

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.072>  
УДК 606:661.8+553.49:550.42

**В.Г. Верховцев**, д-р геол. наук, зав. відділу  
E-mail: Verkhovtsev@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1015-6725>

**О.Г. Мусич**, канд. біол. наук, старш. наук. співроб.  
E-mail: nad79eva@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3874-741X>

**Ю.О. Фомін**, канд. геол.-мін. наук, пров. наук. співроб.  
E-mail: yaf1941@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3043-8359>

**Ю.М. Деміхов**, канд. геол.-мін. наук, зав. лаб.  
E-mail: y\_demikhov@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-3576-6570>  
Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища  
Національної академії наук України"  
03142, м. Київ, пр-т Акад. Палладіна, 34а

## БАКТЕРІАЛЬНЕ ВИЛУГОВУВАННЯ ЗАБАЛАНСОВИХ РУД АЛЬБІТИТОВИХ РОДОВИЩ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА

---

*Розглянуто перспективи збільшення сировинних ресурсів урановорудних родовищ альбітитової формації Інгульського мегаблоку Українського щита, та можливість зменшення впливу шкідливих відходів завдяки методу бактеріального вилуговування металів. Мінералоутворювальні системи урановорудних альбітитів Українського щита завжди розглядалися як моноелементні, виключно уранові об'єкти. Проте, їх забалансові руди та відвали містять в собі підвищені, аж до промислових, концентрації інших металів, які в умовах гіпергенних процесів несуть потенційну загрозу забруднення навколишнього середовища. З метою визначення можливості розширення сировинних ресурсів альбітитових родовищ Українського щита за рахунок використання методу бактеріального вилуговування металів, розглянуто склад промислових руд та вмисних порід. Зокрема, наші дані мінералого-геохімічного їх дослідження показали, що уран та п'ять його елементів-супутників: торій, ванадій, берилій, цирконій та свинець досягають промислового вмісту. Водночас кобальт, нікель та цинк характеризуються збільшеним вмістом, близьким до мінімальних промислових значень. Найперспективнішими для бактеріального вилуговування є породи, які містять сульфіді. У породах урановорудної альбітитової формації присутні сірковмісні сполуки і, зокрема, пірит, а також дво- та тривалентне залізо. Найбільший вміст сульфідів нами виявлено в альбітизованих породах (до 0,82 %), альбітитах безрудних (до 0,81 %), альбітитах слабрудних (до 0,61 %), тобто в породах, які накопичуються у промислових відходах. Передбачається, що використання методів бактеріального вилуговування за участю хемолітотрофних мікроорганізмів, може бути перспективним для переробки забалансових руд і сприятиме розширенню сировинної бази альбітитових родовищ Українського щита, за рахунок не лише урану, а й нікелю, кобальту та цинку.*

**Ключові слова:** урановорудні альбітити, бактеріальне вилуговування, уран, елементи-супутники, забалансові руди, хемолітотрофи.

---

Цитування: Верховцев В.Г., Мусич О.Г., Фомін Ю.О., Деміхов Ю.М. Бактеріальне вилуговування забалансових руд альбітитових родовищ Українського щита. *Мінерал. журн.* 2023. 45, № 1. С. 72—82. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.072>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2023. Стаття опуб лікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

**Вступ.** Явище бактеріального вилуговування (БВ) на сульфідних родовищах міді відоме ще з давніх часів. 1566 року в Угорщині здійснювали повний цикл вилуговування з використанням системи зрошування; в Німеччині вилуговування міді з відвалів практикували з XVI ст.; 1725 року в Іспанії на руднику Ріо-Тінто (Rio Tinto) вилуговували мідні руди. Це було перше практичне застосування БВ, механізм якого (участь бактерій) був невідомий. З середини XX ст. цей метод отримав наукове обґрунтування. 1947 року американські мікробіологи виділили з рудникових вод раніше невідомий мікроорганізм *Thiobacillus (Th.) ferrooxidans*, який окиснює практично всі сульфідні мінерали, сірку і ряд її відновлених сполук, закисне залізо, а також  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Se}^{2-}$ ,  $\text{Sb}^{3+}$ ,  $\text{U}^{4+}$ , за рН 1,0—4,8 (оптимум 2,0—3,0) й  $T$  5—35 °С (оптимум 30—35 °С) [3, 4, 7, 14, 21, 28].

Промислове застосування БВ розпочато у 1960-х рр. з купного та підземного вилуговування металів із бідних забалансових мідних й уранових руд і відвалів у США, Канаді, Болгарії, СРСР та інших країнах [12, 13, 16—18, 20, 30].

Практично всі відомі поклади альбітитової формації Інгульського мегаблоку Українського щита (УЩ) завжди розглядали (і нині розглядають) як моноелементні, тобто винятково уранові об'єкти [10, 25], хоча до майже виключно уранового можна віднести хіба що Мічуринське родовище. Решта покладів, окрім урану, містять підвищені аж до промислових, концентрації інших металів.

Накопичення важких металів спостерігається у складі різних речовинних комплексів мінералоутворювальної системи: вмісних порід — навколорудних натрієво-карбонатних метасоматитів (альбітитів) — уранових руд. Причому аж ніяк не обов'язково у промислових рудах, які йдуть на переробку, на відміну від решти мінеральної маси, що утворює відвали відпрацьованих порід.

Поведінка урану і елементів-супутників у промислових відвалах, під час зберігання в екзогенних умовах, визначена різними факторами. Передусім це ступінь стійкості до вивітрювання мінералів, що вміщують метали, і геохімічні особливості міграційної здатності елементів у гідрогенних умовах. По-

дальша участь елементів-забруднювачів може бути різною залежно від геодинаміки району. Хоча значною мірою вона залежить і від ставлення до неї людини: може бути джерелом істотної додаткової кількості легковидобувних урану й інших металів, або — шкідливих хімічних речовин, що забруднюють навколишнє середовище.

Біогеотехнології ґрунтуються на окисно-відновних реакціях, що відбуваються за участі хемолітотрофних мікроорганізмів, джерелом енергії для яких є неорганічні сполуки (зокрема сульфідні мінерали). Виявлено близько 30 видів потенційно корисних бактерій і архей, які сприяють окисненню сульфідних мінералів у природних і промислових умовах, а саме поблизу сірчаних геотермальних джерел, у водах копалень, задіяних для вилучення металів із руд та відвалів [20].

