

## Моделювання метасоматозу в радіогенних породах як чинника змінення їх властивостей

*В.А. Баранов, Л.Ф. Маметова, В.Ю. Коровін, 2020*

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

Надійшла 21 листопада 2019 р.

Развитие ядерных технологий, их использование в промышленности и хозяйственной деятельности государства обуславливают актуальность данной работы. Появление проблем при внедрении технологий требует научного сопровождения безопасной добычи уранового сырья. С учетом необходимости решения указанных проблем сформулирована цель — проведение прикладных исследований влияния геологических процессов (метасоматоза и тектоники) на преобразование в породах с ураном, проверка поведения урана в условиях, приближенных к естественным. Для достижения цели применены теоретические, экспериментальные и аналитические методы. На основании анализа современных научных взглядов установлено, что изменение геологических условий влияет на минералы любых горных пород и руд, в частности на урановые. Гидротермальные, метасоматические и гипергенные процессы изменяют основные характеристики минералов (состав, структуру, геохимическую устойчивость, плотность и др.). Происходят растворение и миграция минеральных и рудных компонентов, возникают новые минералы. Проведен эксперимент, условно моделирующий метасоматические процессы в гранитах и кристаллических сланцах. Для интенсификации процесса разрушения структуры минералов из устойчивых пород с ураном использованы добавки фторид-бифторид аммония и азотнокислого карбамида. Условия эксперимента: а) статические и динамические; б) изменение концентрации и скорости подачи реагентов. Установлено, что носителями урана являются акцессорные минералы и альбититы — продукт метасоматоза гранитов, мигматитов и других пород. Обнаружены две стадии альбитизации, с которыми связаны распределение и концентрация урана. В тектонических зонах неоднократная активизация движений фиксировалась микродеформацией минералов. Выяснено, что динамические условия и изменение концентрации реагентов способствовали потере массы образцов. Таким образом, геологические процессы регулируют геохимические преобразования в породах, которые приводят к обогащению урана и его выносу в условиях изменения концентрации растворов и тектонической активизации.

**Ключевые слова:** горные породы, процессы преобразования, модель, уран.

**Вступ.** З розвитком атомної енергетики та із застосуванням урану у багатьох галузях науки і промисловості зростає потреба у поповненні його ресурсів. Видобуток уранової сировини, її зберігання, вилучення та збагачення потребують постійного удосконалення технології переробки руди. З огляду на збереження навколишнього середовища і безпеку працівників цієї галузі впроваджують нові способи і засоби виробниц-

тва уранового концентрату. Комплекс технічних і наукових проблем постійно привертає увагу вітчизняних дослідників [Мельник та ін., 2010; Верховцев та ін., 2014; Пухальский и др., 2017 та ін.], неодноразово був предметом обговорення на міжнародних конференціях у Франції [Word ..., 2015].

На відміну від багатьох інших корисних копалин родовища урану розміщуються в різних за складом та умовами утворення комп-

лексах порід. Поклади уранових руд фіксують як у спокійному заляганні, так і в складних тектонічних структурах. Висока геохімічна рухливість урану і здатність концентруватися на різних стадіях природної міграції зумовлюють виникнення промислових покладів [Фомин и др., 2010; Фомин та ін., 2017; Шаталов, 2015]. Геологічними дослідженнями виявлені родовища урану різного походження — ендегенні, екзогенні, метаморфічні. В Україні інтрузивно-магматичні гранітоїдні комплекси з урановою і рідкіснометалевою мінералізацією поширені у межах Українського щита (УЩ) у його центральній частині та в Західному Приазов'ї [Калашник, 2014; Калашник, Кузьмин, 2016]. До перспективних на такі руди належать докембрійські метаморфічні породи (метаосадові за реконструкцією), мігматизовані з прожилками пегматитів (Олексіївське рудне поле). У тектонічних зонах на

процеси регіонального метаморфізму порід накладалися метасоматичні нерідко лужного характеру [Фомин и др., 2010]. Родовища, пов'язані з новоукраїнським і кіровоградським комплексами гранітів, що виникли у таких зонах, належать до гідротермальнометасоматичного типу [Михальченко, 2018]. У магматичних комплексах уран концентрується в породах переважно кислого і лужного ряду [Вернадський, 2012], у метасоматичних утвореннях (альбітитах) (табл. 1).

