and idiomorphic ore (iron-bearing) minerals with limonite borders (0.04–0.12 mm). Inclusions of relict zircon grains 0.02–0.04 mm in size occur in quartz. The rock cement is regenerative quartz (the thickness of the shells is 0.02–0.04 mm), ferruginous (brown pigment), with indentation cementation.

The discovery of erratic fragments of the Jotnian sandstone in the north-eastern part of Lithuania indicates the transfer of material from the north-west, approximately from the Baltic Sea or the adjacent territories of Finland and Sweden.

The main places of primary occurrence of the bedrock from which the erratic fragments of quartzite sandstones were brought could be the following [1; 3; 5; 6; 8; 12–14; 20]:

1) the Satakunta basin – a coastal province in south-western Finland –is the most famous terrestrial source of this type of rocks. The Satakunta sandstones form a thick layer in a graben that extends from the coast to the bottom of the Gulf of Bothnia. Glacial flows transported this material southeast through Estonia and Latvia to the northern part of Lithuania;

2) the Gulf of Bothnia – huge massifs of Jotnian sediments are hidden under water between Finland and Sweden, they constitute a significant part of the moraine that the glacier carried to the Baltic;

3) the Ladoga-Pash Graben – this source is located further east, but it also contains identical red sandstones (Priozerskaya and Salminskaya suites), which could have entered the region with other branches of the glacier;

4) separate underwater massifs in the Baltic Sea, for example, the Landsort Basin near the Stockholm archipelago, where deposits of red Jotnian sandstones have also been recorded (Fig. 5).



Fig. 5. Probable sources of erosion of the Jotnian quartzite sandstones [8]: 1 – Satakunta Basin; 2 – Gulf of Bothnia water area; 3 – Ladoga-Pasha Graben; 4 – Landsort Basin; 5 – sampling site (Skersabalyai quarry)

Regarding the formational affiliation of the studied rocks, the following main formations can be assumed to have been the primary source of the erratic quartzite sandstone boulders in Lithuania:

1) Satakunta Formation – the main source; its rocks occur in the region of the same name in southwestern Finland and continue under the floor of the Bothnian Sea. The formation is composed mainly of red and red-brown sandstones, often with oblique bedding, which indicates their fluvial or deltaic origin. These rocks are most often identified as «indicator boulders» in Lithuania and neighbouring countries [14];

2) Muhos Formation – located much further north, has sandstones in its composition, but also contains a significant proportion of siltstones and clays. Although it belongs to the Jotnian complex, its contribution to the Lithuanian moraines is much smaller compared to Satakunta due to the remoteness and direction of the glacier movement [20];

3) formations located in Sweden, which are lithologically identical: these are the Gävle/Hälsingland sandstones, which lie on the western shore of the Bothnian Sea; the Mälarsandstone formation – a separate outcrop in central Sweden near Lake Mälaren; the Dala/Dalarna sandstone formation – the largest area of outcrops in Sweden, but usually these boulders spread more to the territory of Poland and Germany [5; 6].

The following general mineralogical and petrological features of the mentioned Jotnian sandstones are given. In composition, these are quartz-rich sandstones (quartz arenites), but arkose sandstones (with a feldspar content of over 25 %), siltstones, shales and conglomerates are also found. They are characterized by a red or reddish-brown colour due to deposition in subaerial (terrestrial) conditions, which led to the oxidation of iron (hematite pigmentation). Cross-bedding, ripple marks and drying cracks are often found, which indicates a fluvial (river) or deltaic origin.

Conclusions and prospects for further research. Considering the location of the erratic fragments of the Jotnian sandstones in north-eastern Lithuania and the mineralogical and petrological features of the studied rocks, it can be concluded that the most likely primary source is the Satakunta Formation. Geographically, the main centres of the original occurrence of the Jotnian sandstones were the continental Satakunta basin (southwestern Finland) and its submarine extension in the Bothnian Sea (southern part of the Gulf of Bothnia) [3].

The Satakunta Basin (Finland) is the main «supplier» of red erratic boulders for the Baltics. These quartzite sandstones are often called «red grinding steel» because of their hardness, which is caused by the regeneration of quartz grains. The Bothnian Sea is home to vast underwater fields of Jotnian sandstone. The glacier, moving southeast, «excavated» this material and carried it across the territory of Estonia, Latvia, and Lithuania. From a geological perspective, this is the same Satakunta Graben, which is partially submerged by the sea. However, to describe the paths of glacial transport, it is advisable to separate them, since the glacier «collected» material from both the seabed and the land. The submarine part (in the Bothnian Sea) is territorially much larger than the mainland part. Most erratic boulders in the Baltic region originate from the seabed. Glacial streams moving towards Lithuania first crossed mainland Finland (Satakunta) and then «scooped» material from the Bothnian Sea floor, moving further to the southeast.

Mineralogical and petrological features of the erratic fragment of red quartzite sandstone from north-eastern Lithuania allow us to identify it as a derivative of the Mesoproterozoic Jotnian deposits of the Satakunta Formation (Finland) and the Bothnian Sea basin. Diagnostic features of this origin are the feldspar-quartz composition of the rocks, the saturation with iron oxides, which determine their characteristic colour, and the presence of rounded fragments of chloritized siliceous rocks. Accessory mineralization is represented by idiomorphic crystals of ore minerals and well-preserved zircon grains, which occur as individual grains and inclusions in quartz. The genetic relationship is confirmed by the specific microtextural organization of the quartz aggregate: pronounced turbidization of primary grain nuclei against the background of optically clear regeneration borders with conformal and compressed contact types. The high degree of textural maturity of the rock is emphasized by the good rolling of grains and their high level of sorting, which indicates the formation within the powerful paleofluvial systems of the Fennoscandian Shield. The fragment was delivered to its present location by a Pleistocene glacial flow moving from the Bothnian region in a south-east direction in transit through the Baltic Basin to the territory of Lithuania.

This thesis is confirmed by the fact that in the Skėrsabalyai quarry of Vilnius district, a complex of rocks of various composition and genesis was found in a parasteric association with the studied quartzite sandstone. These are igneous rocks, among which red granites and rhyolite porphyries prevail, on which Jotnian sandstones lie directly in the grabens of the Fennoscandian Shield.

The presence of such rocks fully confirms the Bothnian-Åland vector of material removal by the glacier. The presence of garnet in granites and their epidotization indicate zones of metamorphic changes around large granite intrusions of the Fennoscandian Shield. The metamorphic complex – gneisses, amphibolites, migmatites – is the foundation of Fennoscandia – the Svekofenn belt (Southern Finland and Eastern Sweden). The fact that they are found nearby indicates deep erosion of the shield by the glacier, which «scraped» both the young sedimentary cover (quartzite sandstones) and the ancient crystalline base. The finding of sedimentary rocks indicates that this material, which the glacier picked up closer to the place of unloading the material, comes from the Ordovician and Silurian sediments of the Baltic region (Estonia or the bottom of the Baltic Sea). The discovery of a whole coral indicates that the glacier did not carry it too far, or it was preserved in a large block of limestone – this is a clear indicator of the presence of Palaeozoic cover rocks.

The totality of the described finds is evidence that the Bothnian Ice Stream (its eastern branch) passed through Skersabalyai. The beginning – formation in the area of the Scandinavian Mountains, movement through the Gulf of Bothnia (capture of Jotnian rocks and porphyries); transit – movement to the southeast through the territory of modern Estonia (island part and mainland), where sedimentary formations got into the moraine; finish – deposition of material in the northeast of Lithuania during the last (Valdai/Vistula) glaciation.

BIBLIOGRAPHY

1. Amantov A., Laitakari I., Poroshin Y. Jotnian and Postjotnian: Sandstones and diabases in the surroundings of the Gulf of Finland. *Special Paper – Geological Survey of Finland*. 1996. Vol. 21. P. 99–113. URL: https://www.researchgate.net/publication/259459569_Jotnian_and_Postjotnian_Sandstones_and_diabases_in_the_surroundings_of_the_Gulf_of_Finland
2. Bitinas A. Quaternary stratigraphy of Lithuania: A review. *Baltica*. 2012. Vol. 25. N 1. P. 21–30. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bor.12645?af=R>
3. Donner J. The Quaternary History of Scandinavia. Cambridge University Press, 1995. 210 p. <https://doi.org/10.17741/bgsf/68.2.006>
4. Fredin O. Glacial inception and Quaternary mountain glaciations in Fennoscandia. *Quaternary International*. 2002. Vol. 95–96. P. 99–112. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00031-9)
5. Gorbatshev R. Petrology of Jotnian rocks in the Gävle area, east central Sweden. *Sveriges Geologiska Undersökning. Ser. C*. 1967. Vol. 621. P. 1–50. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/c/c621rapport/c621-rapport.pdf>
6. Gorbatshev R., Kint, O. The Jotnian Mälar sandstone of the Stockholm region, Sweden. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*. 1961. Vol. 40. P. 51–68. URL: <https://paleoarchive.com/literature/Gorbatshev&Kint1961-JotnianMalarSandstone-StockholmRegion.pdf>
7. Guobyte R., Satkunas J. Pleistocene glaciations in Lithuania. *Developments in Quaternary Sciences*. 2011. Vol. 15. P. 231–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00019-2>
8. Harff J., Björck S., Hoth P. (Eds.). The Baltic Sea Basin. Springer-Verlag, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5>
9. Larsen E., Fredin O., Lyså A., Amantov A., Fjeldskaar W., Ottesen D. The Middle and Late Pleistocene glacial history of northern Europe. *Norwegian Journal of Geology*. 2016. Vol. 96. N 2. P. 159–170. <http://dx.doi.org/10.17850/njg96-2-06>
10. Litt T., Behre K.-E., Meyer K.-D., Stephan H.-J., Wansa S. Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. *E&G Quaternary Science Journal*. 2007. Vol. 56, Iss. 1/2. P. 7–65. <https://doi.org/10.3285/eg.56.1-2.02>

11. Monkhouse F. J. Principles of physical geography. University of London Press, 1970.
12. Okko V. On the origin and glacial transport of erratics of Jotnian sandstone. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*. 1950, Vol. 150. P. 115–124. <https://doaj.org/article/3fb898e20da84dcd9f4be39b1a048bf4>
13. Paulamäki S., Paananen M., Elo S. Structure and geological evolution of the bedrock of southern Satakunta, SW Finland. *Report No. POSIVA 2002-04*. 2002. Posiva Oy. URL: <https://inis.iaea.org/records/s242v-wsw98/files/33026590.pdf>
14. Pokki J., Kohonen J., Lahtinen R., Ramo O. T., Andersen T. Petrology and provenance of the Mesoproterozoic Satakunta formation, SW Finland. *Geological Survey of Finland. Report of investigation*. 2013. No. 204. 61 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/286741746_Petrology_and_provenance_of_the_Mesoproterozoic_Satakunta_formation_SW_Finland
15. Poberezhska I., Bilyk N., Kozhushyna S., Kempa P., Biruk D. Moraine deposits of south-eastern Lithuania. *Геотуризм: практика і досвід : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів : Каменяр, 2026. С. 31–33. URL: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/04/heoturyzm_praktyka-i-dosvid_2026-st.pdf
16. Pukelytė V., Gedminienė L., Baltrūnas V., Karmaza, B. Stadial and interstadial deposits of Late Nemunas (Late Weichselian/MIS 2) glaciations in South Lithuania and their interpretation. *Quaternary International*. 2024. Vol. 696. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2024.05.003>
17. Ramberg I. B., Bryhni I., Nøttvedt A., Rangnes K. (Eds.). The making of a land: Geology of Norway. Norsk Geologisk Forening, 2008. URL: https://foreninger.uio.no/ngf/boka-engelsk/chapter_01_2korr.pdf
18. Sederholm J. J. On the geology of Fennoscandia with special reference to the pre-Cambrian: Explanatory notes to accompany a general geological map of Fennoscandia. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande*. 1932. No. 98.
19. Stephens M. B. The central Scandinavian Caledonides – Stockholm to Trondheim, *Sveriges geologiska undersökning (SGU)*. 1998. Rapport C 621. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/c/c621rapport/c621-rapport.pdf>
20. Vaasjoki M., Korsman K., Koistinen T. Paleoproterozoic evolution of the Fennoscandian Shield. *Precambrian geology of Finland: Key problems and modern perspectives / Eds. M. Lehtinen, S. A. I. Nurmi, O. T. Ramo*. Elsevier, 2005. P. 611–671. URL: https://link.springer.com/10.1007/1-4020-4495-X_29
21. Whittow J. Dictionary of physical geography. Penguin, 1984.
22. Дорошенко Ю. П., Побережська І. В., Федоришин Ю. І. Основи кристалооптики породотвірних мінералів гірських порід. Методичні вказівки до курсу «Петрографія кристалічних порід». Ч. 1. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 64 с. URL: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/0-7n_crystalooptyka.pdf
23. Маширова А. Ю., Митрохин О. В., Шумлянський Л. В., Калініченко Т. Г. Ератичні уламки вулканітів з балтійського узбережжя Польщі та джерела їх постачання на Феноскандинавському щиті. *Мінералогічний журнал*. 2025. Т. 47. № 2. С. 53–69. URL: <https://mineraljournal.org.ua/en/node/1521>
24. Побережська І. В., Костюк О. В. Літологічні методи досліджень : Частина 1 (Уламкові породи). Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 96 с. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/ulamkovi-porody.pdf>

REFERENCES

1. Amantov, A., Laitakari, I., & Poroshin, Y. (1996). Jotnian and Postjotnian: Sandstones and diabases in the surroundings of the Gulf of Finland. *Special Paper – Geological Survey of*

- Finland*, 21, 99–113. URL: https://www.researchgate.net/publication/259459569_Jotnian_and_Postjotnian_Sandstones_and_diabases_in_the_surroundings_of_the_Gulf_of_Finland
2. Bitinas, A. (2012). Quaternary stratigraphy of Lithuania: A review. *Baltica*, 25 (1), 21–30. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bor.12645?af=R>
 3. Donner, J. (1995). *The Quaternary history of Scandinavia*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.17741/bgsf/68.2.006>
 4. Fredin, O. (2002). Glacial inception and Quaternary mountain glaciations in Fennoscandia. *Quaternary International*, 95–96, 99–112. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00031-9)
 5. Gorbatshev, R. (1967). Petrology of Jotnian rocks in the Gävle area. *Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C*, 621, 1–50. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/c/c621rapport/c621-rapport.pdf>
 6. Gorbatshev, R., & Kint, O. (1961). The Jotnian Mälar Sandstone of the Stockholm region, Sweden. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*, 40, 51–68. URL: <https://paleoarchive.com/literature/Gorbatshev&Kint1961-JotnianMalarSandstone-StockholmRegion.pdf>
 7. Guobytė, R., & Satkūnas, J. (2011). Pleistocene glaciations in Lithuania. *Developments in Quaternary Sciences*, 15, 231–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00019-2>
 8. Harff, J., Björck, S., & Hoth, P. (Eds.). (2011). *The Baltic Sea Basin*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5>
 9. Larsen, E., Fredin, O., Lyså, A., Amantov, A., Fjeldskaar, W., & Ottesen, D. (2016). The Middle and Late Pleistocene glacial history of northern Europe. *Norwegian Journal of Geology*, 96 (2), 159–170. <http://dx.doi.org/10.17850/njg96-2-06>
 10. Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K.-D., Stephan, H.-J., & Wansa, S. (2007). Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. *E&G Quaternary Science Journal*, 56, 1/2, 7–65. <https://doi.org/10.3285/eg.56.1-2.02>
 11. Monkhouse, F. J. (1970). *Principles of physical geography*. University of London Press.
 12. Okko, V. (1950). On the origin and glacial transport of erratics of Jotnian sandstone. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, 150, 115–124. <https://doaj.org/article/3fb898e-20da84dcd9f4be39b1a048bf4>
 13. Paulamäki, S., Paananen, M., & Elo, S. (2002). Structure and geological evolution of the bedrock of southern Satakunta, SW Finland. *Report No. POSIVA 2002-04*. Posiva Oy. URL: <https://inis.iaea.org/records/s242v-wsw98/files/33026590.pdf>
 14. Pokki, J., Kohonen, J., Lahtinen, R., Andersen, T., & Huhma, H. (2013). Petrology and provenance of the Mesoproterozoic Satakunta formation, SW Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 400*. URL: https://www.researchgate.net/publication/286741746_Petrology_and_provenance_of_the_Mesoproterozoic_Satakunta_formation_SW_Finland
 15. Poberezhska, I., Bilyk, N., Kozhushyna, S., Kempa, P., Biruk, D. (2026). Moraine deposits of southeastern Lithuania. In *Геотуризм: практика і досвід. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції* (pp. 31–33). Львів: Каменярь. URL: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/04/heoturizm_praktyka-i-dosvid_2026-st.pdf
 16. Pukelytė, V., Gedminienė, L., Baltrūnas, V., & Karmaza, B. (2024). Stadial and interstadial deposits of Late Nemunas (Late Weichselian/MIS 2) glaciations in South Lithuania and their interpretation. *Quaternary International*, 696, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2024.05.003>
 17. Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A., & Rangnes, K. (Eds.). (2008). *The making of a land: Geology of Norway*. Norsk Geologisk Forening. URL: https://foreninger.uio.no/ngf/boka-engelsk/chapter_01_2kor.pdf
 18. Sederholm, J. J. (1932). *On the geology of Fennoscandia with special reference to the pre-Cambrian: Explanatory notes to accompany a general geological map of Fennoscandia*. Bulletin de la Commission géologique de Finlande No. 98. Akateeminen Kirjakauppa.

19. Stephens, M. B. (1998). The central Scandinavian Caledonides – Stockholm to Trondheim. Sveriges geologiska undersökning (SGU). Rapport C 621. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/c/c621rapport/c621-rapport.pdf>
20. Vaasjoki, M., Korsman, K., & Koistinen, T. (2005). Paleoproterozoic evolution of the Fennoscandian Shield. In M. Lehtinen, S. A. I. Nurmi, & O. T. Ramo (Eds.), *Precambrian Geology of Finland: Key Problems and Modern Perspectives* (pp. 611–671). Elsevier. URL: https://link.springer.com/10.1007/1-4020-4495-X_29
21. Whittow, J. (1984). *Dictionary of physical geography*. Penguin.
22. Doroshenko, Yu. P., Poberezhska, I. V., & Fedoryshyn, Yu. I. (2012). *Osnovy krystalohrafiyky porodotvirnykh mineraliv hirskykh porid. Metodychni vkazivky do kursu «Petrohraftyia krystalichnykh porid». Chastyna 1* [Basics of crystal optics of rock-forming minerals. Methodological guidelines for the course «Petrography of crystalline rocks». Part 1]. Ivan Franko National University of Lviv. URL : https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/0-7n_crystalooptyka.pdf
23. Mashyrova, A. Yu., Mytrokhyn, O. V., Shumlyansky, L. V., & Kalinichenko, T. H. (2025). Eratychni ulamky vulkanitiv z Baltiiskoho uzberezhzhia Polshchi ta dzhherela yikh postachannia na Fenno-skandynavskomu shchyti [Erratic fragments of volcanic rocks from the Baltic coast of Poland and their supply sources on the Fennoscandian Shield]. *Mineralohichnyi Zhurnal – Mineralogical Journal*, 47 (2), 53–65. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.02.053>
24. Poberezhska, I. V., & Kostiuk, O. V. (2017). *Litolohichni metody doslidzhen: Chastyna 1 (Ulamkovi porody)* [Lithological research methods: Part 1 (Clastic rocks)]. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/ulamkovi-porody.pdf>

ЙОТНІЙСЬКІ ПІСКОВИКИ В МОРЕННИХ ВІДКЛАДАХ ПІВДЕННО-СХІДНОЇ ЛИТВИ

Ірина Побережська, Дмитрій Бірук, Святослав Кожушина, Павло Кемпа
iryna.poberezhska@lnu.edu.ua

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

У статті представлено результати комплексного літологічного та палеогеографічного дослідження ератичних уламків, виявлених у кар'єрі Скерсабалай (Вільнюський район, Литва). Актуальність роботи зумовлена необхідністю деталізації реконструкцій руху льодовикових потоків під час останнього Віслінського (Нямунського) зледеніння, зокрема його максимальної стадії Груда. Основним об'єктом дослідження є червоноколірні йотнійські кварцитопісковики, які є індикаторними валунами.

Мінералого-петрографічний аналіз дав змогу ідентифікувати ці породи як середньозернисті кварцові ареніти, що є дериватами мезопротерозойських відкладів формації Сатакунта (Фінляндія) та басейну Ботнічного моря. Діагностичними ознаками є регенераційна структура, наявність хлоритизованих кременистих уламків і специфічна турбідизація ядер кварцу. Доведено, що висока текстурна зрілість цих порід пов'язана з їхнім формуванням у потужних палеорічкових системах Фенноскандинавського щита.

Важливим науковим підтвердженням Ботнічно-Аландського вектору знесення матеріалу є виявлена парагенетична асоціація гірських порід у кар'єрі Скерсабалай. Поруч з пісковиками наявний комплекс магматичних (червоні граніти, ріолітові порфіри) і метаморфічних порід (гнейси, амфіболіти, мігматити Свекофеннського поясу). Знахідки епідотизованих гранітів

з гранатом свідчать про глибоку ерозію льодовиком кристалічного фундаменту Фенноскандії. Водночас знахідки палеозойських осадових порід (ордовицьких і силурійських вапняків) та цілого корала є доказом захоплення матеріалу з чохла Балтійського регіону під час транзиту льодовика через територію Естонії.

Сукупність описаних знахідок засвідчує, що через територію Східної Литви проходила східна гілка Ботнічного льодовикового потоку. Реконструйовано повну траєкторію транспортування від формування в районі Скандинавських гір і захоплення йотнійських порід у Ботнічній затоці до акумуляції матеріалу на південному сході Литви після транзиту через Балтійську улоговину. Отримані результати мають суттєве значення для уточнення стратиграфії четвертинних відкладів і динаміки плейстоценових зледенів Прибалтики.

Ключові слова: ератичні уламки, йотнійський кварцитопісковик, південно-східна Литва, Віслянське зледеніння, Фенноскандинавський щит, кварц, циркон, регенераційний цемент.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 549.212:[553.91(100)]:069.51(477.83-25)

КОЛЕКЦІЯ ГРАФІТУ МІНЕРАЛОГІЧНОГО МУЗЕЮ ІМЕНІ ЄВГЕНА ЛАЗАРЕНКА У РЕТРОСПЕКТИВІ ОСВОЄННЯ СВІТОВИХ РЕСУРСІВ ГРАФІТУ

Оксана Цільмак, канд. геол. наук,
доцентка кафедри мінералогії, петрографії і геохімії
імені професора Ореста Матковського
oksana.tsilmak@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0009-5701-2866>

Катерина Бурбан, зав. лабораторії мінералого-петрологічних досліджень
kateryna.burban@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0002-9961-5680>

Альбертина Бучинська, зав. Мінералогічного музею імені Євгена Лазаренка
mineralogy.museum@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0009-6133-6118>

Уляна Борняк, канд. геол. наук, доцентка кафедри мінералогії,
петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського
ulyana.bornyak@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-4812-0648>

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

Завдяки унікальному поєднанню фізико-хімічних властивостей графіт є критично важливим ресурсом, що визначає розвиток сучасних енергозберігаючих технологій і стратегічну стабільність світового промислового комплексу.

У Мінералогічному музеї імені Євгена Лазаренка Львівського національного університету імені Івана Франка зберігається досить представницька колекція зразків графіту, графітовмісних парагенезисів та проб графітового концентрату (35 експонатів). Її сформовано за результатами інвентаризації систематичних та експозиційних фондів Музею за 170 років. Експонати представляють головні графітоносні провінції світу і ключові геолого-промислові типи графітових родовищ. Збірка охоплює генетичне розмаїття графіту з об'єктів, що функціонують нині, а також з уже вичерпаних чи перспективних для майбутнього освоєння родовищ. Це робить її унікальним об'єктом для порівняльно-генетичних досліджень та популяризації знань про критичну мінеральну сировину.

У статті наведено ретроспективний аналіз історії формування графітової колекції. Виділено і схарактеризовано три закономірні етапи її становлення: етап I – друга половина XIX ст.–початок XX ст. (шість зразків); етап II – 1950–1980-ті рр. (27 зразків); етап III – від початку XXI ст. (два надходження).

Проаналізовано історію видобування й використання графіту, яка починається ще з давніх часів. Наведено детальний опис найбільш представницьких, найцікавіших і рідкісних взірців, які виставлені в демонстративних вітринах або зберігаються у фондах Музею. Детально описано основні морфолого-генетичні типи графіту – мікрокристалічний, лускуватий і жильний.

Колекція має вагомому наукову й історичну цінність, оскільки містить унікальні зразки з уже вичерпаних, важкодоступних чи нині недоступних родовищ.

Ключові слова: графіт, морфолого-генетичний тип, колекція, Мінералогічний музей імені Євгена Лазаренка, родовище, промислове використання, мінерально-сировинна база, сферичний графіт.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.07>

Постановка проблеми. Графіт належить до специфічних видів мінеральної сировини, стратегічне значення якої безперервно еволюціонувало паралельно з науково-технічним прогресом людства. Якщо у XVIII–XIX ст. його роль обмежувалася переважно металургійними потребами (для футерування печей, виготовлення вогнетривких тиглів тощо) і сферою комунікацій (канцелярське приладдя), то XX ст. перетворило цей мінерал на критичний ресурс для ядерної енергетики й ракетно-космічної галузі. На сучасному етапі, за умов глобального «зеленого переходу», графіт набув статусу незамінного компонента енергозберігаючих технологій, зокрема, як основний матеріал для анодів літій-іонних акумуляторів. Така динаміка попиту зумовлює необхідність переосмислення наявної мінерально-сировинної бази та вивчення генетичних особливостей родовищ, що їх розробляли в різні історичні епохи.

На тлі інтенсивної експлуатації земних надр і вичерпання багатьох класичних об'єктів видобутку особливої актуальності набувають природничі музеї як депозитарії своєрідної геологічної пам'яті. Багато родовищ, які колись становили основу світового балансу графіту, нині цілком відпрацьовані, рекультивовані або ж недоступні для безпосереднього вивчення. У такому контексті кам'яні колекції геологічних музеїв стають єдиним джерелом речовинної інформації, яка дає змогу проводити порівняльно-генетичні дослідження й верифікувати дані минулих геологічних епох.

Аналіз досліджень. Графіт – це природна кристалічна модифікація вуглецю з шаруватою структурою. Графіт вирізняється низьким коефіцієнтом тертя, високою електро- й теплопровідністю, хімічною стійкістю і здатністю витримувати дуже високу температуру.

Згідно з класифікацією, наведеною у праці [15], розрізняють три основних морфолого-генетичних типи графіту: 1) мікрокристалічний (прихованокристалічний) графіт як результат перетворення вуглецю вугілля за умов контактового метаморфізму; 2) кристалічний лускуватий графіт, що формується внаслідок рекристалізації вуглецю органіки, розсіяної в первинних породах, за умов регіонального метаморфізму; 3) жильний графіт, який утворюється в процесі кристалізації з гідротермальних розчинів. На одному й тому ж родовищі може бути і лускуватий, і жильний графіт (як відображення накладених пізніх гідротермальних процесів). Іноді трапляються землісті агрегати графіту в корі звітрявання.

Історія видобутку й використання графіту сягає давніх часів. В епоху неоліту графіт слугував пігментом для декору кераміки. Зокрема, практика нанесення графітового розпису на кераміку в Південно-Східній Європі виникла близько 5 000 років до н. е. (культура Кукутень–Трипілля на території сучасних Молдови, Румунії та України) [11]. Кельти додавали графіт у глину для створення вогнетривкої кераміки (Латенська культура – 3 ст. до н. е.) [10]. Точкою відліку в історії промислового видобутку графіту вважають відкриття 1564 р. родовища Борроудейл у графстві Камбрія (Великобританія) [7]. У XVI ст. графіт почали використовувати в металургії, наприклад, для футерування форм для гарматних ядер, що перетворило Великобританію на світового монополіста з видобутку графіту з середини XVI до кінця XVIII ст. [7]. У XIX ст. естафету перейняли Цейлон (з 1972 р. Шрі-Ланка)

і Російська імперія, де виявили родовища високоякісного вартісного графіту (наприклад, Аліберівське родовище у Східних Саянах), а також Австрійська імперія з родовищами дешевого прихованокристалічного графіту (родовища сучасної Чехії та землі Штирія в Австрії) [6, 17]. До початку ХХ ст. Цейлон забезпечував близько 80 % світового імпорту графіту для промислових тиглів, у яких плавили сталь для залізниць і зброї [6]. На початку ХХ ст. відкрили великі родовища лускуватого графіту на Мадагаскарі [14]. У Європі важливе значення в цей період мали родовища Німеччини й Норвегії. А родовища Канади і дешевий мікрокристалічний графіт з родовищ у шт. Сонора в Мексиці стали основою для промисловості США. У 1930-х рр. на Українському щиті почалося освоєння Заваллівського родовища, яке згодом визнали найбільшим у Європі [1]. У середині ХХ ст. графіт почали використовувати в ядерній енергетиці – у перших ядерних реакторах для сповільнення нейтронів під час ланцюгової реакції на природному урані. З 1980-х рр. на світовому ринку видобутку графіту почав домінувати Китай, який досить агресивно вийшов на ринок, демпінгуючи ціни й нарощуючи видобуток у провінціях Хейлуцзян і Шаньдун [13]. У ХХІ ст. графіт набув особливого значення як стратегічна мінеральна сировина для виробництва літій-іонних акумуляторів. У них використовують продукт переробки графіту – сфероїдизований (сферичний) графіт (SPG – Spherical Purified Graphite), який слугує анодним матеріалом завдяки високій електропровідності, хімічній стабільності та здатності до інтеркаляції літію. Зростання виробництва електромобілів і систем накопичення енергії зумовлює стрімке збільшення попиту на графіт.

За даними Геологічної служби США (USGS – U.S. Geological Survey) за 2025 р., лідером з видобутку графіту (як і протягом останніх 30 років) є Китай з показником 1,4 млн метричних тонн (82 % від світового видобутку графіту). Також Китай відіграє провідну роль у виробництві SPG (фактично 100 %) і в переробці графіту загалом [21]. У десятці країн-лідерів з видобутку є Мадагаскар, Танзанія і Бразилія (по 4 % від світового видобутку), Мозамбік (~3 %), РФ, Індія (по 1 %), Канада, Північна Корея і Норвегія (< 1 %).

Україна, за оцінками USGS, видобула за 2025 р. 1200–2000 тонн графітового концентрату, завдяки чому вона посідає 14–15-те місце у світовому видобутку графіту. Але ж до початку 2022 р. це було шосте місце [20]! Причина зниження видобутку полягає в тому, що графітовий комбінат на Заваллівському родовищі (Кіровоградська обл.) не працює на повну потужність через логістичні труднощі та близькість до зони бойових дій. Однак, беручи до уваги великі запаси графіту в надрах України, потужності Заваллівського графітового комбінату, потенційний видобуток графіту на Балахівському родовищі (Кіровоградська обл.) і будівництво в майбутньому заводів з виробництва SPG, аналітики розглядають Україну як потенційний ключовий європейський хаб з виробництва SPG, що забезпечуватиме «автономію» європейського автопрому від азійських поставок [12].

Мета роботи – дослідити історію формування фондової збірки графіту Мінералогічного музею в контексті комплексного історико-генетичного аналізу освоєння світових ресурсів графіту.

Об'єктом дослідження стала репрезентативна вибірка зразків графіту з фондового зібрання Мінералогічного музею імені Євгена Лазаренка, сформована за результатами інвентаризації систематичних і експозиційних фондів за 170 років.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження сформовано вибірку з фондової колекції Мінералогічного музею імені академіка Євгена Лазаренка, яка налічує 35 одиниць зберігання. Серед них зразки власне графіту, графітовмісних парагенезисів і п'ять проб графітового концентрату. Проаналізовано музейні каталоги за 1872 р., 1881–1913 роки та період 1945–початок ХХІ ст. Ці документи є фундаментальним джерелом історичних і супровідних даних музейної колекції.

На підставі аналізу супровідної інформації виділено три основні *етапи формування фондової збірки графіту Мінералогічного музею*: етап I – друга половина XIX ст.–початок XX ст. (шість зразків); етап II – 1950–1980-ті роки (27 зразків); етап III – початок XXI ст. (два зразки).

Найдавнішими є зразки з родовища Кайзерсберг (Австрія) та Сибіру (на етикетці німецькою мовою зазначено «Irkutsk, Siberien»). Даних про ці зразки в каталогах за період 1870–1913 рр. нема, проте вони наявні в каталозі за 1872 р., хоча й без зазначення часу і джерела надходження до колекції. Родовище Кайзерсберг (муніципалітет Санкт-Штефан-об-Леобен, округ Леобен, земля Штирія в Австрії) – одне з класичних родовищ мікрокристалічного (аморфного) графіту, його розробляють з 1755 р. підземним способом [4]. Нині це єдине діюче родовище в Австрії, у регіоні Альп. Другий зразок графіту походить, імовірно, з Аліберівського (сьогодні Ботогольського) родовища в Східному Саяні, відкритого 1840 р. Високоякісний графіт саме цього родовища був свого часу сировиною для олівців фірми Faber Castell [19]. Ботогольське родовище за генезисом трактують як контактово-метасоматичне [4; 15].

Найдавнішим зразком з визначеними даними про рік і джерело надходження є взірець з Норвегії, куплений 1885 р. у дилерському центрі «Chemische Fabrik & Mineralhandlung» Теодора Шухардта (Theodor Schuchardt), про що зазначено на аутентичній етикетці поставачальника. У каталозі за період 1881–1913 рр. у графі «Місце відбору зразка» зазначена тільки країна походження – Норвегія. Відомо [8], що мінералізацію графіту виявили в Норвегії в першій половині XIX ст. і до початку XX ст. графіт видобували епізодично.