Вилуговування металів за участі мікроорганізмів відбувається за одним із двох механізмів: перетворення (чи окиснення) нерозчинних сполук на розчинні, або створення умов для кращої взаємодії хімічних речовин з поверхнею мінералу і розчиненням необхідного металу. Прикладом першого процесу є перетворення таких нерозчинних сполук міді як ковелін ( $\text{CuS}$ ) або халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) у розчинні сульфати. Прикладом другого є вилуговування заліза, миш'яку і сірки із золотоносного арсенопіриту ( $\text{FeAsS}$ ), унаслідок чого золото, що залишилося в мінералі, легше вилучити за допомогою ціанування. Обидва ці процеси є окиснювальними. Якщо метал переводиться у розчин, мова йде про бактеріальне вилуговування. Коли ж метал залишається в руді — про бактеріальне окиснення. Проте, термін бактеріальне вилуговування часто використовують в обох випадках.

Бактеріальне вилуговування може бути застосоване до руд, що містять сульфід заліза або відновлювальні форми сірки. Перелік можливих потенційно корисних бактерій і архей, здатних до БВ металів, наведено у роботах [3, 15, 19, 20, 22]. Існують два способи БВ: прямий і непрямий [9, 28, 30].

*Пряме БВ* відбувається під час фізичного контакту бактеріальних клітин із поверхнею мінералу в декілька стадій, що каталізуються ферментами, і може бути описане такою ре-

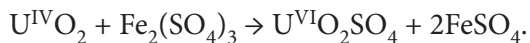
акцією:



де MeS — сульфід металу, MeSO<sub>4</sub> — розчинний сульфат металу.

Під час *непрямого БВ* бактерії генерують "окиснювач", який хімічно окиснює сульфідний мінерал. У кислих розчинах таким окиснювачем слугує Fe<sup>3+</sup>.

Характерний приклад процесу непрямого вилуговування — виділення урану з руд, коли нерозчинний чотиривалентний уран окиснюється до водорозчинного шестивалентного:



Окиснювач чотиривалентного урану можуть виробляти бактерії *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

**Мета роботи:** вивчення можливості застосування методу бактеріологічного вилуговування металів для збільшення сировинних ресурсів і зменшення впливу шкідливих відходів урановорудних родовищ альбітитої формації Інгульського мегаблоку Українського щита.

**Об'єкти дослідження.** Включені в цю розробку об'єкти є типовими представниками промислово важливих урановорудних альбітитів Українського щита, а саме: Северинівське, Мічуринське, Юріївське, Північно-Коноплянське, Ватутінське і Новокостянтинівське родовища.

**Методи дослідження.** Дослідження базувалось на геохімічному і мінералого-петрографічному вивченні урановорудних родовищ альбітитів Українського щита у системі породи едукту — навколорудні метасоматити — руди.

**Результати та їхнє обговорення.** Виконане нами мінералого-геохімічне вивчення порід родовищ альбітитої формації Інгульського мегаблоку Українського щита показало (табл. 1), що вміст урану (U) і п'яти його елементів-супутників (Th, V, Be, Zr, Pb) досягає промислового рівня. Вміст Co і Ni також є близьким до мінімальних промислових значень. Як зазначено вище, найчутливішими до БВ є породи, які також вміщують і сульфідні. З цих позицій розглянемо форми входження названих складових у мінералах, щоб визначити перспективність застосування методів БВ.

Розподіл сірки вивчено нами у рудовмісних породах і альбітитових рудах Северинівського родовища (табл. 2). Вміст елемента (S загальної) у зразках родовища варіює в широких межах (від 0,005—0,006 до 0,127—0,466 %). У середньому він дещо нижчий за кларковий (чи близький до нього) у мікроклінітах, діафоритах, альбітизованих породах і рудних альбітитах суттєво (в 2—3 рази) вищий за кларковий у вмісних породах (особливо гнейсах), а також безрудних і слабрудних альбітитах. Найвищою концентрацією сірки (0,032—0,466 %) характеризуються дайкові діабазы, які також беруть участь у лужному метасоматичному процесі. Отже, під час експлуатації альбітитових родовищ сірка в основному накопичується у промислових відходах.

**Форми знаходження.** Виконані нами на Северинівському родовищі дослідження дають змогу достатньо впевнено виділити дві форми сірки: сульфідну і сульфатну. Сульфідна сірка переважає у всіх типах порід і руд, а в породах субстрату, разом із доальбітитовими метасоматичними продуктами і діафоритами, фактично є єдиною. Сульфатна сірка утворює стійку домішку в альбітитах, зокрема у рудних різновидах. У вихідних породах кількість сульфідної сірки змінюється від 0,02 до 0,32 % (максимум у діафоритах і діабазях) за наявності SO<sub>3</sub> на рівні слідів, до 0,01 % в одиничних зразках (табл. 2). У альбітизованих породах і альбітитах концентрація сульфідної сірки дещо зростає до 0,61—0,82 %, одночасно з'являється доволі стійка домішка SO<sub>3</sub> (до 0,09 %).

Сульфідна сірка представлена, в основному, піритом із складною геохімією, яка, швидше за все, визначена мікрровключеннями інших сульфідів (піротину, Ag-вмісного галеніту з нормальним свинцем, сфалериту і халькопіриту), самородного золота, а також радіогенного свинцю в незрозумілій формі.

Сульфатна форма сірки представлена баритом у вигляді тонких включень у польових шпатах, що підтверджується високим рівнем позитивного кореляційного зв'язку ( $r = +0,74$ ) між SO<sub>3</sub> і Ba в монофракціях мікрокліну і альбіту.