Гранітоїди Ватутінського і Новокостянтинівського родовищ належать до Інгульського мегаблока УЩ, який через Кременчуцько-Криворізьку шовну зону межує із Середньопридніпровським мегаблоком. Західноінгулецька розломна зона виділяється максимальною насиченістю уранопроявів жильно-штокверкового типу із вмістом урану в рудах понад 0,1%. Залягають уранопрояви серед порід із середнім і низьким вмістом

**Т а б л и ц я 1 . Вміст урану в гірських породах Інгульського мегаблока Українського щита [Фомин та ін., 2017; Шаталов, 2015; Калашник, Кузьмин, 2014]**

Породи	Середній вміст урану	
	$1 \cdot 10^{-4}\%$	г/т
Ультраосновні: дуніт перидотит	0,003 —	1,4 1,5
Основні: платобазальти габро базальти	— 0,3—2 0,2—4	2,2 2,4 3,5
Середні: діорит	1,8	4,0
Перехідні до кислих: гранодіорити	3,0	7,5
Кислі: граніти	6,0	9,0
Ватутінське родовище: гранітоїди безрудні альбітити	— —	15,9 17,9
Новокостянтинівське родовище: гранітоїди безрудні альбітити	— —	4,8 20,8

урану (рис. 1). Така концентрація вказує на відсутність зв'язку між процесами уранового рудоутворення і первинним вмістом урану у вмісних породах. Середній вміст урану в породах Західноінгулецької розломної зони змінюється від  $1,4 \cdot 10^{-4}$  до  $5,6 \cdot 10^{-4}$  % і загалом не дуже відрізняється від кларкових значень для кислих порід щита —  $(2 \div 4) \cdot 10^{-4}$  %. Винятком є гранітоїди Боков'янського масиву із середнім вмістом урану  $7 \times 10^{-4}$  % (гранітоїди чарнокітового комплексу). Підвищеними середніми фоновими концентраціями урану характеризуються гранітоїди кіровоградського комплексу ( $3,3 \times 10^{-4}$  %), гранодіорити ( $3,3 \cdot 10^{-4}$  %) і апліт-пегматоїдні граніти ( $5,6 \cdot 10^{-4}$  %). В урановорудних полях УЩ спостерігаються значні за площею ділянки з підвищеною радіоактивністю, які фіксують тектонічні зони та діафторез. Ці підвищення пов'язують з локальним перерозподілом радіоактивних елементів або з їх привнесенням незалежно від петрографічного складу порід. Детальну характеристику метасоматитів Ватутінського

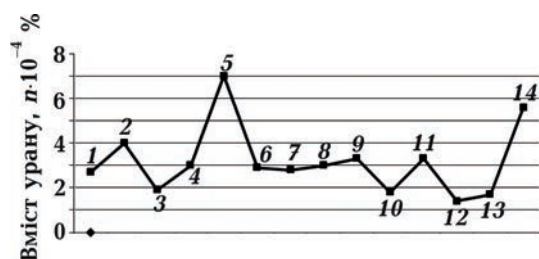


Рис. 1. Середній вміст урану в породах Західноінгулецької розломної зони [Калашник, Кузьмін, 2016]. *Gneisses*, suites: 1 — чечелівської світи, 2 — спасівської, 3 — родіонівської, 4 — інгуло-інгулецької серії; *granites*: 5 — чарнокітового комплексу, 6 — кіровоградські; *migmatites*: 7 — гранодіоритові, 8 — біотитові; 9 — граніти кіровоградського комплексу; 10 — плагіомігматити; 11 — гранодіорити; 12 — кварцові монзоніти; 13 — плагіограніти; 14 — апліт-пегматоїдні граніти.

Fig. 1. Average uranium concentration in the rocks of the West-Ingulets fault zone [Kalashnik, Kuzmin, 2016]. *Gneisses*, suites: 1 — Chechelivsk, 2 — Spasivska, 3 — Rodionivska, 4 — Ingulo-Ingulska Series; *granites*: 5 — Charnokite complex, 6 — Kirovograd; *migmatites*: 7 — granite-diorite, 8 — biotitie; 9 — granites of Kirovograd complex; 10 — plagio-migmatites; 11 — granodiorites; 12 — quarts monzonites; 13 — plagio-granites; 14 — aplite-pegmatoid granites.

і Новокосянтинівського родовищ наведено у публікаціях [Нечаєв, Семка, 2012; Михальченко, 2018].

Уранові об'єкти вздовж Криворізько-Кременчуцького розлому — Ганнівський рудопрояв, Жовторіченське і Первомайське родовища гідротермально-метасоматичного типу, рудопрояви гідротермального генезису в зоні порід криворізької серії з низькою радіоактивністю (15 мкР/год). Локалізація рудних концентрацій урану в межах Криворізько-Кременчуцького розлому не залежала від регіональної міграції урану, його вмісту в породах і від ступеня їх метаморфізму, а просторово тісно пов'язана з глибинним Західноінгулецьким розломом.