Наприкінці XIX ст. і в 1930-х рр. колекцію поповнили майбутні музейні експонати з Цейлону: ємність з графітовим концентратом (точну дату в каталозі не зазначено, проте є аутентична етикетка німецькою мовою на ємності) і зразки жильного графіту. Ці зразки свого часу були куплені в дилерському центрі Фрідріха Кранца («Dr. F. Krantz. Rheinisches Mineralien-Contor»). Цейлонські експонати було придбано у складі великої колекції в процесі організації у Львівському університеті кафедри кристалографії (1922); коли ж кафедрі у 1965 р. закрили, то колекцію передала Мінералогічному музею. Зазначимо, що перша згадка про графіт на Цейлоні датована 1675 р., видобуток почали тільки у 1820–1830-х рр. [6]. Нині графіт Шрі-Ланки вважається світовим еталоном якості графіту, оскільки йому притаманні найвищі значення ступеня кристалічності та вмісту вуглецю [15].

У 1930 р. польська фабрика «Grafos» (повна назва – «Grafos» Fabryka Wyrobów Grafitowych) передала Мінералогічному музеєві дві проби графітового концентрату – з Цейлону та Мадагаскару. На цій фабриці, яка працювала протягом 1924–1949 рр. у м. Бельсько-Бяла, виготовляли графітові тиглі й вогнетривкі продукти для ливарної промисловості.

На другому етапі формування графітової колекції збірка поповнилась зразками графітових агрегатів і графітовмісних порід з родовищ тодішнього СРСР, які почали розробляти в 1930–1940 рр. Зокрема, 1952 р. збірка поповнилась зразком з Тайгинського родовища лускуватого графіту (Урал), 1968 р. – з Курейського родовища мікрокристалічного графіту в Центральному Сибіру (подарував співробітник геологічного факультету Р. Затхей); також з'явився взірець з Багаряцького (Боївського) родовища мікрокристалічного графіту (Південний Урал), яке сьогодні вичерпане.

У 1955 р. Музей отримав два зразки графіту від Північно-Східного геологічного інституту КНР з родовищ Наншу (провінція Шаньдун) і району Цзісі (провінція Хейлуцзян). Родовище Наншу – одне з ключових родовищ кристалічного лускуватого графіту в Китаї, яке почали розробляти 1943 р. [16]. Воно стало базою для створення науково-дослідних

центрів графітової промисловості країни: саме тут розробляли основні стандарти очищення і флотації графіту, які нині використовують у всьому світі. Зразок графітовмісного кристалічного сланця з району Цзісі походить з родовища Люмао (Liumaο), розробку якого розпочали 1936 р. Це родовище вважають найбільшим родовищем графіту в Азії й одним із найбільших у світі [16].

У 1958 р. Празький національний музей подарував Мінералогічному музеєві зразок графіту з родовища Бліжна (Blížná) (нині округ Чеський Крумлов Південночеського краю Чеської Республіки). Бліжна – родовище мікрокристалічного графіту, яке тривалий час було рекордсменом за тривалістю безперервної експлуатації – протягом 1959–2002 рр. (43 роки) [17]. Завдяки значній потужності покладів (понад 50 м) видобуток провадили комбінованим способом – шахтним і кар’єрним, попри складні гідрогеологічні умови, спричинені карстовими порожнинами й проривами підземних вод. Родовище також відоме завдяки унікальній супутній мінералізації рідкісноземельних елементів (Mo, Th, Nb) і комерційному використанню високоякісних підземних вод, каптованих безпосередньо в гірничих виробках [17].

У 1960 р. за сприяння тогочасного ректора Львівського університету і завідувача кафедри мінералогії Євгена Лазаренка, ім’я якого нині має Мінералогічний музей, відбувся обмін мінералогічними колекціями з Королівським музеєм Онтаріо (Торонто, Канада). Серед 170 зразків із Канади є графіт з площі Калабогі (муніципалітет Грейтер-Мадава-ска, графство Ренфрью, провінція Онтаріо). Саме на цій території розташоване родовище Блек Дональд, яке відкрили 1889 р. і вважали найбільшим родовищем графіту Північної Америки. Протягом 1896–1954 рр. тут видобували жильний тип графіту надзвичайної чистоти [9]. Родовище активно розробляли протягом обох світових воєн, а під час Другої світової війни видобуток здійснювали під дном тогочасного озера Вайтфіш. Наразі шахти Блек Дональд недоступні, оскільки 1967 р. тут побудували гідроелектростанцію Mountain Chute і шахти були затоплені новоствореним озером Centennial Lake [22].

З другим етапом становлення описуваної музейної колекції пов’язано надходження зразків з історичних районів видобутку графіту, серед яких район Піткьярнта в Карелії. Загалом його вважають історичним районом видобутку поліметалевої мінералізації (залізні, мідні, олов’яні руди), а видобуток графіту розпочали у XIX ст., коли ця територія належала Фінляндії. Після Другої світової війни родовища Піткьярнти не витримали конкуренції з іншими великими графітовими родовищами СРСР, видобуток було припинено, наразі є залишки старих шахт.

З цим періодом пов’язаний і дар Музею від співробітниці кафедри мінералогії Л. Глазової – ємність з концентратом дрібнолускуватого графіту з Мадагаскару.

Від 1950-х років і до нині працівники геологічного факультету, студенти й аспіранти привозять у Музей зразки з рудопроявів графітової мінералізації на теренах України. Серед них передують взірці з Заваллівського родовища – єдиного родовища графіту в Україні, яке нині розробляють [1, 2, 5]. Також у Музеї є зразки з Буртинського родовища (Хмельницька обл.), де графітові руди за основними характеристиками подібні до заваллівських. Родовище відкрили у 1953–1954 рр., середній вміст графіту в руді оцінюють від 5,90 до 6,37 % [2].

Важливе наукове значення має зразок графіту з району Чивчинських гір, який 1963 р. Музею передали працівники геологічного факультету – учасники польової експедиції в Чивчині О. Матковський, В. Павлишин, У. Феношин і Л. Григорчук. Зазначимо, що прояви графітової мінералізації у верхньопалеозойських метаморфічних породах Чивчинського й Рахівського відгалужень Мармароського масиву відшукали в 1930-х рр. польські геологи Львівського університету. Цей графіт трактували як субграфіт або метаантрацит,

а його утворення пов'язували з перетворенням вуглецю вугільних пластів [3]. Рудопрояви недостатньо вивчені через їхнє розташування у важкодоступному районі.

Фондова збірка графіту Мінералогічного музею містить зразки, які репрезентують всі основні *морфолого-генетичні типи* мінералу.

Мікрокристалічний (або аморфний) різновид представлений зразками трьох родовищ. Зокрема, зразок з Курейського родовища (Центральний Сибір) – це фрагмент керна: масивний агрегат мікрокристалічного графіту з матовим полиском. До нього макроскопічно подібний зразок з Багаряцького родовища (Південний Урал). У взірці з родовища Кайзерсберг (Австрія) графіт наявний у вигляді масивного мікрокристалічного агрегату чорного кольору у кварц-польовошпатовій породі; характерного напівметалічного блиску нема. До мікрокристалічного (аморфного) типу можна зачислити зразок з Чивчинських гір у вигляді масивного землястого агрегату з матовим полиском.

Лускуватий тип графіту у збірці Музею представлений зразками з Заваллівського й Буртинського родовищ (Україна), родовищ Люмао і Наншу (Китай), Тайгинського родовища (Урал), о-ва Мадагаскар. Загалом це макроскопічно подібні графітовмісні кристалічні сланці. Породам притаманна добре виражена сланцювата текстура і лепідо- або гранолепідобластова структура. У мінеральному складі є кварц, польові шпати, слюди, амфіболи, а також лускуватий графіт, орієнтація лусок якого субпаралельна до головного напрямку сланцюватості. Вміст графіту становить від 5 до 60–70 % породи. Наявні також взірці з Завалля, складені масивним агрегатом великолускуватого (розмір лусок – 5 см) графіту (рис. 1), і проби графітового концентрату.

Що стосується графіту жильного типу, то відповідні зразки представлені масивними агрегатами мікрокристалічного графіту з окремими зернами кварцу і характерним напівметалічним блиском. Серед них взірці з родовища Блек Дональд (Канада) (рис. 2), Ботогольського родовища (Східні Саяни) і району Піткьяранта (Карелія). Зразок з Норвегії – це лускуватий графіт у крупнокристалічному діопсидовому скарні; орієнтування лусок хаотичне (рис. 3).



Рис. 1. Масивний агрегат великолускуватого графіту з Заваллівського родовища. Зразок бн. Розмір 15×15×9 см, маса 1,3 кг. Дар О. Іванціва, 1988



Рис. 2. Масивний агрегат дрібнокристалічного графіту з родовища Блек Дональд, Канада. Зразок № 11703. Розмір 14,0×6,0×4,5 см, маса 319 г. Надійшов 1960 р. від Королівського музею Онтаріо

На родовищах Шрі-Ланки описано шість морфологічних різновидів графіту [18]. З них у колекції Мінералогічного музею є зрізки груболускуватого (розмір лусок – до 3–4 см) і волокнистого графіту (рис. 4).

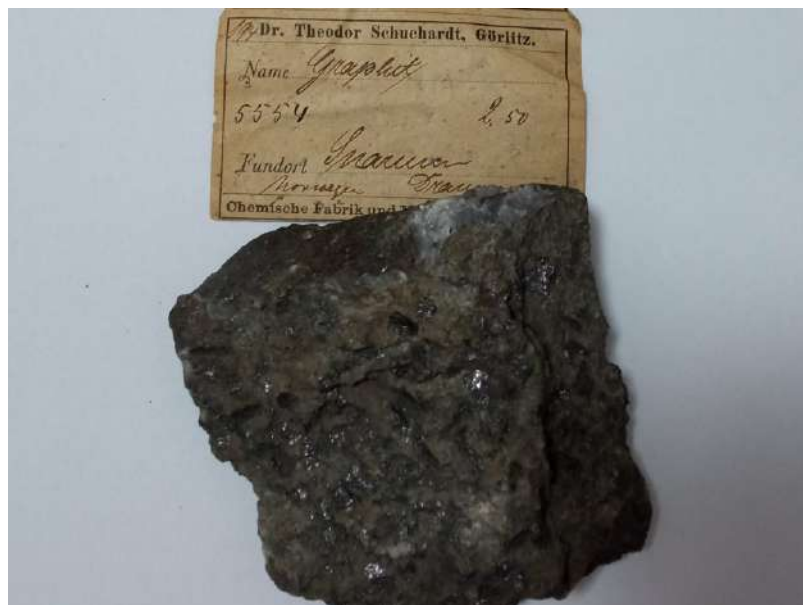


Рис. 3. Лускуватий графіт у діопсидовому скарні з Норвегії. Зразок № 5554. Розмір 8×8×2 см, маса 256 г. Придбаний 1885 р. у дилерському центрі «Chemische Fabrik & Mineralhandlung» Теодора Шугардта



Рис. 4. Графіт волокнистого різновиду з Цейлону. Зразок № 13050. Розмір 7,0×3,5×1,0 см, маса 20 г. Придбаний у дилерському центрі «Dr. F. Krantz. Rheinisches Mineralien-Kontor»

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз фондової збірки графіту Мінералогічного музею імені Євгена Лазаренка дав змогу з'ясувати її поетапне формування від другої половини XIX ст. до початку XXI ст. Найінтенсивніше поповнення припадає на другу половину XX ст. завдяки надходженням зразків з різних родовищ Європи, Азії та Північної Америки, а також міжнародному обміну з музеями та науковими організаціями. Колекція охоплює взірці графіту різних морфолого-генетичних типів (мікрокристалічний, лускуватий, жильний), графітовмісні породи і проби графітового концентрату.

Збірка має вагомий науковий і історичний цінність, оскільки містить зразки з класичних світових і регіональних родовищ. Серед них є рідкісні ранні надходження з неповною документацією та унікальні взірці з родовищ, які вже або вичерпані (Багаряцьке (Боївське) на Південному Уралі), або з різних причин недоступні (шахта Бліжна в Чехії, родовище Блек Дональд у Канаді).

Надходження зразків графітових руд до фондів Мінералогічного музею закономірно пов'язане з освоєнням світових ресурсів графіту відповідно до еволюції застосування і потреб графіту в промисловості. Сподіваємось на поповнення колекції в майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Іванців О. Є. Геологія та генезис графітових родовищ України. Київ : Наукова думка, 1972. 134 с.
2. Кропівний В. М., Молокост Л. А., Кузик О. В., Кропівна А. В. Порівняльна промислова оцінка графітових родовищ та руд України, характеристика збагачення руд. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1 (32). С. 93–102. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).93-102](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).93-102)
3. Матковський О., Павлишин В., Сливко Є. Основи мінералогії України. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. 856 с.

4. Михайлов В. А., Виноградов Г. Ф., Курило М. В., Михайлова Л. С., Шунько В. В., Шевченко В. І., Грінченко О. В., Гелета О. Л., Щербак Д. М. Неметалічні корисні копалини України. Київ : ВЦ «Київський університет», 2007. 507 с. Режим доступу: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/RKK_nemetalichni_kk.pdf
5. Шакіна К. А., Скакун Л. З. Графітове зруденіння на Заваллівському родовищі як результат гідротермальної діяльності. *Геохімія та рудоутворення*. 2009. № 27. С. 50–53.
6. Bastin E. S. The graphite deposits of Ceylon. *Economic Geology*. 1912. Vol. 7. N 5. P. 419–443.
7. Donaldson C. The black lead of Borrowdale, 1500–1750: An object history of a mutable material. *Mobility of objects across boundaries 1000–1700* / Ed. by K. A. Wilson, S. F. S. Phillips. Liverpool : Liverpool University Press, 2024.
8. Gautneb H., Rønning J. S., Slagstad T., Henderson I. The graphite occurrences of Northern Norway, a review of geology, geophysics, and resources. *Minerals*. 2020. Vol. 10. Is. 7. 626. <https://doi.org/10.3390/min10070626>
9. Hewitt D. F. Graphite in Ontario. Toronto, ON : Ontario Dep. of Mines, 1965. 34 p.
10. Kreiter A., Bartus-Szöllösi Sz., Bajnóczi B., Azbei Havancsák I., Tóth M., Szakmány G. Ceramic technology and the materiality of Celtic graphitic pottery. *Exchange networks and local transformations. Interaction and local change in Europe and the Mediterranean from the Bronze Age to the Iron Age* / Eds. M. E. Alberti, S. Sabatini. Oxford : Oxbow Books, 2017. P. 169–179. URL: https://www.academia.edu/50028000/Ceramic_technology_and_the_materiality_of_Celtic_graphitic_pottery
11. Martino S. Graphite-treated pottery in the Northeastern Mediterranean from the Chalcolithic to the Bronze Age. *Near Eastern Archaeology*. 2017. Vol. 80. N 1. P. 3–11. <https://doi.org/10.5615/neareastarch.80.1.0003>
12. Mykhailov V., Maljuk B., Bovsunivskiy P., Kovalenko N., Bertrand G., de Oliveira D., Wittenberg A., Wellmer F.-W., Horwath Z., Hollis J. Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness. France, Orleans : BRGM, 2023. 293 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/392904136_Strategic_minerals_of_Ukraine_and_their_investment_attractiveness
13. Park J., Cho S.-J., Shin S., Kim R., Shin D., Shin Y. Overview of graphite supply chain and its challenges. *Geosciences Journal*. 2025. Vol. 29. P. 329–341. <https://doi.org/10.1007/s12303-025-00027-2>
14. Shelley J. W. Graphite in Madagascar. *The Mining Magazine*. 1916. Vol. 14. N 6. P. 324–330.
15. Simandl G. J., Paradis S., Akam C. Graphite deposit types, their origin, and economic significance. *Geological Fieldwork 2014, British Columbia Geological Survey Paper*. 2015. N 2015-1. P. 163–171.
16. Sun Li, Xu Cui-ping, Xiao Ke-yan, Zhu Yu-sheng, Yan Ling-ya. Geological characteristics, metallogenic regularities and the exploration of graphite deposits in China. *China Geology*. 2018. Vol. 1. Is. 3. P. 425–434. <https://doi.org/10.31035/cg2018044>
17. Tichý L. Z historie exploatace grafitu v jižních Čechách: Pravěk a starověk. *Obnovená tradice*. 1998. N 17. S. 3–7. URL: <https://slon.diamo.cz/hpvt/2006/tradice/T09.htm>
18. Touzain P., Balasooriya N., Bandaranayake K., Descolas-Gros C. Vein graphite from the Bogala and Kahatagaha–Kolongaha mines, Sri Lanka: A possible origin. *Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48. Is. 6. P. 1373–1384. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1373>
19. Faber-Castell. A brief history of the pencil. URL: <https://www.faber-castell.com/corporate/history/a-brief-history-of-the-pencil> (дата звернення: 15.03.2026).
20. Mineral Commodity Summaries 2022 / U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior, 2022. 202 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf> (дата звернення: 20.03.2026).

21. Mineral Commodity Summaries 2026 / U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior, 2026. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf> (дата звернення: 21.03.2026).
22. Township of Greater Madawaska. The History of Black Donald Mine. 2022. URL: <https://www.greatermadawaska.com/en/play-and-explore/black-donald-graphite-mine.aspx> (дата звернення: 18.03.2026).

REFERENCES

1. Ivantsev, O. Ye. (1972). *Heolohiia ta henezys hrafytoyvykh rodovyshch Ukrainy* [Geology and genesis of graphite deposits of Ukraine]. Kyiv: Naukova Dumka.
2. Kropivnyi, V. M., Molokost, L. A., Kuzyk, O. V., & Kropivna, A. V. (2019). Porivniialna promyslova otsinka hrafytoyvykh rodovyshch ta rud Ukrainy, kharakterystyka zbahachennia rud [Comparative industrial assessment of graphite deposits and ores of Ukraine, characteristics of ore enrichment]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1 (32), 93–102. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).93-102](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).93-102)
3. Matkovskiy, O., Pavlyshyn, V., & Slyvko, Ye. (2009). *Osnovy mineralohii Ukrainy* [Fundamentals of mineralogy of Ukraine]. Lviv: Publishing Centre of Ivan Franko National University of Lviv.
4. Mykhailov, V. A., Vynohradov, H. F., Kurylo, M. V., Mykhailova, L. S., Shunko, V. V., Shevchenko, V. I., Hrinchenko, O. V., Heleta, O. L., & Shcherbak, D. M. (2007). *Nemetalichni korysni kopalyny Ukrainy* [Non-metallic minerals of Ukraine]. Kyiv: Publishing Centre «Kyivskiy universytet». URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/RKK_nemetalichni_kk.pdf
5. Shakina, K. A., & Skakun, L. Z. (2009). Hrafytove zrudennia na Zavallivskomu rodovyshchi yak rezultat hidrotermalnoi diialnosti [Graphite mineralization at the Zavallivske deposit as a result of hydrothermal activity]. *Geochemistry and Ore Formation*, 27, 50–53.
6. Bastin, E. S. (1912). The graphite deposits of Ceylon. *Econ. Geol.*, 7 (5), 419–443.
7. Donaldson, C. (2024). The black lead of Borrowdale, 1500–1750: An object history of a mutable material. In K. A. Wilson & S. F. S. Phillips (Eds.), *Mobility of objects across boundaries 1000–1700*. Liverpool: Liverpool University Press.
8. Gautneb, H., Rønning, J. S., Slagstad, T., & Henderson, I. (2020). The graphite occurrences of Northern Norway, a review of geology, geophysics, and resources. *Minerals*, 10 (7), 626. <https://doi.org/10.3390/min10070626>
9. Hewitt, D. F. (1965). *Graphite in Ontario*. Toronto, ON: Ontario Dep. of Mines.
10. Kreiter, A., Bartus-Szöllösi, Sz., Bajnóczi, B., Azbei Havancsák, I., Tóth, M., & Szakmány, G. (2017). Ceramic technology and the materiality of Celtic graphitic pottery. In M. E. Alberti, S. Sabatini (Eds.), *Exchange networks and local transformations. Interaction and local change in Europe and the Mediterranean from the Bronze Age to the Iron Age* (pp. 169–179). Oxford: Oxbow Books. URL: https://www.academia.edu/50028000/Ceramic_technology_and_the_materiality_of_Celtic_graphitic_pottery
11. Martino, S. (2017). Graphite-treated pottery in the Northeastern Mediterranean from the Chalcolithic to the Bronze Age. *Near Eastern Archaeology*, 80 (1), 3–11. <https://doi.org/10.5615/neareastarch.80.1.0003>
12. Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskiy, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., de Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. France, Orleans: BRGM URL: https://www.researchgate.net/publication/392904136_Strategic_minerals_of_Ukraine_and_their_investment_attractiveness
13. Park, J., Cho, S. J., Shin, S., Kim, R., Shin, D., & Shin, Y. (2025). Overview of graphite supply chain and its challenges. *Geosciences Journal*, 29, 329–341. <https://doi.org/10.1007/s12303-025-00027-2>

14. Shelley, J. W. (1916). Graphite in Madagascar. *The Mining Magazine*, 14 (6), 324–330.
15. Simandl, G. J., Paradis, S., & Akam, C. (2015). Graphite deposit types, their origin, and economic significance. *Geological Fieldwork 2014, British Columbia Geological Survey Paper, 2015-1*, 163–171.
16. Sun, L., Xu, Cui-ping, Xiao, Ke-yan, Zhu, Yu-sheng, & Yan, Ling-ya (2018). Geological characteristics, metallogenic regularities and the exploration of graphite deposits in China. *China Geology*, 1 (3), 425–434. <https://doi.org/10.31035/cg2018044>
17. Tichý, L. (1998). Z historie exploatace grafitu v jižních Čechách: Pravěk a starověk [From the history of graphite exploitation in South Bohemia: Prehistory and Antiquity]. *Obnovená tradice*, (17), 3–7. URL: <https://slon.diamo.cz/hpvt/2006/tradice/T09.htm>
18. Touzain, P., Balasooriya, N., Bandaranayake, K., & Descolas-Gros, C. (2010). Vein graphite from the Bogala and Kahatagaha–Kolongaha mines, Sri Lanka: A possible origin. *Canadian Mineralogist*, 48 (6), 1373–1384. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1373>
19. Faber-Castell (n. d.). *A brief history of the pencil*. <https://www.faber-castell.com/corporate/history/a-brief-history-of-the-pencil>
20. U.S. Geological Survey. (2022). *Mineral commodity summaries 2022*. U.S. Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
21. U.S. Geological Survey. (2026). *Mineral commodity summaries 2026*. U.S. Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf>
22. Township of Greater Madawaska. (2022). *The history of Black Donald Mine*. <https://www.greatermadawaska.com/en/play-and-explore/black-donald-graphite-mine.aspx>

THE GRAPHITE COLLECTION OF THE YEVHEN LAZARENKO MINERALOGICAL MUSEUM IN A RETROSPECTIVE OF THE DEVELOPMENT OF GLOBAL GRAPHITE RESOURCES

Oksana Tsilimak, Kateryna Burban, Albertyna Buchynska, Uliana Borniak
oksana.tsilimak@lnu.edu.ua, kateryna.burban@lnu.edu.ua,
mineralogy.museum@lnu.edu.ua, ulyana.bornyak@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Due to its unique combination of physicochemical properties, graphite is a critically important resource that determines the development of modern energy-saving technologies and the strategic stability of the global industrial complex.

The Yevhen Lazarenko Mineralogical Museum of the Ivan Franko National University of Lviv houses a fairly representative collection of graphite samples, graphite-containing parageneses, and graphite concentrate samples (35 exhibits). It was formed based on the results of an inventory of the Museum's systematic and exhibition funds over 170 years. The exhibits represent the main graphite-bearing provinces of the world and key geological and industrial types of graphite deposits. The collection covers the genetic diversity of graphite from currently operating facilities, as well as from already depleted or promising deposits for future development. This makes it a unique object for comparative genetic research and popularization of knowledge about critical mineral raw materials.

The article provides a retrospective analysis of the history of the formation of the graphite collection. Three natural stages of its formation are identified and characterized: stage I – the second half of the 19th century–the beginning of the 20th century (six samples); stage II – the 1950s–1980s (27 samples); stage III – from the beginning of the 21st century (two samples).

The history of graphite extraction and use, which dates back to ancient times, is analysed. A detailed description of the most representative, most interesting and rare samples, which are exhibited in

demonstrative showcases or stored in the Museum's collections, is given. The main morphological and genetic types of graphite are described in detail – microcrystalline, flake and veined.

The collection has significant scientific and historical value, as it contains unique samples from deposits that are already depleted, hard-to-reach, or currently inaccessible altogether.

Key words: graphite, morphological and genetic type, collection, Yevhen Lazarenko Mineralogical Museum, deposit, industrial use, mineral and raw material base, SPG (Spherical Purified Graphite).



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ УТВОРЕННЯ СІРКОВОДНЮ В ПРОЦЕСАХ ДІАГЕНЕЗУ ТА КАТАГЕНЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ

Мирослава Яковенко, канд. геол. наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу геології нафти і газу
myroslavakoshil@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-8967-0489>
Scopus Author ID: 59365262600

Олександр Любчак, канд. геол. наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу проблем геотехнології горючих копалин
oleksandr.lyubchak@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0700-6929>
Scopus Author ID: 59495337800

Юрій Хоха, д-р геол. наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник відділу геології нафти і газу
kho_ha_yury@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-8997-9766>
Scopus Author ID: 58797479800

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України
вул. Наукова, 3А, м. Львів, Україна, 79060

У статті розглянуто проблему утворення сірководню з органічно зв'язаної сірки у викопній органічній речовині на стадіях діагенезу та катагенезу. Актуальність роботи зумовлена тим, що сірка, яка входить до складу гумінових кислот, керогену та інших геополімерних компонентів осадової органічної речовини, істотно впливає на напрями й температурні межі її перетворення, а також на генерацію газоподібних продуктів, склад бітумоїдів, нафти й асфальтенових фракцій. На підставі аналізу літературних даних показано, що в S-збагачених системах термічно нестійкі сульфідні, дисульфідні та полісульфідні фрагменти є важливим джерелом H_2S , тоді як у ході катагенетичної еволюції відбувається відносно збагачення органічної речовини термостійкішими тіофеновими структурами. З урахуванням цього запропоновано спрощену кінетичну модель гідролітичного утворення сірководню з лабільних сульфідних груп геополімерного матриксу за умов надлишку води, що відповідає наближенню псевдопершого порядку.

Модель описує двостадійне перетворення органічно зв'язаної сірки через проміжне утворення тіолових груп із подальшим формуванням сірководню. Для запропонованої схеми складено систему диференційних рівнянь і наведено її аналітичний розв'язок, який дає змогу простежити часову зміну кількостей сульфідної, тіолової та газоподібної сірчаних форм. Показано, що за умови тривалого перебігу процесу в обводнених породах кількість сульфідної сірки монотонно зменшується, тоді як вміст H_2S зростає до граничного значення, визначеного початковим розподілом сірки між компонентами схеми. Встановлено, що крива зміни вмісту тіолових груп може мати максимум, а час його досягнення контролюється співвідношенням констант швидкості окремих стадій, вмістом води та початковими кількостями реагуючих сірковмісних груп. Це дає змогу використовувати модель

для оцінки динаміки гідролітичної деструкції органічної речовини в інтервалі діагенезу – раннього катагенезу.

Обґрунтовано, що модель є першим наближенням і не враховує мікробіологічного сульфатредукування, радикальних і термолізних шляхів утворення H_2S , зворотних реакцій, мінерального зв'язування сірководню у форми FeS/FeS_2 , вторинного включення сірки в органічний матрикс і масо-переносних обмежень. Попри це, вона є корисним інструментом для теоретичного опису одного з важливих механізмів геохімічної еволюції органічної сірки та може бути застосована для інтерпретації процесів осадконакопичення в закритих басейнах, а також для подальшої верифікації за даними гідропіролізу й природних рядів катагенетичної зрілості.

Ключові слова: органічно зв'язана сірка, сірководень, геополімерний матрикс, гідроліз сульфідних груп, кероген, діагенез, катагенез, кінетична модель, тіолові групи, органічна речовина.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.08>

Постановка проблеми. Вивчення процесів розкладу сульфідних груп органічної речовини (ОР) під дією води (гідроліз) є важливим для нафтогазової геології, оскільки ці процеси мають прямий вплив на генерацію та склад вуглеводнів. Присутність сірки в органічному матеріалі – гумінових кислотах чи керогені (насамперед сірковмісний кероген типу II-S) значно знижує енергію активації та температурний поріг генерації вуглеводнів з органічної матриці. Наявність органічної сірки в ОР може сприяти вивільненню вуглеводнів на більш ранніх стадіях катагенезу, порівняно з матеріалом бідним на сірку. Процеси, пов'язані з сіркою, можуть впливати на кінцевий хімічний склад бітумів та нафти, зокрема на утворення смол та асфальтенів, що є важливим для оцінки якості сировини.

Аналіз досліджень. У межах останніх десятиліть накопичено переконливі докази, що в катагенезі значні кількості сірководню H_2S можуть генеруватися безпосередньо з органічно-зв'язаної сірки вихідного органічного матеріалу (кероген, гумінові кислоти тощо) через термічну деструкцію та внутрішньомолекулярну перебудову сірковмісних груп, передусім лабільних S–S і C–S зв'язків, аліфатичних сульфідів та тіоестерів, з подальшими реакціями перенесення водню та стабілізації матриці.

Найбільш продуктивними в контексті генерування органогенного H_2S виявляються S-збагачені системи, такі як кероген типу II-S чи S-rich тверді бітуми, де органічна сірка може становити до 10–12 мас.%, і значна її частина може вважатись термічно нестабільною через ланцюгові полісульфідні зв'язки. Для таких систем характерними є ранній термічний розрив слабких S–S/C–S зв'язків з виділенням H_2S (і подекуди елементарної сірки S^0) та одночасна стабілізація залишкової органіки через формування більш стабільних C–S–C структур і ароматизацію/циклізацію до тіофенових структур [3; 4].

Ефект стабілізації геополімерів після відщеплення сірководню до тіофенових структур також досліджено термодинамічними методами в наших ранніх роботах [1; 2]. У зазначених працях показано, що як у керогені, так і в гумінових кислотах концентрація ароматичних, у тому числі тіофенових, груп контролюється температурою, яка закономірно зростає з глибиною, а їхній вміст підвищується зі збільшенням ступеня перетворення геополімеру.

У викопній органічній речовині сірка розподіляється між різними відновленими органосірчаними групами, але з ростом ступеня катагенетичної трансформації матеріалу дедалі більше зміщується в бік циклічних ароматичних структур. Для неокислених нафт, бітумів, асфальтенів і зріліших керогенів найтипівіша сірковмісна група – тіофенова сірка, а сульфідна/тіоферна зазвичай займає другу позицію. Меркаптани, дисульфідні та полісульфідні присутні, але частіше як лабільна, рання або проміжна частина сірковмісного пулу. Окиснені форми сірки – сульфоксиди, сульфони, сульфонати спостерігаються переважно в менш зрілому або більш окисненому матеріалі [1; 2; 4; 5; 7–9].

Отже, у геохімічній літературі для керогену, бітуму, асфальтенів і вугілля найчастіше за результатами аналітичних досліджень (хімічні методи, FT-IR, XANES/XPS і т.д.) розрізняють такі класи сірковмісних груп [10; 11]:

1) відновлені ациклічні форми – тіоли (меркаптани, R-SH), сульфідати/тіоефіри (R-S-R'), дисульфідати й полісульфідати (R-S-S-R', R-S_n-R');

2) циклічні та ароматизовані форми – тіофени, бензотіофени, дибензотіофени, а також насичені циклічні сульфідати;

3) окиснені форми – сульфоксиди, сульфони, сульфонати/сульфокислоти.

Для важких нафт, асфальтенів і бітумів література подає досить узгоджену інформацію: в структурі цих класів сполук переважають тіофени і сульфідати, а серед окиснених форм найчастіше головною є сульфоксидна. У роботах із використанням методики XANES для вивчення асфальтенів зазначено, що в усіх проаналізованих асфальтенах домінують сульфідати та тіофени, а серед окиснених форм – сульфоксиди. Для бітумів із незрілих порід сульфоксид може бути дуже помітним, але після керованого піролізу частка тіофенової сірки систематично зростає й стає домінантною [5].

Водночас для керогену важливий не стільки пропорційний вміст груп як такий, скільки його еволюція. S-XANES для керогену типу II показав, що аліфатичні сірчані форми втрачаються рано, а за вищої зрілості відбувається відносно зростання тіофенової сірки порівняно з ароматичним сульфідом. Тобто в ході катагенезу нециклічні форми зменшуються, а тіофенова сірка систематично збільшує свій внесок у загальну масу органічної сірки. Це добре узгоджується і з оглядовими роботами: лабільні C-S і S-S мотиви з часом зникають, а більш термостійкі тіофенові структури накопичуються [9; 4; 8].

Меркаптани й дисульфідати не варто вважати головною формою сірки в геополімерах на середніх та пізніх стадіях катагенезу. Вони хімічно більш рухливі й термічно менш стійкі. У роботах з вугілля й методами температурно-програмованого піролізу саме дисульфідати, меркаптани, арилтіоли, аліфатичні сульфідати реагують за нижчих температур, тоді як тіофени – найстійкіші. Це означає, що меркаптано- та дисульфідато-подібна сірка важлива на ранніх стадіях катагенезу і як джерело подальших перетворень [6; 8].

У вугіллі розподіл форм сильно залежить від рангу, історії окиснення і методу аналізу. У великому огляді по лігнітах різні методи дали від 33–48% тіофенової та 52–67% нетіофенової сірки за XPS/XANES суміщеної з піролізом, але інші методи для того ж лігніту дали 64–75% тіофенової. Це дуже наочно показує: точна частка окремих груп методозалежна, але не скасовує загального висновку, що саме тіофенова vs нетіофенова – головна вісь поділу [6].

Для конкретних вугільних зразків ця методика дала, наприклад, близько 58% тіофенової сірки в Harworth coal, близько 84% у Silverdale coal, а в Prince of Wales coal – приблизно 50% тіофенової і 50% нетіофенової, причому найбільша нетіофенова група там – аліциклічні сульфідати (~25%), а прості тіофени дають ~23%. Тобто навіть у межах вугілля немає однакової картини, але з підвищенням рангу та ароматизації тіофенова форма загалом збільшує свою присутність [6; 11].

Робота [11] з вивчення сірковмісних груп у вугіллі методом XPS показала, що серед органічних форм найбільші частки часто мають сульфідати, тіофени і сульфонати, в меншій мірі – сульфони і сульфоксиди. У частини зразків головною органічною формою була тіофенова сірка, але в окремих низькосіричистих та водночас низькорангових зразках відносно великою ставала сульфонатна або сульфідна частка. Це ще раз підкреслює спостереження, що для малозрілих, кисневмісних і поверхнево окиснених матеріалів окиснені форми можуть бути помітними.