Як правило, спосіб експлуатації таких родовищ сприяє тому, що сульфідна сірка на-

копичується переважно у промислових відходах, де концентрація її може зростати до 0,61—0,82 %. До того ж у відвалах забалансових руд альбітитових родовищ урану Українського щита міститься достатня кількість сполук дво- та тривалентного заліза. Зокрема, згідно з нашими даними, вміст у

гнейсах і мігматитах  $Fe_2O_3$ , FeO і їх відношення  $Fe_2O_3 : FeO$ , відповідно, лежать у межах 1,12—1,32, 4,42—4,33 %, 0,26. Такі умови створюють постійну небезпеку виникнення неконтрольованих природних процесів вилугування. Опади разом із киснем, особливо в присутності деяких бактерій [4], мо-

**Таблиця 1. Деякі геохімічні параметри урану і елементів-супутників в уранових родовищах альбітитової формації Українського щита**  
**Table 1. Some geochemical parameters of uranium and satellite elements in uranium deposits of the albite formation of the Ukrainian Shield**

Елемент	Концентрація в альбітитах, варіації, г/т	Кларк, г/т	Мінімальний промисловий вміст у рудах, г/т	Клас небезпечності згідно з ГДК	Елемент	Концентрація в альбітитах, варіації, г/т	Кларк, г/т	Мінімальний промисловий вміст у рудах, г/т	Клас небезпечності згідно з ГДК
U	0,4—11128	2,5	300	1	Zn	0—500 до 1 %	83	2 %	3
Th	0,5—200	13	100	1	Cu	3—70	47	3000	2—3
Ra	0,00028	—			Bi	15 до 0,8—1,3 %	0,009	0,2—0,3 %	2
V	5—1000	90	100—1000	1—2	Mo	0,4—50	1,1	100	2
Ni	4—1000	58	2000	2—3	Ba	5—500 до 3200	650		3
Co	5—100	18	150—370	2	Sr	1—1000 до 1626	340		2
Cr	5—3000	83		2—3	Be	1—50	3,8	30—400	1
Pb	5—5500 до 1 %	16	1 %	1—2	Zr	4—600	170		3

Примітка. Вміст елементів наведено за даними авторів статті та КП "Кіровогеологія".

Note. The content of the elements is given according to the data of the authors of the article and KP "Kirovgeologiya".

**Таблиця 2. Розподіл сірки в урановорудних альбітитах Северинівського родовища**  
**Table 2. Distribution of sulfur in uranium-ore albitites of the Severynivske deposit**

Вибірка	S загальна, %			S сульфідна, %			SO <sub>3</sub> -іон, %	
	число проб	варіації	середнє	число проб	варіації	середнє	варіації	середнє
1	12	0,010—0,395	0,089	3	0,03—0,07	0,043	Сл.	Сл.
2	7	0,005—0,064	0,035	1	0,02	0,020	0,01	0,010
3	10	0,006—0,074	0,039	4	0,02—0,32	0,105	Сл.	Сл.
4	6	0,009—0,127	0,049	8	0,02—0,82	0,244	до 0,05	0,016
5	6	0,011—0,338	0,143	9	0,02—0,80	0,271	до 0,09	0,013
6	2	0,017—0,238	0,128	4	0,06—0,61	0,235	до 0,02	0,005
7	3	0,022—0,046	0,034	1	0	0	0	0
8	3	0,032—0,466	0,194	2	0,12—0,22	0,170	до 0,01	0,005

Примітка. Вибірки: 1 — вмісні породи (гнейси, мігматити, граніти, пегматити), 2 — мікроклініти, 3 — діафторовані породи, діафторити, 4 — альбітизовані породи, 5 — альбітити безрудні, 6 — альбітити слаборудні, 7 — альбітити рудні, 8 — діабазы дайкові, зокрема альбітизовані. Сірка визначена хімічним шляхом; загальна — в лабораторії СхідГЗК, Жовті Води; форми — у лабораторії ІГМР НАН України. Дані авторів статті.

Note. Samples: 1. Containing rocks (gneisses, migmatites, granites, pegmatites). 2. Microclinites. 3. Diafluorinated rocks, diafluorites. 4. Albitized rocks. 5. Albitites are barren. 6. Albitites are weakly ore. 7. Ore albitites. 8. Dike diabases, including albitized ones. Sulfur is determined chemically; general — in the laboratory of VostokGOK, Zhovti Vody; according to the forms — in the laboratory of the IGMOF of NAS of Ukraine. Data of the authors of the article.



жуть спричиняти у відвалах генерування сірчаної кислоти, що призводить до можливого вилуговування урану та інших забруднювачів, отруєння ґрунтових вод протягом багатьох століть.

Геотехнологічні, зокрема біотехнологічний, методи видобутку корисних копалин достатньо перспективні для переробки рудної маси. Вони дають змогу розширити сировинну базу родовищ, вилучати метали безпосередньо з руди, зменшити екологічне навантаження на довкілля.

**Уран.** Основні мінерали урану: настуран (від  $\text{UO}_2$  до  $\text{U}_3\text{O}_8$ ) — мінерал класу простих оксидів; ураніт ( $\text{UO}_2 - \text{UO}_3$ ) — безводний оксид урану ( $\text{U}^{4+}$ ); уранові черні ( $\text{UO}_2$  й  $\text{UO}_3$ ) — колоїдно-дисперсний мінерал, продукт зміни уранітиту, містить різні домішки і  $\text{H}_2\text{O}$ ; бранерит ( $\text{U}^{4+}$ , Ca, Th, Y)  $[(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{O}_4] \times n\text{H}_2\text{O}$  — водний оксид урану; уранофан ( $\text{Ca}[\text{UO}_2(\text{SiO}_3\text{OH})]_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) — водний ураносилікат кальцію острівної будови; кофінит ( $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ ) — силікат урану з групи уранофану;  $\beta$ -уранотил ( $\text{Ca}(\text{UO}_2)\text{SiO}_3(\text{OH})_2 \times 5(\text{H}_2\text{O})$  —  $\beta$  різновид уранофану; ненадквіт ( $\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Pb}, \text{Fe}^{3+}$ )  $[\text{UO}_2 | (\text{OH}) | \text{SiO}_4] \times n\text{H}_2\text{O}$  — водний ураносилікат магнію, кальцію, свинцю або заліза. Усі мінерали урану взаємодіють із розбавленими кислотами, тому чутливі до БВ.

**Торій.** Породи, що вміщують родовища урановорудних альбітитів Інгульського мегаблоку, — ранньопротерозойські товщі метаморфогенної тріади: гнейси — мігматити — граніти. Гнейси мають безпосереднє відношення до масштабів торієносності зазначених родовищ. Основними мінералами-концентраторами торію в гнейсах є акцесорні мінерали: насамперед монацит, а також циркон, апатит і сфен.