**Матеріал і методи досліджень.** У дослідженні геохімічних перетворень у породах брали участь співробітники Лабораторії нових технологій переробки сировини та промислових відходів. Було проведено експеримент з умовного моделювання метасоматичних процесів у породах різного генетичного типу і полімінерального складу. Структурні й текстурні характеристики порід визначали петрографічними методами (мікроскоп ПОЛАМ Р-111, фотокамера ДСМ-200). Було створено лабораторне устаткування для вивчення процесів руйнування кристалічної ґратки модельних зразків у динамічних умовах; виготовлено лабораторну партію карбаміду із розчину азотної кислоти і карбаміду (азотної кислоти — 41,5, карбаміду — 44,3, води — 14,2%); вміст фтору у зразку фторидбіфториду амонію дорівнював 61,2% (рис. 2).

Зразки попередньо висушували за температури  $105^{\circ}\text{C}$ , яку підтримували за допомогою ультратермостата MLW UN8 з періодичним перемішуванням. Потім проби контактували (6 діб) з розчином фторидбіфториду амонію різної концентрації і сірчаної кислоти. Концентрація фторидіона ( $\text{F}^-$ ) у розчині становила  $2 \cdot 10^{-3}$  і  $2 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>. Діапазон концентрацій фторидіона вибирали з урахуванням здатності фторидіона сорбуватися аніонообмінниками, що може знижувати ступінь вилучення урану із сірчано-кислих розчинів. Рівень концентрації сірчаної кислоти, потрібної для вилучення урану, має забезпечити максимальну сорб-



а



б

Рис. 2. Зовнішній вигляд реагентів: а — азотнокислий карбамід, б — фторид-біфторид амонію.

Fig. 2. Appearance of reagents: a — urea nitric acid, b — ammonium fluoride-ammonium bifluoride.

ційну ємність аніонних складових процесу. Наприкінці процесу вилуговування показник кислотності рН сягає рівня 1,5—2,0.

Використання фторид-біфториду амонію є перспективним для інтенсифікації вилучення урану шляхом руйнування структури мінералів [Скрипка та ін., 2005]. Попередня обробка гірських порід з ураном цими реагентами сприяє процесам їх трансформації.

**Результати та їх аналіз.** Як модельні об'єкти для дослідження відібрано 6 проб контрастного складу — по 3 проби з грані-

тів Середньопридніпровського мегаблока УЩ і з альбітизованих апосланців рудних горизонтів Жовторіченського родовища. Дослідження здійснювали у статичних і динамічних (граніт з Орільського кар'єру) умовах на лабораторній установці з різною швидкістю подачі реагентів (табл. 2).

На початку експерименту зразок граніту з 14-го шахтного стовбура станції метро «Центральна» (м. Дніпро) мав такий склад, %: кварц 30; польові шпати 65; темно-бурий біотит 5; релікти піроксену, одиничні луски мусковіту; акцесорні мінерали: циркон, апа-

**Т а б л и ц я 2 .** Зміни умов і концентрації реагентів за статичного режиму

Порода	Концентрація реагентів, моль/л		Маса*, г
	Фтор	Кислота	
Граніт біотитів (будівництво метро)	$2 \cdot 10^{-3}$	0,2	<u>53,0</u> 52,7
	$2 \cdot 10^{-2}$	0,2	<u>29,425</u> 28,890
Амфібол-магнетит біотит-кварцовий апосланець (шахта «Нова»)	$2 \cdot 10^{-3}$	0,2	<u>54,4</u> 53,1
	$2 \cdot 10^{-2}$	0,2	<u>49,864</u> 48,930

\* Над рискою — маса до реакції, під рискою — маса після реакції.



тит, рудний. Структура крупнозерниста з елементами катакlastичної і проявами бластезу (рис. 3).