Загалом висновок можна сформулювати так:

– Органічний матеріал на початку катагенетичного шляху характеризується розподілом сірки у вигляді суміші сульфідів/тіоєфірів, полісульфідних або дисульфідних містків, частини тіофенів; окиснені форми можливі, особливо в бітумі й низькоранговому вугіллі.

– У геополімерах на середніх стадіях катагенезу переважає тіофенова сірка, сульфідна лишається другою за важливістю; меркаптано-дисульфідна частина вже не становить значної частки.

– Для середньо- і високорангового вугілля головна форма сірки – тіофенова, хоча частка нетіофенової може бути значною, що значно залежить від конкретного вугілля та методу аналізу.

Мета статті – розробити спрощену кінетичну модель генерування сірководню під час гідролізу сульфідних груп геополімерного матриксу органічної речовини на стадіях діагенезу та раннього катагенезу, одержати її аналітичний розв’язок і визначити основні чинники, що контролюють динаміку накопичення H_2S та проміжних тіолових груп за умов надлишку води. Нами не враховуються такі шляхи генерування сірководню, як радикальні та термолізні шляхи. Таке спрощення спричинено наявністю значного масиву експериментальних досліджень, прийнято з метою побудови моделі першого наближення та для виділення внеску саме гідролітичного механізму.

Виклад основного матеріалу. Одним з газів, які утворюються в процесі перетворення природних органічних речовин є сірководень. Будемо вважати, що перетворення відбувалися без участі мікроорганізмів за наступною схемою в якій позначення SH_2 еквівалентне сірководню H_2S :



де квадратними дужками позначено кількість речовини відповідної сірковмісної групи або сполуки. Таке умовне позначення використане нижче за текстом. Константи швидкості першої та другої реакції процесу (1) оцінюються значеннями 10^{-10} та 10^{-15} (1/с) відповідно, а напівперіод процесу складає від сотень до десятків мільйонів років. З огляду на це перетворення (1) не використовується в технологічних процесах, але може бути застосованим для аналізу процесів перерозподілу форм знаходження сірки протягом геологічних часових періодів. Сірковмісні групи, що входять до схеми (1) належать тільки до органічної речовини, а саму схему будемо використовувати для визначення кількості виділення сірководню в процесах діагенезу та катагенезу.

Схема (1) описує процес гідролізу сульфідної групи, який складається з двох стадій за умови надлишку води (це твердження аналогічне тому, що ми приймаємо псевдоперший порядок реакції) або її постійного припливу до газогенеруючої системи. Цей лімітуючий фактор обмежує використання (1) аналізом перетворення в часі природної органічної речовини стадією діагенезу та раннього катагенезу, позаяк на стадії пізнього катагенезу відбувається ущільнення та значне зневоднення порід. На розвиток реакцій (1) впливатиме висока мінералізація води та значне відхилення значення рН від нейтрального. Зокрема присутність у воді катіонів перехідних металів у вищих ступенях окислення теоретично може призвести до утворення дисульфідної (у т.ч. піритної) сірки. Найбільш сприятливими для гідролізу є лужні гідрокарбонатні води. Водночас сульфатна мінералізація є малосприятливою для генерування сірководню внаслідок проходження реакції диспропорціонування сірки.

Скориставшись схемою (1) будемо наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{d[-S-]}{dt} = -k_1[-S-][H_2O]$$

$$\frac{d[SH_2]}{dt} = k_2[-SH][H_2O]$$

$$[-SH] = [-SH]_0 + [-S-] - [SH_2] \quad (2),$$

де k_1, k_2 (1/моль \times с) – константи швидкості першої та другої стадій гідролізу відповідно, а нижній символ "0", як і в наступному тексті, позначатиме кількість відповідної речовини в початковий момент часу ($t=0$). Розв'язок системи рівнянь (2) має наступний вигляд:

$$[-S-] = [-S-]_0 e^{-k_1[H_2O]t}$$

$$[-SH] = [-SH]_0 Y_1 - [-S-]_0 Y_2 \frac{k_1}{k_2 - k_1}$$

$$[SH_2] = [SH_2]_0 + ([-S-]_0 + [-SH]_0) Y_1 + [-S-]_0 Y_2 \frac{k_2}{k_2 - k_1} \quad (3),$$

де безрозмірні функції часу Y_1, Y_2 визначаються так

$$Y_1 = 1 - e^{-k_2[H_2O]t}$$

$$Y_2 = e^{-k_2[H_2O]t} - e^{-k_1[H_2O]t}.$$

Перше рівняння системи (3) показує, що з плином часу ($t \rightarrow \infty$) в обводнених породах сульфідна сірка викопної органічної речовини повністю гідролізується. В той самий час кількість сірководню монотонно збільшується та прямує до значення, яке визначається сумою початкових кількостей компонентів схеми (1). Для умови $t \rightarrow \infty$ перерозподіл сірки між компонентами схеми (1) ілюструється наступним рисунком:

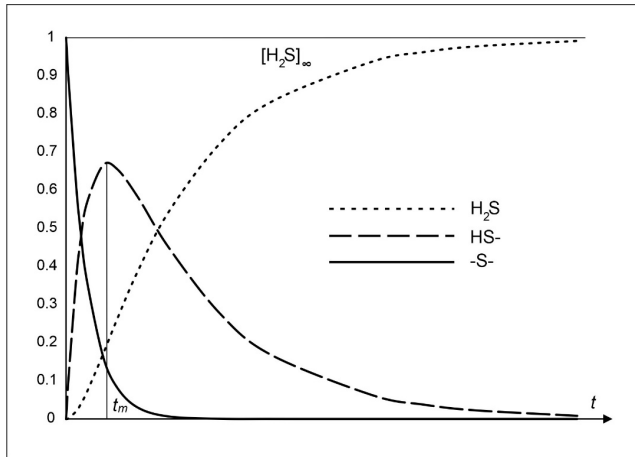


Рис. 1. Перерозподіл сірки між компонентами схеми (1) за умови $t \rightarrow \infty$

В залежності від початкових умов функція, яка визначає зміну в часі кількості тіолових груп, може мати максимум у точці t_m , що визначається за формулою:

$$t_m = \frac{1}{(k_2 - k_1)[H_2O]} \left[\ln \left(\frac{k_2}{k_1} \right) + \ln \left(1 + \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \frac{[-SH]_0}{[-S-]_0} \right) \right].$$

Врахувавши значення констант швидкостей реакцій k_1 , k_2 і прийнявши середнє значення відношення кількостей сульфідної до тіолової групи рівне семи (за усередненими літературними даними) отримуємо наступний вираз для оцінки t_m вираженого в роках:

$$t_m = 4300 \frac{[-SH]_0}{[H_2O]}$$

З отриманого виразу випливає, що час t_m прямо пропорційний кількості сірковмісних груп та зворотно пропорційний кількості води. Останню формулу можна використовувати для оцінки динаміки розкладу органічної речовини на стадіях діагенез – початковий катагенез. Враховуючи вищенаведені умови, модель має адекватно описувати виділення сірководню в процесі осадконагромадження в закритих басейнах. Водночас, слід врахувати обмеження цієї моделі: постійну температуру, сталу активність води, відсутність впливу мікроорганізмів, відсутність зворотних реакцій, відсутність зв'язування сірководню у сполуки заліза FeS/FeS₂, відсутність масопереносу, відсутність вторинного включення сірки в органічну матрицю.

Швидкість реакції гідролізу розглянутих функціональних груп у процесах діагенезу та катагенезу надзвичайно мала, а значить час лабораторного експерименту непомірно великий. Проте значення констант швидкості реакцій (1) можна встановити знаючи кути нахилу аналітичних кривих (3) до прямої абсцис у початковий момент часу. При цьому в початковий момент часу сума кутових коефіцієнтів дотичних до кінетичних кривих $[-S-]$ та $[SH_2]$ дорівнює кутовому коефіцієнту кривої $[-SH]$. Практичні розрахунки кількостей сірковмісних груп доцільно проводити у вигляді відношення до загальної органічної сірки.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

1. Органічно зв'язана сірка у викопній органічній речовині може бути джерелом сірководню у ході термічної еволюції осадового органічного матеріалу, особливо в S-збагачених системах.

2. Запропонована схема є спрощеною кінетичною моделлю, що описує внесок лабільних сульфідних форм органічної сірки за умов надлишку води на стадіях діагенезу – раннього катагенезу.

3. Модель показує, що проміжне накопичення тіолових груп і час досягнення їх максимуму визначаються співвідношенням швидкостей двох стадій та ефективною концентрацією води.

4. Модель не враховує мінеральне зв'язування сірководню, вторинне включення сірки в органічну матрицю, зворотні реакції та масопереносні обмеження, тому її слід розглядати як перший наближений опис.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оцінку параметрів Арреніуса та верифікацію моделі за даними експериментального гідролізу і природних рядів катагенетичної зрілості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хоха Ю., Любчак О., Яковенко М. Вплив температурного режиму на газогенераційний потенціал гумінових кислот органічної речовини. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2018. № 3–4 (176–177). С. 49–62. URL: <https://ggcmjournal.org.ua/uk/вплив-температурного-режиму-на-газог/>
2. Хоха Ю., Любчак О., Яковенко М. Термодинаміка трансформації керогену II типу. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2019. № 3. С. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/ggcm2019.03.025>
3. Aizenshtat Z., Amrani A. Significance of $\delta^{34}S$ and evaluation of its imprint on sedimentary sulfur rich organic matter II: Thermal changes of kerogens type II-S catagenetic stage

- controlled mechanisms. A study and conceptual overview. *Geochemical Society Special Publications*. 2004. Vol. 9. P. 35–50. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1873-9881\(04\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S1873-9881(04)80005-1)
4. Amrani A. Organosulfur compounds: Molecular and isotopic evolution from biota to oil and gas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2014. Vol. 42. P. 733–768. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124126>
 5. Bolin T. B., Birdwell J. E., Lewan M. D., Hill R. J., Grayson M. B., Mitra-Kirtley S., Bake K. D., Craddock P. R., Abdallah W., Pomerantz A. E. Sulfur species in source rock bitumen before and after hydrous pyrolysis determined by X-ray absorption near-edge structure. *Energy & Fuels*. 2016. Vol. 30, No. 8. P. 6264–6270. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00744>
 6. Ghauri M., Shahzad K., Khurram M. S., Jaffery M. H., Ali N., Khan W. A., Cliffe K. R. Development of a Temperature Programmed Identification Technique to Characterize the Organic Sulphur Functional Groups in Coal. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 6. Art. 782. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10060782>
 7. Kasrai, M., Bancroft, G. M., Brunner, R. W., Jonasson, R. G., Brown, J. R., Tan, K. H., & Feng, X. Sulphur speciation in bitumens and asphaltenes by X-ray absorption fine structure spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1994. Vol. 58, No. 13. P. 2865–2872. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90120-1)
 8. Kelemen S. R., Sansone M., Walters C. C., Kwiatak P. J., Bolin T. B. Thermal transformations of organic and inorganic sulfur in Type II kerogen quantified by S-XANES. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. Vol. 83. P. 61–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.12.015>
 9. Sinninghe Damsté J. S., de Leeuw J. W. Analysis, structure and geochemical significance of organically-bound sulphur in the geosphere: state of the art and future research. *Organic Geochemistry*. 1990. Vol. 16, No. 4–6. P. 1077–1101. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90145-P](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90145-P)
 10. Waldo G. S., Carlson R. M., Moldowan J. M., Peters K. E., Penner-Hahn J. E. Sulfur speciation in heavy petroleum: Information from X-ray absorption near-edge structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55, No. 3. P. 801–814. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90343-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90343-4)
 11. Zhang L., Li Z., Yang Y., Zhou Y., Li J., Si L., Kong B. Research on the composition and distribution of organic sulfur in coal. *Molecules*. 2016. Vol. 21, No. 5. Art. 630. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21050630>

REFERENCES

1. Khokha, Yu., Liubchak, O., & Yakovenko, M. (2018). Vplyv temperaturnoho rezhymu na hazoheneratsiyni potentsial huminovykh kyslot orhanichnoi rechovyny [Influence of the temperature regime on the gas-generation potential of humic acids of organic matter]. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 3–4 (176–177), 49–62. Retrieved from: <https://ggcmjournal.org.ua/uk/вплив-температурного-режиму-на-газог/>
2. Khokha, Yu., Liubchak, O., & Yakovenko, M. (2019). Termodynamika transformatsii kerohenu II typu [Thermodynamics of type II kerogen transformation]. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 3 (180), 25–40. <https://doi.org/10.15407/ggcm2019.03.025>
3. Aizenshtat, Z., & Amrani, A. (2004). Significance of $\delta^{34}\text{S}$ and evaluation of its imprint on sedimentary sulfur rich organic matter II: Thermal changes of kerogens type II-S catagenetic stage controlled mechanisms. A study and conceptual overview. *The Geochemical Society Special Publications*, 9, 35–50. [https://doi.org/10.1016/S1873-9881\(04\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S1873-9881(04)80005-1)
4. Amrani, A. (2014). Organosulfur compounds: Molecular and isotopic evolution from biota to oil and gas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 733–768. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124126>

5. Bolin, T. B., Birdwell, J. E., Lewan, M. D., Hill, R. J., Grayson, M. B., Mitra-Kirtley, S., Bake, K. D., Craddock, P. R., Abdallah, W., & Pomerantz, A. E. (2016). Sulfur species in source rock bitumen before and after hydrous pyrolysis determined by X-ray absorption near-edge structure. *Energy & Fuels*, 30(8), 6264–6270. 10.1021/acs.energyfuels.6b00744
6. Ghauri, M., Shahzad, K., Khurram, M. S., Jaffery, M. H., Ali, N., Khan, W. A., & Cliffe, K. R. (2017). Development of a Temperature Programmed Identification Technique to Characterize the Organic Sulphur Functional Groups in Coal. *Energies*, 10(6), 782. <https://doi.org/10.3390/en10060782>
7. Kasrai, M., Bancroft, G. M., Brunner, R. W., Jonasson, R. G., Brown, J. R., Tan, K. H., & Feng, X. (1994). Sulphur speciation in bitumens and asphaltenes by X-ray absorption fine structure spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(13), 2865–2872. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90120-1)
8. Kelemen, S. R., Sansone, M., Walters, C. C., Kwiatek, P. J., & Bolin, T. (2012). Thermal transformations of organic and inorganic sulfur in Type II kerogen quantified by S-XANES. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 83, 61–78. 10.1016/j.gca.2011.12.015
9. Sinninghe Damsté, J. S. S., & de Leeuw, J. W. (1990). Analysis, structure and geochemical significance of organically-bound sulphur in the geosphere: state of the art and future research. *Organic Geochemistry*, 16(4-6), 1077–1101. 10.1016/0146-6380(90)90145-P
10. Waldo, G. S., Carlson, R. M., Moldowan, J. M., Peters, K. E., & Penner-Hahn, J. E. (1991). Sulfur speciation in heavy petroleum: Information from X-ray absorption near-edge structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(3), 801–814. 10.1016/0016-7037(91)90343-4
11. Zhang, L., Li, Z., Yang, Y., Zhou, Y., Li, J., Si, L., & Kong, B. (2016). Research on the composition and distribution of organic sulfur in coal. *Molecules*, 21(5), 630. <https://doi.org/10.3390/molecules21050630>

KINETIC MODEL OF HYDROGEN SULFIDE GENERATION DURING DIAGENESIS AND CATAGENESIS OF ORGANIC MATTER

Myroslava Yakovenko, Oleksandr Liubchak, Yurii Khokha

myroslavakoshil@ukr.net; oleksandr.lyubchak@gmail.com; khoha_yury@ukr.net

*Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the NAS of Ukraine
3a Naukova St., Lviv, Ukraine, 79060*

The paper addresses the problem of hydrogen sulfide generation from organically bound sulfur in fossil organic matter during diagenesis and catagenesis. The relevance of the study is determined by the fact that sulfur incorporated into humic acids, kerogen and other geopolymeric components of sedimentary organic matter substantially affects the pathways and temperature limits of its transformation, as well as the generation of gaseous products, the composition of bitumoids, oils and asphaltene fractions. A review of published data shows that in sulfur-enriched systems thermally unstable sulfide, disulfide and polysulfide fragments are important precursors of H₂S, whereas catagenetic evolution is accompanied by the relative enrichment of organic matter in more thermally stable thiophenic structures. These regularities are characteristic not only of sulfur-rich kerogen and solid bitumens, but also of coal-bearing organic matter in which the proportion of thiophenic and non-thiophenic sulfur changes systematically with increasing maturity.

Taking these features into account, a simplified kinetic model of hydrogen sulfide generation during the hydrolysis of labile sulfide groups in a geopolymeric organic matrix under water excess is proposed. This assumption corresponds to a pseudo-first-order approximation and makes it possible to consider the contribution of one specific mechanism of sulfur transformation separately from radical, thermolytic

and microbial pathways. The model describes a two-stage conversion of organically bound sulfur through the intermediate formation of thiol groups followed by H_2S generation. A system of differential equations is derived for the proposed reaction scheme, and its analytical solution is obtained. The solution makes it possible to trace the temporal evolution of sulfide sulfur, thiol sulfur and gaseous hydrogen sulfide, as well as to evaluate the limiting redistribution of sulfur among the components of the system.

It is shown that, over sufficiently long time intervals in water-saturated rocks, the amount of sulfide sulfur decreases monotonically, whereas the amount of hydrogen sulfide increases toward a limiting value controlled by the initial sulfur distribution. The model also predicts that the concentration of intermediate thiol groups may pass through a maximum, and the time required to reach this maximum depends on the ratio of the rate constants of the two stages, the effective water content and the initial abundance of reactive sulfur-bearing groups. Thus, the model can be used for assessing the dynamics of hydrolytic destruction of fossil organic matter during diagenesis and early catagenesis, including peat-forming, coal-bearing and other carbonaceous sedimentary systems.

The proposed scheme is regarded as a first approximation. It does not take into account microbial sulfate reduction, radical and thermolytic pathways of H_2S generation, reverse reactions, mineral trapping of hydrogen sulfide into FeS/FeS_2 , secondary incorporation of sulfur into the organic matrix, or mass-transfer limitations. Nevertheless, it provides a useful theoretical framework for describing one of the important mechanisms of sulfur evolution in fossil organic matter and may be applied in further studies aimed at estimating Arrhenius parameters and validating the model by hydrolysis experiments and natural maturity series.

Key words: organically bound sulfur, hydrogen sulfide, fossil organic matter, kerogen, peat, coal, hydrolysis of sulfide groups, diagenesis, early catagenesis, kinetic model, thiol groups.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ У БІОМІНЕРАЛОГІЇ

*Святослав Лойко, аспірант кафедри мінералогії,
петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського
Sviatoslav.Loiko@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0003-2613-7910>*

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005*

Біомінералогія на сучасному етапі є однією з найбільш динамічних міждисциплінарних галузей науки, у якій інтегровані методичні підходи мінералогії, геохімії, молекулярної біології, медицини і матеріалознавства.

У статті узагальнено сучасні напрями досліджень у біомінералогії та проаналізовано основні тенденції її розвитку. Особливу увагу зосереджено на механізмах біомінералізації як процесу утворення твердих неорганічних фаз за безпосередньої участі біологічних чинників. Розглянуто суттєві відмінності між біологічно індукованою мінералізацією (BIM), характерною головню для мікробних систем, і біологічно контрольованим мінералоутворенням (BCM), властивим вищим організмам.

Проаналізовано роль органічних матриць, зокрема специфічних білків і полісахаридів, у процесах нуклеації, орієнтованого росту і просторової організації кристалів, що забезпечує формування біогенних мінералів з унікальною ієрархічною будовою та специфічними фізико-хімічними властивостями. Схарактеризовано основні природні модельні системи, серед яких біогенні карбонати кальцію (кальцит, арагоніт і вітерит у складі скелетів безхребетних і кокколітофор), фосфати кальцію (зокрема, гідроксо-апатит кісткової тканини), а також біогенний опал діатомей і магнетит магнітотактичних бактерій. Окрему увагу приділено мікробній біомінералізації як важливому чиннику геохімічної трансформації середовища, патологічній мінералізації в організмі людини та біоміметичним напрямом у створенні нових функціональних матеріалів.

Сучасна біомінералогія має важливе значення для реконструкції палеоекологічних умов, розвитку регенеративної медицини та дослідження біогеохімічних процесів. Окреслено перспективи переходу до мультимасштабного дослідження складу й структури речовини на мікро-, нано- й атомному рівнях із використанням різноманітних спектроскопічних методів і синхротронного випромінювання. Інтеграція цих підходів є фундаментом для розуміння закономірностей мінералоутворення в живій і неживій природі та розкриття ролі біоти у глобальних геохімічних циклах.

Ключові слова: біомінералогія, біомінералізація, мікробна біомінералізація, патологічна мінералізація, біоміметичні матеріали, гідроксо-апатит, кристалохімія біогенних фаз, наноструктура мінералів.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.09>

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку біомінералогії характеризується формуванням нових дослідницьких напрямів, розширенням кола об'єктів вивчення та впровадженням високоточних аналітичних методів, що зумовлює потребу в системному узагальненні сучасних тенденцій цієї галузі. Біомінералогія вже давно вийшла за межі опису окремих біогенних мінералів і нині охоплює вивчення механізмів біомінералізації на молекулярному, клітинному, тканинному й геобіологічному рівнях. Особливого значення

набувають дослідження, присвячені ролі органічної матриці в мінералоутворенні, функціонуванню аморфних попередників, взаємодії мікроорганізмів з мінеральною фазою, патологічній мінералізації та біоміметичному відтворенню природних процесів у матеріалознавстві.

Актуальність проблеми посилюється тим, що сучасні аналітичні методи, зокрема електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, спектроскопічні та синхротронні підходи, дають змогу досліджувати біогенні мінерали на значно вищому рівні просторової і структурної роздільної здатності, ніж раніше. Це сприяє переходу від морфологічно-описового етапу розвитку біомінералогії до мультимасштабного аналізу складу, кристалохімії, наноструктури й механізмів формування біомінеральних систем. Водночас накопичення великої кількості даних у мінералогії, геохімії, біології, медицині, палеонтології та матеріалознавстві потребує їх інтеграції в межах єдиного оглядового бачення.

Проблема полягає також у тому, що сучасні напрями досліджень у біомінералогії часто висвітлюють фрагментарно: окремо розглядають мікробну біомінералізацію, патологічні кальцифікації, біоміметичні технології, екологічні й еволюційні аспекти. За таких умов виникає потреба в узагальнювальному аналізі, який дав би змогу показати внутрішню логіку розвитку цієї науки, взаємозв'язок між фундаментальними і прикладними дослідженнями, а також значення біомінералогії для розуміння закономірностей мінералоутворення в живій і неживій природі.

Аналіз досліджень. Класичні фундаментальні публікації з біомінералогії сформува-ли концептуальну основу сучасних досліджень, у межах якої біомінералізацію трактують як процес утворення біогенних мінеральних фаз під контролем живих систем, а власне біомінерали – як складні органо-мінеральні композити зі специфічними кристалохімічними, морфологічними й ізотопно-геохімічними характеристиками. У фундаментальних узагальненнях показано, що біомінералізація безпосередньо пов'язана з біогеохімічними циклами, осадоагромадженням, фосильним літописом і проблемою *vital effect* (життєвий, або біологічний ефект) – системним відхиленням ізотопного складу ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{44}\text{Ca}$) та вмісту слідових елементів у біогенних фазах від рівноважних абіогенних аналогів [16; 26]. Саме ці праці заклали підґрунтя для переходу від опису окремих біогенних мінералів до аналізу механізмів їхньої нуклеації, росту, фазових трансформацій і стабілізації в природних системах.

Упродовж останніх років дослідницький фокус помітно змістився в бік механістичного й мультимасштабного аналізу біогенних мінеральних фаз. Якщо в попередні десятиліття домінували морфологічний опис і фазова ідентифікація, то нині провідними стали дослідження неklasичних шляхів кристалізації, ролі аморфних попередників (ACC¹, ACP²), переднуклеаційних кластерів, органічних матриць і компарменталізації мінералоутворення. Особливо важливими в цьому контексті стали високороздільна крио-ТЕМ (трансмійсійна електронна мікроскопія), томографія та синхротронні методи, зокрема, сканувальна трансмісійна рентгенівська мікроскопія (STXM); вони дали змогу простежити перехід від аморфних кальцій-фосфатних або кальцій-карбонатних попередників до впорядкованих кристалічних фаз [6; 9; 26].

Окремий масив сучасних публікацій присвячений мікробній біомінералізації. У цій групі досліджень особливу увагу приділяють розмежуванню понять *біологічно контрольована мінералізація* (*biologically controlled mineralization* – BCM), *біологічно індукована мінералізація* (*biologically induced mineralization* – BIM), *органомінералізація* (*biologically influenced mineralization*). У сучасних оглядах зазначено, що прокариоти здатні індукувати

¹ Аморфний карбонат кальцію (Amorphous Calcium Carbonate).

² Аморфний фосфат кальцію (Amorphous Calcium Phosphate).

утворення широкого спектра фаз – від оксидів і оксигідроксидів заліза (гетит, магнетит) до карбонатів і сульфідів [4; 8; 24]. Особливе місце посідають праці про магнітотактичні бактерії, у яких біогенний магнетит і грейгіт розглядають як модельні фази внутрішньоклітинної мінералізації [9].

Паралельно швидко розвивається блок досліджень, присвячений прикладним аспектам біомінералогії. У 2024–2025 рр. особливо активно узагальнювали біоміметичні підходи до синтезу функціональних органо-мінеральних матеріалів, зокрема скаффолд-систем для кісткової регенерації, матеріалів для ремінералізації твердих тканин, біоінспірованих композитів і мінералізованих носіїв для біомедичних застосувань. У цих працях біомінералогічні моделі використовують уже не тільки для пояснення природного фазоутворення, а й для керованого відтворення кристалохімічних і текстурних характеристик біогенних мінеральних фаз у штучних системах [9; 12].

Отже, біомінералогія нині розвивається в кількох взаємопов'язаних напрямках: дослідження фундаментальних механізмів нуклеації та росту біогенних мінеральних фаз; вивчення їхніх кристалохімічних, морфологічних і текстурних особливостей; аналіз мікробно-опосередкованих мінеральних трансформацій; розроблення біоміметичних матеріалів; інтерпретація ролі біомінералізації в геологічній історії та сучасних біогеохімічних циклах. Водночас зберігається потреба в інтегрованому мінералогічному узагальненні, яке поєднувало б дані про фазовий склад, механізми кристалізації та геохімічне значення біогенних мінеральних фаз [8; 9; 12; 24; 26].

Мета статті – виконати системний аналіз сучасних напрямів досліджень у біомінералогії, виявити ключові тенденції розвитку цієї галузі та обґрунтувати значення інтегрованого мінералогічного підходу до дослідження біогенних мінеральних фаз як чинника геологічних і біогеохімічних процесів у сучасних і фосильних системах.

Виклад основного матеріалу. Біомінералізація є базовим процесом формування біогенних мінеральних фаз і становить фундаментальну основу біомінералогії як між-дисциплінарної галузі. У мінералогічному розумінні йдеться не тільки про власне факт утворення мінералу за участю живого організму, а й про формування специфічних органо-мінеральних систем, у яких нуклеація, ріст, поліморфний вибір, морфологія кристалів, ступінь кристалічності й текстурна організація визначені біологічним контролем різної інтенсивності. Саме ця ознака відрізняє біогенні мінеральні фази від їхніх абіогенних аналогів і зумовлює появу кристалохімічних і геохімічних характеристик, які нерідко не відтворюються у типових неорганічних системах. Біомінерали, зазвичай, є не ізольованими кристалами, а складними органо-неорганічними композитами, у яких мінеральна фаза тісно пов'язана з органічною матрицею й набуває специфічних морфологічних, текстурних та ізотопних ознак [26].

Упродовж геологічної історії біота сформувала широкий спектр мінеральних фаз, серед яких домінують карбонати кальцію (кальцит, арагоніт, вітерит), фосфати кальцію (біогенний апатит), біогенний кремнезем (опал-А), оксиди, оксигідроксиди та сульфід заліза. Біомінералізація постає як процес керованого створення локально пересиченого мікросередовища, у межах якого відбуваються нуклеація й подальша стабілізація певної мінеральної фази. Таке мікросередовище може бути внутрішньоклітинним, міжклітинним або позаклітинним, однак у всіх випадках воно передбачає просторове обмеження зони мінералоутворення, селективне надходження йонів, регуляцію рН, Eh, $p\text{CO}_2$ та участь органічних шаблонів [16; 26].

Як базовий процес фазоутворення, біомінералізація охоплює кілька рівнів. На фізико-хімічному рівні це досягнення пересичення, зародження нової фази, ріст кристалів і стабілізація метастабільних попередників, зокрема. На кристалохімічному рівні суттєво

значення мають поліморфізм, ізоморфні заміщення, ступінь гідратації та розподіл слідових елементів. На текстурному рівні ключовими є орієнтований ріст кристалітів та формування ієрархічних композитів [16].

Для мінералогії біомінералізація має особливе значення як джерело інформації про умови середовища. Ізотопний склад і кристалохімічні особливості біогенних фаз використовують для реконструкції палеоекологічних умов, хоча інтерпретація таких даних ускладнена явищем *vital effect*. Отже, розуміння біомінералізації є необхідною умовою для правильної інтерпретації геологічного літопису та з'ясування ролі біогенних мінеральних фаз у біогеохімічній еволюції Землі [26].

Ключовою особливістю біомінералізації є її реалізація як процесу, детермінованого на молекулярному й клітинному рівнях. У сучасній науковій парадигмі, як зазначено вище, виділяють три типи біомінералізації: ВСМ, ВІМ та органомінералізацію. У разі ВСМ організм безпосередньо регулює нуклеацію, фазовий склад і кристалографічну орієнтацію, формуючи високоспеціалізовані скелетні структури. Натомість ВІМ є наслідком метаболічно зумовлених змін фізико-хімічних параметрів локального середовища (рН, рСО₂, Eh), коли клітина є ініціатором, а не точним регулятором фазоутворення [4; 26].

У системах ВСМ вирішальну роль відіграє органічна матриця, представлена білками, глікопротеїнами й полісахаридами, що формують тривимірний каркас мінералоутворення. Вона виконує не тільки опорну, а й шаблонувальну функцію, задаючи місця нуклеації та контролюючи орієнтований ріст кристалів. Взаємодія між структурною матрицею та розчинними регуляторними макромолекулами визначає поліморфний вибір, зокрема, співвідношення між кальцитом і арагонітом, а також ієрархічну організацію біогенної мінеральної фази [6; 26].

Важливим механізмом є компартменталізація – створення ізольованих мікрозон у везикулах або інших мембранно-обмежених компартментах, де підтримується специфічний іонний гомеостаз. Мембрани таких компартментів регулюють трансмембранне перенесення катіонів і аніонів, зокрема, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺/Fe³⁺, забезпечуючи локальне пересичення, необхідне для стабілізації метастабільних попередників.

У мікробних системах центрами гетерогенної нуклеації слугують клітинні поверхні та позаклітинні полімерні речовини (EPS)³. Їхні функціональні групи модифікують локальне середовище, впливаючи на розмір, морфологію та ступінь агрегування кристалів. Унікальною моделлю внутрішньоклітинного контролю є магнітотактичні бактерії, у яких мембранно-обмежені магнітосоми забезпечують синтез евгедральних кристалів магнетиту або грейгіту [24].

Сучасні дані свідчать, що молекулярний контроль часто реалізується через неklasичні шляхи кристалізації – від стабілізації переднуклеаційних кластерів до керування переходом аморфна фаза–кристал. Це дає змогу живим системам формувати мінеральні агрегати з кристалохімічними і текстурними характеристиками, що не завжди відтворюються в типових абіогенних системах [6; 16].

Сучасній біомінералогії притаманний перехід від класичної теорії нуклеації до концепції неklasичних шляхів кристалізації. У межах цих уявлень фазоутворення починається не з безпосереднього зародження впорядкованої кристалічної фази з іонного розчину, а через формування переднуклеаційних кластерів і рідкоподібних мінеральних прекурсорів, які виступають проміжними стадіями на шляху до кристалічно впорядкованої структури [6; 26]. Сучасні уявлення додатково пов'язують формування аморфних попередників із виникненням переднуклеаційних кластерів і щільних рідкоподібних прекурсорів, які трактують як проміжні стадії на шляху до стабільної кристалічної фази [6; 26].

³ EPS – Extracellular Polymeric Substances.

Стратегічну роль у цьому процесі відіграють аморфні попередники – АСС та АСР. Завдяки відсутності далекого кристалічного порядку та високій реакційній здатності ці метастабільні фази слугують лабільним резервуаром мінеральної речовини. У біологічних системах така нестабільність є функціональною перевагою, оскільки дає змогу організму транспортувати мінеральну речовину до зони мінералоутворення та контролювати формування складної морфології біогенної фази. Стабілізація АСС як попередника кальциту або арагоніту та АСР як прекурсора біогенного апатиту здійснюється органічними макромолекулами, а в карбонатних системах також іонами-стабілізаторами, зокрема Mg^{2+} , що дає змогу селективно регулювати момент і локалізацію фазового переходу [4; 8; 10].

До неklasичних механізмів належить також орієнтоване приєднання, за якого нанорозмірні кристалічні блоки вирівнюються в межах органічної матриці вздовж спільних кристалографічних осей. Цей механізм пояснює формування мезокристалів – структур, що морфологічно можуть нагадувати монокристали, однак фактично мають мозаїчну будову й містять інтегровані органічні включення [4].

Для мінералогії це має принципове значення, оскільки дає підстави по-новому інтерпретувати кристалохімічні дефекти, варіабельний ступінь кристалічності та особливості поліморфного вибору в біогенних системах. Отже, дослідження неklasичної кристалізації є одним із ключових напрямів сучасної біомінералогії, який поєднує фізичну хімію фазових переходів з біологічним контролем біомінералоутворення [4; 10].

Базовий аналітичний комплекс сучасної біомінералогії ґрунтується на поєднанні морфологічних, фазово-аналітичних, кристалохімічних та спектроскопічних підходів. Традиційно до нього належать сканувальна (SEM) та трансмісійна (TEM) електронна мікроскопія, рентгенівська дифракція (XRD), інфрачервона спектроскопія (FTIR) та Раман-спектроскопія. Їхнє поєднання дає змогу аналізувати фазовий склад, поліморфні модифікації, ступінь кристалічності та ієрархічну організацію біогенних фаз [17; 21].