**Ванадій.** Власне мінералів V у рудній масі не виявлено. З урахуванням того, що висока концентрація ванадію встановлена в егіринових (0,034—0,144 %) і, особливо, сфен-егіринових (0,146—0,229 %) альбітитах Ватутінського родовища, можна припустити переважне входження цього елемента (як ізоморфної домішки) саме до складу егірину та сфену. Припущення підтверджується описом багатих на ванадій акміту ( $\text{V}_2\text{O}_5$  до 3,98 %) у жильних утвореннях США і сфену з вмістом

$\text{V}_2\text{O}_5$  0,09—0,10 % у породах Балтійського щита [7]. Деяка кількість ванадію, як видно з даних, наведених тими ж дослідниками, може розподілятися у метаморфічних породах (гнейсах) між роговими обманками і біотитами (також ізоморфно заміщуючи  $\text{Mg}^{2+}$  і  $\text{Fe}^{2+}$ , а також  $\text{Fe}^{3+}$  і  $\text{Ti}^{3+}$ ). З огляду на кількість ванадію в цих мінералах (300—500 г/т  $\text{V}_2\text{O}_5$  у рогових обманках, 100—700 г/т V у біотитах), вони можуть забезпечувати фоновий вміст елемента в породах і рудах.

Підвищений вміст ванадію відмічено також в уранініті та сфені альбітитів Мічурінського родовища [8]. Наші дані щодо розподілу ванадію в піритах Северинівського родовища, отримані за допомогою атомно-абсорбційного аналізу, свідчать про незначну роль цього мінералу в загальному балансі елемента: вміст ванадію в піритах діафоритів, альбітизованих порід і альбітитах не перевищує 10—25 г/т.

**Берилій.** Власне мінералів Be у родовищах альбітитової формації не виявлено. Головними носіями Be є польові шпати і слюди (у нашому випадку біотит), які під час вивітрювання є основним джерелом елемента в екзогенних процесах [14].

**Цирконій.** Головною формою цирконію в альбітитах і породах, що вміщують зруденіння, є циркон ( $\text{ZrSiO}_4$  — острівний силікат), а також його уранові різновиди — малакон ( $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$ ), або циртолїт ( $\text{Zr}[(\text{SiO}_4), (\text{OH})_4]$ ) — водний Th + U циркон.

Як бачимо, Th, V, Be, Zr представлені силікатами, і майже не мають сульфідних форм, тому прямий метод їх БВ малоперспективний, щодо непрямого методу БВ даних немає, але можна припустити їх залучення до процесу через трансформацію силікатів.

**Нікель, кобальт.** Основними формами присутності Ni та Co в ендегенних формуваннях є звичайні сульфіди (пірит, піротин, пентландит, халькопірит) і магнезіально-залізисті силікати, особливо хлорит. За вмістом нікелю вивчені родовища розподіляють на дві групи: ті, що вміщують завищену кількість нікелю, і практично його позбавлені (табл. 3).

**Форми знаходження елементів.** У метаморфічних породах, що вміщують альбітитами, значна частина Ni і Co (а також Cu), очевид-

но, входить до складу сульфідів, серед яких, поряд із піротином, піритом і халькопіритом, знайдені включення пентландиту. Особливості розподілу цих елементів у сульфідах, за нашими даними, розглянуті на прикладі піриту Северинівського родовища. Найвища концентрація нікелю (до 235—255, в середньому 155 г/т) і кобальту (до 520, в середньому 300 г/т) пов'язана з генераціями піриту доальбітитових діафоритів і накладених на альбітити урановорудних асоціацій. У піриті альбітитів вміст Ni (108,8 г/т) і Co (219,5 г/т) нижчий, але найменше цих елементів зафіксовано в піриті пізніх (пострудних) жилок — 62,7 і 59,0 г/т відповідно.

Іншою формою знаходження Ni і Co у вмісних породах і метасоматитах, очевидно, є магнезійно-залізисті силікати — піроксени, амфіболи, біотит і, особливо, хлорити [7, 21]. У відомому довіднику [7] відмічено дві важливі закономірності. По-перше, нікеленосність таких мінералів суттєво підвищується зі зниженням ступеня метаморфізму порід. Так, вміст NiO у рогових обманках амфіболітової і епідот-амфіболітової фацій складає 171 і 878 г/т. У біотитах кристалічних

сланців середнього і низького ступеня метаморфізму кількість Ni і Co становить 30; 25 і 70; 35 г/т відповідно. Це положення підтверджено і порівнянням вмісту NiO (%) в Ni-вмісних клинопіроксенах із порід середньої основності (0,0003—0,006), рогових обманок (0,003—0,02) і хлоритів типу рипідоліту і клинохлору (0,021—0,28). По-друге, вищою виявилась нікеленосність Mg-силікатів порівняно з Fe-різними, зокрема, у ході порівняння вмісту Ni (г/т) у магнезійному (50—70) і залізистому (15—30) гастингситі. Кількість Co тут варіює у межах 20—50 г/т. Підвищена нікеленосність хлориту підтверджена матеріалами Ю.П. Єгорова [8] відносно хлориту Мічуринського родовища. Його дані стосовно піриту Мічуринського родовища збігаються також із наведеними вище даними про підвищену концентрацію Ni в піриті діафоритів Северинівки. Деяка кількість Ni і Co може ізоморфно входити і до магнетиту.

*Свинець.* У ендегенних умовах свинець звичайно трапляється разом із цинком, і обидва вони (як катіони) виявляють зв'язок переважно з аніоном S<sup>2-</sup>, утворюючи сульфід-

**Таблиця 3. Вміст нікелю (г/т) в уранових рудах і рудовмісних породах альбітитових родовищ Українського щита (у дужках наведені варіації)**

**Table 3. Nickel content (g/t) in uranium ores and ore-bearing rocks of albite deposits of the Ukrainian Shield (variations are given in brackets)**

Родовище	Вмісні породи	Альбітити безрудні	Непромислові руди	Промислові руди
Северинівське	258,6 (60—500)	318,7 (60—1000)	225,3 (60—500)	239,0 (30—500)
Мічуринське	4,0—11,0	5,0—6,0	8,0—10,0	8,0—12,0
Північно-Коноплянське	30,9 (6—100)	30,0 (10—100)	31,4 (10—80)	40,0 (10—100)
Юріївське	42,8 (10—200)	—	—	—
Ватутинське	—	212,4 (30—1000)	170,0 (30—500)	233,3 (30—500)
Новокостянтинівське	8,0	8,0—11,0	9,0	8,0

**П р и м і т к а.** Северинівське родовище — дані щодо горизонтів 530, 620, 710 м; Ватутинське — 220, 280, 340. Північно-Коноплянське — щодо розрізу свердловин; Юріївське — породи, що вміщують рудне поле; Мічуринське — середній вміст у вибірках, за даними [8]; Новокостянтинівське — те саме, за даними І.Б. Гаврусевича, А.В. Пушкарьова, 1985. Всюди вміст нікелю визначено за допомогою спектрального методу. Мічуринське родовище — наведено за даними Ю.П. Єгорова [2]; Новокостянтинівське — дані І.Б. Гаврусевича, О.В. Пушкарьова, 1985. Решта родовищ — матеріали авторів статті.