З метою ефективної взаємодії породи з реагентами технологією вилучення урану передбачено її подрібнення. У природних умовах подрібнення (катаклаз) відбувається внаслідок тектонічних рухів. Ознаки катаклазу: зерна кварцу мають хвилясте погасання і утворюють деформаційні смужки з мозаїчними ділянками. Плагіоклази (Са-На шпати) з деформованими полісинтетичними двійниками порівняно з К-На шпатами свіжіші. По периферії зерен плагіоклазу на контакті з кварцом у центрі окремих зерен спостерігається альбіт (здвійникований, розміром від 0,08 до 0,15 мм і більше, чистий). Іноді поряд з біотитом поширений епідот. За кімнатної температури у статичних умовах проба граніту була 6 діб у розчині з реагентами (фторид-біфторидом амонію і сірчаної кислоти). Після висушування при температурі 100 °С у шліфі граніту кардинальних змін не спостерігали. У центрі зерен польових шпатів (К-На) рельєфніше проявилися мікротріщини та закономірні включення плагіоклазів у вигляді дрібних здвійникованих табличок з одночасним погасанням. Між зернами кварцу і польового шпату спостерігали неправильної форми воднопрозорі новоутворення мікрокліну (?) з перехресними двійниками або альбіту. Окремі пластинки біотиту містили включення цирконів розміром від 0,07 до 0,3 мм (рис. 4).

У статичних умовах за заданої концентрації реагентів порода втрачає певну масу (0,3 г) через розчинення її компонентів. У динамічному середовищі інтенсивність цього процесу зростає зі зміною концентрації фтор-реагентів (табл. 2), втрата маси становить 0,535 г. Мікроскопічні дослідження цієї проби чітко фіксують деформації кристалічної структури мінералів, їх зміщення через кілька зерен. У зерні кварцу спостерігаються деформаційні площини, паралельні одна одній, завширшки 0,03—0,05 мм. Напружено-деформований стан породного масиву фіксується зонами мікротріщинуватості мінералів. На контакті кварцу з польовим шпатом утворилася ділянка грану-

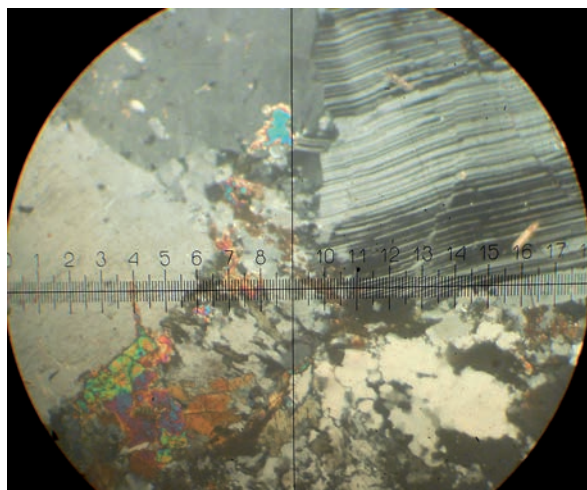


Рис. 3. Граніт крупнозернистої структури з елементами катаклазу (Середньопридніпровський мегаблок Українського щита). Зб. 90, нік. +.

Fig. 3. Granite of coarse-grained structure with kataklas elements (Serednoprivniprovsyky block), 90<sup>x</sup>, Nicolet +.

ляції з дрібними зернами (0,05 мм). По периферії польових шпатів спостерігаються голочки слюд. У деяких калієвих шпатах такі голочки концентруються уздовж дефор-

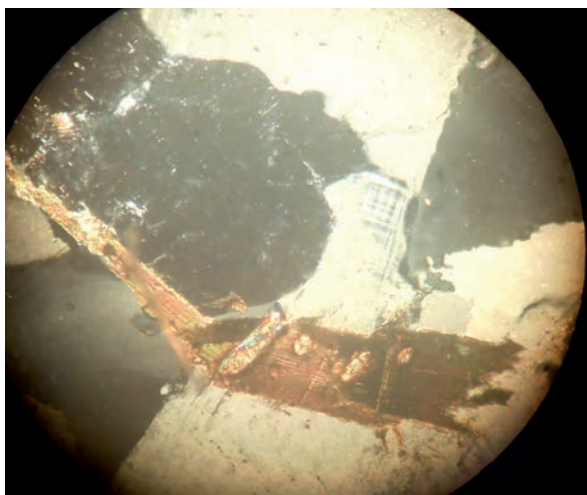


Рис. 4. Граніт із включеннями цирконів у біотиті — після контакту з реагентами за статичних умов. Зб. 90, нік. +.

Fig. 4. Granite with zircons inclusions biotite — after contact with the reagents under static conditions, 90<sup>x</sup>, Nicolet +.

маційних смужок. Біотит знебарвлюється. В гранітах такого типу уран наявний як ізоморфна складова акцесорних мінералів (циркону, сфену, апатиту, монациту), а також у розсіяній формі у плагіоклазах, кварці, мікрокліні.