SEM залишається ключовим інструментом для вивчення мікротекстури, тоді як TEM дає змогу досліджувати ультраструктуру й орґано-мінеральний інтерфейс на нанорівні. Водночас сучасні дослідження застерігають від спрощених інтерпретацій, особливо для кальцій-фосфатних систем. Пряме ототожнення біогенної фази з «гідроксо-апатитом» без урахування дефектності структури, ізоморфних заміщень, зокрема карбонат-іона, та наявності аморфних доменів часто є некоректним. Для деталізації складу дедалі ширше залучають термічний аналіз (TG/DSC⁴), який дає змогу кількісно оцінити вміст води й органічної речовини, інтегрованих у структуру біомінералу [17; 21]. Основні аналітичні можливості сучасних методів дослідження біогенних мінеральних фаз узагальнено в табл. 1.

Прорив у розумінні динаміки біомінералоутворення пов'язаний із впровадженням методів *in situ* та *in operando*. Кріогенна трансмісійна електронна мікроскопія (cryo-TEM) та рідиннофазова трансмісійна електронна мікроскопія (liquid-TEM) дають змогу візуалізувати переднуклеаційні кластери та аморфні прекурсори в їхньому нативному, тобто гідратованому, стані. Це критично важливо для верифікації моделей неklasичної кристалізації, оскільки традиційна підготовка зразків часто спричиняє артефактну дегідратацію й фазові трансформації [7; 17].

Вагомим елементом сучасного інструментарію стали синхротронні методи. Сканувальна трансмісійна рентгенівська мікроскопія (STXM) забезпечує високороздільне хімічне картування кальцієвмісних компартментів у клітинах. Спектроскопічні підходи XANES (рентгенівська спектроскопія ближньої зони поглинання) та EXAFS (розширена рентгенівська абсорбційна спектроскопія) дають змогу аналізувати локальну координацію, електронний стан і характер включення домішкових елементів у біогенні мінеральні фази.

⁴ TG – термогравіметрія; DSC – диференціальна сканувальна калориметрія.

Таблиця 1

**Сучасні методи дослідження біогенних мінеральних фаз
та їх аналітичні можливості**

Метод/підхід	Аналітичний фокус	Можливості	Джерело
Сканувальна електронна мікроскопія (SEM)	Морфологія поверхні, мікротекстура, просторове розміщення мінеральної фази	Дає змогу аналізувати форму кристалів, мікроструктурну організацію біомінералів і характер мінералоутворення на мікрорівні	[1; 25]
Трансмісійна електронна мікроскопія (TEM/сгуо-TEM/liquid-TEM)	Ультраструктура, нанокристали, органо-мінеральний інтерфейс, аморфні попередники	Дає змогу простежувати ранні стадії фазоутворення, перехід від аморфних прекурсорів до впорядкованих фаз і механізми неklasичної кристалізації	[7; 17]
Рентгеноструктурний аналіз (XRD) / Мікрорентгенодіфракція (MicroED)	Фазовий склад, поліморфні модифікації, ступінь кристалічності, структурні характеристики субмікронних кристалів	Забезпечує надійну фазову ідентифікацію біогенних мінеральних фаз і уточнення кристалохімічних особливостей слабковпорядкованих систем	[21; 23]
ІЧ-спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR) / Раман-спектроскопія (Raman)	Функціональні групи, карбонатні та фосфатні домени, кристалічність, органо-мінеральні взаємодії	Дає змогу оцінювати ступінь кристалічності, карбонатні заміщення та співвідношення органічної й мінеральної складових у біомінералах	[2; 25]
Сканувальна трансмісійна рентгеновська мікроскопія (STXM) / Рентгеновська спектроскопія ближньої зони поглинання (XANES) / Розширена рентгеновська абсорбційна спектроскопія (EXAFS)	Хімічне картування, локальна координація елементів, електронний стан і домішкові заміщення	Розкриває кристалохімічні заміщення, локальний хімічний стан елементів і механізми формування vital effect у біогенних фазах	[3; 13]
Ядерний магнітний резонанс вуглецю-13 (APT)	Субнанометрова хімічна гетерогенність, тривимірний розподіл слідових елементів	Надає майже атомномасштабну інформацію про неоднорідність біомінералів і розподіл домішок у твердих тканинах	[11]
Корелятивний мультимасштабний аналіз	Інтеграція морфологічних, спектроскопічних і високороздільних даних	Дає змогу інтерпретувати біогенні мінеральні фази як динамічні органо-мінеральні системи, а не як ізольовані кристалічні об'єкти	[11; 13; 17]

Це важливо для інтерпретації кристалохімічних заміщень і механізмів формування *vital effect* [3; 13]. Одним із найперспективніших методів атомного масштабу є атомно-зондова томографія, яка забезпечує тривимірну реконструкцію субнанометрової хімічної гетерогенності та розподілу слідових елементів у структурі біомінералу [11]. Перспективним доповненням до цього інструментарію є мікрорентгенодіфракція (MicroED), яка дає змогу визначати структурні характеристики субмікронних і слабковпорядкованих кристалічних об'єктів, що особливо важливо для дослідження дрібнодисперсних біогенних фаз і поліморфних модифікацій [23].

Отже, методологічний арсенал сучасної біомінералогії еволюціонує в бік корелятивного аналізу, де дані різних масштабів інтерпретуються як взаємодоповнювальні. Саме такий мультимасштабний підхід дає підстави розглядати біогенні мінеральні фази не як статичні об'єкти, а як складні динамічні органо-мінеральні системи [11; 17].

Серед природних модельних систем біомінералогії провідне місце посідають карбонатні й фосфатні біогенні мінеральні фази вищих організмів. Саме вони найкраще демонструють, як біологічний контроль впливає на поліморфний вибір, кристалохімічні особливості, текстурну організацію та функціональні властивості біомінералів. У мінералогічному аспекті ці системи особливо цінні, оскільки поєднують чітко визначений фазовий склад з високим рівнем морфологічної та структурної впорядкованості, що робить їх придатними як для фундаментального аналізу механізмів фазоутворення, так і для палео-екологічних реконструкцій [5; 19].

Карбонатні системи представлені, насамперед, біогенними модифікаціями CaCO_3 – кальцитом, арагонітом і, рідше, вітеритом – у складі черепашок молюсків і коралів. Формування цих фаз визначене не тільки термодинамічними умовами, а й тонким контролем над локальними концентраціями йонів, рН, органічною матрицею та просторовим обмеженням зони кристалізації. Для біомінералогії особливо важливо, що ці об'єкти є основними носіями інформації про механізми інкорпорації слідових елементів і формування *vital effect*, що безпосередньо впливає на інтерпретацію геохімічних проксі у палеокліматичних дослідженнях [5; 19].

Фосфатні системи охоплюють кісткову тканину, дентин і емаль, де домінує біогенний апатит. Важливо зазначити, що мінеральний компонент кістки не слід спрощено ототожнювати зі стехіометричним гідроксо-апатитом: ідеться про кальцій-дефіцитний, карбонатовмісний апатит із вираженою дефектністю структури та, ймовірно, участю аморфно-нанокристалічних доменів. У кістковій тканині мінеральна фаза тісно пов'язана з колагеновою матрицею, утворюючи ієрархічну систему, тоді як у високомінералізованих тканинах, зокрема, в емалі, апатит має вищий ступінь кристалічності. Саме ці системи є ключовими моделями для дослідження ролі матриці, ферментативної регуляції фосфатного обміну та просторово-часового контролю нуклеації й росту кристалів [17; 21; 27].

Порівняльний аналіз цих систем дає змогу простежити спільні й відмінні риси біологічно контрольованого фазоутворення. У карбонатних системах головний акцент припадає на поліморфізм CaCO_3 та значення біомінералів як геохімічних архівів, тоді як у фосфатних – на дефектну структуру апатиту та зв'язок між його кристалохімічними характеристиками і механічними властивостями тканин. Саме тому ці системи залишаються базовими модельними об'єктами сучасної біомінералогії та створюють концептуальний місток до аналізу мікробної біомінералізації й патологічного мінералоутворення [5; 21; 27].

Мікробна біомінералізація є одним із найбільш динамічних напрямів сучасної біомінералогії, оскільки саме мікроорганізми здатні ініціювати формування, трансформацію та стабілізацію широкого спектра біогенних мінеральних фаз – карбонатів, оксидів і гідроксидів заліза, сульфідів і фосфатів – у природних середовищах. У мінералогічному аспекті її значення полягає у здатності прокариотів суттєво впливати на морфологію, ступінь кристалічності та хімічну неоднорідність мінеральних продуктів, а через це і на перебіг глобальних біогеохімічних циклів [4; 8; 15].

Сучасні уявлення про мікробну біомінералізацію ґрунтуються на розмежуванні трьох фундаментальних типів. У разі біологічно індукованої мінералізації мікроорганізми змінюють фізико-хімічні параметри середовища, зокрема рН, Eh та вміст неорганічного вуглецю, створюючи умови для пересичення і масового осадження фаз. Саме цим пояснюється роль бактеріального карбонатогенезу у формуванні строматолітів, осадкових товщ

і процесах фосилізації [4; 8]. Біологічно зумовлена мінералізація пов'язана з тим, що клітинні поверхні та позаклітинні полімерні речовини (EPS) відіграють роль активних матричних субстратів і центрів гетерогенної нуклеації. Це дає змогу мікробним клітинам задавати текстурні характеристики кристалів навіть за відсутності прямого генетичного контролю. Особливе екологічне значення мають залізовмісні системи, де біогенні ферригідрит $\text{Fe}^{3+}_{10}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ і гетит $\text{FeO}(\text{OH})$ стають високореактивними геохімічними бар'єрами, забезпечуючи іммобілізацію забруднювачів [4; 15].

Біологічно контрольована мінералізація найвиразніше представлена у магнітотактичних бактерій. У межах мембранно-обмежених магнітосом формуються евгдральні кристали магнетиту $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ або грейгіту $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{S}_4$. Ця система демонструє здатність прокаріотів прецизійно регулювати фазовий склад, морфологію та просторову організацію мінералу на генетично детермінованому рівні [24].

Геохімічне значення цих процесів полягає не тільки у формуванні стійкого мінерального запису в геологічному літописі, а й у їхній участі в циклах вуглецю, заліза, сірки і фосфору. Мікробно-опосередковані фази є індикаторами умов палеосередовища, поєднуючи мінералогічний аналіз з геомікробіологічною інтерпретацією процесів фазоутворення [4; 8; 24].

Патологічне мінералоутворення в організмі людини є важливим об'єктом сучасної біомінералогії, оскільки демонструє, що біогенне фазоутворення може реалізуватися не тільки у фізіологічних, а й у патологічних умовах. У мінералогічному аспекті йдеться про формування ектопічних або атипично локалізованих мінеральних фаз у м'яких тканинах, порожнинних органах, судинній стінці, клапанах серця чи біоплівках. Такі утворення не слід розглядати як пасивне осадження солей, оскільки сучасні дослідження засвідчують, що їхнє формування пов'язане з запаленням, локальними змінами йонного середовища, появою матричних субстратів для нуклеації та активацією остеогеноподібних сигнальних шляхів [22].

Однією з найбільш показових моделей патологічної біомінералізації є уролітіаз. Сучасний підхід дедалі частіше трактує ниркові камені як патологічні біогенні мінерали, для аналізу яких недостатньо лише визначення загального хімічного складу. Принципове значення мають кристалічна структура, пористість, проникність, спайність, тріщинуватість і механічні властивості конкременту. Для уролітів характерне суттєве мінералогічне різноманіття: серед основних фаз трапляються оксалати кальцію, зокрема, ювеліт $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ й уделіт $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, фосфати кальцію, а також урати й інші компоненти, співвідношення яких відображає умови фазоутворення в багатокомпонентному біологічному середовищі. Важливо, що навіть за незначної масової частки органічний матрикс може суттєво впливати на архітектуру конкременту, модулюючи нуклеацію, фазові переходи й текстурну будову патологічного мінерального агрегату [18].

Іншим важливим напрямом є судинна і клапанна кальцифікація, коли осаджуються кальцій-фосфатні мінеральні фази, близькі за складом до кісткоподібного мінералу. Сучасні дані свідчать, що в кальцифікованих судинних і клапанних тканинах переважають добре впорядковані фосфатні фази, тоді як на ранніх етапах може зростати частка більш незрілих і протонуваних кальцій-фосфатних компонентів. Це засвідчує, що для патологічної кальцифікації важливі не тільки локалізація й кількість мінералу, а й ступінь його зрілості, фазовий стан і кристалохімічна організація. Імовірно, суттєву роль у цьому процесі відіграють позаклітинні везикули, які функціонують як локальні мікрореактори початкової нуклеації кальцій-фосфатних фаз [22; 28].

Окреме місце серед патологічних біомінеральних систем посідає дентальний камінь як мінералізована біоплівка. Його мінеральна складова представлена переважно

кальцій-фосфатними фазами, серед яких домінують апатитові модифікації, а також інші фосфатні й карбонатні компоненти. Важливо, що мінералізація в цьому випадку відбувається не спонтанно, а внаслідок взаємодії мікробної біоплівки, ферментативної активності, зміни рН та локального пересичення кальцій-фосфатної системи. Отже, дентальний камінь є показовим прикладом того, як патологічне мінералоутворення поєднує мікробний, фізико-хімічний і матричний контроль фазоутворення [25].

Для патологічних біомінеральних систем загалом характерні мікрогетерогенність, зональна будова, варіабельний ступінь кристалічності та специфічний набір домішкових компонентів. Саме ці ознаки роблять їх цінними об'єктами біомінералогічного аналізу, оскільки дають змогу досліджувати механізми нуклеації, фазової еволюції та стабілізації біогенних мінеральних фаз у нефізіологічних умовах. Отже, патологічне мінералоутворення в організмі людини має подвійне значення для сучасної біомінералогії: з одного боку, воно є моделлю порушеного фазоутворення, а з іншого, – джерелом інформації про взаємозв'язок між запаленням, матричними субстратами, локальною геохімією середовища та кристалохімією мінеральної фази [18; 22; 25].

Сучасні біоміметичні підходи ґрунтуються на відтворенні не тільки хімічного складу природних біомінералів, а й фундаментальних принципів їхньої нуклеації, росту, фазових переходів та ієрархічної організації. Якщо ранні біоінспіровані матеріали переважно копіювали окремі морфологічні риси природних систем, то сучасна парадигма зміщується до керованого відтворення органо-мінеральних інтерфейсів, стабілізації аморфних прекурсорів та просторово-часового контролю мінералоутворення. Саме тому біомінералізацію дедалі частіше трактують як природну модель для конструювання функціональних матеріалів із наперед заданими кристалохімічними, текстурними й механічними властивостями [12; 14].

Одним із центральних напрямів є створення біомінераловмісних композитів для регенеративної медицини і тканинної інженерії. Сучасні дослідження засвідчують, що інтеграція мінеральної фази в полімерні або гібридні матриці дає змогу не тільки підвищувати механічну стійкість матеріалу, а й відтворювати мікрооточення природної тканини. Особливе значення мають наноструктуровані карбонатзаміщені фосфати кальцію, які забезпечують високу біосумісність, остеointegraцію та наближення властивостей штучного матеріалу до кісткової тканини. У стоматологічному матеріалознавстві біоміметичні підходи особливо виразно виявлені у технологіях ремінералізації емалі, коли білкові й супрамолекулярні матриці використовують для спрямованого росту апатитової фази й часткового відновлення ультраструктурної організації твердих тканин зуба [10; 20].

Важливим напрямом є також наслідування власне механізму біомінералізації. Йдеться про системи, у яких органічна матриця, ферментні регулятори або стабілізовані аморфні попередники забезпечують контрольоване осадження мінеральної фази *in situ*. Такий підхід відкриває можливості для створення гідрогелів, 3D-друкованих конструкцій, мінералізованих каркасів і нанокомпозитів, у яких мінералізація відбувається за м'яких умов температури й тиску. Саме це зближує біоміметичне матеріалознавство з принципами «зеленої хімії», оскільки дає змогу уникати жорстких фізико-хімічних режимів синтезу й водночас зберігати високу структурну впорядкованість кінцевого матеріалу [12; 29].

Для мінералогії принципово важливо, що біоміметичне матеріалознавство дедалі більше спирається на кристалохімічну логіку природних систем. Йдеться про керування поліморфним вибором, стабілізацію метастабільних фаз, контроль розміру й орієнтації кристалітів, а також про відтворення ієрархічної текстурної організації. Завдяки цьому біоінспіровані матеріали перестають бути простими аналогами природних біомінералів і перетворюються на функціональні системи, властивості яких задаються через фазовий склад, режим мінералоутворення та органо-мінеральний інтерфейс [12; 29].

Отже, біоміметичні підходи у матеріалознавстві та медицині є одним із найважливіших прикладних відгалужень сучасної біомінералогії. Їхня цінність полягає в тому, що фундаментальні знання про нуклеацію, фазові переходи, аморфні прекурсори та кристалохімічну організацію біогенних мінеральних фаз безпосередньо трансформуються у технології створення регенеративних матеріалів, стоматологічних систем, біоінженерних конструкцій та інших функціональних композитів [10; 12; 14].

Біоінспіровані композити та регенеративні матеріали є прямим результатом перенесення біомінералогічних принципів у прикладну площину. У матеріалознавстві фундаментальні знання про нуклеацію, фазові переходи та органо-мінеральні інтерфейси використовують для створення систем, у яких мінеральна й органічна складові поєднані в ієрархічно організований функціональний композит. Найбільший інтерес у цьому контексті становлять кальцій-фосфатні, кальцій-карбонатні та змішані гібридні системи, здатні відтворювати не тільки склад, а й структурну логіку природних біомінералів [12; 14].

Провідне місце серед регенеративних матеріалів посідають композити на основі фосфатів кальцію, насамперед карбонатзаміщених апатитів, аморфного фосфату кальцію та їхніх комбінацій з полімерними матрицями. Їхня перевага полягає в можливості тонкого керування розчинністю, фазовим складом, пористістю й міжфазною взаємодією. Такі системи активно розглядають для кісткової регенерації, остеоінтеграції імплантатів і тканинної інженерії, де пріоритетом є відтворення природного мінералізованого мікрооточення, а не просто заповнення дефекту інертною речовиною [12; 29].

Окремий напрям становлять матриці, у яких мінералізація відбувається безпосередньо *in situ* і регулюється ферментами, білками або супрамолекулярними структурами. Такі системи дають змогу відтворювати власне послідовність біомінералоутворення – від стабілізації аморфних прекурсорів до переходу в упорядкований апатитовий стан. Для регенеративної медицини це забезпечує просторово-часовий контроль мінералізації, що зближує штучний матеріал з природними механізмами формування твердих тканин [14; 29].

У стоматологічному матеріалознавстві біоінспіровані системи найвиразніше виявлені у дослідженні ремінералізації емалі. Сучасні роботи свідчать, що білкові матриці можуть спрямовувати ріст апатитових кристалітів, частково відновлюючи структурну організацію людської емалі та її механічні властивості. Паралельно розвиваються керамичні й пептидні системи, здатні створювати умови для впорядкованого апатитового росту за фізіологічних умов. Це робить їх перспективними для створення нових покриттів і регенеративних стоматологічних матеріалів [10; 20].

Ефективність біоінспірованих композитів визначена контролем кристалохімічних параметрів – фазового складу, ступеня кристалічності, характеру заміщень і текстурної організації мінеральної фази. Саме тому сучасні регенеративні матеріали проєктують як керовані органо-мінеральні системи, у яких властивості програмуються через режим мінералоутворення. У цьому полягає одна з головних прикладних перспектив сучасної біомінералогії [12; 29].

Еволюційні й екологічні аспекти біомінералогії визначають її значення не тільки як науки про механізми фазоутворення, а й як важливого інструмента для інтерпретації геологічної історії та сучасних біогеохімічних процесів. Біогенне мінералоутворення є однією з ключових еволюційних інновацій, що забезпечила виникнення скелетних структур і суттєво вплинула на взаємодію організмів з довкіллям. У цьому контексті біогенні мінеральні фази стають активними учасниками глобальних циклів вуглецю, кальцію, кремнію, фосфору, заліза й сірки [5; 15].

Екологічне значення біомінералогії особливо виразно виявлене у процесах біоремедіації. Біологічно індуквана мінералізація здатна переводити розчинні форми токсичних

елементів у порівняно стійкі мінеральні фази, що знижує їхню міграційну здатність у природних водах. Цей механізм вважають перспективним методом іммобілізації важких металів і радіонуклідів через утворення вторинних карбонатних або фосфатних фаз. У мінералогічному аспекті це означає формування стабільних геохімічних бар'єрів, у яких поліаніони фіксуються безпосередньо у структурі біогенних мінералів. Сучасним прикладом такого підходу є мікробно- та ферментативно-індуковане осадження карбонатів, що їх розглядають як перспективні інструменти екологічної інженерії, стабілізації ґрунтів і контрольованої іммобілізації забруднювачів [8; 15].

Не менш важливим є значення біогенних мінеральних фаз як архівів палеосередовища. Кристалохімічний та ізотопний склад біогенних кальциту й арагоніту в скелетах коралів, форамініфер і молюсків використовують для реконструкції параметрів давніх басейнів. Особливу роль у палеоокеанографії відіграють ізотопні співвідношення $\delta^{18}\text{O}$ та $\delta^{13}\text{C}$ як індикатори температури й циклу вуглецю, а також мікроелементні проксі, зокрема Mg/Ca та Sr/Ca, що відображають хімізм морської води. Коректність таких реконструкцій безпосередньо залежить від розуміння механізмів vital effect – біологічно зумовлених відхилень у входженні ізотопів і домішок до структури мінералу. Отже, біомінералогічний аналіз є необхідною умовою для верифікації палеокліматичних моделей [5; 26].

Еволюційні й екологічні аспекти біомінералогії замикають логіку дисципліни від молекулярного контролю нуклеації до планетарних циклів речовини. Біогенні мінеральні фази є одночасно і активними учасниками сучасних геохімічних процесів, і надійними носіями інформації про минулі стани біосфери, поєднуючи мінералогічний, геохімічний та палеоекологічний підходи [5; 15; 26].

У табл. 2 узагальнено основні напрями сучасних досліджень у біомінералогії.

Таблиця 2

Основні напрями сучасних досліджень у біомінералогії

Напрямок досліджень	Головний науковий фокус	Типові об'єкти / біогенні мінеральні фази	Джерело
Фундаментальні механізми і неklasична кристалізація	Нуклеація, ріст кристалів, роль органічної матриці, аморфні попередники, переднуклеаційні кластери, органо-мінеральні інтерфейси	ACC, ACP, колаген-апатитові системи, ієрархічно організовані біогенні композити	[4; 7; 17; 21]
Карбонатні й фосфатні системи вищих організмів	Кристалохімія, текстурна організація й функціональні властивості біогенних карбонатів і фосфатів	Кальцит, арагоніт, вітерит, біогенний апатит, кісткова тканина, емаль, дентин	[5; 17; 21]
Мікробна біомінералізація	ВІМ, ВСМ, роль клітинних поверхонь та EPS, внутрішньоклітинна мінералізація, мікробно-опосередковані геохімічні трансформації	Магнетит, грейгіт, карбонати, фосфати, оксиди й гідроксиди заліза	[8; 15; 24]
Патологічне мінералоутворення	Ектопічна кальцифікація, запально-асоційоване фазоутворення, мінералогічна характеристика патологічних конкрементів	Судинні кальцифікати, уроліти, кальцифікація м'яких тканин, дентальний камінь	[18; 22; 25; 28]

Продовження таблиці 2

Біоміметичні та матеріалознавчі напрями	Використання принципів природної біомінералізації для створення функціональних матеріалів, скафолд-систем і регенеративних технологій	Біоінспіровані апатитові композити, мінералізовані матриці, матеріали для ремінералізації та тканинної інженерії	[9; 10; 12; 14]
Аналітичні та мультимасштабні підходи	Поєднання морфологічних, спектроскопічних і високороздільних методів для вивчення біогенних фаз на мікро-, нано-й атомному рівнях	SEM, TEM, cryo-TEM, XRD, FTIR, Raman, STXM, APT, MicroED	[11; 13; 23]
Екологічні, еволюційні та біогеохімічні аспекти	Роль біомінералів у глобальних циклах речовини, реконструкції палеосередовища, біоремедіації та кліматичних застосуваннях	Біогенні карбонати, залізовмісні мінерали, мікробно-індуковані карбонатні й фосфатні фази	[5; 15; 19]

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Виконаний аналіз засвідчив, що сучасна біомінералогія сформувалася як міждисциплінарна галузь, у межах якої поєднані мінералогічний, геохімічний, біологічний, медичний і матеріалознавчий підходи до вивчення біогенних мінеральних фаз. Біогенне мінералоутворення слід розглядати не як пасивне осадження солей, а як складний контрольований процес, у якому визначальну роль відіграють органічні матриці, молекулярний і клітинний контроль, аморфні та метастабільні попередники, поліморфний вибір і багаторівнева текстурна організація мінеральної фази.

До ключових напрямів сучасної біомінералогії належать дослідження фундаментальних механізмів фазоутворення, ролі неklasичної кристалізації, удосконалення мультимасштабних методів аналізу, вивчення карбонатних і фосфатних систем вищих організмів, мікробної біомінералізації, патологічного мінералоутворення та прикладних біоміметичних матеріалів.

Показано, що біогенні мінеральні фази є не тільки продуктами життєдіяльності організмів, а й активними учасниками глобальних біогеохімічних циклів, важливими архівами палеосередовища та перспективною основою для створення функціональних матеріалів. Патологічні кальцифікати й конкременти доцільно трактувати як моделі порушеного фазоутворення, тоді як біоінспіровані композити відображають перехід від копіювання форми до відтворення логіки природного мінералоутворення.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком корелятивних високороздільних методів, зокрема *in situ* та *in operando* підходів, поглибленням кристалохімічного аналізу біогенних фаз, уточненням ролі аморфних попередників і органо-мінеральних інтерфейсів у механізмах фазоутворення, а також із розширенням екологічно керованих біомінералізаційних технологій у біоремедіації, матеріалознавстві та медицині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Arshynnikov R. S., Kulygina V. N., Drohomiyetska M. S., Poberezhna H. M., Polyanyk N. Y., Sukhomlynova T. Y. Morphological study of hard dental tissue condition with various types of dental deposits. *Reports of Morphology*. 2024. Vol. 30. No. 4. P. 5–11. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(4\)-01](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(4)-01)

2. Bartholdy B. P., Velsko I. M., Gur-Arieh S., Fagnäs Z., Warinner C., Henry A. G. Assessing the validity of a calcifying oral biofilm model as a suitable proxy for dental calculus. *bioRxiv*. 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.05.23.541904>
3. Bazin D., Carpentier X., Brocheriou I., Dorfmueller P., Aubert S., Chappard C., Thiaudière D., Reguer S., Waychunas G., Jungers P., Daudon M. Revisiting the localisation of Zn²⁺ cations sorbed on pathological apatite calcifications made through X-ray absorption spectroscopy. *Biochimie*. 2009. Vol. 91. No. 10. P. 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.05.009>
4. Benzerara K., Miot J., Morin G., Ona-Nguema G., Skouri-Panet F., Féraud C. Significance, mechanisms and environmental implications of microbial biomineralization. *Comptes Rendus Geoscience*. 2011. Vol. 343. No. 2–3. P. 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.002>
5. Branson O., de Nooijer L. J. Calcium carbonate biomineralisation: Insights from trace elements. *Elements*. 2025. Vol. 21. No. 2. P. 105–111. <https://doi.org/10.2138/gselements.21.2.105>
6. Cölfen H. Biomineralization: A crystal-clear view. *Nature Materials*. 2010. Vol. 9. No. 12. P. 960–961. <https://doi.org/10.1038/nmat2911>
7. DiCecco L.-A., Gao R., Gray J. L., Kelly D. F., Sone E. D., Grandfield K. Liquid transmission electron microscopy for probing collagen biomineralization. *Nano Letters*. 2023. Vol. 23. No. 21. P. 9760–9768. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02344>
8. Eltarahony M., Jestrzemeski D., Hassan M. A. A comprehensive review of recent advancements in microbial-induced mineralization: Biosynthesis and mechanism, with potential implementation in various environmental, engineering, and medical sectors. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 978. Art. 179426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179426>
9. Guo J., Gao F., Zhang F., Zhao X., Zhao R. Biomineralization-driven advances in materials science and biomedical engineering. *JACS Au*. 2025. Vol. 5. No. 9. P. 4134–4154. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00669>
10. Hasan A., Chuvilin A., Van Teijlingen A., Rouco H., Parmenter C., Venturi F., Fay M., Greco G., Pugno N. M., Ruben J., Edwards-Gayle C. J. C., Myers B., Dreveny I., Cowieson N., Winter A., Gamea S., Walboomers X. F., Hussain T., Rodríguez-Cabello J. C., Rawson F., Tuttle T., Elsharkawy S., Banerjee A., Habelitz S., Mata A. Biomimetic supramolecular protein matrix restores structure and properties of human dental enamel. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. No. 1. Art. 9434. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64982-y>
11. Holmes N. P., Chen Y.-S., Niu R., McGuire H., Cairney J. M., Chen E. Y.-S. Probing the near-atomic scale structure of hard biological materials with atom probe tomography: A review. *Solid State and Materials Science*. 2025. Vol. 39. Art. 101241. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2025.101241>
12. Hu H., Lin Y., Yang B., Wen X., Ma P., Loh X. J., Luo Z., Li Z., Wu Y.-L. Biomineralization-inspired functional biomaterials: From principles to practice. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 504. Art. 158624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158624>
13. Karim B., Görden S., Athar K. M., Chauvat F., March K., Menguy N., Lopez-Adams E., Cordier L., Labarre J., Belhadj O., Duprat E., Poinot M., El Albani A., Gérard E., Jebbar M., Benzerara K. Quantitative mapping of calcium cell reservoirs in cyanobacteria at the submicrometer scale. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2023. Vol. 267. Art. 147369. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2023.147369>
14. Kim S. H., Ki M.-R., Han Y., Pack S. P. Biomineral-based composite materials in regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. No. 11. Art. 6147. <https://doi.org/10.3390/ijms25116147>

15. Li S., Li C., Gao X., Zhu M., Li H., Wang X. Biomineralization mediated by iron-oxidizing microorganisms: Implication for the immobilization and transformation of heavy metals in AMD. *Minerals*. 2025. Vol. 15. No. 8. Art. 868. <https://doi.org/10.3390/min15080868>
16. Lowenstam H. A., Weiner S. On biomineralization. New York: Oxford University Press, 1989. 324 p.
17. Micheletti C., Shah F. A. Bone hierarchical organization through the lens of materials science: Present opportunities and future challenges. *Bone Reports*. 2024. Vol. 22. Art. 101783. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2024.101783>
18. Popova E., Tkachev S., Shapoval A., Karpenko A., Lee Y., Chislov P., Ershov B., Golub D., Galechyan G., Bogodov D., Akovantseva A., Gafarova E., Musaelyan R., Schekleina M., Clark S., Ali S., Dymov A., Vinarov A., Glybochko P., Timashev P. Kidney stones as minerals: How methods from geology could inform urolithiasis treatment. *Journal of Clinical Medicine*. 2025. Vol. 14. No. 3. Art. 997. <https://doi.org/10.3390/jcm14030997>
19. Sanyal S. K., Scott C., Nagaraj V., Speight R., Ahmed F. H. Harnessing the biomolecular mechanisms of marine biomineralisation for carbon sequestration. *Biotechnology Advances*. 2025. Vol. 83. Art. 108644. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108644>
20. Sedek E. M., Holiel A. A. Next-generation strategies for enamel repair and regeneration: Advances in biomaterials and translational challenges. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 2025. Vol. 22. No. 6. P. 771–789. <https://doi.org/10.1007/s13770-025-00725-w>
21. Shah F. A. Revisiting the physical and chemical nature of the mineral component of bone. *Acta Biomaterialia*. 2025. Vol. 196. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.01.055>
22. Song J.-H., Liu M.-Y., Ma Y.-X., Wan Q.-Q., Li J., Diao X.-O., Niu L.-N. Inflammation-associated ectopic mineralization. *Fundamental Research*. 2023. Vol. 3. No. 6. P. 1025–1038. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.04.020>
23. Trzybiński D., Ziemniak M., Olech B., Sutula S., Góral T., Bemowska-Kalabun O., Brzost K., Wierzbicka M., Woźniak K. MicroED: Unveiling the structural chemistry of plant biomineralisation. *Molecules*. 2024. Vol. 29. No. 20. Art. 4916. <https://doi.org/10.3390/molecules29204916>
24. Wan J., Ji R., Liu J., Ma K., Pan Y., Lin W. Biomineralization in magnetotactic bacteria: From diversity to molecular discovery-based applications. *Cell Reports*. 2024. Vol. 43. No. 12. Art. 114995. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114995>
25. Wei Y., Dang G.-P., Ren Z.-Y., Wan M.-C., Wang C.-Y., Li H.-B., Zhang T., Tay F. R., Niu L.-N. Recent advances in the pathogenesis and prevention strategies of dental calculus. *npj Biofilms and Microbiomes*. 2024. Vol. 10. No. 1. Art. 56. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00529-1>
26. Weiner S., Dove P. M. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2003. Vol. 54. No. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.2113/0540001>
27. Yang W., Wang B., Ren Y., Li W., Li X. Multiscale characterization of bone mineralization reveals an amorphous–nanocrystalline apatite phase intimately associated with collagen. *Materials & Design*. 2026. Vol. 261. Art. 115362. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115362>
28. Yao J., Farrar C. T., Aikawa E., Sosnovik D. E., Moon B. F., Kulkarni A., Ackerman J. L. Ex vivo phosphorus-31 solid-state magnetic resonance spectroscopy identifies compositional differences between bone mineral and calcified vascular tissues. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2025. Vol. 12. Art. 1689116. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1689116>
29. Zhao Q., He M., Shu J., Huang Y., Chen J., Guo W. Enzyme-regulated biomineralization: Biological functions and advanced biomaterials for tissue regeneration. *Bioactive Materials*. 2026. Vol. 59. P. 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.12.041>