**N o t e.** Severynyske deposit — data on horizons 530, 620, 710 m; Vatutinsk deposit — data on horizons 220, 280, 340. Pivnichno-Konoplyanske deposit — data on well sections. Yuryivske deposit: data on the rocks containing the ore field; Michurinske deposit — the average content of samples is given, according to data [8]; The Novokostyantynivske deposit is the same, according to I.B. Gavrusevich, A.V. Pushkaryov, 1985. Nickel content was determined everywhere using the spectral method. Michurinsk deposit — given according to data of Yu.P. Yehorov [2]; Novokostyantynivske deposit — data of I.B. Gavrusevych, O.V. Pushkaryov, 1985. The rest of the deposits are the materials of the authors of the article.

ди. В екзогенних процесах вони геохімічно поділяються: розчинність сульфідів Pb у край низька, а Zn у сульфатній формі може повністю виноситись за межі первинних концентрацій.

Вміст свинцю та цинку (г/т) в уранових рудах і вмісних породах альбітитових родовищ Українського щита наведено в табл. 4.

Вивчення мінеральних форм свинцю в уранових мінералах альбітитових родовищ, зокрема за допомогою електронно-мікроскопічного дослідження, показало, що свинець у ньому фіксується у вигляді галеніту, самородного свинцю або фази PbUO<sub>4</sub> [5, 8].

Звичайний (нерадіогенний) свинець завжди пов'язаний із сульфідною мінералізацією, і характеризується підвищеною, аж до промислової, концентрацією Pb (+Zn, Cu та ін).

Оскільки сульфід свинцю не взаємодіє з розбавленою сірчаною кислотою, то метод БВ для видобутку свинцю не використовують. Для бідних сульфідних поліметалевих

руд використовують вилуговування з використанням сірчаноокисотно-хлоридних розчинів [29].

Як зазначено вище, геотехнологічні методи і, зокрема, методи бактеріального вилуговування корисних копалин достатньо перспективні для переробки рудної маси, що сприяє розширенню сировинної бази родовищ.

Згідно зі світовим досвідом, породи для купного вилуговування намагаються розташовувати на природних водонепроникних майданчиках з топографією, що дає змогу легко збирати розчини від вилуговування (рудник Бінгем Каньйон (*Bingham Canyon*), США). Там, де таких умов немає, відповідні майданчики готують заздалегідь [1]. У кожному випадку їх готують з огляду на особливості місцевості: іноді цементують і покривають шаром гудрону, подеколи — шаром дрібного піску, потім шаром поліетилену та знову піску. Для зменшення гідрогенного забруднення необхідно передбачити підсти-

Таблиця 4. Вміст свинцю та цинку (г/т) в уранових рудах і вмісних породах альбітитових родовищ Українського щита (у дужках наведено варіації)

Table 4. Lead and zinc content (g/t) in uranium ores and host rocks of albite deposits of the Ukrainian Shield (variations are given in parentheses)

Родовище	Вмісні породи	Альбітити безрудні	Непромислові руди	Промислові руди
<i>Свинець</i>				
Северинівське	36,2 (8—170)	51,7 (16—190)*	129,5 (30—207)	558,8 (59—2000)
Мічуринське	—	16,5 (5—32)	135,0 (6—810)	195,0 (49—575)
Північно-Коноплянське	143,5 (1—242)	175,2 (70—369)	799,7 (120—3389)	593,5 (99—1116)
Юрїївське	27,4 (14—56)	26,2 (6—60)	52,3 (31—134)	364,1 (105—1247)
Ватутинське	55,1 (23—126)	192,2 (18—2995)	143,0 (45—428)	956,7 (145—2350)
Новокостянтинівське	37,4 (24—60)	27,6 (20—43)	258,4 (20—1065)	642,2 (100—1130)
<i>Цинк</i>				
Северинівське	121,4 (0—300)	134,4 (0—500)**	69,2 (0—200)	94,7 (0—500)
Північно-Коноплянське	100	100	100	100
Юрїївське	89,7 (0—200)	—	—	—
Ватутинське	112,5 (0—200)	89,9 (0—200)	88,8 (0—100)	57,1 (0—100)
Новокостянтинівське	34	37—54	39—44	36

П р и м і т к а. \* Без урахування аномального вмісту Pb в одному зразку (0,55 %); \*\* Те саме Zn в одному зразку (1 %). Северинівське, Північно-Коноплянське та Ватутинське родовища — дані Ю.О. Фоміна; Юрїївське — Ю.О. Фоміна, В.Ф. Лапусти; Новокостянтинівське — Ф.І. Жукова та ін. (свинець) і І.Б. Гаврусевича, А.В. Пушкарьова (цинк); Мічуринське — матеріали ДДП "Кіровгеологія". Вміст Pb визначено за допомогою рентгеноспектрального та спектрального методів; Zn — спектрального методу.

N o t e. \* Excluding abnormal content of Pb in one sample (0.55%); \*\* The same Zn in one sample (1%). Severynivske, Pivnichno-Konoplyanske and Vatutynske deposits — data from Yu.O. Fomin; Yuryivske deposit — data of Yu.O. Fomin, V.F. Lapusta; Novokostiantynivske field — data of F.I. Zhukov and others. (lead) and I.B. Gavrusevich, A.V. Pushkaryov (zinc); Michurinske deposit — materials of DDP "Kirovgeology". The content of Pb was determined using X-ray spectral and spectral methods; Zn is a spectral method.

лання відвалів глинистими і карбонатними породами. Відвали для купного вилуговування мають, як правило, форму усіченої піраміди, масою від мільйона до мільярдів тонн [1].

Перевірку методу БВ здійснили наші попередники з ДП "СхідГЗК" [6], використавши проби руд Інгульської шахти з фракцією 0,5—1,0 мм і вмістом урану від  $0,33 \cdot 10^{-3}$  до  $86,5 \cdot 10^{-3}$  %, що відповідало вмісту урану в блокових промислових і забалансових рудах. Вони установили, що процеси перколяційного і пачукового вилуговування уранових руд у випробуваних умовах характеризуються високим ступенем вилучення урану — 94—98 % (рис. 1, 2).