Пробу з шахти «Нова» (горизонт –380,0 м) досліджували у аналогічних умовах і таких самих реагентах. Це порода смугастої текстури, яка зумовлена чергуванням рудних (амфібол-магнетитових) і малорудних (магнетит-біотит-кварцових) складових (рис. 5). Ширина рудних смужок — від 0,7 до 1,2 мм, малорудних — удвічі менша (0,2—0,45 мм). Серед смуг, багатих на магнетит (40—55 %), спостерігаються: синьо-зелені амфіболи ( $cNg\ 24^\circ$ ) призматичної форми (15—20 %), карбонати (5,0 %), червоно-бурі голки залізистих слюд (10 %). Магнетит утворює ідіобласти ізометричної, ромбоподібної, призматичної форми (від 0,05 до 0,2 мм) і гломеробласти у вигляді перерваного «ланцюга» завдовжки від 0,3 до 0,85 мм. Структура смуг нематогранобластова з елементами фібробластової. Останню створюють волокнисті агрегати кумінгтоніту (рис. 6), актиноліту (?). У рудних смугах міститься гематит, порода зазнала мартитизації.

Магнетит-біотит-кварцові смуги характеризуються значно меншими розмірами і кількістю рудних мінералів (магнетит (пірит ~1 %) — 8—10 %, біотит 10—15, кварц 65—70 %). Структура гранобластова у поєднанні із лепідогранобластовою. Довжина голок і лусочок біотиту — від 0,1 до 0,25 мм. Голки і лусочки фіксують також серед амфіболів. Акцесорні мінерали: апатит, турмалін. За складом і структурно-текстурними характеристиками це апосланець по джеспіліту.

Експеримент з цією породою у статичних умовах показав ліпшу реакційну здатність її мінералів і саме тому більшу втрату маси (1,3 г), ніж зразок біотитового граніту зі станції метро «Центральна». Смугаста текстура породи збереглась, у розрізі рудних смуг спостерігаються лінзоподібні (до 2 мм) скупчення метабластів («роздувів») магнетиту і амфіболів. Актиноліт світло-зеленого кольору утворюється на перифе-

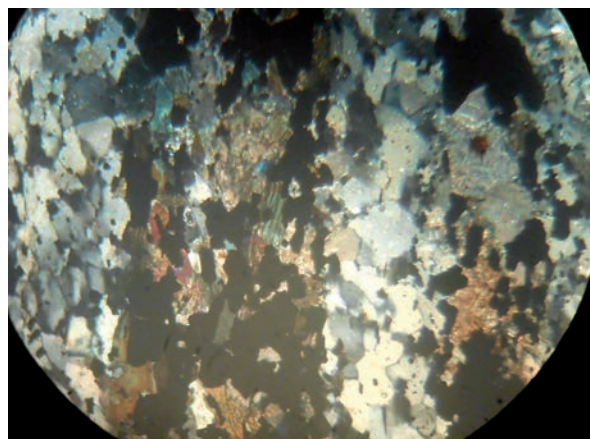


Рис. 5. Смугаста текстура апосланця по джеспіліту (шахта «Нова», глибина 380 м). Зб. 90, нік. +.

Fig. 5. Banded texture of aposhale rock on jaspilite («Nova» mine, depth 380 m), 90<sup>x</sup>, Nicolet +.

рії синьо-зелених призм амфіболів кросит-родузитового (лужного) ряду. Під гострим кутом (іноді майже прямим) до останніх розміщуються тонкі волокна і голочки безбарвного кумінгтоніту.

В малорудних суттєво кварцових смугах середній розмір зерен кварцу — 0,15 мм, структура гранобластова з ділянками ле-

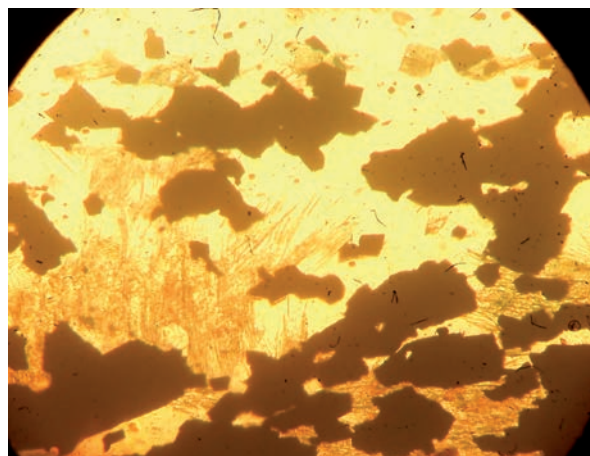


Рис. 6. Амфібол-магнетитовий апосланець з фібробластами і волокнистими агрегатами кумінгтоніту. Зб. 200, нік. ||.