REFERENCES

1. Arshynnikov, R. S., Kulygina, V. N., Drohomiretska, M. S., Poberezhna, H. M., Polyanyk, N. Y., & Sukhomlynova, T. Y. (2024). Morphological study of hard dental tissue condition with various types of dental deposits. *Reports of Morphology*, 30 (4), 5–11. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(4\)-01](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(4)-01)
2. Bartholdy, B. P., Velsko, I. M., Gur-Arieh, S., Fagnäs, Z., Warinner, C., & Henry, A. G. (2023). Assessing the validity of a calcifying oral biofilm model as a suitable proxy for dental calculus. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.05.23.541904>
3. Bazin, D., Carpentier, X., Brocheriou, I., Dorfmueller, P., Aubert, S., Chappard, C., Thiaudière, D., Reguer, S., Waychunas, G., Jungers, P., & Daudon, M. (2009). Revisiting the localisation of Zn²⁺ cations sorbed on pathological apatite calcifications made through X-ray absorption spectroscopy. *Biochimie*, 91 (10), 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.05.009>
4. Benzerara, K., Miot, J., Morin, G., Ona-Nguema, G., Skouri-Panet, F., & Féraud, C. (2011). Significance, mechanisms and environmental implications of microbial biomineralization. *Comptes Rendus Geoscience*, 343 (2–3), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.002>
5. Branson, O., & de Nooijer, L. J. (2025). Calcium carbonate biomineralisation: Insights from trace elements. *Elements*, 21 (2), 105–111. <https://doi.org/10.2138/gselements.21.2.105>
6. Cölfen, H. (2010). Biomineralization: A crystal-clear view. *Nature Materials*, 9 (12), 960–961. <https://doi.org/10.1038/nmat2911>
7. DiCecco, L.-A., Gao, R., Gray, J. L., Kelly, D. F., Sone, E. D., & Grandfield, K. (2023). Liquid transmission electron microscopy for probing collagen biomineralization. *Nano Letters*, 23 (21), 9760–9768. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02344>
8. Eltarahony, M., Jestrzemeski, D., & Hassan, M. A. (2025). A comprehensive review of recent advancements in microbial-induced mineralization: Biosynthesis and mechanism, with potential implementation in various environmental, engineering, and medical sectors. *Science of the Total Environment*, 978, 179426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179426>
9. Guo, J., Gao, F., Zhang, F., Zhao, X., & Zhao, R. (2025). Biomineralization-driven advances in materials science and biomedical engineering. *JACS Au*, 5 (9), 4134–4154. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00669>
10. Hasan, A., Chuvilin, A., van Teijlingen, A., Rouco, H., Parmenter, C., Venturi, F., Fay, M., Greco, G., Pugno, N. M., Ruben, J., Edwards-Gayle, C. J. C., Myers, B., Dreveny, I., Cowieson, N., Winter, A., Gamea, S., Walboomers, X. F., Hussain, T., Rodríguez-Cabello, J. C., Rawson, F., Tuttle, T., Elsharkawy, S., Banerjee, A., Habelitz, S., & Mata, A. (2025). Biomimetic supramolecular protein matrix restores structure and properties of human dental enamel. *Nature Communications*, 16 (1), 9434. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64982-y>
11. Holmes, N. P., Chen, Y.-S., Niu, R., McGuire, H., Cairney, J. M., & Chen, E. Y.-S. (2025). Probing the near-atomic scale structure of hard biological materials with atom probe tomography: A review. *Solid State and Materials Science*, 39, 101241. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2025.101241>
12. Hu, H., Lin, Y., Yang, B., Wen, X., Ma, P., Loh, X. J., Luo, Z., Li, Z., & Wu, Y.-L. (2024). Biomineralization-inspired functional biomaterials: From principles to practice. *Chemical Engineering Journal*, 504, 158624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158624>
13. Karim, B., Görden, S., Athar, K. M., Chauvat, F., March, K., Menguy, N., Lopez-Adams, E., Cordier, L., Labarre, J., Belhadj, O., Duprat, E., Poinso, M., El Albani, A., Gérard, E., Jebbar, M., & Benzerara, K. (2023). Quantitative mapping of calcium cell reservoirs in cyanobacteria at the submicrometer scale. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 267, 147369. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2023.147369>
14. Kim, S. H., Ki, M.-R., Han, Y., & Pack, S. P. (2024). Biomineral-based composite materials in regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 25 (11), 6147. <https://doi.org/10.3390/ijms25116147>

15. Li, S., Li, C., Gao, X., Zhu, M., Li, H., & Wang, X. (2025). Biomineralization mediated by iron-oxidizing microorganisms: Implication for the immobilization and transformation of heavy metals in AMD. *Minerals*, 15 (8), 868. <https://doi.org/10.3390/min15080868>
16. Lowenstam, H. A., & Weiner, S. (1989). *On biomineralization*. Oxford University Press.
17. Micheletti, C., & Shah, F. A. (2024). Bone hierarchical organization through the lens of materials science: Present opportunities and future challenges. *Bone Reports*, 22, 101783. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2024.101783>
18. Popova, E., Tkachev, S., Shapoval, A., Karpenko, A., Lee, Y., Chislov, P., Ershov, B., Golub, D., Galechyan, G., Bogodov, D., Akovantseva, A., Gafarova, E., Musaelyan, R., Schekleina, M., Clark, S., Ali, S., Dymov, A., Vinarov, A., Glybochko, P., & Timashev, P. (2025). Kidney stones as minerals: How methods from geology could inform urolithiasis treatment. *Journal of Clinical Medicine*, 14 (3), 997. <https://doi.org/10.3390/jcm14030997>
19. Sanyal, S. K., Scott, C., Nagaraj, V., Speight, R., & Ahmed, F. H. (2025). Harnessing the biomolecular mechanisms of marine biomineralisation for carbon sequestration. *Biotechnology Advances*, 83, 108644. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108644>
20. Sedek, E. M., & Holiel, A. A. (2025). Next-generation strategies for enamel repair and regeneration: Advances in biomaterials and translational challenges. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 22 (6), 771–789. <https://doi.org/10.1007/s13770-025-00725-w>
21. Shah, F. A. (2025). Revisiting the physical and chemical nature of the mineral component of bone. *Acta Biomaterialia*, 196, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.01.055>
22. Song, J.-H., Liu, M.-Y., Ma, Y.-X., Wan, Q.-Q., Li, J., Diao, X.-O., & Niu, L.-N. (2023). Inflammation-associated ectopic mineralization. *Fundamental Research*, 3 (6), 1025–1038. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.04.020>
23. Trzybiński, D., Ziemniak, M., Olech, B., Sutuła, S., Góral, T., Bemowska-Kalabun, O., Brzost, K., Wierzbicka, M., & Woźniak, K. (2024). MicroED: Unveiling the structural chemistry of plant biomineralisation. *Molecules*, 29 (20), 4916. <https://doi.org/10.3390/molecules29204916>
24. Wan, J., Ji, R., Liu, J., Ma, K., Pan, Y., & Lin, W. (2024). Biomineralization in magnetotactic bacteria: From diversity to molecular discovery-based applications. *Cell Reports*, 43 (12), 114995. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114995>
25. Wei, Y., Dang, G.-P., Ren, Z.-Y., Wan, M.-C., Wang, C.-Y., Li, H.-B., Zhang, T., Tay, F. R., & Niu, L.-N. (2024). Recent advances in the pathogenesis and prevention strategies of dental calculus. *npj Biofilms and Microbiomes*, 10 (1), 56. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00529-1>
26. Weiner, S., & Dove, P. M. (2003). An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54 (1), 1–29. <https://doi.org/10.2113/0540001>
27. Yang, W., Wang, B., Ren, Y., Li, W., & Li, X. (2026). Multiscale characterization of bone mineralization reveals an amorphous–nanocrystalline apatite phase intimately associated with collagen. *Materials & Design*, 261, 115362. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115362>
28. Yao, J., Farrar, C. T., Aikawa, E., Sosnovik, D. E., Moon, B. F., Kulkarni, A., & Ackerman, J. L. (2025). Ex vivo phosphorus-31 solid-state magnetic resonance spectroscopy identifies compositional differences between bone mineral and calcified vascular tissues. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 12, 1689116. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1689116>
29. Zhao, Q., He, M., Shu, J., Huang, Y., Chen, J., & Guo, W. (2026). Enzyme-regulated biomineralization: Biological functions and advanced biomaterials for tissue regeneration. *Bioactive Materials*, 59, 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.12.041>

MODERN RESEARCH DIRECTIONS IN BIOMINERALOGY

Sviatoslav Loiko

Sviatoslav.Loiko@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Biomaterialogy is currently one of the most dynamic interdisciplinary fields, integrating the methodological approaches of mineralogy, geochemistry, molecular biology, medicine, and materials science. Its relevance is driven by the rapid development of high-precision analytical methods and by the need for a deeper understanding of the fundamental processes governing the interaction between living systems and mineral matter throughout Earth's geological history.

This article summarizes current research directions in biomaterialogy and analyses the main trends in the development of this field. Particular attention is given to biomaterialization mechanisms as processes of inorganic solid-phase formation under the direct influence of biological factors. The essential differences between biologically induced mineralization (BIM), characteristic mainly of microbial systems, and biologically controlled mineralization (BCM), typical of higher organisms, are examined.

The role of organic matrices, including specific proteins and polysaccharides, in nucleation, oriented crystal growth, and the spatial organization of crystals is analysed, as these factors ensure the formation of biogenic minerals with unique hierarchical architectures and specific physicochemical properties. The paper considers the principal natural model systems, including biogenic calcium carbonates (calcite, aragonite, and vaterite in the skeletons of invertebrates and coccolithophores), calcium phosphates (particularly hydroxyapatite in bone tissue), as well as biogenic opal in diatoms and magnetite in magnetotactic bacteria. Special attention is paid to microbial biomaterialization as an important factor in the geochemical transformation of the environment, to pathological mineralization in the human body, and to biomimetic approaches to the design of new functional materials.

Modern biomaterialogy is of great importance for the reconstruction of palaeoecological conditions, the development of regenerative medicine, and the study of biogeochemical processes. The prospects for a transition toward multiscale investigations of matter at the micro-, nano-, and atomic levels using SEM, TEM, XRD, infrared spectroscopy, and synchrotron radiation are outlined. It is concluded that the integration of these approaches provides the foundation for understanding the regularities of mineral formation in living and non-living nature and for revealing the role of biota in global geochemical cycles.

Key words: biomaterialogy, biomaterialization, biogenic minerals, microbial biomaterialization, pathological mineralization, biomimetic materials, hydroxyapatite, crystallochemistry of biogenic phases, nanostructure of minerals.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ІСТОРІЯ НАУКИ

УДК [378.4.096:552](477.83-25)ЛНУім.Франка(091)

КАФЕДРА ПЕТРОГРАФІЇ ЛЬВІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ (ДО 80-РІЧЧЯ ВІД ЧАСУ ЗАСНУВАННЯ)

Олександр Костюк, канд. геол. наук,
доцент кафедри мінералогії, петрографії і геохімії
імені професора Ореста Матковського
oleksandr.kostyuk@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2218-1757>

Інга Попова, інженер кафедри мінералогії,
петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського
inga.popova@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0006-6426-7216>

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005*

Стисло проаналізовано всебічну діяльність кафедри петрографії, яку було засновано 1945 р. Це була єдина в Україні кафедра, яка мала таку назву і на якій готували фахівців-петрографів. У 2020 р. внаслідок реорганізації геологічного факультету її об'єднали з кафедрою мінералогії, і нині це кафедра мінералогії, петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського.

Схарактеризовано внесок співробітників кафедри у розвиток петрології та літології. Висвітлено окремі аспекти навчального процесу, здобутки у підготовці й виданні навчально-методичної літератури. У різні роки на кафедрі готували фахівців-петрографів для таких країн, як Алжир, Ангола, Буркіна-Фасо, В'єтнам, Кот-д'Івуар, Куба, Лаос, Монголія, НДР, Сенегал, Сирія, Туркменістан. У 1946 р. при кафедрі створено шліфувальну майстерню, а 1950 р. – міжкафедральну лабораторію літологічних досліджень, яку 2020 р. об'єднано з лабораторією фізичних методів досліджень мінералів і гірських порід і нині це лабораторія мінералого-петрологічних досліджень.

Проаналізовано головні наукові напрями, що їх розвивали на кафедрі від початку її заснування знані професори В. Соболев, Д. Бобровник, О. Бобрівич, К. Свешніков, їхні колеги й учні. Схарактеризовано наукові публікації співробітників кафедри, а також їхню активну участь в організації та проведенні різноманітних наукових форумів різного рангу.

У 1976–1993 рр. студенти і співробітники кафедри петрографії брали участь у діяльності міжфакультетської студентської науково-дослідної групи «Шельф», у 1995–2010, 2025 рр. – еколого-культурологічної експедиції «Дністер».

Нині на кафедрі розвивають такі основні наукові напрями, як мінералого-геохімічні дослідження гідротермальних і магматичних родовищ; петрологічні дослідження магматичних і метаморфічних комплексів; літологія осадових комплексів; мінерало-геохімічний супровід під час проведення реставраційних робіт та ін. Для реалізації поставлених завдань фахівці кафедри активно співпрацюють з вітчизняними та зарубіжними науковими й виробничими установами.

Ключові слова: кафедра петрографії, кафедра мінералогії, петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського, петрологія, літологія, навчальний процес, науково-дослідна робота, наукова публікація, історія науки, геологічний факультет, Львівський національний університет імені Івана Франка.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.10>

Мета пропонованої статті – усебічно схарактеризувати діяльність кафедри петрографії, яка активно функціонувала на геологічному факультеті Львівського університету протягом 1945–2020 рр. Нині її співробітники продовжують заповзятливо працювати у складі новоствореної кафедри мінералогії, петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського

Виклад основного матеріалу. Кафедра петрографії як окремий структурний підрозділ геологічного факультету була заснована 1945 р. І до 2020 р., коли її об'єднали з кафедрою мінералогії, це була єдина в Україні кафедра, яка мала таку назву і готувала спеціалістів геохімічного профілю за спеціалізацією *петрографія*.

Окремі курси з петрографії почав викладати ще у 1860-х роках Фердинанд Ціркель (Zirkel), перший завідувач кафедри мінералогії, заснованої 1864 р. на філософському факультеті Львівського університету [11]. Він уперше застосував кристалооптичний метод для мікроскопічного вивчення гірських порід і їхньої діагностики. Його підручник «Lehrbuch der Petrographie» (Bonn, 1866) знаменував період відокремлення петрографії від геології і мінералогії; друге видання (1873) побудоване на даних мікроскопічних досліджень [3; 4]. Фелікс Крейтц (Kreutz), який керував кафедрою мінералогії до 1874 р., продовжував читати курси з петрографії та займався мінералого-петрографічними дослідженнями магматичних і осадових порід. Професор Еміль Дуніковський-Габданк (Dunikowski-Habdank), завідувач кафедри мінералогії протягом 1889–1925 рр., удосконалив методику викладання навчальних курсів з петрографії: для студентів стало можливим вивчати різноманітні гірські породи на основі зібраних і впорядкованих колекцій гірських порід з музейних фондів. З 1925 по 1933 рр. на кафедрі, яка тоді мала назву мінералогії і петрографії, під керівництвом проф. Зигмунда Вейберга (Weyberg) вивчали проблеми генезису гірських порід. Уже з 1928 р. на кафедрі запровадили чотирирічну підготовку магістрів-мінералогів і петрографів. Відомий педагог і дослідник у галузі мінералогії й петрографії Карпат і Волино-Поділля проф. Юліан Токарський (Tokarski) протягом 1933–1939 рр. завідував кафедрою мінералогії, а 1939–1941 – кафедрою петрографії і читав такі курси, як «Вступ до петрографії», «Хімічна петрографія», «Спеціальні розділи петрографії» та ін. Він виховав плеяду молодих кадрів і сформував відому мінералого-петрографічну школу, представниками якої були С. Біскупський (Biskupski) (завідувач кафедри мінералогії і декан природничого факультету протягом 1939–1941 рр.) і К. Смулік-овський (Smulikowski) (очолював кафедру мінералогії у 1944 р.) [3; 4; 11].

З 1945 р. новостворену кафедру петрографії у Львівському університеті очолювали професори В. Соболев (1945–1960), Д. Бобровник (1960–1974), О. Бобрієвич (1974–1995), доц. В. Хмелівський (1995–2002), проф. К. Свешніков (2002–2006), доценти А. Сеньковський (2006–2011) та І. Побережська (2011–2012), проф. В. Гулій (2012–2019).

У 1946 р. при кафедрі петрографії створено шліфувальну майстерню, яка функціонує досі. Вона була оснащена шліфувальними станками різних конструкцій для виготовлення шліфів гірських порід, аншліфів руд і пластинок мінералів для петрографічних, мінералогічних і термобарогеохімічних досліджень. Нею завідували Є. Мандзюк, В. Гринчук, В. Онишко, Ю. Сидор [3], нині – Є. Дворжак. У 1950 р. з ініціативи тоді ще доцента

Д. Бобровника розпочала роботу міжкафедральна лабораторія літологічних досліджень, яку очолювали В. Чернишова (1950–1995) та І. Гнатів (1995–2020). У 2020 р. лабораторію об'єднали з лабораторією фізичних методів досліджень мінералів і гірських порід. Нині це лабораторія мінерало-петрологічних досліджень, якою завідує К. Бурбан.

У 2020 р. внаслідок реструктуризації й реорганізації геологічного факультету кафедру петрографії було об'єднано з кафедрою мінералогії. І з 1 січня 2020 р. це стала кафедра мінералогії, петрографії і геохімії, якій у 2024 р. було присвоєно ім'я видатного мінералога, багатолітнього завідувача кафедри мінералогії, професора Ореста Матковського. Протягом 2020–2023 рр. новостворену кафедру очолював доц. Л. Скакун, а у червні 2023 р. за конкурсом на посаду завідувача кафедри обрано доц. І. Побережську [13; 14]. Отже, власне кафедра петрографії функціонувала на геологічному факультеті з 1945 по 2020 рр.

Нині кафедра є випусковою зі спеціальності Е4 Науки про Землю і має значні здобутки у розробці навчальної та навчально-методичної літератури. Серед навчальних дисциплін петрографічного профілю протягом останніх 10 років викладачі кафедри читали або читають зараз такі курси, як «Основи петрографії», «Петрографія», «Петрографія кристалічних порід», «Кристалооптика», «Основи мінералогії, петрографії, літології», «Основи петрології», «Основи фізичної геохімії і петрології» «Петрологія алмазоносних порід», «Геологія та мінералогія родовищ діамантів», «Літологія», «Методи літологічних досліджень», «Аналіз петрохімічних даних» (для бакалаврів), «Петрологія», «Методи петрологічних досліджень», «Магматичні комплекси України», «Метаморфізм», «Метасоматичні процеси», «Літогенез», «Осадкові формації і фації», «Літологічний практикум», «Стадіальний аналіз осадових порід», «Рентгеноструктурний аналіз гірських порід та руд», «Рентгенофазовий аналіз гірських порід та руд» (для магістрів).

Навчальний процес на кафедрі петрографії у різні роки забезпечували професори, доктори геол.-мін. наук О. Бобрівич [7; 15], Д. Бобровник [18], В. Гулій, В. Соболев [1; 2; 9; 10; 12], К. Свешніков, Л. Ткачук, доценти, кандидати геол.-мін. наук Н. Варганова, О. Горбачевська, Ю. Дорошенко, Е. Єлісеєв, Є. Лавренко, А. Сеньковський [16], Є. Сливко, В. Степанов, Ю. Федоришин, В. Хмелівський, асистенти, кандидати геол.-мін. наук Є. Костюк (Макарова), І. Кривошлик, старші наукові співробітники, кандидати геол.-мін. наук М. Безверхній, В. Лашманов, А. Смоголюк, О. Хмелівська, асистенти С. Войтович, К. Калюжна, В. Поповчак, Є. Рибачок, а також навчально-допоміжний персонал: О. Бура, І. Гнатів, К. Гулькіна, М. Дмитренко, Л. Зубкова, Т. Рева, Т. Соловійова, Л. Федоренко, В. Чернишова. Сьогодні петрографічні дисципліни на кафедрі читають доценти І. Побережська та О. Костюк, їм допомагає інженер І. Попова (рис. 1–5).

Протягом майже 20 років (1970–1980-ті роки) на кафедрі готували фахівців-петрографів для таких країн, як В'єтнам, Куба, Лаос, Монголія, НДР, Сирія, пізніше серед студентів з інших країн були представники Алжиру, Анголи, Буркіна-Фасо, Кот-д'Івуару, Сенегалу, останніми роками – з Туркменістану.

Викладачі кафедри петрографії опублікували близько 50 підручників, навчальних посібників і різноманітних навчально-методичних матеріалів (рис. 6), зокрема: *Бобровник Д. П.* Петрографія осадових порід (1974); *Свешніков К. І., Побережська І. В.* Природні сполучення магматичних гірських порід (2005); *Хмелівський В. О., Побережська І. В., Костюк О. В., Гнатів І. Г.* Таблиці та рисунки до лабораторних робіт з курсу «Петрографія осадових порід» (2005); *Свешніков К. І., Побережська І. В., Дорошенко Ю. П.* Магматичні породи та породні сполучення: петрографія, петрологія, методи досліджень (2010); *Дорошенко Ю. П., Побережська І. В., Федоришин Ю. І.* Основи кристалооптики породотвірних мінералів гірських порід (2012); *Степанов В. Б., Генералова Л. В., Дворжак Т. С.* Методичні вказівки до лабораторних занять із курсів «Аналіз петрохімічних даних» і «Геодинамічні



Рис. 1. Колектив кафедри петрографії, 1958 р.

Зліва направо сидять: проф. Д. Бобровник, доц. Н. Варганова, зав. каф., проф. В. Соболев, доц. О. Горбачевська, асист. К. Калюжна; стоять: аспірантки С. Плакса, Г. Слоневська, З. Ляшкевич, асист. Є. Рибачок, ст. лаб. В. Чернишова, асп. Г. Шайнюк, асист. Є. Костюк (Макарова).



Рис. 2. Співробітники кафедри петрографії, 2004 р.

Зліва направо сидять: зав. лаб. І. Гнатів, зав. каф., проф. К. Свешніков, доц. Є. Сливко; стоять: доценти А. Сеньковський, В. Степанов, асист. О. Костюк, доц. В. Хмельівський, ст. наук. співробітник Р. Затхей, зав. шліфувальної майстерні В. Онишко.



Рис. 3. Колектив кафедри петрографії, 2008 р.
Зліва направо: асист. С. Войтович, доценти Ю. Дорошенко, І. Побережська, зав. лаб. І. Гнатів,
зав. каф., доц. А. Сеньковський, асистенти У. Борняк, О. Костюк, доц. В. Степанов.



Рис. 4. Співробітники кафедри петрографії, 2013 р.
Зліва направо сидять: інж. О. Бура, зав. каф., проф. В. Гулій, доц. І. Побережська; стоять: інженери
Ю. Сидор, І. Попова, зав. лаб. І. Гнатів, доценти У. Борняк, В. Степанов, О. Костюк.



Рис. 5. Співробітники кафедри мінералогії, петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського, 2023 р.

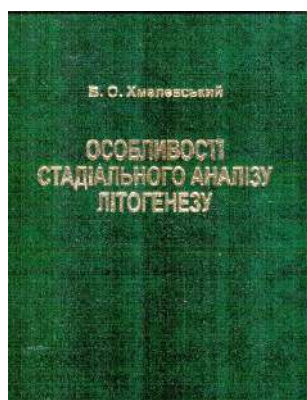
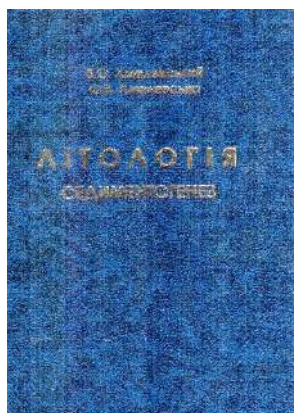
Зліва направо: інж. лаб. І. Шведа, зав. лаб. К. Бурбан, доц. С. Кріль, інженери Є. Дворжак, І. Попова, зав. каф., доц. І. Побережська, асист. Н. Білик, доценти Н. Словотенко, О. Костюк, У. Борняк, Л. Скакун.

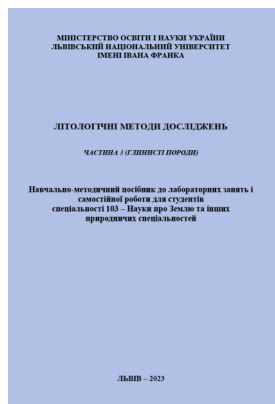
реконструкції». Ч. 1 (2013), Ч. 2. Петрохімічні коефіцієнти, індекси, модулі, параметри (2014); Степанов В. Б., Побережська І. В., Костюк О. В., Гнатів І. Г. Методи вивчення осадових порід (2014); Хмелівський В. О. Особливості стадіального аналізу літогенезу (2015); Хмелівський В. О., Хмелевська О. В. Літологія. Седиментогенез (2015); Хмелівський В. О., Хмелевська О. В. Літологія. Літогенез. Осадіві породи (2015); Дорошенко Ю. П., Побережська І. В., Степанов В. Б., Костюк О. В. Петрографія кристалічних порід. Ч. 3. Метаморфічні породи (2015); Дорошенко Ю. П., Побережська І. В. Петрографія кристалічних порід. Ч. 4. Метасоматичні породи (2016); Побережська І. В., Костюк О. В. Літологічні методи досліджень. Ч. 1 (уламкові породи) (2017); Костюк О. В., Побережська І. В., Борняк У. І. Літологічні методи досліджень. Ч. 2 (карбонатні породи) (2021); Костюк О. В., Побережська І. В. Літологічні методи досліджень. Ч. 3 (глинисті породи) (2023); Костюк О. В., Побережська І. В., Генералова Л. В., Борняк У. І., Войтович С. П., Цільмак О. В., Білик Н. Т. Літологічні методи досліджень. Ч. 4 (кременисті породи) (2026) та ін.

Періодичні видання



*Підручники, навчальні посібники, тексти лекцій
та інші навчально-методичні видання*

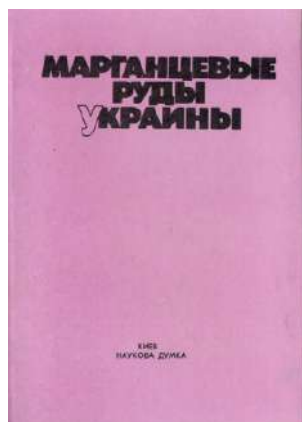
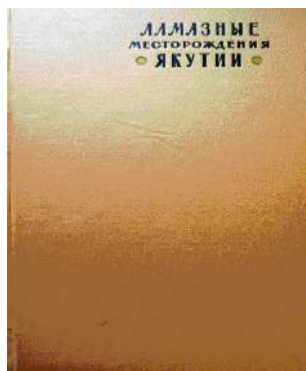




Монографії



Монографії (продовження)



Видання перше і єдине
Львівський національний університет імені Івана Франка

ШАЦЬКЕ ПООЗЕР'Я:
ХАРАКТЕРИСТИКА АБІОТИЧНИХ
І БІОТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ
ЕКОСИСТЕМ

Збірник праць, А. 9, 60 с., 1998
ІЛД ДУАВКА

ЛВ 888
Видання шосте, 2015
160 с., Івано-Франківськ
2015

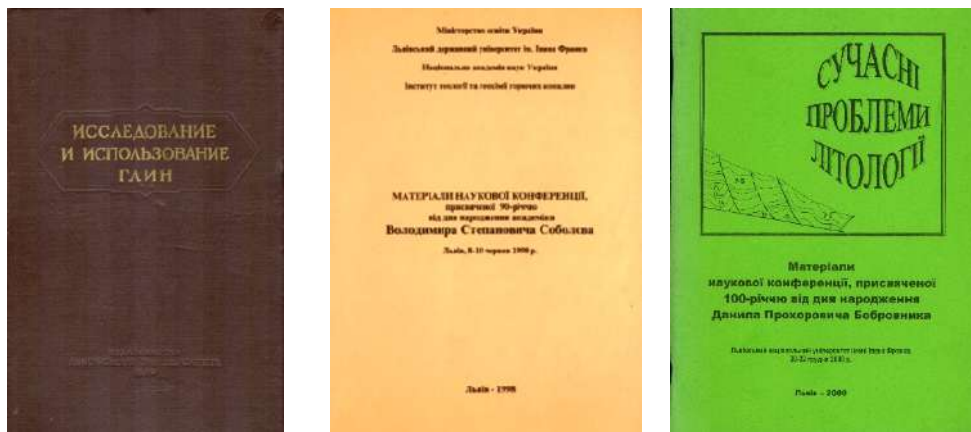
Матеріали наукових конференцій

Рис. 6. Праці співробітників кафедри петрографії

Студенти під час навчання на кафедрі проходять навчальні польові практики в різних куточках України. Серед них Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо, села Міжгір'я і Кваси (Закарпатська обл.), Полицький кар'єр базальтів та Володимирецьке родовище бурштину на Рівненщині, м. Кам'янець-Подільський, села Китайгород і Маліївці на Хмельниччині, міста Кремінець, Заліщики, Бучач, печера Оптимістична (Тернопільська обл.), с. Крилос (Івано-Франківська обл.), с. Підкамінь (Львівська обл.) та ін. [14].

Понад 30 здобувачів закінчило аспірантуру на кафедрі петрографії. Серед них кандидатські дисертації свого часу захистили такі молоді вчені: О. Горбачевська (1954), М. Фішкін (1954), В. Золотухін (1958), З. Ляшкевич (1959), О. Ушакова (1960) – науковий керівник В. Соболев; Я. Плакса (1965), В. Хмелівський (1968), А. Шайнюк (1969), Г. Бойчук (1972), Ю. Карпенчук (1975) – наук. кер. Д. Бобровник; І. Кривошлик (1984, наук. кер. О. Бобрієвич), М. Кошіль (2002, наук. кер. А. Сеньковський), С. Войтович (2017, наук. кер. В. Гулій).

Від початку діяльності кафедри петрографії її співробітники активно провадили різноманітні наукові дослідження. На кафедрі розвивали такі наукові напрями: розсипна алмазонасність Якутського й Архангельського регіонів, Українського щита і його схилів; неогенові вулканічні комплекси Закарпаття та пов'язана з ними рудоносність; глауконітові відклади України та використання глауконіту в промисловості й охороні довкілля; Бурштинське родовище мангану та інші залізо-манганові рудопрояви Західної України; фосфоритосні відклади України; літологія та умови утворення карбонатних відкладів Львівсько-Волинської западини; петрографія докембрійських утворень Воронежсько-Українського мегаблока; розчленування і систематика магматичних порід на підставі виділення ізоморфних і псевдоморфних рядів магматичних формацій тощо.

Протягом останніх десяти років працівники кафедри в межах робочого часу виконували та виконують такі науково-дослідні роботи: «Геохімічні моделі абіогенного походження концентрацій вуглеводнів» (2014–2018) та «Мінералого-геохімічне моделювання взаємодії силікатних і карбонатних порід за різних умов, температур, тисків і складу флюїдів» (2019–2022) (науковий керівник В. Гулій); «Петрологічні моделі еволюції глибинних порід та їх використання для прогнозно-пошукових цілей» (2016–2020)

та «Мінералого-геохімічні і петрологічні дослідження порід різновікових комплексів центральних та західних регіонів України» (2025–2027) (І. Побережська); «Літогенетичні особливості та рудоносність осадових формацій Карпат» (2017–2020) та «Літолого-петрологічні дослідження генезису осадових, магматичних та метаморфічних комплексів порід західної і центральної частин України та проблеми їхнього генезису» (2022–2024) (О. Костюк); «Дослідження кам'яного матеріалу пам'ятників культурної спадщини Галичини» (2016–2020) та «Мінералого-петрографічні дослідження геотуристичних об'єктів та пам'ятників культурної спадщини Західної України» (2021–2023) (У. Борняк) [14].

Співробітники кафедри петрографії за 80-річну історію опублікували понад 750 наукових праць, серед них відомі монографії та фундаментальні наукові статті В. Соболева, О. Бобрієвича, Д. Бобровника та інших видатних учених. Серед монографій останніх 20-ти років зазначимо такі: «Дослідження Дністра: 10 років громадської екологічної експедиції «Дністер» (співавтор А. Сеньковський, 1998); «Мінерали Українських Карпат. Борати, арсенати, фосфати, молібдати, сульфати, карбонати, органічні мінерали і мінералоїди» (співавт. А. Сеньковський, В. Хмелівський, 2003); «Геолого-генетична типізація золоторудних родовищ України» (співавтор В. Степанов, 2004); «Шацьке поозер'я: характеристика абіотичних і біотичних компонентів екосистем» (співавт. В. Хмелівський, О. Костюк, В. Лашманов, О. Хмелівська, 2008); «Мінерали Українських Карпат. Процеси мінералоутворення» (співавтор В. Степанов, 2014); «Фактори загрози біорізноманіттю заповідних територій Українських Карпат, Розточчя та Західного Полісся» (співавтор О. Костюк, 2016) та ін. (див. рис. 6).