Із блокової промислової руди за 15 діб обробки вилучено 97,7 % у пачуковому режимі, і 95,1 % — у перколяційному, що перевищує ефективність хімічного вилуговування. Для забалансової руди за 15 діб обробки вилучення урану склало, відповідно, 94,0 і 88,0 %. Водночас використання асоціації мікроорганізмів роду *Tiobacillus* і ацидофільних бактерій за даними [6], не потребувало підкиснення, що, у свою чергу, призводило до зниження витрачання  $H_2SO_4$  до 80 і 55 кг/т для блокової і забалансової руд відповідно.

Отже, виявлені закономірності геолого-геохімічного складу та біогеохімічних процесів, що відбуваються в системах зберігання відходів урановидобувної промисловості, дають змогу вважати методи бактеріального вилуговування перспективними для розширення й раціонального використання позабалансових уранових руд альбітитових родовищ Українського щита.

**Висновки.** 1. Нині близько 30 видів мікроорганізмів виявлено як у природних, так і в промислових умовах, поблизу сірчаних геотермальних джерел, у копальневих водах, які можуть бути використані для вилучення металів із руд і відвалів, зокрема для родовищ альбітитої формації Інгульського мегаблоку УЩ.

2. У відвалах забалансових руд альбітитових родовищ урану УЩ наявні сірковмісні сполуки і, зокрема, пірит, а також сполуки дво- та тривалентного заліза, що уможливує застосування методу біологічного вилуговування.

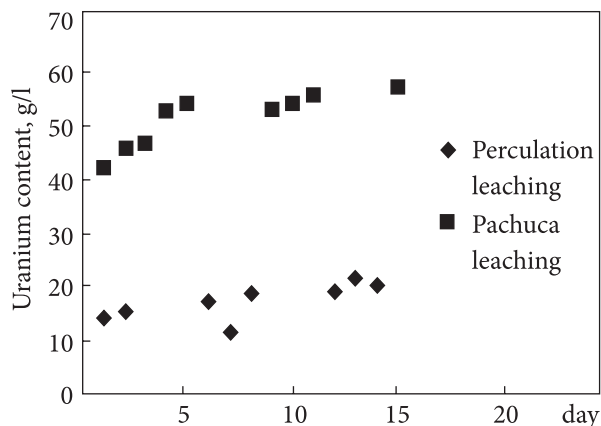


Рис. 1. Вилучення урану під час вилуговування блокової руди в пачуковому і перколяційному режимах (за даними [6])

Fig. 1. Extraction of uranium during the leaching of block ore in pachuков and percolation modes (according to [6])

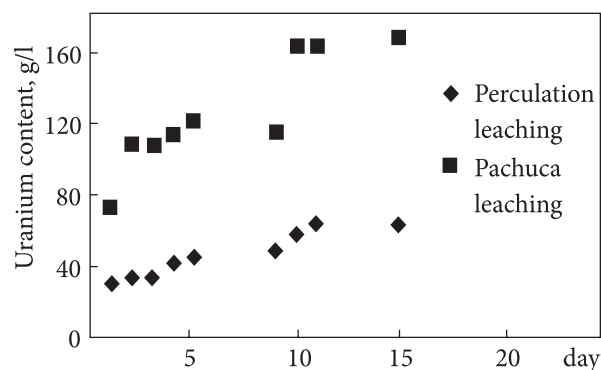


Рис. 2. Вилучення урану під час вилуговування забалансової руди в пачуковому і перколяційному режимах (за даними [6])

Fig. 2. Extraction of uranium during leaching of out-of-balance ore in pachuков and percolation regimes (according to [6])

3. Використання біологічного вилуговування за незначної зміни технологічного процесу хімічного вилуговування може дати змогу суттєво знизити витрати на вилуговування урану і вирішити питання щодо безпечного й екологічного шляху утилізації відходів.

4. Методи біологічного вилуговування корисних копалин достатньо перспективні для переробки забалансових руд альбітитових родовищ УЩ. Вони можуть розширити сировинну базу альбітитових родовищ за рахунок урану і супутніх елементів, зокрема нікелю, кобальту, цинку.



Роботу виконано в рамках планових бюджетних тем: "Мінералізація, прогнозна оцінка та перспективи комплексного використання мінеральної сировини ядерної енергетики Ук-