Fig. 6. Amphibol-magnetite aposhale rock with fibroblast and «bundle like» aggregates of kumingtonites, 200<sup>x</sup>, Nicolet ||.

підогранобластової. В окремих зернах магнетиту спостерігається «корона» — обростання — з тонких пластинок червоно-бурого біотиту. Подрібнена проба породи (апосланець по джеспіліту) з комбінацією рудних і суттєво кварцових смуг після контакту з реагентами теж втратила масу — 0,934 г. Зі зміною концентрації фтор-реагенту в режимі експерименту з пробами шахти «Нова» втрата маси зразка у статичних умовах уповільнилася. Утім це явище не заперечує хімічних процесів перетворення породи — трансформації основних мінералів і утворення нових. Прикладом трансформації є амфіболи, за якими фіксують як лужний (натрієвий) метасоматоз, так і діафторез (рогова обманка—кумінтоніт). У рудних смугах скупчення магнетиту розростаються (бластез), об'єднуються і «захоплюють» амфіболи. Між тонкими рудними смужками спостерігається знебарвлення синьо-зеленого амфіболу і заміщення його актинолітом і новоутвореним карбонатом. Крім того, з'являються жовто-бурі дрібні землясті утворення (можливо, уранові слюдки), які у вигляді скупчень містяться у смугах з рудою. На межі смужок (рудних з малорудними) у незначній кількості спостерігається альбіт. Унаслідок впливу реагентів мінеральні зміни складу досліджуваного апосланця вказують на те, що перетворення відбувалися у кілька етапів і супроводжувалися не лише втратою компонентів, а й певною трансформацією мінералів, утворенням стійких асоціацій у нових умовах.

На думку вчених [Фомин и др., 2010; Вернадский, 2012], уран у біотитах, амфіболах,

піроксенах міститься у сорбційній формі. Саме такі сорбційні утворення урану пов'язують з гідроксидами заліза, піритом і карбонатами. Припускають механічне захоплення атомів урану магнетитом і гематитом під час міграції. На багатьох відомих уранових родовищах спостерігають як первинну, так і вторинну мінералізацію з кількома генераціями мінералів. У результаті неодноразового розчинення уранова руда самоочищується. У природних метасоматичних процесах, поряд з розчиненням і міграцією компонентів породи, привносяться натрій, залізо (III), магній, кальцій, з наступною регенерацією і пізньою карбонатизацією. Зауважимо, що на відміну від статичних умов проведення експерименту зменшення маси зразків за динамічних умов зростає пропорційно до збільшення концентрації фторид-іона в розчині сірчаної кислоти у пробі 13 (табл. 3).

Саме тривала обробка зразка розчином фторид-біфториду спричинює руйнування міцної структури силікатів унаслідок часткового розчинення кремнію та подальшого вилуговування мінералів з ураном.

**Висновки.** Експеримент з породами різного генезису і складу є спробою моделювання природного процесу метасоматозу як дискретного за характером впливу. Застосування однакового хімічного реагенту виявило таке:

- а) зміна умов (зі статичних на динамічні) режиму подачі реагенту і його концентрації для проби граніту сприяла втраті маси, тобто розчиненню і винесенню компонентів;

**Т а б л и ц я 3.** Зменшення маси зразка у динамічних умовах

Тривалість прокачки реагенту, год	Маса зразка, <i>m</i> , г	Втрата маси, $\Delta m$		Кислотність, г/дм <sup>3</sup>	Втрачений об'єм реагенту, $V_p$ , дм <sup>3</sup>
		г	%		
0	13,826	0	0	20,11	—
17	13,472	0,354	2,56	18,21	9,28
34	13,354	0,472	3,41	18,08	18,56
51	13,235	0,591	4,27	18,21	27,84



- б) під дією динамічних умов і за зміни концентрації реагенту на зразок апосланців шахти «Нова» уповільнилася втрата маси зразка, але не загальмувалися реакції трансформації основних і утворення нових мінералів;
- в) динамічні умови в експерименті можна розглядати як прообраз тектонічних рухів, які активізують геохімічні перетворення (метасоматоз) у породах будь-якого генезису та інтенсифікують перерозподіл рудних компонентів;
- г) на метасоматичну переробку граніту витрачається менше енергії, ніж на апосланці, які відрізняються значною кількістю фемічних мінералів та меншими розмірами породоутворювальних мінералів. Напружено-деформований стан породного масиву фіксують за наявністю зон мік-

ротріщинуватості мінералів. Збільшення мінерального напруження призводить до дроблення і розширення зони порушення метасоматитів, їх катаклазу. Альбітові метасоматити пов'язані з тектонічними зонами зсувного характеру, що відображується пластичними мікродеформаціями мінералів. Подальший розвиток і активізація цих зон сприяє перерозподілу продуктивних компонентів у рудах, трансформації уранових мінералів.