Серед статейних публікацій, які ілюструють надзвичайну різноманітність наукових інтересів співробітників кафедри петрографії, наведемо такі праці: «До вивчення кристалічних порід околиць м. Хмельник Вінницької області» (Рибачок, 1961); «До питання про генезис самородної сірки Прикарпатських родовищ» (Бобровник, 1967); «Корундові кристалічні сланці в центральній частині Українського щита» (співавтор Є. Лавренко, 1976); «Металогенія золота Українських Карпат» (співавтор В. Степанов, 1994); «Геохіміко-петрохімічні особливості кімберлітів Приазов'я» (співавтор Ю. Федоришин, 1998); «Наукове обґрунтування перспектив корінної та розсипної алмазносності території України» (співавтор О. Бобрієвич, 2000); «Проблеми систематики вулканічних серій основного складу» (співавтор К. Свешніков, 2001); «Особливості серпентинізації та карбонатизації кімберлітів Приазов'я» (співавтор Ю. Федоришин, 2002); «Морфологія та оптичні властивості алмазних кубів та тетрагексаєдрів із кімберлітів» (співавтор І. Побережська, 2003); «Про формування сульфідів у мідистих відкладах Скибових Карпат» (Костюк, 2004); «Нова теригенно-мінералогічна провінція у сучасних озерних відкладах північно-західної частини Українського Полісся» (співавт. В. Хмелівський, В. Лашманов, 2005); «Умови утворення гранітоїдів палеопротерозойської тектономагматичної активізації Українського щита за хімічним складом біотиту» (співавтор К. Свешніков, 2005); «Сапропелеві мули Полісся (на прикладі Шацьких озер)» (співавт. В. Хмелівський, О. Костюк, 2010); «Перша знахідка кусонгіту в експлозивних утвореннях України» (співавт. І. Побережська, В. Степанов, 2014); «Компонентний склад штучного каменю історичної частини м. Львова» (Сеньковський, Степанов, Андріяшева, Побережська, 2014); «Особливості мінерального складу та походження карбонатитів Сіліньярві (Фінляндія)» (співавт. В. Гулій, В. Степанов, І. Побережська, 2015); «Мінералого-петрографічні особливості вулканічних порід Вигорлат-Гутинського пасма (околиці смт Кольчино та с. Кленовець Закарпатської області)» (співавт. І. Побережська, В. Степанов, 2017); «Перспективи мінералого-петрографічних досліджень природного

каміння деяких архітектурних та сакральних споруджень минулих часів на території Галичини» (Борняк, Гулій, 2018); «Серпентини – індикатори метаморфічних і геодинамічних перетворень мезозойських перидотитів Внутрішніх Українських Карпат» (співавтор В. Степанов, 2019); «Родовища алебастру Галичини» (Гулій, Борняк, Костюк, Степанов, 2019); «Pumpellyite from metabasalts of the Ukrainian Carpathians» (Poberezhska, Bilyk, Matkovskiy, Slyvko, Dubrovskiy, 2023); «Верхньокрейдово-нижньоеоценові аргіліти Зовнішніх Карпат (петрохімічний та палеогеодинамічний аспекти)» (співавтор О. Костюк, 2024); «Прояви басаніту в сульфатних відкладах Городищенського родовища гіпсів» (Білай, Побережська, Білик, Менцінський, 2025); «Features of the mineral composition of andesites from the Matekivskiy and Obavskiy volcanic complexes of the Vyhohat-Nutynske ridge (Ukrainian Carpathians)» (co-author I. Poberezhska, 2025) та ін.

Співробітники кафедри петрографії брали активну участь в організації та проведенні під егідою геологічного факультету різноманітних наукових форумів різного рангу, як-от «Осадове мінералоутворення» (1955), «Дослідження і використання глини» (1957), Третя вулканологічна нарада (1969), конференція, присвячена 90-річчю від дня народження академіка В. Соболева (1998) [6], наукова конференція з сучасних проблем літології (до 100-річчя від дня народження проф. Д. Бобровника, 2000), «Проблемні питання мінералогії і петрології» (до 100-річчя від дня народження акад. В. Соболева, 2008) та ін. Науковці кафедри неодноразово представляли результати своїх досліджень на таких наукових форумах, що їх регулярно організовує геологічний факультет: Наукові читання імені академіка Євгена Лазаренка (з 1997 р.), «Проблеми геології фанерозою України» (з 2022 р. «Проблеми геології України»), «Геотуризм: практика і досвід». Щороку взимку колектив кафедри бере участь у пленарних засіданнях на факультеті в межах Звітної наукової конференції ЛНУ імені Івана Франка [14].

Співробітники кафедри петрографії тісно співпрацювали з колегами різних наукових установ і виробничих організацій України та інших країн. Зокрема, у 1997 р. Ю. Федоришин брав участь в організації та проведенні виставки «Мінерали України» на XV міжнародній виставці-ярмарку у Мішкольці (Угорщина). У 2002 р. К. Свешніков був учасником проекту «Eurobridge», присвяченому комплексному дослідженню літосфери докембрійського кратона Північно-Східної Європи. У межах проекту він керував навчальними практиками студентів Вроцлавського, Сілезького університетів та Краківської гірничої академії, які відбувались у Криворіжжі та Криму. Згідно з укладеними угодами працівники кафедри проходили міжнародне наукове стажування у Варшавському університеті (Ю. Федоришин, 1999), Вроцлавському університеті (аспірантка А. Бучинська, 2002), Університеті прикладних наук м. Рига (О. Костюк, 2022). У 2010 р. Ю. Дорошенко у складі делегації геологічного факультету на запрошення монгольських випускників відвідав Монголію. Львів'яни взяли участь у церемонії відкриття національного свята «Наадам» з нагоди 804-ї річниці Монголії й відвідали унікальне комплексне золото-мідь-молібденове родовище Оюу Толгой в пустелі Гобі. Родовище відкрите за участю випускника факультету 1991 р., учня Ю. Дорошенка Тумур-Очірин Мунхбата [8; 13].

Викладачі кафедри петрографії завжди залучали до наукових досліджень талановиту студентську молодь. Зокрема, протягом 1976–1993 рр. при кафедрі активно працювала міжфакультетська студентська науково-дослідна група «Шельф», створена 1975 р. з метою проведення систематичних комплексних досліджень природи, культурних пам'яток та екологічних проблем Українського Полісся (на прикладі Шацького приозер'я), розробки рекомендацій з їхньої охорони та раціонального використання. Від геологічного факультету групою керували В. Хмельський, В. Лашманов та Е. Янчук. Студенти-геологи досліджували особливості літологічного складу донних і прибережних

відкладів Шацьких озер, проблеми літогенезу моренних відкладів регіону. У складі групи, яка налічувала близько 450 студентів, були також представники біологічного, географічного, історичного, юридичного, філологічного факультетів університету та інших ЗВО Києва, Луцька, Тернополя й Івано-Франківська. Група була одним із ініціаторів створення Шацького національного природного парку. За час існування групи «Шельф» результати досліджень стали підґрунтям для написання 40 дипломних і 100 курсових робіт. У 1982 р. студент А. Сморщок та доц. В. Хмелівський здобули III премію на Другому всесоюзному конкурсі «Екотехніка-82» за працю «Шацькі озера і деякі проблеми їх охорони» [5; 17; 19].

Студенти кафедри петрографії під керівництвом А. Сеньковського протягом 1995–2010 рр. брали активну участь у роботі громадської еколого-культурологічної експедиції «Дністер», яка була організована у Львові ще 1988 р. Товариством Лева. Дослідницька група на катамаранах і байдарках сплавлялася за течією Дністра з кількадедними зупинками для досліджень у гирлах найбільших допливів Дністра (іноді практикували й піші походи). Головні об'єкти досліджень – води Дністра та його приток, ґрунти берегів, джерела забруднення вод, ґрунтів і повітря, вода в криницях [3; 13; 16; 19]. За результатами експедиції 2002 р. М. Кошіль захистила кандидатську дисертацію на тему «Донні відклади верхньо-середньої частини р. Дністер (еколого-геохімічний аспект)». У 2025 р. участь в експедиції «Дністер» брала У. Борняк.

На кафедрі зберігається величезна колекція зрізів, а також шліфів гірських порід і породоутворювальних мінералів. Відразу після заснування кафедри петрографії Мінералогічний музей передав їй численні збірки гірських порід і шліфів. Упродовж усього існування кафедри ці колекції регулярно поповнювалися завдяки активній діяльності викладачів і співробітників, студентів і випускників факультету. Упорядковано навчальні колекції магматичних, метаморфічних і метасоматичних порід (понад 600 зрізів) та осадових утворень (понад 300). У скляних вітринах і запасниках зберігається понад 900 зрізів різноманітних гірських порід і породоутворювальних мінералів з усього світу. Представлені практично всі гірські системи Євразії – Альпи, Карпати, Кавказ, Урал, Тянь-Шань, Памір, Саяни, Алтай. Привертає увагу колекція ефузивних порід із Закарпаття, Сибіру, Камчатки, Курильських островів, Кавказу. Окрема вітрина присвячена породам Українського щита. Час від часу працівники кафедри оновлюють вітрини, у яких виставлено приватні кам'яні колекції викладачів – У. Борняк, В. Гулія, Ю. Дорошенка, І. Побережської та зрізи, привезені студентами з навчальних практик. Із зрізів порід, що зберігаються у фондах, неодноразово komponували колекції для проведення Всеукраїнських студентських олімпіад і конкурсів.

Навчальна колекція шліфів налічує понад 4 300 одиниць і охоплює шліфи мінералів і різноманітних гірських порід. У запасниках зберігаються шліфи, зроблені до 1945 р., а також шліфи, що їх свого часу передавали на кафедру співробітники Львівської геолого-розвідувальної експедиції та УкрНДГРІ. Не можна не відзначити важливу роль у створенні навчальних колекцій шліфів таких співробітників кафедри, як Ю. Дорошенко, Є. Лавренко, В. Хмелівський, І. Побережська та ін. Зберігаються також окремі колекції шліфів порід Українського щита, Передкарпатського регіону, осадів Чорного моря, кімберлітів, Алданського та Індійського щитів, Забайкалля й інших регіонів. Завдяки чималим фондам шліфів викладачі мають змогу регулярно поповнювати чи оновлювати навчальні збірки.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Кафедра петрографії ЛНУ імені Івана Франка за період з 1945 р. пройшла славний творчий шлях. Здобутки представників кафедри високо оцінені науковою спільнотою України, і не тільки. Зокрема, В. Соболев став лауреатом Державної премії у галузі науки і техніки (1950). Премією імені академіка

В. І. Вернадського АН України відзначено А. Сеньковського (1994). Золотою медаллю «Людина року» (1998) Американського біографічного інституту та іменною срібною медаллю «Видатні люди XX століття» (2000) у номінації ІВС Кембриджу (Великобританія) нагороджено О. Бобрівича. За підготовку фахівців для Монголії медаллю «800-річчя Монголії» нагороджено Ю. Дорошенка (2010). Державна геологічна служба України нагородила пам'ятним знаком А. І. Лутугіна «За заслуги у розвідці надр» Ю. Федоришина [3; 13; 14].

Сучасна кафедра мінералогії, петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського є провідною в підготовці висококваліфікованих дослідників речовинного складу геологічних об'єктів. Її мета – підготовка фахівців, які здатні розв'язувати складні наукові і прикладні задачі щодо вибору методів досліджень, аналізу мінералогічних, петрологічних і геохімічних даних, моделювання петрологічних і геохімічних процесів та інтерпретації результатів дослідження. Колектив кафедри і надалі докладатиме максимум зусиль щодо підготовки кваліфікованих професіоналів, здатних успішно вирішувати комплексні геологічні проблеми [14]. Для реалізації поставлених завдань потрібно зміцнити кадровий потенціал кафедри, також доцільно розширювати всебічну співпрацю з колегами з інших ЗВО відповідного профілю, геологічних інституцій і виробничих організацій України та інших країн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бакуменко І. Т., Павлишин В. І. В. С. Соболев – видатний петролог і мінералог. *Записки Укр. мінерал. т-ва*. 2008. Т. 5. С. 136–140. URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/items/968eef02-a651-487f-ab9c-9b9d81c2dd41>
2. Бакуменко І. Т., Матковський О. І., Хмелівський В. О. Життєвий і творчий шлях В. С. Соболева. *Мінерал. журн.* 1998. Т. 20. № 6. С. 5–9.
3. Білоніжка П., Матковський О., Павлунь М., Сливко Є. Геологічний факультет Львівського національного університету імені Івана Франка (1945–2010). Львів: ВЦ ЛНУ, 2010. 520 с.
4. Бобрівич О. П., Хмелівський В. О., Затхей Р. А. З історії кафедри петрографії Львівського держуніверситету. *Проблеми геологічної науки та освіти в Україні* : тези доп. наук. конф., присвяченої 50-річчю геол. ф-ту. Львів : ЛДУ імені Івана Франка, 1995. С. 21–23.
5. Костюк О., Дворжак Т., Дворжак Є., Богданова М. Міжфакультетська студентська науково-дослідна група підводних досліджень «Шельф»: спогади і перспективи діяльності (до 50-річчя від часу заснування). *80 років геологічному факультету: нові тренди розвитку геологічної освіти і науки* : матеріали міжнар. конф., присвяченої 80-річчю геол. факультету ЛНУ імені Івана Франка. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2025. С. 166–169. URL: https://necu.org.ua/wp-content/uploads/2025/10/80_tezy_compressed.pdf
6. Матеріали наукової конференції, присвяченої 90-річчю від дня народження академіка В. С. Соболева / відп. ред. О. І. Матковський. Львів, 1998. 98 с.
7. Матковський О. Внесок професора О. П. Бобрівича у вивчення надр України (до 80-річчя від дня народження). *Мінерал. зб.* 2009. № 59. Вип. 1. С. 179–185. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1143>
8. Матковський О. Про поїздку в Монголію. *Мінерал. зб.* 2010. № 60. Вип. 2. С. 159–162. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2010_60_2_19
9. Матковський О., Бакуменко І. Академік В. С. Соболев – видатний мінералог і петрограф XX століття (до 100-річчя від дня народження). *Мінерал. зб.* 2008. № 58. Вип. 1–2. С. 4–18.

10. Матковський О. І. Внесок академіка В. С. Соболева у розвиток мінералогії в Україні (до 110-ї річниці від дня народження). *Записки Укр. мінерал. т-ва*. 2018. Т. 15. С. 119–121.
11. Матковський О. І., Павлунь М. М. Розвиток геології у Львівському національному університеті імені Івана Франка. *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол.* 2005. Вип. 19. С. 4–21.
12. Матковський О. І., Федоришин Ю. І. Львівський період науково-педагогічної діяльності В. С. Соболева і його значення для розвитку мінералогії та петрографії в Україні. *Мінерал. журн.* 1998. Т. 20. № 6. С. 10–17.
13. Павлунь М., Матковський О., Сливко Є., Білоніжка П., Іваніна А. Геологічному факультету Львівського національного університету імені Івана Франка 75 років. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 208 с. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2014/11/75-rokiv.pdf>
14. Павлунь М., Ціхонь С., Сливко Є., Гайовський О., Дворжак Т. Геологічному факультету Львівського національного університету імені Івана Франка 80 років. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2025. 178 с. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/80-richchia-fakultetu.pdf>
15. Побережська І., Сливко Є. До 95-річчя від дня народження Олександра Павловича Бобрівича. *Мінерал. зб.* 2023. № 73. С. 67–71. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/347/327>
16. Сливко Є., Побережська І., Шакін А. Андрій Юрійович Сеньковський (некролог). *Мінерал. зб.* 2011. № 61. Вип. 1–2. С. 186–189. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/viewFile/1013/1007>
17. Хмелівський В. Внесок міжфакультетської студентської науково-дослідної групи підводних досліджень «Шельф» у вивчення Українського Полісся. *Мінерал. зб.* 2005. № 55. Вип. 1–2. С. 201–204. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/viewFile/1248/1232>
18. Хмелівський В., Зарицький П., Матковський О., Білоніжка П. Науково-педагогічна спадщина професора Д. П. Бобровника (до сторіччя з дня народження). *Мінерал. зб.* 2002. № 51. Вип. 2. С. 141–151.
19. Хмелівський В. О., Артюх В. С., Стецюк В. М. Комплексні студентські науково-дослідні групи як ефективний метод організації студентської науково-дослідної роботи (на прикладі досвіду груп «Шельф» та «Дністер»). *Наук. вісн. УкрДЛТУ*. 1998. Вип. 94. С. 133–136.

REFERENCES

1. Bakumenko, I. T., & Pavlyshyn, V. I. (2008). V. S. Sobolev – vydatnyi petroloh i mineraloh [V. S. Sobolev – an outstanding petrologist and mineralogist]. *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 5, 136–140. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/968eef02-a651-487f-ab9c-9b9d81c2dd41>
2. Bakumenko, I. T., Matkovskiy, O. I., & Khmelivskiy, V. O. (1998). Zhyttievyi i tvorchi shliakh V. S. Sobolevia [The life and career of V. S. Sobolev]. *Mineralogical Journal*, 20 (6), 5–9.
3. Bilonizhka, P., Matkovskiy, O., Pavlun, M., & Slyvko, Ye. (2010). *Heolohichniy fakultet Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka (1945–2010)* [Faculty of Geology of the Ivan Franko National University of Lviv (1945–2010)]. Lviv: PC of LNU.
4. Bobriievych, O. P., Khmelivskiy, V. O., & Zatkhei, R. A. (1995). Z istorii kafedry petrohrafii Lvivskoho derzhuniversitytetu [History of the Department of Petrography of Lviv State University]. In *Problems of geological science and education in Ukraine: Abstracts of reports of the Sci. Conf. dedicated to the 50th anniversary of the Faculty of Geology* (pp. 21–23). Lviv: State University of Lviv.

5. Kostiuk, O., Dvorzhak, T., Dvorzhak, Ye., & Bohdanova, M. (2025). Mizhfakultetska studentska naukovo-doslidna hrupa pidvodnykh doslidzhen «Shelf»: spohady i perspektyvy diialnosti (do 50-richchia vid chasu zasnuvannia) [Interfaculty student research group for underwater research «Shelf»: Memories and prospects for activity (to the 50th anniversary of its founding)]. In *80 years of the Faculty of Geology: new trends in the development of geological education and science: Materials of the Intern. Conf. dedicated to the 80th anniversary of the Faculty of Geology of the Ivan Franko National University of Lviv* (pp. 166–169). Lviv: Ivan Franko National University of Lviv. URL: https://necu.org.ua/wp-content/uploads/2025/10/80_zezy_compressed.pdf
6. Matkovskiy, O. I. (Ed.) (1998). *Materialy naukovoi konferentsii, prysviachenoï 90-richchiiu vid dnia narodzhennia akademika V. S. Sobolieva* [Materials of the Sci. Conf. dedicated to the 90th anniversary of the birth of Acad. V. S. Sobolev]. Lviv.
7. Matkovskiy, O. (2009). Vnesok profesora O. P. Bobriievycha u vyvchennia nadr Ukrainy (do 80-richchia vid dnia narodzhennia) [Contribution of Professor O. P. Bobriievych to the study of the subsoil of Ukraine (to the 80th anniversary of his birth)]. *Mineralogical Review*, 59 (1), 179–185. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1143>
8. Matkovskiy, O. (2010). Pro poizdku v Monholiiu [About a trip to Mongolia]. *Mineralogical Review*, 60 (2), 159–162. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2010_60_2_19
9. Matkovskiy, O., & Bakumenko, I. (2008). Akademik V. S. Soboliev – vydatnyi mineraloh i petrohraf XX stolittia (do 100-richchia vid dnia narodzhennia) [Academician V. S. Sobolev – outstanding mineralogist and petrologist of the 20th century (to the centenary anniversary)]. *Mineralogical Collection*, 58 (1–2), 4–18.
10. Matkovskiy, O. I. (2018). Vnesok akademika V. S. Sobolieva u rozvytok mineralohii v Ukraini (do 110-yi richnytsi vid dnia narodzhennia) [Contribution of Academician V. S. Sobolev to the development of mineralogy in Ukraine (to the 110th anniversary of his birth)]. *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 15, 119–121.
11. Matkovskiy, O. I., & Pavlun, M. M. (2005). Rozvytok heolohii u Lvivskomu natsionalnomu universyteti imeni Ivana Franka [Development of geology at the Ivan Franko National University of Lviv]. *Visnyk of the Lviv University. Ser. Geol.*, 19, 4–21.
12. Matkovskiy, O. I., & Fedoryshyn, Yu. I. (1998). Lvivskiy period naukovo-pedahohichnoi diialnosti V. S. Sobolieva i yoho znachennia dla rozvytku mineralohii ta petrohrafiï v Ukraini [The Lviv period of scientific and pedagogical activity of V. S. Sobolev and its significance for the development of mineralogy and petrography in Ukraine]. *Mineralogical Journal*, 20 (6), 10–17.
13. Pavlun, M., Matkovskiy, O., Slyvko, Ye., Bilonizhka, P., & Ivanina, A. (2020). *Heolohichnomu fakultetu Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka 75 rokiv* [Seventy-five years of the Faculty of Geology of the Ivan Franko National University of Lviv]. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2014/11/75-rokiv.pdf>
14. Pavlun, M., Tsikhon, S., Slyvko, Ye., Haiovskyi, O., & Dvorzhak, T. (2025). *Heolohichnomu fakultetu Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka 80 rokiv* [Eighty years of the Faculty of Geology of the Ivan Franko National University of Lviv]. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/80-richchia-fakultetu.pdf>
15. Poberezhska, I., & Slyvko, Ye. (2023). Do 95-richchia vid dnia narodzhennia Oleksandra Pavlovycha Bobriievycha [To the 95th anniversary of the birth of Oleksandr Pavlovych Bobriievych]. *Mineralogical Collection*, 73, 67–71. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/347/327>

16. Slyvko, Ye., Poberezhska, I., & Shakin, A. (2011). Andrii Yuriiovych Senkovskiy (nekroloh) [Andrii Yuriiovych Senkovskiy (obituary)]. *Mineralogical Review*, 61 (1–2), 186–189. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/viewFile/1013/1007>
17. Khmelivs'kyi, V. (2005). Vnesok mizhfakultetskoï studentskoï naukovо-doslidnoï hrupy pidvodnykh doslidzhen «Shelf» u vyvchennia Ukrainskoho Polissia [Contribution of the interfaculty student scientific-research group of underwater investigations «Shelf» in the Ukrainian Polissya studies]. *Mineralogical Collection*, 55 (1–2), 201–204. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/viewFile/1248/1232>
18. Khmelivs'kyi, V., Zaryts'kyi, P., Matkovs'kyi, O., & Bilonizhka, P. (2002). Naukovopedahohichna spadshchyna profesora D. P. Bobrovnyka (do storichchia z dnia narodzhennia [Scientific-pedagogical legacy of professor D. P. Bobrovnyk (by one century from birthday)]. *Mineralogical Collection*, 51 (2), 141–151.
19. Khmelivskiy, V. O., Artiukh, V. S., & Stetsiuk, V. M. Kompleksni studentski naukovо-doslidni hrupy yak efektyvnyi metod orhanizatsii studentskoï naukovо-doslidnoï roboty (na prykladi dosvidu hrup «Shelf» ta «Dnister») [Integrated student research groups as an effective method of organizing student research work (based on the experience of the «Shelf» and «Dnister» groups)]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 94, 133–136.

DEPARTMENT OF PETROGRAPHY OF THE LVIV UNIVERSITY (TO THE 80TH ANNIVERSARY OF ITS FOUNDATION)

Oleksandr Kostyuk, Inha Popova

oleksandr.kostyuk@lnu.edu.ua; inga.popova@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

The comprehensive activities of the Department of Petrography, which was founded in 1945, were briefly analysed. It was the only department in Ukraine that had such a name and trained petrographers. In 2020, as a result of the reorganization of the Faculty of Geology, it was merged with the Department of Mineralogy, and now it is the Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry named after Professor Orest Matkovskiy.

The contribution of the Department's staff to the development of petrology and lithology is described. Some aspects of the educational process, achievements in the preparation and publication of educational and methodological literature are highlighted. The Department trained petrographers for such countries as Algeria, Angola, Burkina Faso, Vietnam, Ivory Coast, Cuba, Laos, Mongolia, East Germany, Senegal, Syria, Turkmenistan in different years. A grinding workshop was created at the Department in 1946, and in 1950 – an interdepartmental laboratory of lithological research, which in 2020 was merged with the laboratory of physical methods of research of minerals and rocks and is now a laboratory of mineralogical and petrological research.

The main scientific directions developed at the Department since its foundation by the famous professors V. Soboliev, D. Bobrovnyk, O. Bobrievych, K. Sveshnikov, their colleagues and students are analysed. The scientific publications of the Department staff, as well as their active participation in the organization and holding of various scientific forums of various ranks, are characterized.

Students and staff of the Department of Petrography participated in the activities of the interfaculty student research group «Shelf» in 1976–1993, and in the ecological and cultural expedition «Dniester» – in 1995–2010, 2025.

Currently, the Department is developing such main scientific areas as mineralogical and geochemical studies of hydrothermal and magmatic deposits; petrological studies of magmatic and metamorphic

complexes; lithology of sedimentary complexes; mineralogical and geochemical support during restoration work, etc. To implement the tasks set, the Department's specialists actively cooperate with domestic and foreign scientific and production institutions.

Key words: Department of Petrography, Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry named after Professor Orest Matkovskyi, petrology, lithology, educational process, research work, scientific publication, history of science, Faculty of Geology, Ivan Franko National University of Lviv.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 001-057.4:[549+550.4](477)

СТОРИЧНИЙ ЮВІЛЕЙ МАРТИНА МАТВІЙОВИЧА СЛИВКА

Євгенія Сливко, канд. геол.-мін. наук, доцентка кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології
yevheniya.slyvko@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2731-0602>

Петро Білоніжка, канд. геол.-мін. наук
<https://orcid.org/0009-0005-2177-3138>

Лариса Сливко,
завідувачка Музею рудних формацій
<https://orcid.org/0009-0004-3857-8382>
larysa.slyvko@lnu.edu.ua

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

У листопаді 2026 р. виповнюється 100 років від дня народження Мартина Матвійовича Сливка – багаторічного доцента кафедри мінералогії Львівського університету, кандидата геолого-мінералогічних наук, відомого мінералога і геохіміка. Він закінчив геологічний факультет 1951 р., й відтоді все його життя і науково-педагогічна діяльність були пов’язані з кафедрою мінералогії. У науковому доробку вченого майже 80 наукових праць, серед яких монографія (1955) та навчальний посібник з геохімії у трьох частинах, написаний українською мовою (1965, 1966, 1975).

Майже 50 % наукових праць М. Сливка присвячено мінералам групи турмаліну. Він досліджував морфологію кристалів, їхнє забарвлення (та його геохімічне значення), густину, хімічний склад, рідкісні і розсіяні елементи, ізоморфні заміщення, включення мінералоутворювальних розчинів (у тім числі механізми їхнього утворення), ріст кристалів (вільний ріст, регенерація), механізми відштовхування й захоплення твердих частинок кристалами, що ростуть, скульптуру граней. Учений займався питаннями процесів турмалінізації у гранітах і пегматитах та місцем турмаліну в процесі формування різних пегматитів (слюдяних, рідкіснометалевих та ін.), працював над класифікацією мінералів групи турмаліну, почав застосовувати математичну статистику до вивчення конституції мінералу.

Низка праць присвячена різноманітним аспектам регіональної мінералогії, історії науки та шляхам розвитку мінералогії.

Проблеми геохімічного спрямування, що їх поглиблено вивчав М. Сливко, пов’язані, насамперед, з явищем ізоморфізму в мінералах, ізоморфними заміщеннями хімічних елементів, взаємозв’язком між періодичною системою елементів та ізоморфізмом.

Мартин Матвійович був прекрасним педагогом, викладав низку основних курсів і спецкурсів з мінералогії та геохімії. Його любили студенти і поважали колеги. І загалом він був талановитим і прискіпливим ученим, надзвичайно ерудованою й позитивною людиною та справжнім патріотом України.

Ключові слова: Мартин Матвійович Сливко, мінералогія, геохімія, кристалохімія, турмалін, ізоморфізм, науково-педагогічна діяльність, кафедра мінералогії, геологічний факультет, Львівський університет.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.11>

Восьмого листопада 2026 р. виповниться сто років від дня народження Мартин Матвійовича Сливка – знаного українського мінералога, геохіміка, кристалохіміка, кандидата геолого-мінералогічних наук, доцента кафедри мінералогії Львівського державного (нині національного) університету імені Івана Франка, талановитого науковця й педагога, який, на жаль, пішов від нас дуже рано – 5 лютого 1974 р., на 48-му році життя.

Мартин Сливко народився на Житомирщині – у с. Новий Дорогинь Народицького (нині Коростенського) району 8 листопада 1926 р. у селянській родині. У 1928 р. в селі організували комуну, і діда Сливка розкуркулили, тому, щоб заробити грошей на життя, батько Матвій влаштувався грабарем (землекопом) на залізниці. Це дало змогу купити коня й почати разом з сім'єю, у якій було п'ятеро дітей, кочове грабарське життя. Важко було... Із дітей вижила найстарша сестра Євдокія та Мартин, який був третьою дитиною.

Коли почалася Друга світова війна, родина Сливків жила в білорусі, звідки юнака 1944 р. призвали в армію. Мартин воював на території Польщі, а в лютому 1945 р. поблизу Щецина його було поранено.

Та Мартин не падав духом: після демобілізації він з золотою медаллю закінчив підготовче відділення Львівського університету і вступив на перший курс геологічного факультету (фото 1).



Фото 1. Студент I курсу М. Сливко (стоїть у центрі) разом з іншими студентами та викладачами геологічного факультету на першій практиці, літо 1947 р.

Після смерті мами й тата у 1947 р. з грошима було сутужно, однак на допомогу прийшли друзі та Свген Костянтинович Лазаренко – тодішній завідувач кафедри мінералогії й декан геологічного факультету. Він влаштував Мартин на посаду препаратора, а пізніше – лаборанта кафедри мінералогії. У 1951 р. після закінчення з відзнакою геологічного факультету М. Сливко вступив в аспірантуру до проф. Є. Лазаренка (фото 2). Кандидатську дисертацію «Дослідження турмалінів деяких родовищ СРСР» успішно захистив 1954 р., а в 1956 р. йому присвоєно вчене звання доцента. І до кінця життя він працював доцентом кафедри мінералогії (фото 3, 4).



Фото 2. Є. Лазаренко (у центрі) серед своїх учнів, 1953 р.
Зліва направо: М. Сливко, Ю. Пекун, М. Фішкін, Г. Смирнов.

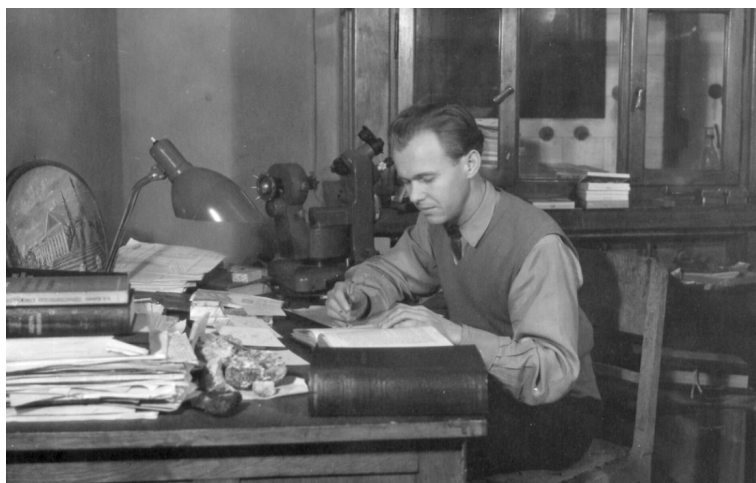


Фото 3. Доцент М. Сливко готується до лекції, 1957 р.

Наукові інтереси Мартина Матвійовича охоплювали широке коло питань. Серед них конституція і кристаломорфологія мінералів, їхня систематика й термінологія, регіональна і генетична мінералогія, фізика мінералів, кристалохімія, загальна геохімія, геохімія окремих елементів, історія науки, шляхи розвитку мінералогії та ін. У доробку вченого майже 80 наукових праць, серед яких одна монографія.

Зазначимо, що наукою Мартин Сливко почав займатися ще в студентські роки. Він брав активну участь в експедиціях, що їх Є. Лазаренко організовував у повоєнні роки, – на теренах України (Карпати, Поділля, Волинь, Донбас, Приазов'я), в Уральських горах (фото 5) та Забайкаллі. Під час таких експедицій збирали мінералогічний матеріал для

Мінералогічного музею геологічного факультету і проведення різнобічних наукових досліджень.



Фото 4. Доц. М. Сливко та завідувач нещодавно створеної Проблемної лабораторії геохімічних і радіометричних методів розшуку родовищ корисних копалин Г. Чеджемов на кафедрі мінералогії, грудень 1957 р.

Майже половина наукових праць М. Сливка присвячена мінералам групи турмаліну, зокрема [3; 4; 7]. Учений вивчав морфологію, фізичні властивості, хімічний склад, онтогенію, включення мінералоутворювальних розчинів та ін. Кристаломорфологічні дослідження науковця супроводжувалися гоніометричними вимірюваннями (фото 6) і побудовою ортогональних проєкцій вершинних граней і зведених гномостереографічних проєкцій кристалів (1963).

Було з'ясовано, що у вертикальному (призматичному) поясі шерлу переважають грані гексагональної призми $\{11\bar{2}0\}$, тоді як грані тригональної призми $\{10\bar{1}0\}$ підпорядковані; у поліхромних турмалінах – навпаки: у більшості кристалів тригональна призма звичайно різко домінує над гексагональною.

Зіставлення побудованих М. Сливком кривих морфолого-статистичних рядів турмалінів (1952) та загального морфолого-статистичного ряду для кристалів засвідчило, що обрис кристалів турмаліну зумовлений першими трьома–чотирма формами, однаковими для всіх кристалів. Проте зафіксовано відмінність у кількості граней на головках кристалів: поліхромні відміни мінералу з родовищ Na-Li пегматитів мають обмежену кількість форм, а кристалам із родовищ інших типів притаманне багатство цих форм. За морфолого-статистичними дослідженнями виявилось, що найважливішими простими формами на головках кристалів турмаліну (а їх налічується понад сто) є тригональні піраміди $\{10\bar{1}1\}$ або $\{01\bar{1}1\}$ з обчисленою полярною відстанню $27^{\circ}20'$. Мартин Матвійович уперше дослідив особливості скульптури вершинних граней турмаліну, різноманітність якої визначена безліччю способів наростання граней і причин появи дислокацій.



Фото 5. Професор Є. Лазаренко та студент М. Сливко в мінералогічному музеї
Ільменського заповідника (Урал). Мінералогічна практика, 1949 р.