раїни", шифр теми III-04-21; "Перспективи раціонального використання і радіоекологічна безпека відходів урановидобувної та уранопереробної промисловості", шифр теми III-06-21.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бейсембаев Б.Б., Кунаев А.М., Кенжалиев Б.К. Теория и практика кучного выщелачивания меди. Алматы: Гылым, 1998. 346 с.
2. Брунштейн А. Применение микробиологических методов при подземном выщелачивании урановых руд. *Биогеотехнология металлов. Тр. Междунар. семин. и Междунар. учебн. курсов*. Москва, 1985. С. 326—339.
3. Веклов В.А., Митраков О.Е., Зайнетдинова Л.И. и др. Лабораторные исследования по биоокислению сульфидной руды. *Геотехнология*. 2006. № 3. С. 50—52.
4. Волкова Т.П., Демина Е.Ю. Влияние отвалов редкометалльных месторождений на окружающую среду. *Зб. наук. пр. Донецького нац. техн. ун-ту*. 2007. С. 43—53.
5. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. Отв. ред. Я.Н. Белевцев, В.Б. Коваль. Киев: Наук. думка, 1995. 396 с.
6. Дербасова Н.М., Гавриш М.В., Смирнов С.Б., Гавриш В.М. Биологическое выщелачивание урана из отходов уранодобывающей промышленности. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2011. 2(50). Симферополь, 2011. С. 52—55. [https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2\(42\).134295](https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2(42).134295)
7. Дир У.А., Хауи Р. А., Зусман Дж. Пороодообразующие минералы. Москва: Мир, 1965. Т. 1. 371 с.; Т. 2. 405 с.; Т. 3. 317 с.
8. Закономерности образования и размещения урановых месторождений Украины. Отв. ред. Я.Н. Белевцев. Киев: 1968. 763 с.
9. Кузякина Т.И., Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд. *Вест. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2008. 2, № 12. С. 76—86.
10. Кулебакин В.Г. Бактериальное выщелачивание сульфидных минералов. Новосибирск: Наука, 1978. 264 с.
11. Лисицын А.К., Кузнецова Э.Г. О роли микроорганизмов в образовании восстановительных геохимических барьеров на выклинивании зон пластовой лимонитизации. *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1967. № 1. С. 31.
12. Лисицын А.К. Значение биохимических процессов в осаждении урана на восстановительном геохимическом барьере. В кн.: Перельман А.И. Гидрогенные месторождения урана. Москва: Атомиздат, 1980. С. 67—71. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001015268> (дата звернення: 12.08.2022).
13. Маркосян Г.Е. Новая железоокисляющая бактерия *Leptospirillum ferrooxidans*. *ген. нов., сп. нов. Микробиолог. журн. Армении*. 1972. 35, № 2. С. 26—29.
14. Мицкевич Б.Ф., Сущик Ю.Я., Самчук А.И. Физико-химические условия формирования экзогенных ореолов и потоков рассеяния бериллия. Киев: Наук. думка, 1984. 176 с.
15. Мусич Е.Г., Демихов Ю.Н. Биовыщелачивание как практический подход к экстракции металлов. *Сб. науч. тр. Ин-та геохимии окружающей среды*. 2014. Вып. 23. С. 110—122. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/140423> (дата звернення: 12.08.2022).
16. Панин В.В., Каравайко Г.И., Полькин С.И. Механизм и кинетика бактериального окисления сульфидных минералов. *Тр. Междунар. семин. и Междунар. учебн. курсов*. Москва, 1985. С. 203—221.
17. Пивоварова Т.А., Кондратьева Т.Ф., Каравайко Г.И. Археи рода *Ferroplasma* и их роль в окислении сульфидных минералов. *Тез. 4-го Московского Междунар. конгр. "Биотехнология: состояние и перспективы развития"*. Москва, 2007. Ч. 2. С. 323.
18. Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. Москва: Недра, 1982. 288 с.
19. Сидякина Г.Г. Новые экологически чистые технологии в обогащении сульфидных руд. *Строительство и техноген. безопасность*. 2005. Вып. 10. С. 169—173.
20. Фомина О. Возобновляемые источники. Разумный подход. *Энергетика Украины*. 2010. № 11. С. 18—38.
21. Щербина В.В. Основы геохимии. Москва: Недра, 1972. 296 с.
22. Brierley J.A., Hill D.Z. Biooxidation process for recovery of metal values from sulfur-containing ore materials. Patent (USA) № 5, 834. Bulletin 93/02. European Patent Office. Applic. publ. date: 13.01.93. Applic. number: 92402026.6 C22B 3/18
23. Brown A.R.G., Van Aswegen P.C. The BIOX® Process: A solution to the treatment of refractory gold ores. *Paper presented at the Mineral Proc. and the Hydrometallurgy Plant Design Conf. World's Best Practice, Australia, Perth*, 1998.

24. Colmer A.R., Hinkle M.E. The Role of Microorganisms in acid Mine Diainage: A Preliminary Report. *Science*. 1947. **106**, № 2751. P. 253—256. <https://doi.org/10.1126/science.106.2751.253>
25. Gericke, M., Pinches A. Bioleaching of copper sulphide concentrate using extreme thermophilic bacteria. *Minerals Engineering*. 1999. **12**. P. 893—904. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00076-X)
26. Guay R., Silver M. *Thiobacillus acidophilus* sp.nov.; isolation and some physiological characteristics. *Canad. J. Microbiology*. 1975. **21**, № 3. P. 281—288. <https://doi.org/10.1139/m75-040>
27. Mining-encyclopedia. URL: <http://mining-enc.com/b/bacterial-leaching-of-the-metals/> (дата звернення 12.09.2022).
28. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., Schippers A. (Bio)chemistry of bacteria leaching direct vs indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001. **59**, Iss. 2—3. P. 159—175. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8)
29. Schueler T.A., de Aguiar P.F., Vera Y.M., Goldman D. Leaching of Cu, Zn and Pb from Sulfidic Tailings Under the Use of Sulfuric Acid and Chloride Solutions. *J. Sustain. Metall.* 2021. **7**. P. 1523—1536. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00446-z>
30. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. **59**, Iss. 2—3. P. 177—185. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00181-X)