Дослідження засвідчили, що в системі породи—метасоматичні мінералізатори (реагенти) відбулись якісні та кількісні зміни. Для визначення впливу технологічних реагентів, їх концентрації на навколишнє середовище необхідні додаткові дослідження кожного з виділених типів уранових порід для удосконалення технології їх переробки відповідно до вимог держстандарту.

### Список літератури

- Вернадский В. И. Три типа месторождений урана и тория. В кн.: *Вибрані наукові праці академіка В. І. Вернадського*. Т. 7. *Праці з геохімії та радіології*. Київ: Вид. Ін-ту геохімії навколишнього середовища НАН України, 2012. С. 574—589.
- Верховцев В. Г., Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Возняк Д. К. *Перспективи розвитку уранової сировинної бази ядерної енергетики України*. Київ: Наук. думка, 2014. 355 с.
- Калашник А. А. Новые прогнозно-оценочные критерии в технологии прогнозирования формирования промышленных эндогенных месторождений урана Украинского щита. *Зб. наукових праць УкрДГРІ*. 2014. № 2. С. 25—52.
- Калашник А. А., Кузьмин А. В. Предпосылки формирования и прогнозные критерии медно-уранового оруденения в Западно-Ингулецкой разломной зоне Украинского щита. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2016. № 2. С. 61—81.
- Мельник Ю. П., Лисенко О. Ю., Дудар Т. В., Нікітіна Н. В. Уранові руди України. Геологія, використання, поводження з відходами виробництва. Ред. Г. В. Лисиченко. Київ: Наук. думка, 2010. 221 с.
- Михальченко І. І. Геологія рудних полів і родовищ Центральноукраїнського ураново-рудного району: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2018. 45 с.
- Нечаев С. В., Семка В. О. Рудоносные метасоматиты центральной части Украинского щита (УЩ) (прогнозно-поисковое значение). *Геохімія та рудоутворення*. 2012. Вип. 31—32. С. 12—23.
- Пухальский В. Н., Синчук В. В., Басараб Н. Н. Добыча и переработка урановой руды в Украине. *Геотехнічна механіка*. 2017. № 133. С. 27—32.
- Скрипко М. М., Коровін Ю. Ф., Коровін В. Ю. Спосіб одержання важкозаймистого азотнокислого карбаміду. Деклараційний патент на корисну модель № 20040806881. Україна. Заявл. 17.08.2004. Опубл. 15.07.2005. Бюл. № 7.
- Фомин Ю. А., Демихов Ю. Н., Сущук Е. Г. По-



ведение урана в процессах эволюции альбититовых месторождений Кировоградского мегаблока. *Доп. НАН України*. 2010. № 1. С. 131—137.

Фомін Ю. А., Верховцев В. Г., Деміхов Ю. Н., Студзінська А. О. Мінералізатори в ураново-рудних альбітитах Українського щита. *Доп. НАН України*. 2017. № 7. С. 51—55. doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.07.051>.

Шаталов М. М. Уран надр України: геохімія урану та історія створення мінерально-сировинної бази. *Вісник НАН України*. 2015. № 10. С. 50—59. <https://doi.org/10.15407/vsn2015.10/050>.

World Energy Outlook. (2015). Organization for Economic Co-operation and Development. International Energy Agency, Paris, France. Retrieved from <https://doi.org/10.1787/weo-2015-en>.