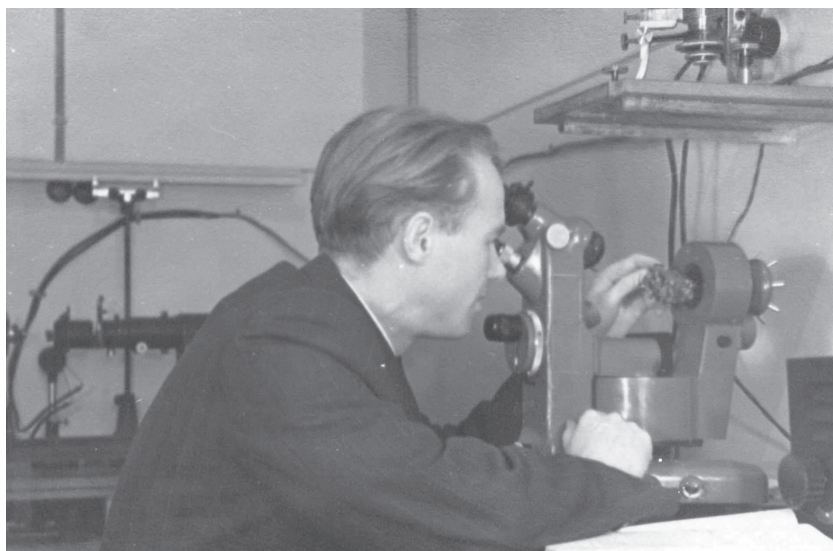


Фото 6. Мартин Сливко виконує гоніометричні дослідження кристалів турмаліну,
початок 1960-х років

Учений узагальнив наявні на той час аналітичні дані стосовно хімізму мінералів групи турмаліну, на підставі чого виділив чотири групи елементів, які є в їхньому складі (1962): 1) основні мінералоутворювальні – O, Si, Al, B, Na, H; 2) головні або типові мінералоутворювальні – Fe, Mg, Li, Mn; 3) другорядні мінералоутворювальні – Ti, V, Cr, Pb; 4) елементи-домішки: ізоморфні – Rb, Cs, Be, Sr, Ba, Sc, Tl, Ga, Ge, Ni, Co та ін. і сумнівно ізоморфні – Zr, Nb, Mo, W, As, Sb та ін. За головними мінералоутворювальними компонентами М. Сливко побудував чотирикутні діаграми складу шерл–ельбаїт–дравіт, тсилаїзит–ельбаїт–дравіт, шерл–ельбаїт–тсилаїзит, шерл–тсилаїзит–дравіт. Завдяки цим діаграмам виявлено важливу закономірність – розрив ізоморфізму між дравітом і ельбаїтом. Незмішувальність цих компонентів у природних процесах учений пов'язував з явищем геохімічного порядку, зумовленим різними умовами утворення магнезійного й літєвого турмалінів. На підставі отриманих результатів уперше побудовано чотирикомпонентну тетраедричну діаграму складу мінералів групи турмаліну. Вона дала змогу виявити незмішувальність двох ізоморфних рядів – шерл–дравітового і шерл–ельбаїт–тсилаїзитового і на цій підставі виділити два мінеральних види (1962).

За твердженням О. Матковського і П. Білоніжки [1], Мартин Сливко започаткував в Україні вивчення фізики мінералів, оскільки ще в середині 1950-х років почав досліджувати природу забарвлення мінералів групи турмаліну (1955). Численні вимірювання кривих вбирання на об'єктивному спектрофотометрі дали підстави зробити висновок, що основними елементами-хромофорами в цих мінералах є Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+} , які майже ніколи не зустрічаються окремо один від одного. Власне сумісна дія двох чи декількох хромофорів, різні їх поєднання та різні кількісні співвідношення (завдяки ізоморфним заміщенням) зумовлюють цілу низку типів і відтінків та спричинюють усе спостережуване розмаїття забарвлення кристалів. Дослідник визначив п'ять основних типів кривих спектрального поглинання, які відповідають таким катіонам-хромофорам або їх групам у турмаліні: Fe^{3+} ; Fe^{2+} ; $Fe^{3+}+Fe^{2+}$; Mn^{3+} ; Cr^{3+} за наявності Fe^{2+} і Fe^{3+} . Абсолютна кількість хромофору визначає інтенсивність забарвлення кристалів (1955). Мартин Матвійович також дослідив природу термічного вицвітання рожевого турмаліну і з'ясував генетичне значення цього явища. Побудовані вченим графіки залежності об'ємів і параметрів елементарної комірки та світлозаломлення від хімічного складу не втратили свого значення й нині [2], оскільки дають змогу визначати хімічний склад мінералу.

Важливе місце в дослідженнях М. Сливка посідали проблеми генезису турмаліну. Він вивчав, передусім, онтогенію та включення мінералоутворювальних розчинів у кристалах (1952, 1955, 1958, 1973). Виділено первинні, уявно-первинні та вторинні включення, які класифіковано за способом і місцем утворення: у віцинальних заглибленнях на гранях призм; у площинах зростання блоків мозаїчних кристалів; під час відштовхування й захоплення твердих частинок; у процесі заліковування поперечних і поздовжніх тріщин; під час регенерації кристалів.

Результати термобарогеохімічних досліджень турмалінів із шерл–мусковітових пегматитів околиць Корця на Житомирщині дали підстави для висновку, що процес турмалінізації в них відбувався завдяки дії рідких розчинів, насичених CO_2 . У подібних пегматитах Уралу й Мамсько-Чуйського району Сибіру вивчено індивідуальні включення в шерлі та сингенетичному кварці, а також склад водних витяжок. Результати засвідчили, що насичення мінералоутворювальних розчинів CO_2 на метасоматичній стадії формування пегматитів – це їхня характерна ознака. Комплекс отриманих даних дав змогу М. Сливку підсумувати, що турмаліни в пегматитах не є винятково пневматолітовими утвореннями, як свого часу писав О. Ферсман, вони можуть кристалізуватися з гідротермальних розчинів [1].

Під час природних спостережень і експериментальних досліджень Мартин Матвійович виявив, що ріст кристалів турмаліну відбувається кількома способами, які можуть змінювати один одного. Власне цим, а також широким діапазоном термодинамічних умов кристалізації можна пояснити виняткову неоднорідність внутрішньої будови кристалів турмаліну, що виявлено в блоковій структурі, грубій чи тонкій мозаїчності, наявності порожнин (плоских або трубчастих), твердих, газо-рідких і багатофазових включень [2].

Крім турмаліну, М. Сливко вивчав і інші мінерали. У співавторстві з В. Павлишиним (фото 7) вийшли праці, присвячені ізоморфній змішуваності CaCO_3 – MnCO_3 (1962), конституції тригональних карбонатів (1967) та знахідці у волинських пегматитах опалу, що містить органічну речовину (1967).

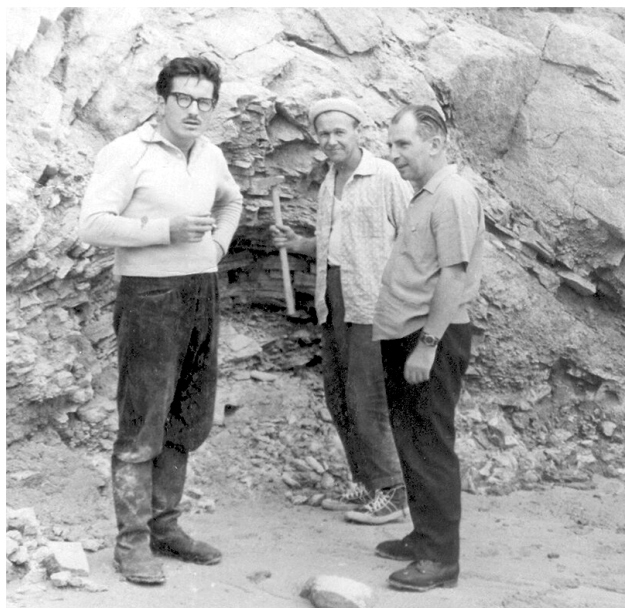


Фото 7. В. Павлишин (ліворуч), М. Сливко (у центрі) та О. Матковський перед розкритим тілом камерного пегматиту. Володарськ-Волинський, 1967 р.

Серед робіт регіонально-мінералогічного спрямування зазначимо також праці про жильні карбонати Нагольного кряжа (1949), мінералогію діоритів с. Курчиця на Житомирщині (1950), алофан району с. Вишково на Закарпатті (1953), карбонатні стяжіння в юрських відкладах Карадагу (1956, співавтор М. Фішкін (фото 8)), целестин Придністров'я (1958, співавтор Є. Лазаренко), сфалерит Мангазейського родовища (1958, співавтор Є. Прошенко), цеоліти Закарпаття (1961, співавтор Е. Лазаренко) та ін.

Чільне місце серед наукових уподобань Мартина Матвійовича посідають питання історії мінералогії та перспектив її розвитку. Відповідні праці, написані у співавторстві з Є. Лазаренком та О. Матковським (1959, 1967), вийшли друком у вітчизняних, всесоюзних і зарубіжних [11] виданнях. Наголошено, що розвиток сучасної мінералогії повинен ґрунтуватися на історико-генетичному принципі, який дає змогу вивчати еволюцію мінеральної речовини в планетному аспекті й раціонально підходити до з'ясування високих концентрацій мінералів в окремих ділянках земної кори (1967).



Фото 8. Перед корпусом геологічного факультету, 1957 р. Зліва направо: М. Фішкін, гостя львів'ян І. Йогансен – дружина В. Міхєєва, автора відомого «Рентгенометричного визначника мінералів», С. Рибачок, подружжя Сливків – Олена і Мартин

Теоретичні напрацювання М. Сливка мінералого-геохімічного спрямування пов'язані, насамперед, з проблемою ізоморфізму. Серед них сутність поняття *ізоморфізм*, ізоморфні заміщення хімічних елементів, концентрація і розсіяння елементів у земній корі, взаємозв'язок між періодичною системою хімічних елементів та ізоморфізмом тощо (1961, 1962, 1965, 1966, 1969 та ін.). Мартин Матвійович уважав (1969), що вчення про ізоморфізм – це одна з найважливіших зв'язних ланок у ланцюзі хімія–мінералогія–кристалохімія–геохімія. А періодична система елементів – головне джерело теоретичної і прикладної інформації про будову та властивості атомів, їхні асоціації в земній корі. Тому вона завжди буде свого роду провідною зіркою у розвитку вчення про ізоморфізм. Дослідник наполягав на правильному вживанні наукових термінів (1965): ізоморфізм – це здатність речовин, подібних за хімічним складом і однакових або близьких за структурою, утворювати ряди змішаних кристалів (безперервні або з розривом), а ізоморфні заміщення хімічних елементів – це явище заміщення окремих структурних одиниць – атомів, іонів (простих або комплексних) – у кристалічних ґратках мінералів. На підставі стану хімічних елементів і природи хімічного зв'язку у кристалічних ґратках мінералів М. Сливко виділив такі типи ізоморфізму (1965): атомний у структурах з металічним зв'язком і в істотно ковалентних сполуках; іонний (ізозарядний і гетерозарядний); ізоморфізм аніонів (простих і комплексних).

Цикл праць Мартин Матвійовича присвячений геохімії окремих хімічних елементів у різних процесах мінералоутворення. До них належать статті з проблем поведінки в земній корі бору і деяких інших рідкісних елементів, а також кристалохімічних закономірностей їх розсіяння.

Геохімія об'єднувала у М. Сливку науковця й педагога, адже він заклав на геологічному факультеті основи курсу «Геохімія». Мартин Матвійович написав цикл лекцій з цього

курсу [5; 6; 8], який фактично став першим навчальним посібником з геохімії українською мовою. У праці [1] зазначено, що цей посібник «за своєю оригінальністю, доступністю викладу матеріалу та науковістю є сучасним, хоча став, звичайно, бібліографічною рідкістю. Він вигідно відрізняється від багатьох інших таких посібників з геохімії тим, що опис поведінки хімічних елементів у різних геологічних процесах здійснений на кристалохімічній основі». Цикл складається з трьох частин: «Вступні лекції до курсу *Геохімія*» (1966), «Хімічний склад земної кори» (1965) та «Міграція хімічних елементів у земній корі» (вийшла 1975 р., уже після смерті М. Сливка).

У першій частині [6] описано типи хімічного зв'язку атомів у кристалах, закономірності зміни атомних та йонних радіусів хімічних елементів залежно від їхнього місця в періодичній таблиці, ступеня окиснення й зовнішніх параметрів мінералоутворювального середовища, схарактеризовано координаційні числа та їх значення в геохімії, а також деякі методи визначення енергії кристалічної ґратки мінералів, проаналізовано закон геохімічної послідовності кристалізації мінералів, сформульований О. Ферсманом. У другій частині навчального посібника [5] наведено детальний аналіз кларків хімічних елементів земної кори, ізотопний склад, відомий на той час хімічний склад метеоритів. Поглиблено схарактеризовано розподіл хімічних елементів у мінералах та явище ізоморфізму, яке, на думку М. Сливка, має важливе теоретичне і прикладне значення. Оригінальними є відомості про геохімічні зірки елементів, стан і форми їх знаходження в земній корі.

У третій частині посібника [8] розглянуто джерела енергії геохімічних процесів, геохімічні бар'єри та міграцію й колообіг хімічних елементів у природі, схарактеризовано внутрішні і зовнішні (температура, тиск, концентрація, водневий та окисно-відновний потенціали) чинники міграції. На підставі всіх цих даних проаналізовано геохімію власне магматичного, пегматитового та гідротермального процесів і процесів гіпергенезу, у тім числі на сульфідних родовищах; також наведено головні риси геохімії галогенезу.

Крім класичних дисциплін «Мінералогія» і «Геохімія», Мартин Матвійович читав також спецкурси «Кристалохімія», «Мінералогія та геохімія рідкісних і розсіяних елементів», «Мінералогія урану», проводив практичні й лабораторні заняття, керував студентськими курсовими і дипломними роботами, навчальними й виробничими практиками. Він розробив низку методичних матеріалів і робочих програм з мінералогії та геохімії, зокрема, вказівки до складання проектною частини дипломних робіт для студентів-геохіміків та програму першої виробничої практики за спеціальністю «Геохімія» для студентів третього курсу. Доцент Сливко активно залучав студентів до науково-дослідної роботи через наукові студентські гуртки та наукові семінари кафедри.

Ангеліна Андріївна Ясинська, теж багаторічний доцент кафедри мінералогії, у спогадах про М. Сливка писала, що «визначальною рисою педагогічної діяльності Мартина Матвійовича Сливка було властиве йому чуття нового, дисциплінованість у роботі, відданість своєму обов'язку, високому покликанню педагога й ученого. Широка ерудиція, педагогічний талант, виключна працелюбність і цілеспрямованість М. М. Сливка сприяли тому, що його лекції, виступи перед студентською аудиторією, наукові доповіді вирізнялися чіткістю, доступністю викладу, емоційністю, глибиною та новизною, супроводжувалися численними прикладами власних спостережень і досліджень, вони прищеплювали студентам інтерес і любов до мінералів. При цьому напрочуд гармонійно вписувався і зовнішній вигляд Мартина Матвійовича: завжди підтягнутий, стрункий, акуратний, з білосніжним комірцем, без зайвих рухів і жестів, на вустах легка посмішка. Ось він зайшов в аудиторію на першу, вступну лекцію з геохімії на третьому курсі, привітався і трохи схвильованим голосом звернувся до студентів з такими напутніми словами: «Я не хочу, щоб ти знання, які я подам вам, залишилися у вашій пам'яті як зведення ще не зовсім

чітких законів, мертвих канонів, щоб вони залишилися пасивним багажем. Для мене буде найвищою нагородою, якщо ваші геохімічні знання перетворяться у стимул дерзани, у метод наукового пошуку, у дар передбачення» (1970–1972 рр.)» [10].

Мартин Матвійович завжди брав активну участь у різноманітних заходах, що їх організовували університет і геологічний факультет. Тут і будівництво університетського стадіону (фото 9), і наукові конференції (фото 10, 11), і поїздки зі студентами в колгосп на сільськогосподарські роботи (фото 12). Його неодноразово обирали секретарем Ученої ради геологічного факультету.



Фото 9. Мартин Сливко серед співробітників геологічного факультету на будівництві університетського стадіону, 1957 р.

Займався М. Сливко і редакторською роботою. Зокрема, був відповідальним редактором путівника по Мінералогічному музею ЛДУ імені Івана Франка (фото 13) (укладачі М. Коробцова, Н. Лиса, С. Мартинова, 1956) та українського видання підручника Є. Лазаренка «Курс мінералогії», який вийшов у Львівському університеті у трьох частинах: Ч. 1. Загальна мінералогія (1958); Ч. 2. Опис мінералів (1959); Ч. 3. Мінералогія гірських порід і мінеральних родовищ (1961).

Мартин Матвійович був членом Комісії з мінералогії та геохімії Карпато-Балканської геологічної асоціації. За дорученням голови Комісії Є. Лазаренка він розробив принципи складання геохімічного довідника Карпато-Балканської гірської системи і навів схему

його геохімічного опису. Ці розробки було схвалено на засіданні Комісії у Львові та опубліковано 1961 р.



Фото 10. Доценти М. Сливко (ліворуч) та В. Горецький на геологічній екскурсії у Щирці під час наради «Дослідження і використання глин», 1957 р.



Фото 11. На звітній науковій конференції геологічного факультету, ауд. 219, лютий 1972 р.
Зліва направо: М. Сливко, Л. Колтун, Г. Чеджемов, А. Ясинська.



Фото 12. Доценти О. Матковський (ліворуч) та М. Сливко на кукурудзяному полі в Кіровоградській обл., 1970 р.



Фото 13. Доц. М. Сливко у Мінералогічному музеї геологічного факультету, кінець 1960-х років

У вільній від роботи час Мартин Матвійович захоплювався живописом. Після нього залишилося понад 30 картин, головню пейзажів (фото 14, 15), адже це був його найулюбленіший жанр образотворчого мистецтва. Сьогодні ці твори «працюють» для нас і як емоція, і як документ, бо ж деякі красвиди вже зникли назавжди. Є також натюрморти й урбаністичні картини.



Фото 14. М. Сливко. Перед грозою.



Фото 15. М. Сливко. Туман.

П'ятого листопада 1996 р. на геологічному факультеті відбулася урочиста академія, присвячена пам'яті М. Сливка. У ті дні йому було б 70. Виступали друзі, колеги,

учні Мартина Матвійовича – О. Матковський, В. Павлишин, П. Білоніжка, А. Ясинська, З. Бартошинський, В. Шевчук та ін. Багато промовців згадувало, як Мартин Матвійович у 1960-ті роки читав студентам лекції українською мовою і любив приходити на кафедру у вишитих сорочках, які вишивала йому старша сестра Євдокія. В урочистостях також взяла участь журналістка газети «Високий Замок» Світлана Шашко, яка згодом у статті «Загадкові мінерали Мартина Сливка» написала так: «Великий вплив на формування його особистої та наукової долі мала співпраця та дружба з академіком Євгеном Лазаренком. В роки панування «совєтської» ідеології М. М. Сливко був тим, хто власним прикладом проводив на практиці українізацію навчального процесу у ЛДУ. ... Після себе він залишив великий науковий спадок, безліч закоханих у геологію учнів та послідовників. Навіть у родині (дружина, дві дочки, зяті – усі геологи) немає байдужих до геології людей. ... Зрештою, М. Сливко був великим жителюбом, людиною одержимою і талановитою» [9].

Усі, хто знав Мартина Матвійовича, зберігають світлу пам'ять про нього як глибоко ерудовану людину, авторитетного вченого, скрупульозного науковця, чудового педагога і щирого патріота України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Матковський О. І., Білоніжка П. М. Життєвий шлях та творчий доробок М. М. Сливка (до 70-річчя від дня народження). *Мінерал. зб.* 1999. № 49. Вип. 1. С. 204–213. Режим доступу: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1432>
2. Матковський О. І., Білоніжка П. М., Павлишин В. І. Проблеми мінералогії в працях М. М. Сливка (до 70-річчя від дня народження). *Мінерал. журн.* 1996. Т. 18. № 5. С. 108–113.
3. Сливко М. М. Ізоморфні заміщення в турмалінах. *Ювілейна наук. сесія, присвячена 300-річчю Львів. держ. ун-ту імені Івана Франка. Тези доп. секцій геології і географії.* Львів : Вид-во Львів. ун-ту, 1961. С. 40–42.
4. Сливко М. М. Особливості хімічного складу турмалінів шерліт-дравітового ряду. *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол.* 1962. № 1. С. 134–138.
5. Сливко М. М. Хімічний склад земної кори : лекції з курсу «Геохімія». Львів : Вид-во Львів. ун-ту, 1965. 109 с.
6. Сливко М. М. Вступні лекції до курсу «Геохімія». Львів : Вид-во Львів. ун-ту, 1966. 136 с.
7. Сливко М. М. Про місце турмаліну в процесі формування пегматитів (Волинь). *ХІ наук. конф., присвячена підсумкам наук.-дослід. роботи університету за 1965 р. Тези доп. Геологія, географія.* Львів, 1966. С. 7–8.
8. Сливко М. М. Міграція хімічних елементів у земній корі. Львів : ВО «Вища школа», 1975. 100 с.
9. Шишко С. Загадкові мінерали Мартина Сливка. *Високий Замок.* 1996. 28 лист. С. 3.
10. Ясинська А. А. Педагогічна діяльність Мартина Матвійовича Сливка. *Мінерал. зб.* 1999. № 49. Вип. 1. С. 214–216. Режим доступу: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1443/0>
11. Lazarenko Ye. K., Slivko M. M. Paths of development in mineralogy. *Intern. Geol. Rev.* 1967. Vol. 9. N 10. P. 1299–1303.

REFERENCES

1. Matkovsky, O. I., & Bilonizhka, P. M. (1999). Zhyttievyyi shliakh ta tvorchyi dorobok M. M. Slyvka (do 70-richchia vid dnia narodzhennia) [Path in life and creative activities of

- M. M. Slyvko (regarding the 70th anniversary)]. *Mineralogical Collection*, 49 (1), 204–213. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1432> [in Ukrainian]
2. Matkovskiy, O. I., Bilonizhka, P. M., & Pavlyshyn, V. I. (1996). Problemy mineralohii v pratsiakh M. M. Slyvka (do 70-ricchia vid dnia narodzhennia) [Problems of mineralogy in the works of M. M. Slyvko (to the 70th anniversary of his birth)]. *Mineralogical Journal*, 18 (5), 108–113. [in Ukrainian]
 3. Slyvko, M. M. (1961). Izomorfni zamishchennia v turmalinakh [Isomorphous substitutions in tourmalines]. In *Jubilee scientific session dedicated to the 300th anniversary of the Ivan Franko State University of Lviv. Abstracts of reports of the Geology and Geography sections* (pp. 40–42). Lviv: Lviv University Publishing House. [in Ukrainian]
 4. Slyvko, M. M. (1962). Osoblyvosti khimichnogo skladu turmaliniv sherlit-dravitovoho riadu [Features of the chemical composition of tourmalines of the sherlite-dravite series]. *Visnyk of the Lviv University. Ser. Geol.*, 1, 134–138. [in Ukrainian]
 5. Slyvko, M. M. (1965). *Khimichnyi sklad zemnoi kory : leksii z kursu «Heokhimiia»* [Chemical composition of the Earth's crust: Lectures of the course «Geochemistry»]. Lviv: Publishing House of Lviv University. [in Ukrainian]
 6. Slyvko, M. M. (1966). *Vstupni leksii do kursu «Heokhimiia»* [Introductory lectures to the course «Geochemistry»]. Lviv: Publishing House of Lviv University. [in Ukrainian]
 7. Slyvko, M. M. (1966). Pro mistse turmalinu v protsesi formuvannia pehmatytiv (Volyn) [Place of tourmaline in the process of pegmatite formation (Volyn)]. In *XL Sci. Conf., dedicated to the results of the scientific research work of the University for 1965. Abstracts. Geology, Geography* (pp. 7–8). Lviv. [in Ukrainian]
 8. Slyvko, M. M. (1975). *Mihratsiia khimichnykh elementiv u zemnii kori* [Migration of chemical elements in the Earth's crust]. Lviv: PA «Vyscha Shkola». [in Ukrainian]
 9. Shyshko, S. (1996, November 28). Zahadkovi mineraly Martyna Slyvka [Mysterious minerals of Martyn Slyvko]. *Vysoky Zamok*, 3. [in Ukrainian]
 10. Yasynska, A. (1999). Pedahohichna diialnist Martyna Matviiovycha Slyvka [Pedagogical activities of Martyn Matvijovych Slyvko]. *Mineralogical Collection*, 49 (1), 214–216. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1443/0> [in Ukrainian]
 12. Lazarenko, Ye. K., & Slivko, M. M. (1967). Paths of development in mineralogy. *Intern. Geol. Rev.*, 9 (10), 1299–1303.

CENTENNIAL ANNIVERSARY OF MARTYN MATVIOVYCH SLYVKO

Yevheniia Slyvko, Petro Bilonizhka, Larysa Slyvko
yevheniya.slyvko@lnu.edu.ua

Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005

November 2026 marks the 100th anniversary of the birth of Martyn Matviiovych Slyvko, a long-time Associate Professor at the Department of Mineralogy at Lviv University, candidate of geological and mineralogical sciences, and a well-known mineralogist and geochemist. He graduated from the Faculty of Geology in 1951, and since then his entire life and scientific and pedagogical activities have been connected with the Department of Mineralogy. The scientist's scientific output includes almost 80 scientific works, including a monograph (1955) and a textbook on geochemistry in three parts, written in Ukrainian (1965, 1966, 1975).

Almost 50 % of M. Slyvko's scientific works are devoted to minerals of the tourmaline group. He investigated the morphology of crystals, their colour (and its geochemical significance), density, chemical composition, rare and scattered elements, isomorphic substitutions, inclusions of mineral-forming solutions (including the mechanisms of their formation), crystal growth (free growth, regeneration), mechanisms of repulsion and capture of solid particles by growing crystals, and face sculpture. The scientist dealt with the issues of tourmalinization processes in granites and pegmatites and the place of tourmaline in the formation of various pegmatites (mica, rare-metal, etc.), worked on the classification of minerals of the tourmaline group, and began to apply mathematical statistics to the study of the mineral's constitution.

A number of works have been devoted to various aspects of regional mineralogy, the history of science, and the development of mineralogy.

The problems of the geochemical direction, which were studied in depth by M. Slyvko, are related, first of all, to the phenomenon of isomorphism in minerals, isomorphic substitutions of chemical elements, the relationship between the periodic system of elements and isomorphism.

Martyn Matviiovych was an excellent teacher, teaching a number of basic and specialized courses in mineralogy and geochemistry. He was loved by his students and respected by his colleagues. And in general, he was a talented and meticulous scientist, an extremely erudite and positive person, and a true patriot of Ukraine.

Key words: Martyn Matviiovych Slyvko, mineralogy, geochemistry, crystal chemistry, tourmaline, isomorphism, scientific and pedagogical activity, Department of Mineralogy, Faculty of Geology, Lviv University.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ХРОНІКА

УДК 001-057.4:[549+504](477)

ЮВІЛЕЙ ЄВГЕНІЇ СЛИВКО

Петро Волошин, канд. геол.-мін. наук,
зав. кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології
petro.voloshyn@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-4193-6705>

Сергій Ціхонь, канд. геол. наук,
декан геологічного факультету
serhii.tsikhon@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-3423-5767>

Валентина Марусяк, канд. геол. наук,
доцентка кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології
marusyak_v@ukr.net
<https://orcid.org/0009-0002-3156-9606>

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005*

Усе життя Євгенії Мартинівни Сливко, якій 31 жовтня 2025 р. виповнилося 70 років, пов'язане з геологічним факультетом. Вона кандидатка геолого-мінералогічних наук (1986), znana фахівчиня в галузі дослідження акцесорних і рудних мінералів Українського щита, з 2004 р. – доцентка кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології геологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка. Євгенія Сливко – багаторічною відповідальною секретаркою редколегії «Мінералогічного збірника» та вченою секретаркою Львівського відділення Українського мінералогічного товариства.

Нині Є. Сливко викладає такі навчальні дисципліни, як «Екологічна геологія», «Основи геохімії», «Охорона і раціональне використання підземних вод», «Мінеральні води України», «Інженерно-геологічне картування», «Інженерно-геологічні розвідування в районах поширення просадних ґрунтів» та ін. Вона є автором і співавтором 10 навчальних і навчально-методичних праць, серед яких один підручник. Науково-дослідна робота Є. Сливко досить багатогранна, свідченням чого є список її наукових праць. Вона є співавтором семи монографій, автором чи співавтором 125 наукових статей, 80 матеріалів/тез доповідей на міжнародних і вітчизняних наукових форумах, п'яти довідково-інформаційних видань і чотирьох довідково-бібліографічних, а також 27 рукописних звітів про науково-дослідну роботу. Дослідниця брала безпосередню участь або представляла доповіді на майже 30 наукових конференціях і нарадах різного рівня.

Майже 20 років Євгенія Мартинівна була вченим секретарем спеціалізованої вченої ради із захисту кандидатських і докторських дисертацій. Вона є багаторічним активним членом Вченої ради геологічного факультету. Неодноразово виконувала обов'язки вченого секретаря Оргкомітету

різноманітних наукових форумів, що їх організував геологічний факультет, готувала до друку збірники матеріалів цих форумів.

За високі здобутки в науково-педагогічній діяльності Євгенію Мартинівну неодноразово нагороджено грамотами і подяками керівництва ЛНУ імені Івана Франка, профспілкової організації та Львівської міської ради.

Ключові слова: Євгенія Мартинівна Сливко, мінералогія, екологічна геологія, науково-педагогічна діяльність, геологічний факультет, Львівський національний університет імені Івана Франка.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.12>

Тридцять перше жовтня 2025 р. – ювілейна дата у житті Євгенії Мартинівни Сливко: їй виповнилося 70 років. Євгенія Мартинівна – кандидатка геологічно-мінералогічних наук, доцентка кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології Львівського національного університету імені Івана Франка, багаторічна відповідальна секретарка редколегії «Мінералогічного збірника», учена секретарка Львівського відділення Українського мінералогічного товариства.

Євгенія Сливко народилася 31 жовтня 1955 р. у Львові в родині геологів. Її мама й тато закінчили геологічний факультет Львівського державного університету (ЛДУ) імені Івана Франка й аспірантуру на кафедрі мінералогії під керівництвом професора Євгена Костянтиновича Лазаренка, у 1954 р. захистили кандидатські дисертації (*Фурман О.* Мінералогія фосфоритових родовищ Придністров'я; *Сливко М.* Дослідження турмалінів деяких родовищ СРСР). Олена Петрівна (1927–2008) протягом 1950–1954 рр. працювала старшим лаборантом кафедри мінералогії університету, а з 1954 р. до виходу на пенсію – старшим науковим співробітником Інституту геології і геохімії горючих копалин НАН України. Мартин Матвійович (1926–1974) у 1954–1955 р. був асистентом, а з 1956 р. до кінця життя – доцентом кафедри мінералогії.

У 1973 р. Євгенія Сливко закінчила з золотою медаллю львівську середню школу № 4 і поступила на геологічний факультет ЛДУ імені Івана Франка, який успішно закінчила 1978 р., захистивши разом з О. Бобровим комплексний диплом, присвячений усебічному дослідженню магнетитових кальцифірів Секретарської структури в Середньому Побужжі, та отримавши диплом з відзнакою за спеціальністю *геохімія*. Молоду фахівчиню було скеровано на роботу в науково-дослідну частину геологічного факультету, де вона працювала на посаді інженера й молодшого наукового співробітника. Протягом 1981–1984 рр. Євгенія навчалася в аспірантурі на кафедрі мінералогії під керівництвом професора Ореста Ілляровича Матковського й 1986 р. захистила кандидатську дисертацію на тему «Мінералогія і питання генезису докембрійських конгломератів Білокоровицької структури (Український щит)». У 1984–1994 рр. працювала на посаді старшого наукового співробітника Галузевої науково-дослідної лабораторії вивчення речовинного складу рудоносних формацій (керівник – Герман Михайлович Яценко), а пізніше стала її завідувачкою. У 2000 р. Євгенію залучили до навчального процесу: з 01.03.2000 р. її переведено на посаду асистента кафедри мінералогії, а з 01.01.2002 р. – доцента цієї ж кафедри. Читала лекції і проводила лабораторні заняття з таких дисциплін, як «Мінералогічний аналіз», «Загальна геохімія», «Пошукова і технологічна мінералогія». На додаток до курсу «Космічна мінералогія» створила позамережевий локальний веб-сайт «Мінералогія метеоритів», який на той час містив велику кількість ілюстративного і текстового матеріалу, перекладеного з англійської мови на українську. Протягом 2002–2004 рр. Є. Сливко завідувала міжкафедральною лабораторією рентгеноструктурного аналізу і за сумісництвом працювала доценткою кафедри петрографії. З 01.09.2004 р. до нині Євгенія Мартинівна є доценткою кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології ЛНУ імені Івана Франка (фото 1). Атестат доцента отримала 2006 р.



Фото 1. Кафедра екологічної та інженерної геології і гідрогеології, 2019.

Зліва направо у першому ряду: Ю. Крупський, В. Марусяк, А. Бучацька, Є. Сливко, П. Ніколенко, А. Федчун, О. Столяр, у другому ряду: Н. Кремінь, П. Волошин, І. Книш, В. Дяків.

Значним є доробок Є. Сливко в навчальній і навчально-методичній роботі. Останніми десятиліттями вона читала або викладає нині такі дисципліни (для ОКР *Бакалавр* і *Магістр* спеціальностей 101 – Екологія та Е4 – Науки про Землю), як «Екологічна геологія», «Екологічна геологія України», «Основи геохімії», «Геохімія токсичних елементів», «Екологічна геохімія», «Геохімія доквілля», «Охорона і раціональне використання підземних вод», «Мінеральні води України», «Інженерно-геологічне картування», «Інженерно-геологічні розвідування в районах поширення просадних ґрунтів», «Геоекологічний аудит», «Вступ до екологічної діяльності», «Управління природоохоронною діяльністю», «Екологічні функції геологічного середовища», «Охорона геологічної спадщини України», «Концепції сучасного екологічного геотуризму», «Історія розвитку геотуризму в світі та Україні», «Магістерський семінар», «Науково-дослідний практикум» та ін. До всіх дисциплін складено робочі програми й силабуси.

Євгенія Сливко брала активну участь в організації та проведенні першої навчальної практики (фото 2), навчальної магістерської (польової) практики, виробничої (переддипломної) практики для студентів-заочників, керує написанням курсових, дипломних і магістерських робіт (фото 3), неодноразово була радником групи та членом Екзаменаційної комісії із захисту кваліфікаційних робіт.