Надійшла 16.08.2022

## REFERENCES

1. Beisembaev, B.B., Kunaev, A.M. and Kenzhaliev, B.K. (1998), *Theory and practice of heap leaching of copper*, Gylym publ., Almaty, Kazakhstan, 346 p. [in Russian].
2. Bruinstejn, A. (1985), *Biogeotekhnologiya metallov*, Trudy Mezhdunar. seminarov i Mezhdunar. uchebnykh kursov, Moskva, RU, pp. 326-339 [in Russian].
3. Veklov, V.A., Mitrov, O.E., Zajnetdinova, L.I. i dr. (2006), *Geotekhnologiya*, No. 3, pp. 50-52 [in Russian].
4. Volkova, T.P. and Demina, E.Yu. (2007), *Zb. nauk. prats Donets'kogo Nac. Tehn. Un-tu*, UA, pp. 43-53 [in Russian].
5. Belevtsev, Ya.N. and Koval, V.B. (eds) (1995), *Geneticheskie tipy i zakonomernosti razmesheniya uranovykh mestorozhdenij Ukrainy*, Nauk. dumka, Kyiv, 396 p. [in Russian].
6. Derbasova, N.M., Gavrish, M.V., Smirnov, S.B. and Gavrish, V.M. (2011), *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2(50), Simferopol, pp. 52-55 [https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2\(42\).134295](https://doi.org/10.18524/2307-4663.2018.2(42).134295) [in Russian].
7. Dir, U.A., Haui, R.A. and Zusman, Dzh. (1965), *Porodoobrazuyushie mineraly*, Vol. 1, 371 p.; Vol. 2. 405 p.; Vol. 3, 317 p., Mir, Moskva [in Russian].
8. Belevtsev, Ya.N. (otv. red.) (1968), *Zakonomernosti obrazovaniya i razmesheniya uranovykh mestorozhdenij Ukrainy*, Kyiv, 763 p. [in Russian].
9. Kuzyakina, T.I., Hajnasova, T.S. and Levenec, O.O. (2008), *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, Vol. 2, No. 12, Petropavlovsk-Kamchatsky, RU, pp. 76-86 [in Russian].
10. Kulebakin, V.G. (1978), *Bakterialnoe vyshelachivanie sulfidnykh mineralov*, Nauka, Novosibirsk, RU, 264 p. [in Russian].
11. Lisitsyn, A.K. and Kuznetsova, E.G. (1967), *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, No. 1, p. 31 [in Russian].
12. Lisitsyn, A.K. (1980), *Znachenie biokhimicheskikh processov v osazhdenii urana na vosstanovitel'nom geokhimicheskom barjere*, in Perelman, A.I. "Gidrogennyye mestorozhdeniya urana", Atomizdat, Moscow, RU, pp. 67-71. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001015268> (Last accessed: 12.08.2022).
13. Markosyan, G.E. (1972), *Mikrobiolog. zhurn. Armenii*, Vol. 35, No. 2, pp. 26-29 [in Russian].
14. Mitskevich, B.F., Sushchik, Yu.Ya. and Samchuk, A.I. (1984), *Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya ekzogennykh oreolov i potokov rasseyaniya berilliya*, Nauk. dumka, Kyiv, 176 p. [in Russian].
15. Musych, E.G. and Demihov, Yu.N. (2014), *Sb. nauch. tr. In-ta geokhimii okruzhayushchey sredy*, Vyp. 23, Kyiv, pp. 110-122 [in Russian]. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/140423> (Last accessed: 12.08.2022).
16. Panin, V.V., Karavajko, G.I. and Pol'kin, S.I. (1985), *Mehanizm i kinetika bakterial'nogo okisleniya sulfidnykh mineralov*, Trudy Mezhdunar. seminarov i Mezhdunar. uchebnykh kursov, Moscow, RU, pp. 203-221 [in Russian].
17. Pivovarova, T.A., Kondratieva, T.F. and Karavayko, G.I. (2007), *Tezisy 4-go Moskovskogo Mezhdunar. kongr. "Biotekhnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya"*, Ch. 2, Moscow, RU, p. 323 [in Russian].
18. Pol'kin, S.I., Adamov, E.V. and Panin, V.V. (1982), *Tekhnologiya bakterial'nogo vyshelachivaniya tsvetnykh i redkikh metallov*, Nedra, Moscow, RU, 288 p. [in Russian].
19. Sidyakina, G.G. (2005), *Stroitel'stvo i tekhnogen. bezopasnost'*, Iss. 10, pp. 169-173 [in Russian].
20. Fomina, O. (2010), *Energetika Ukrainy*, No. 11, Kyiv, pp. 18-38 [in Russian].
21. Shcherbina, V.V. (1972), *Osnovy geokhimii*, Nedra, Moscow, RU, 296 p. [in Russian].
22. Brierley, J.A. and Hill, D.Z. (1993), *Biooxidation process for recovery of metal values from sulfur-containing ore materials*. Patent (USA) No. 5, 834. Bulletin 93/02, European Patent Office, Applic. publ. date: 13.01.93, Applic. number: 92402026.6 C22B 3/18
23. Brown, A.R.G. and Van Aswegen, P.C. (1998), *Paper presented at the Mineral Processing and the Hydrometallurgy Plant Design Conf. World's Best Practice*, Perth, Australia.

24. Colmer, A.R. and Hinkle, M.E. (1947), *Science*, Vol. 106, No. 2751, pp. 253-256. <https://doi.org/10.1126/science.106.2751.253>
25. Gericke, M. and Pinches, A. (1999), *Minerals Engineering*, Vol. 12, pp. 893-904. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00076-X)
26. Guay, R. and Silver, M. (1975), *Canad. J. Microbiology*, Vol. 21, No. 3, pp. 281-288. <https://doi.org/10.1139/m75-040>
27. (2022) *Mining-encyclopedia*. URL: <http://mining-enc.com/b/bacterial-leaching-of-the-metals/> (Last accessed: 12.09.2022).
28. Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P.-G. and Schippers, A. (2001), *Hydrometallurgy*, Vol. 59, Iss. 2-3, pp. 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8)
29. Schueler, T.A., de Aguiar, P.F., Vera, Y.M. and Goldman, D. (2021), *J. Sustain. Metall.*, Vol. 7, pp. 1523-1536. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00446-z>
30. Tributsch, H. (2001), *Hydrometallurgy*, Vol. 59, Iss. 2-3, pp. 177-185. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)-00181-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)-00181-X)

Received 16.08.2022

V.G. Verkhovtsev, D.Sc. (Geology), Senior Research Fellow, Head of department

E-mail: Verkhovtsev@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1015-6725>

O.G. Musich, PhD (Biology), Senior Researcher

E-mail: nad79eva@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3874-741X>

Yu.O. Fomin, PhD (Geology, Mineralogy), Assist. Prof., Lead Researcher

E-mail: yaf1941@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3043-8359>

Yu.M. Demikhov, PhD (Geology, Mineralogy), Senior Research Fellow, Head of laboratory

E-mail: y\_demikhov@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-3576-6570>

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry"  
of National Academy of Sciences of Ukraine"

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

#### BACTERIAL LEACHING OF BALANCED ORES OF ALBITITE DEPOSITS OF THE UKRAINIAN SHIELD

Prospects for increasing the raw materials resources of uranium ore deposits of the albitite formation of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield and the possibility of reducing the impact of harmful waste due to the method of bacterial leaching of metals were considered. Mineral-forming systems of uranium-bearing albitites of the Ukrainian Shield have always been considered as mono-element, exclusively uranium objects. However, their out-of-balance ores and tailings contain elevated, up to industrial, concentrations of other metals, which, under conditions of hypergenic processes, pose a potential threat of environmental pollution. In order to determine the possibility of expanding raw materials resources of albitite deposits of the Ukrainian Shield due to the use of the method of bacterial leaching of metals, the composition of industrial ores and host rocks was considered. In particular, our data from their mineralogical and geochemical research showed that uranium and five of its companion elements: thorium, vanadium, beryllium, zirconium and lead reach industrial content. At the same time, cobalt, nickel and zinc are characterized by an increased content close to the minimum industrial values. The most promising for bacterial leaching are rocks that contain sulfides. The rocks of the uranium ore albitite formation contain sulfur-containing compounds and, in particular, pyrite, as well as bi- and trivalent iron. We found the highest content of sulfides in albitized rocks (up to 0.82%), ore-free albitites (up to 0.81%), low-ore albitites (up to 0.61%), that is, in rocks accumulated in industrial waste. It is assumed that the use of bacterial leaching methods with the participation of chemolithotrophic microorganisms can be promising for the processing of off-balance ores and will contribute to the expansion of the raw material base of albitite deposits of the Ukrainian Shield, due not only to uranium, but also to nickel, cobalt and zinc.

**Keywords:** uranium ore albitites, bacterial leaching, uranium, satellite elements, for balance ores, chemolithotrophs.