## **Modelling of metasomatism in radiogenic rocks as a factor of transformation of their properties**

*V.A. Baranov, L.F. Mametova, V. Yu. Korovin, 2020*

The development of nuclear technologies, their use in industry and economic activities of the state determine the relevance of this work. The emergence of problems in the implementation of technologies requires the scientific support of the safe extraction of uranium raw materials. Given the need for their solution, the goal of this article was to conduct applied research on the impact of geological processes (metasomatic and tectonics) on the conversion of uranium into rocks, verification of the behavior of uranium in different conditions which are close to nature ones. To achieve the goal, theoretical, experimental and analytical methods have been applied. Based on the analysis of modern scientific views, it was established that the change in geological conditions affects the minerals of any rocks and ores, in particular — on uranium. Hydrothermal, metasomatic and hypergene processes transform the basic characteristics of minerals (composition, structure, geochemical stability, density, etc.). There are dissolution and migration of mineral and ore components, there are new minerals. The experiment, simulating the metasomatic processes in granites and crystalline shales, was carried out. Supplements of fluoride-ammonium fluoride and urea nitrate were used to intensify the process of destroying the structure of minerals from persistent rocks with uranium. The experimental conditions are: a) static and dynamic ones; b) change in concentration and rate of reagent supply. It was established that uranium carriers are accessory minerals and albitites which are the product of metasomatism of granites, migmatites, and other rocks. Two stages of albitization are revealed, with which the distribution and concentration of uranium are related. In tectonic zones, repeated activation of movements was detected by microdeformations of minerals. It was found out that dynamic conditions and changes in the concentration of reagents contributed to the loss of mass of samples. Consequently, geological processes regulate geochemical transformations in rocks, which result both in the enrichment of uranium and in its removal in conditions of changing the concentration of solutions and tectonic activation.

**Key words:** rocks, processes of transformation, model, uranium.

References

- Vernadskiy, V.I. (2012). Three types of deposits of uranium and thorium. In *Selected scientific works of academician V.I. Vernadsky. Vol. 7. Works on geochemistry and radiogeology* (pp. 574—589). Kyiv: Publ. of the Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine (in Russian).
- Verkhovtsev, V.G., Lysychenko, G.V., Zabulov, Yu. L., & Voznyak, D.K. (2014). *Prospects of development of uranium source of raw materials of nuclear energy of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka, 355 p. (in Ukrainian).
- Kalashnik, A.A. (2014). New forecasting and evaluation criteria in technology of prognostication of forming of industrial endogenous deposits of uranium of the Ukrainian Shield. *Collection of scientific works of UkrDGRI*, (2), 25—52 (in Russian).
- Kalashnik, A. A., & Kuzmin, A. V. (2016). Prerequisites for the formation and forecast criteria of copper-uranium mineralization in the West Ingulets fault zone of the Ukrainian Shield. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDHRI*, (2), 61—81 (in Russian).
- Melnyk, Yu. P., Lysenko, O. Yu., Dudar, T. V., & Nikitina, N. V. (2010). *Uranium ores of Ukraine. Geology, use, handling wastes of production*. Kyiv: Naukova Dumka, 221 p. (in Ukrainian).
- Mikhalchenko, I.I., (2018). Geology of Ore Fields and Deposits of the Central Ukrainian Uranium Ore District. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv, 45 p. (in Ukrainian).
- Nechaev, S.V., & Semka, V.O. (2012). Ore-bearing metasomatites of central part of the Ukrainian Shield (USh): prognostic, prospecting and general geological significance. *Heokhimiya ta rudoutvorennya*, (31—32), 12—23 (in Russian).
- Pukhalskiy, V.N., Sinchuk, V.V., & Basarab, N.N. (2017). Extraction and processing of uranium ore in Ukraine. *Heotekhnichna mekhanika*, (133), 27—32 (in Russian).
- Skrypko, M. M., Korovin, Yu. F., & Korovin, V. Yu. (2005). *A method of obtaining a flammable carbamide nitrate*. Utility Declaration Patent No 20040806881. Ukraine. Declared August 17, 2004. Published July 15, 2005. Bulletin No. 7. (in Ukrainian).
- Fomin, Yu. A., Demikhov, Yu. N., & Sushchuk, E. G. (2010). Uranium behavior in the evolution processes of albitite deposits of the Kirovograd megablock. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (1), 131—137 (in Russian).
- Fomin, Yu. A., Verkhovtsev, V. G., Demikhov, Yu. N., & Studzinska, A. O. (2017). Mineralizers in uranium ore albitites of Ukrainian Shield. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (7), 51—55. doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.07.051> (in Ukrainian).
- Shatalov, N.N. (2015). Uranium mineral resources of Ukraine: geochemistry of uranium and history of the mineral resource base. *Visnyk NAN Ukrayiny*, (10), 50—59. <https://doi.org/10.15407/visn2015.10/050> (in Ukrainian).
- World Energy Outlook. (2015). Organization for Economic Co-operation and Development. International Energy Agency, Paris, France. Retrieved from <https://doi.org/10.1787/weo-2015-en>.