Є. Сливко – автор і співавтор 10 навчальних і навчально-методичних праць, серед яких підручник *Матковський О., Павлишин В., Сливко Є. Основи мінералогії України*. Львів, 2009. 856 с.; три одноосібних тексти лекцій: *Космічна мінералогія*. Львів, 2002. 74 с.; *Мінералогічний аналіз*. Львів, 2004. 173 с.; *Загальна геохімія*. Львів, 2006. 162 с.; цикл лекцій з курсу «Методи мінералогічних досліджень» у 2-х ч. (Бекеша, Сливко, Білик, 2013).



Фото 2. Є. Сливко (стоїть у центрі) серед викладачів і студентів під час мандрівки по Дністру. Перша навчальна практика, липень 2013 р.



Фото 3. Доц. Є. Сливко з магістром Д. Борняком після захисту його магістерської роботи, 14.12.2024 р.

У співавторстві зі співробітниками кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології видано методичні посібники з виконання та оформлення кваліфікаційної роботи для студентів геологічного факультету за спеціальністю 7.04010601 та 8.04010601 – екологія та охорона навколишнього середовища (2013) та з фахових вступних випробувань для магістрів і спеціалістів геологічного факультету за цією ж спеціальністю у 4-х ч. (2014). У 2023 р. у співпраці з П. Волошиним, В. Марусяк та У. Борняк складено методичні матеріали з підготовки, оформлення та захисту курсової роботи для студентів кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології та з підготовки й оформлення кваліфікаційної (магістерської) роботи для студентів цієї ж кафедри.

Багатогранною є науково-дослідна робота Є. Сливко. Вона є співавтором семи монографій, автором чи співавтором 125 наукових статей, 80 матеріалів/тез доповідей на наукових форумах різного рангу, а також 27 наукових звітів.

Початок наукової діяльності Євгенії Мартинівни пов'язаний з дослідженнями акцесорних мінералів та літолого-мінералогічним вивченням золотоносних докембрійських конгломератів Білорівницької структури в північно-західній частині Українського щита (праці 1982–1993 рр.). Подальші дослідження були спрямовані головню на вивчення різноманітних аспектів золото- й алмазонасності надр України. Під час роботи в Галузевій науково-дослідній лабораторії речовинного складу рудоносних формацій та організованому в межах факультету Інституті геології і мінералогії золота, кольорових металів і алмазів України (1994–1999) Є. Сливко брала участь у виконанні міжгалузевого проекту «Золото України» і тем Міносвіти України з вивчення золото- й алмазонасності різних регіонів країни. У складі групи під керівництвом д-ра геол.-мін. наук Г. Яценка провадила активні дослідження Клишівського родовища золота та нетрадиційних алмазонасних формацій України, займалася проблемами флюїдизацно-експлозивного породо- і рудоутворення докембрію й фанерозою. Результати цих досліджень узагальнені в трьох колективних монографіях, численних статтях і матеріалах наукових форумів [1; 12; 20–23; 30–32 та ін.].

У процесі підготовки підручника з мінералогії України у «Мінералогічному збірнику» вийшли дві узагальнювальні статті Є. Сливко: «Опал у породах України» (2006) [16] та «Берил у геологічних утвореннях України» (2007) [17].

Дослідниця брала активну участь у написанні, підготовці й виданні двох останніх (з п'яти) фундаментальних колективних монографічних праць з циклу «Мінерали Українських Карпат» – «Силікати» (2011) і «Процеси мінералоутворення» (2014).

Протягом усієї наукової-педагогічної діяльності Євгенія Мартинівна тісно співпрацювала зі своїм «мінералогічним» учителем – Орестом Ілляровичем Матковським [18; 19]. Свідченням цього є чотири спільні монографії, 40 наукових статей і понад 20 інших друкованих праць [3; 4; 8; 9 та ін.]. Серед них особливе місце посідають праці, присвячені історії мінералогії, академіку Є. Лазаренку та мінералогічній школі, яка нині має його ім'я [5–7; 11; 13; 26 та ін.]. Євгенія Мартинівна, перша аспірантка Ореста Ілляровича, нині дуже тішиться, що саме в день її народження, 31.10.2023 р., кафедрі мінералогії, петрографії і геохімії геологічного факультету присвоєно ім'я професора Ореста Матковського.

Низка праць Є. Сливко стосується різноманітних еколого-геологічних проблем: *Паранько І. С., Сливко Є. М., Ярков С. В.* Про правомірність виділення наукових напрямів *Екологічна геологія та Економічна геологія* в циклі геологічних наук (2013); *Волошин П., Сливко Є., Книш І., Кремінь Н.* Еколого-геологічні дослідження Українських Карпат і Передкарпаття під час навчальних студентських практик (2018); *Матковський О., Сливко Є.* Відкриття спеціальності *екологічна геологія* на геологічному факультеті Львівського університету – важлива передумова появи кафедри екологічної та інженерної геології

і гідрогеології (2019); *Волошин П., Сливко Є., Кремень Н., Книш І.* Сучасні виклики екологічної науки (2019) та ін.

Останніми роками Є. Сливко брала участь у дослідженні окремих мінералогічних проблем Українського щита [14; 24; 27] і Карпатського регіону [2; 15; 25; 28; 29].

Євгенія Мартинівна є співавтором п'яти довідково-інформаційних видань, які присвячені кафедрі мінералогії (2004) та геологічному факультету ЛНУ імені Івана Франка (2008, 2010, 2020, 2025), а також чотирьох довідково-бібліографічних видань, присвячених Оресту Ілляровичу Матковському (2009, 2014, 2019) та Ангеліні Андріївні Ясинській. Авторству Є. Сливко належать численні гасла у виданні «Encyclopedia. Львівський національний університету імені Івана Франка» (Т. 1 : А–К. Львів, 2011; Т. 2 : Л–Я. Львів, 2014), вона бере активну участь у підготовці другого видання Енциклопедії.

Дослідниця була відповідальним виконавцем або співвиконавцем держбюджетних і госпдогвірних тем, пов'язаних з вивченням різноманітних аспектів золото- й алмазності України. Результати досліджень за цією тематикою висвітлені у 21 науковому звіті.

Євгенія Сливко брала участь або представляла доповіді на майже 30 міжнародних та вітчизняних наукових конференціях і нарадах різного рангу. Серед них XVI симпозиум Міжнародної мінералогічної асоціації (Піза, 1994), XVI конгрес КБГА (Відень, 1998), X конгрес Європейської геологічної спілки (Страсбург, 1999), XXX, XXXI та XXXIII Міжнародні геологічні конгреси (1996, 2000, 2008), з'їзди Українського мінералогічного товариства (фото 4), міжнародні наукові конференції «Прогнозування і розшуки корінних алмазних родовищ» (1999) (фото 5), «Еволюція докембрійських гранітоїдів і пов'язаних з ними корисних копалин в зв'язку з еволюцією земної кори і основними етапами тектоно-магматичної активізації» (2007), «Корінні і розсипні родовища алмазів та найважливіших металів» (2008), «Екологічні проблеми природокористування та ефективне енергозбереження» (2010), «Геологія та рудноність докембрію та фанерозою» (2015), «Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво» (2019), «Геологічні музеї і колекції: їх роль в науці, освіті та туризмі» (2023), «Геотуризм: практика і досвід» (2024) (фото 6) та ін., науково-виробнича нарада «Геологія та питання геологічного картування і вивчення докембрійських утворень Українського щита» (2007), науково-практична конференція «Мінерально-сировинні багатства України: шляхи оптимального використання» (2018, 2020, 2021), наукові конференції «Геологія і корисні копалини України» (2018), «Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні» (2019) та ін.

У 2023–2024 рр. Є. Сливко проходила наукове стажування в Інституті геології і геохімії горючих копалин НАН України з метою поглиблення теоретичних знань і практичних навичок у галузі еколого-геохімічних досліджень геологічного й суміжних середовищ Західного регіону України (180 год, 6 кредитів ЄКТС).

Надзвичайно активною є науково-організаційна діяльність Є. Сливко. З 1999 р. вона є відповідальним секретарем «Мінералогічного збірника», готувала до друку комп'ютерний варіант видання. Тривалий час вона є вченим секретарем Львівського відділення Українського мінералогічного товариства, членом Термінологічної комісії при УМТ і науково-редакторської та погоджувальної груп «Мінералогічної енциклопедії України».

Майже 20 років (1992–2011) Є. Сливко була вченим секретарем спеціалізованої вченої ради геологічного факультету із захисту кандидатських і докторських дисертацій Д 35.051.04. Євгенія Мартинівна – активний багаторічний член ученої ради геологічного факультету (фото 7), була членом методичної ради.



Фото 4. На Дев'ятому з'їзді Українського мінералогічного товариства. Київ, вересень 2017 р.



Фото 5. На міжнародній конференції «Прогнозування і розшуки корінних алмазних родовищ». Крим, Судак, вересень 1999 р.



Фото 6. І. Бучинська (ліворуч) та Є. Сливко на відкритті VI міжнародної конференції «Геотуризм: практика і досвід» у Науковій бібліотеці ЛНУ імені Івана Франка, 25.04.2024 р.

У 2018 р. вона була членом конкурсних комісій геологічного факультету для проведення університетського (першого) етапу Всеукраїнських студентських олімпіад з навчальних дисциплін «Екологічна безпека», «Економіка природокористування» та спеціальності «Екологія». Євгенію Сливко неодноразово призначали вченим секретарем (членом оргкомітету, відповідальним секретарем редакційної колегії) різноманітних наукових форумів, що їх організовував геологічний факультет, причому вона готувала до друку збірники матеріалів цих форумів.



Фото 7. Члени Вченої ради геологічного факультету в День вишиванки, 16.05.2024 р.
Зліва направо: О. Гайовський, О. Костюк, Є. Сливко, С. Ціхонь, С. Давид, І. Шайнога,
Г. Гоцанюк, У. Борняк

Серед них – Наукові читання імені академіка Євгена Лазаренка (П'яті, 2007; Восьмі, 2014; Дванадцяті, 2022; Тринадцяті, 2024), наукові конференції «Наукові основи прогнозування, пошуків та оцінки родовищ золота» (1999), «Мінералогія: історія, теорія і практика» (2004), Всеукраїнська наукова конференція до 20-річчя кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології «Екологічні проблеми надрокористування. Наука, освіта, практика» (фото 8), ювілейні факультетські конференції «Проблемні питання геологічної освіти та науки на порозі XXI століття» (2005), «Стан і перспективи сучасної геологічної освіти та науки» (2010), «Фундаментальне значення і прикладна роль геологічної освіти і науки» (2015), «80 років геологічному факультету: нові тренди розвитку геологічної освіти і науки» (2025).

Науково-педагогічну діяльність Є. Сливко неодноразово відзначено подяками і грамотами ректора університету, профспілок та Львівської міської ради. Зокрема, з нагоди



Фото 8. Організатори наукової конференції до 20-річчя кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології біля озера Геологів на шляху у Верхнє Синьовидне, вересень 2019 р.
Зліва направо: І. Книш, Є. Сливко, П. Волошин, В. Марусяк, Г. Бучацька

80-ї річниці від дня заснування геологічного факультету вона отримала Подяку від міського голови Львова Андрія Садового «за високий професіоналізм, педагогічну майстерність, відданість справі виховання молодого покоління науковців» (фото 9). З нагоди 70-літнього ювілею Євгенію Мартинівну нагороджено Подякою ректора ЛНУ імені Івана Франка Романа Гладішевського за «багаторічну сумлінну працю та вагомі здобутки у науково-педагогічній діяльності», а також Грамотою Львівської обласної організації профспілки працівників освіти і науки України за «багаторічну плідну працю, високу професійну майстерність, вагомий особистий внесок у наукову, навчальну та виховну роботу, підготовку висококваліфікованих фахівців, розвиток професійної галузі в Університеті, громадську активність».

Євгенія Сливко – непересічна і багатогранна людина, дуже працююча, відповідальна й ерудована. Усі її життя присвячене геологічному факультетові, широко диверсифікована науково-педагогічна й організаційна діяльність спрямована на його благо та просякнута щирим бажанням і вірою в успішне майбутнє й нові наукові досягнення факультету. Вона знає англійську мову і радо допомагає своїм колегам з перекладом наукових статей. Уже багато років Євгенія Мартинівна редагує, коректує й готує до друку «Мінералогічний збірник» та збірки матеріалів різних конференцій, що їх проводить геологічний факультет. І робить вона цю роботу так вправно, швидко і без помилок, що дивуєшся! Євгенія – душа колективу факультету, навколо неї завжди гуртуються люди.

Добра, здоров'я та удачі, Євгенію Мартинівно! З роси й води – на довгі роки!



Фото 9. Перший заступник міського голови Львова Андрій Москаленко вручає Євгенії Сливко Подяку від міського голови Львова Андрія Садового на урочистому засіданні з нагоди відкриття міжнародної конференції до 80-річчя геологічного факультету, 24.09.2025 р.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гайовський О. В., Бекеша С. М., Сливко Є. М., Яценко Г. М. Геологія та літолого-структурні умови локалізації брекчієподібних порід центральної частини Українського щита (на прикладі Грузького поля трубоподібних тіл). *Геофиз. журнал*. 2019. Т. 41. № 6. С. 93–110. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190068>
2. Генералова Л. В., Степанов В. Б., Білик Н. Т., Сливко Є. М. Серпентини – індикатори метаморфічних і геодинамічних перетворень мезозойських перидотитів Внутрішніх Українських Карпат. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Геологія, географія, екологія*. 2019. № 51. С. 52–66. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-04>
3. Матковський О., Сливко Є. Шістдесят номерів Мінералогічного збірника. *Мінерал. зб.* 2010. № 60. Вип. 1. С. 3–9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2010_60_1_3
4. Матковський О., Сливко Є. Мінералоутворення в корах звітрювання Українських Карпат. *Мінерал. зб.* 2013. № 63. Вип. 2. С. 98–105. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/923/921>
5. Матковський О., Сливко Є. Наукові читання імені академіка Євгена Лазаренка та їхній внесок у розвиток сучасної мінералогії. *Мінерал. зб.* 2021. № 71. С. 3–27. <http://dx.doi.org/10.30970/min.71.01>
6. Матковський О., Сливко Є. Вшанування пам'яті академіка Євгена Лазаренка. Львів : Видав. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2022. 188 с. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/02/vshanuvannya.pdf>

7. Матковський О., Сливко Є. Лазаренківський період розвитку мінералогії в Україні. *Мінерал. зб.* 2022. № 72. С. 5–22. <http://dx.doi.org/10.30970/min.72.01>
8. Матковський О., Побережська І., Сливко Є. Сімдесят п'ять років «Мінералогічному збірнику». *Мінерал. зб.* 2022. № 72. С. 113–123. <https://doi.org/10.30970/min.72.09>
9. Матковський О., Наумко І., Павлунь М., Сливко Є. Термобарогеохімія в Україні. Львів : Простір-М, 2021. 282 с. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2014/11/Termobarogeokhimiia-v-Ukraini.pdf>
10. Матковський О., Наумко І., Павлунь М., Волошин П., Скакун Л., Білоніжка П., Гулій В. Сливко Євгенія Мартинівна (до 60-річчя від дня народження). *Мінерал. зб.* 2015. № 65. Вип. 2. С. 190–195. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/317>
11. Матковський О. І., Сливко Є. М. Львівське відділення Українського мінералогічного товариства та львівська мінералогічна школа. *Записки Укр. мінерал. т-ва.* 2004. Т. 1. С. 68–78.
12. Матковський О. І., Сливко Є. М. Мінералогічні особливості конгломератів Білорозвицької структури (північно-західна частина Українського щита). *Записки Укр. мінерал. т-ва.* 2015. Т. 12. С. 23–53.
13. Матковський О. І., Сливко Є. М. Історія мінералогії в працях академіка Євгена Лазаренка, його учнів і послідовників (до 110-річчя від дня народження вченого). *Мінерал. журн.* 2022. Т. 44. № 4. С. 140–147. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.04.140>
14. Побережська І., Білик Н., Сливко Є., Бондарчук В., Бірук Д., Меркушин І. Ультрасновні породи Західно-Ляцьківського масиву (Побузький рудний район). *Мінерал. зб.* 2024. № 74. С. 56–66. <https://doi.org/10.30970/min.74.05>
15. Побережська І., Білик Н., Сливко Є., Войтович С., Мігунова Я. Післямагматичні зміни в основних вулканітах рахівсько-чивчинського комплексу. *Мінерал. зб.* 2023. № 73. С. 41–57. <https://doi.org/10.30970/min.73.04>
16. Сливко Є. Опал у породах України. *Мінерал. зб.* 2006. № 56. Вип. 1–2. С. 25–37. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1232/1218>
17. Сливко Є. Берил у геологічних утвореннях України. *Мінерал. зб.* 2007. № 57. Вип. 1. С. 26–38. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1198/1186>
18. Сливко Є. Урочища академія до 85-річчя професора Ореста Матковського. *Мінерал. зб.* 2014. № 64. Вип. 2. С. 227–234. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2014_64_2_22
19. Сливко Є. Дев'яносторічний ювілей Ореста Ілляровича Матковського. *Мінерал. зб.* 2019. № 69. Вип. 1–2. С. 136–147. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/203/191>
20. Яценко Г., Кир'янов М., Калашник Г., Гайовський О., Сливко Є., Яценко І., Соломатина Л. Мінералогічні особливості рудоносних порід чохла Кіровоградського блока Українського щита на прикладі теригенно-глинистої алмазонасної формації. *Мінерал. зб.* 2009. № 59. Вип. 1. С. 144–159.
21. Яценко Г. М., Братчук О. М., Яценко В. Г., Сливко Є. М., Шкуренко І. Є., Гайовський О. В. Етапи активізації флюїдизатно-експлозивного рудоутворення в аспекті мінералогії алмазів і золота Центральної області Українського щита. *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2004. № 31–32. С. 94–95.
22. Яценко Г. М., Гайовський О. В., Сливко Є. М., Братчук О. М., Махай О. І., Якубенко П. Ф., Яценко В. Г. Металогенія золота протоплатформних структур Українського щита (Кіровоградський блок). Київ : Логос, 2009. 243 с.
23. Яценко Г. М., Яценко В. Г., Росихіна А. І., Павлюк Т. О., Сливко Є. М., Лавро В. О., Гайовський О. В. Умови формування та вік потенційно алмазонасних формацій північного заходу України (Прип'ятський вал та Ковельський виступ). *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол.* 2004. Вип. 18. С. 184–189.

24. Bilyk N., Poberezhska I., Skakun L., Slyvko Ye. Peculiarities of the composition and thermodynamic conditions of formation of enderbites of the Haivoronskyi complex (south-western part of the Ukrainian Shield). *Мінерал. зб.* 2022. № 72. С. 72–92. <http://dx.doi.org/10.30970/min.72.06>
25. Heneralova L. V., Stepanov V. B., Bilyk N. T., Slyvko Ye. M. Serpentes as the indicators of geodynamic conditions of Mesozoic peridotites metamorphic transformations in the Marmarosh rocky zone (Inner Ukrainian Carpathians). *Геодинаміка (Geodynamics)*. 2019. № 2 (27). С. 39–47. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.039>
26. Matkovskiy O., Slyvko Ye. On the status of implementation of planned and started by Yevhen Lazarenko scientific works on mineralogy of Ukraine and the Carpathian-Balkan mountain system. *Мінерал. зб.* 2016. № 66. Вип. 1. С. 3–15. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/897/885>
27. Poberezhska I., Bilyk N., Slyvko Ye., Buchynska A., Shevchuk A. Petrological features of acid plutonic rocks of the Osnytskyi complex (Volynskiy megablock of the Ukrainian Shield). *Мінерал. зб.* 2021. № 71. С. 28–46. <http://dx.doi.org/10.30970/min.71.02>
28. Poberezhska I., Biruk D., Skakun L., Brynskii T., Slyvko Ye., Pavlenko A. Features of the mineral composition of andesites from the Matekivskiy and Obavskiy volcanic complexes of the Vyhorlat-Hutynske ridge (Ukrainian Carpathians). *Мінерал. зб.* 2025. № 75. С. 43–56. <https://doi.org/10.30970/min.75.03>
29. Poberezhska I. V., Bilyk N. T., Matkovskiy O. I., Slyvko Ye. M., Dubrovskiy I. M. Pumpellyite from metabasalts of the Ukrainian Carpathians. *Мінерал. журн.* 2023. Т. 45. № 2. С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.02.003>
30. Slyvko Ye. Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian Shield. Part 3. Pivdenno-Zakhidna (Ovrutska) and Mizhrichynska areas. *Мінерал. зб.* 2019. № 69. Вип. 1–2. С. 46–58. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/193/182>
31. Slyvko Ye., Razumieieva N. Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian shield. Part 1. Prypiatska area. *Мінерал. зб.* 2017. № 67. Вип. 1. С. 66–73. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/259/245>
32. Slyvko Ye., Razumeieva N., Bura O. Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian shield. Part 2. Usivska area. *Мінерал. зб.* 2017. № 67. Вип. 2. С. 38–47. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/269/255>

REFERENCES

1. Haiovskyi, O. V., Bekesha, S. M., Slyvko, Ye. M., & Yatsenko, H. M. (2019). Heolohiia ta litoloho-strukturni umovy lokalizatsii brekchiiepodibnykh porid tsentralnoi chastyiny Ukrainskoho shchyta (na prykladi Hruzkooho polia trubkopodibnykh til) [Geology and lithological and structural conditions of brecciated rocks localization of the central part of the Ukrainian Shield (as an example of the Hruzke field of pipe-like bodies)]. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 41 (6), 93–110. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190068>
2. Heneralova, L. V., Stepanov, V. B., Bilyk, N. T., & Slyvko, Ye. M. (2020). Serpentyiny – indykatory metamorfichnykh i heodynamichnykh peretvoren Mezozoiskyykh perydotyiv Vnutrishnykh Ukrainskyykh Karpat [Serpentes as the indicators of Mesozoic peridotites metamorphic and geodynamic transformations in the Internal Ukrainian Carpathians]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 51, 52–66. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-04>

3. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2010). Shistdesiat numeriv Mineralohichnoho zbirnyka [Sixty numbers of «Mineralogical Review»]. *Mineralogical Collection*, 60 (1), 3–9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2010_60_1_3
4. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2013). Mineraloutvorennia v korakh zvetriuvannia Ukrain-skykh Karpat [Mineral-forming processes in the crusts of weathering of the Ukrainian Car-pathians]. *Mineralogical Collection*, 63 (2), 98–105. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/923/921>
5. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2021). Naukovi chytannia imeni akademika Yevhena Laza-renka ta yikhni vnesok u rozvytok suchasnoi mineralohii [Academician Yevhen Lazarenko Scientific Readings and their contribution to the development of modern mineralogy]. *Min-eralogical Collection*, 71, 3–27. <http://dx.doi.org/10.30970/min.71.01>
6. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2022). *Vshanuvannia pamiaty akademika Yevhena Laza-renka [Honouring the memory of Academician Yevhen Lazarenko]*. Lviv: Publishing Centre of Ivan Franko National University of Lviv. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/02/vshanuvannya.pdf>
7. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2022). Lazarenkivskiy period rozvytku mineralohii v Ukraini [Lazarenko's period of development of mineralogy in Ukraine]. *Mineralogical Col-lection*, 72, 5–22. <http://dx.doi.org/10.30970/min.72.01>
8. Matkovskiy, O., Poberezhska, I., & Slyvko, Ye. (2022). Simdesiat piat rokov «Mineralo-hichnomu zbirnyku» [Seventy-five years of the «Mineralogical Collection»]. *Mineralogical Collection*, 72, 113–123. <https://doi.org/10.30970/min.72.09>
9. Matkovskiy, O., Naumko, I., Pavlun, M., & Slyvko, Ye. (2021). *Termobarogeokhimiia v Ukraini [Thermobarogeochimistry in Ukraine]*. Lviv: Prostir-M. URL: <https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2014/11/Termobarogeokhimiia-v-Ukraini.pdf>
10. Matkovskiy, O., Naumko, I., Pavlun, M., Voloshyn, P., Skakun, L., Bilonizhka, P., & Hulii, V. (2015). Slyvko Yevheniia Martynivna (do 60-richchia vid dnia narodzhennia) [Yevheniya Martynivna Slyvko (to the 60th anniversary from the birthday)]. *Mineralogical Collection*, 65 (2), 190–195. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/317>
11. Matkovskiy, O. I., & Slyvko, Ye. M. (2004). Lvivske viddilennia Ukrainskoho mineralohichnoho tovarystva ta lvivska mineralohichna shkola [Lviv branch of the Ukrain-ian Mineralogical Society and Lviv Mineralogical School]. *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 1, 68–78.
12. Matkovskiy, O. I., & Slyvko, Ye. M. (2015). Mineralohichni osoblyvosti konhlomerativ Bilokorovytskoi struktury (pivnichno-zakhidna chastyna Ukrainskoho shchya) [Mineral-ogical features of conglomerates of the Bilokorovytska structure (north-western part of the Ukrainian Shield)]. *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 21, 23–53.
13. Matkovskiy, O. I., & Slyvko, Ye. M. (2022). Istoriia mineralohii v pratsiakh akademika Yevhena Lazarenka, yoho uchniv i poslidovnykiv (do 110-richchia vid dnia narodzhennia vchenoho) [The history of mineralogy in the works of academician Yevhen Lazarenko, his students and followers (to the 110th anniversary of the scientist's birth)]. *Mineralogical Jour-nal*, 44 (4), 140–147. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.04.140>
14. Poberezhska, I., Bilyk, N., Slyvko, Ye., Bondarchuk, V., & Merkushyn, I. (2024). Ultraosnovni porody Zakhidno-Lashchivskoho masyvu (Pobuzkyi rudnyi raion) [Ultrabasic rocks of the Zakhidno-Lashchivskiy massif (Pobuzkyi ore district)]. *Mineralogical Collec-tion*, 74, 56–66. <https://doi.org/10.30970/min.74.05>
15. Poberezhska, I., Bilyk, N., Slyvko, Ye., Voitovych, S., & Mihunova, Ya. (2023). Pisliamahmatychni zminy v osnovnykh vulkanitakh rakhivsko-chyvchynskoho kompleksu [Post-magmatic alterations in the basic volcanites of the Rakhivsko-Chyvchynskiy com-plex]. *Mineralogical Collection*, 73, 41–57. <https://doi.org/10.30970/min.73.04>

16. Slyvko, Ye. (2006). Opal u porodakh Ukrainy [Opal in geological formations of Ukraine]. *Mineralogical Collection*, 56 (1–2), 25–37. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1232/1218>
17. Slyvko, Ye. (2007). Beryl u heolohichnykh utvorenniakh Ukrainy [Beryl in geological formations of Ukraine]. *Mineralogical Collection*, 57 (1), 26–38. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/1198/1186>
18. Slyvko, Ye. (2014). Urochysta akademiia do 85-richchia profesora Oresta Matkovskoho [Solemn academy to 85 years of professor Orest Matkovskiy]. *Mineralogical Collection*, 64 (2), 227–234. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Minzb_2014_64_2_22
19. Slyvko, Ye. (2019). Devianostorichnyi yuvilei Oresta Illiarovycha Matkovskoho [The ninetieth anniversary of Orest Illiarovych Matkovskiy]. *Mineralogical Collection*, 69 (1–2), 136–147. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/203/191>
20. Yatsenko, G., Kyrjanov, M., Kalashnyk, G., Gayovskyi, O., Slyvko, Ye., Yatsenko, I., & Solomatina, L. (2009). Mineralohichni osoblyvosti rudonosnykh porid chokhla Kirovohradskoho bloka Ukrainського shchyta na prykladi teryhenno-hlynystoi almazonosnoi formatsii [Mineralogical features of Kirovohrad block cover ore-bearing rocks (Ukrainian Shield) on example of terrigene-clay diamond-bearing formation]. *Mineralogical Collection*, 59 (1), 144–159.
21. Yatsenko, H. M., Bratchuk, O. M., Yatsenko, V. H., Slyvko, Ye. M., Shkurenko, I. Ye., & Haiovskyi, O. V. (2004). Etapy aktyvizatsii fluidyzatno-eksplozyvnoho rudoutvorennia v aspekti minerahenii almaziv i zolota Tsentralnoi oblasti Ukrainського shchyta [Stages of activation of fluidized-explosive ore formation in the aspect of diamond and gold minerageny of the Central region of the Ukrainian Shield]. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 31–32, 94–95.
22. Yatsenko, H. M., Haiovskyi, O. V., Slyvko, Ye. M., Bratchuk, O. M., Makhai, O. I., Yakubenko, P. F., & Yatsenko, V. H. (2009). *Metaloheniia zolota protoplatformnykh struktur Ukrainського shchyta (Kirovohradskiy blok)* [Gold metallogeny of protoplatform structures of the Ukrainian Shield (Kirovohrad block)]. Kyiv: Logos.
23. Yatsenko, G. M., Yatsenko, V. G., Rosykhina, A. I., Pavliuk, T. O., Slyvko, Ye. M., Lavro, V. O., & Gayovskyi, O. V. (2004). Umovy formuvannia ta vik potentsiino almazonosnykh formatsii pivnichnoho zakhodu Ukrainy (Prypiatskyi val ta Kovelskyi vystup) [Formation conditions and age of potentially diamond-bearing formations of North-Western Ukraine (Prypiatskyi arch and Kovelskyi nose)]. *Visnyk of the Lviv University, Series Geology*, 18, 184–189.
24. Bilyk, N., Poberezhska, I., Skakun, L., & Slyvko, Ye. (2022). Peculiarities of the composition and thermodynamic conditions of formation of enderbites of the Haivoronskyi complex (south-western part of the Ukrainian Shield). *Mineralogical Collection*, 72, 72–92. <http://dx.doi.org/10.30970/min.72.06>
25. Heneralova, L. V., Stepanov, V. B., Bilyk, N. T., & Slyvko, Ye. M. (2019). Serpentes as the indicators of geodynamic conditions of Mesozoic peridotites metamorphic transformations in the Marmarosh rocky zone (Inner Ukrainian Carpathians). *Geodynamics*, 2 (27), 39–47. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.039>
26. Matkovskiy, O., & Slyvko, Ye. (2016). On the status of implementation of planned and started by Yevhen Lazarenko scientific works on mineralogy of Ukraine and the Carpathian-Balkan mountain system. *Mineralogical Collection*, 66 (1), 3–15. URL: <https://publications.lnu.edu.ua/collections/index.php/mineralogy/article/view/897/885>
27. Poberezhska, I., Bilyk, N., Slyvko, Ye., Buchynska, A., & Shevchuk A. (2021). Petrological features of acid plutonic rocks of the Osnytskyi complex (Volynskiy megablock of the Ukrainian Shield). *Mineralogical Collection*, 71, 28–46. <http://dx.doi.org/10.30970/min.71.02>

28. Poberezhska, I., Biruk, D., Skakun, L., Brynskyi, T., Slyvko, Ye., & Pavlenko, A. (2025). Features of the mineral composition of andesites from the Matekivskiyi and Obavskiyi volcanic complexes of the Vyhorlat-Hutynske ridge (Ukrainian Carpathians). *Mineralogical Collection*, 75, 43–56. <https://doi.org/10.30970/min.75.03>
29. Poberezhska, I. V., Bilyk, N. T., Matkovskiy, O. I., Slyvko, Ye. M., & Dubrovskiy, I. M. (2023). Pumpellyite from metabasalts of the Ukrainian Carpathians. *Mineralogical Journal*, 45 (2), 3–15. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.02.003>
30. Slyvko, Ye. (2019). Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian Shield. Part 3. Pivdenno-Zakhidna (Ovrutska) and Mizhrichynska areas. *Mineralogical Collection*, 69 (1–2), 46–58. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/193/182>
31. Slyvko, Ye., & Razumieieva, N. (2017). Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian shield. Part 1. Prypiatska area. *Mineralogical Collection*, 67 (1), 66–73. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/259/245>
32. Slyvko, Ye., Razumeieva, N., & Bura, O. (2017). Fractional structure and mineralogical features of psephytic deposits – potential reservoirs of diamond in the north-western part of the Ukrainian shield. Part 2. Usivska area. *Mineralogical Collection*, 67 (2), 38–47. URL: <https://journals.lnu.lviv.ua/index.php/mineralogy/article/view/269/255>

ANNIVERSARY OF YEVHENIIA SLYVKO

Petro Voloshyn, Serhii Tsikhon, Valentyna Marusiak

petro.voloshyn@lnu.edu.ua; serhii.tsikhon@lnu.edu.ua; marusyak_v@ukr.net

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

The whole life of Yevheniia Martynivna Slyvko, who turned 70 on October 31, 2025, has been connected with the Faculty of Geology. She is a candidate of geological and mineralogical sciences (1986), a well-known specialist in the field of research of accessory and ore minerals of the Ukrainian Shield, and since 2004, an Associate Professor at the Department of Environmental and Engineering Geology and Hydrogeology of the Ivan Franko National University of Lviv. Yevheniia Slyvko has been the Managing Editor of the «Mineralogical Collection» for many years and the Scientific Secretary of the Lviv branch of the Ukrainian Mineralogical Society.

Today, Ye. Slyvko teaches students such basic disciplines as «Environmental Geology», «Fundamentals of Geochemistry», «Protection and rational use of groundwater», «Mineral waters of Ukraine», «Engineering-geological mapping», «Engineering-geological exploration in areas of expansion of subsidence soils» etc. She is the author and co-author of 10 educational and teaching-methodical works, including one textbook. Ye. Slyvko's research work is quite multifaceted, as evidenced by the list of her scientific works. She is a co-author of seven monographs, the author or co-author of 125 scientific articles, 80 materials/abstracts of reports at international and domestic scientific forums, five reference and information publications and four reference and bibliographic ones, as well as 27 handwritten reports on scientific research work. The researcher directly participated or presented papers at almost 30 scientific conferences and meetings of various levels.

For almost 20 years, Yevheniia Martynivna was the scientific secretary of the specialized academic council for the defence of candidate and doctoral theses, and she has been an active member of the Academic Council of the Faculty of Geology for many years. She repeatedly served as the Scientific Secretary of the Organizing Committee of various scientific forums organized by the Faculty of Geology, and prepared collections of materials from these forums for publication.

Yevheniia Martynivna has been repeatedly awarded certificates and thanks from the leadership of the Ivan Franko National University of Lviv, the trade union organization, and the Lviv City Council for her high achievements in scientific and pedagogical activities.

Key words: Yevheniia Martynivna Slyvko, mineralogy, environmental geology, scientific and pedagogical activity, Faculty of Geology, Ivan Franko National University of Lviv.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026