

## Предмет «Радіогідрогеологія»

Гр. ПІ-41

18.03.2020 р. Лекція

### Тема лекції «Первинна міграція радіоактивних елементів»

Відмінність у радіологічних характеристиках та хімічних властивостях радіоактивних елементів спричинює до різного їх положення в породах. Питання про форму знаходження радіоактивних елементів у гірських породах вивчив **І. Є. Старик**. Головними теоретичними засадами, покладеними в основу його робіт, полягають у тому, що:

1. Три родоначальники радіоактивних радів – уран, торій та актиній – мають настільки велику тривалість життя, що вони могли міститися в магмі або розчинах у момент утворення мінералів і порід і, таким чином, могли увійти до кристалічної решітки мінералів.
2. Решта радіоактивних елементів, що утворюється із названих трьох, мають малу тривалість життя з точки зору масштабів геологічного часу, і отже, ті їх атоми, що містяться в мінералах і породах у наш час, утворились уже після їх сформування.
3. Радіоактивні елементи, що утворюються із урану, торію й актинію, відрізняються за своїми кристалохімічними властивостями від їх родоначальників.
4. Радіоактивні елементи, особливо ті з них, що пов'язані з викиданням із ядра  $\alpha$ -частинок, можуть «виштовхнути» утворюваний атом із того місця, яке займав у кристалічних ґратках його попередник (явище радіоактивного віддавання).

Логічним наслідком цих положень став такий висновок про можливу форму знаходження радіоактивних елементів у гірських породах: якщо атоми елементів-родоначальників – урану, торію й актинію, – скоріше за все, входять до кристалічних ґраток мінералів, то атоми продуктів їх розпаду, якщо вони не є ізотопами перших трьох, імовірно, не можуть знаходитися в кристалічних ґратках мінералів і повинні скупчуватись у її порушеннях –

різних за видом і походженням пустот, або так званих «капілярах», очевидно, заповнених водою. Під капілярами розуміються різні пустоти в гірській породі, необов'язково капілярного характеру.

Таким буде, напевне, розподіл урану й радію в структурах усіх гірських порід, за винятком тих випадків, коли радіоактивні елементи осадились із вод на стінках водопроникних пустот і тріщин. У цих випадках не лише радій, але й уран може знаходитися в адсорбованому, тобто рухливому стані.

Унаслідок того, що уран, торій та актиній, а також, можливо, їх ізотопи зазвичай знаходяться у кристалічних ґратках мінералів, перехід їх із порід у воду, який **І. Є. Стариков** називає *міграцією першого роду*, пов'язаний із явищем розчинення мінералів, отже, на перехід урану із порід у воду повинні впливати всі ті фактори, котрі взагалі впливають на розчинність: хімічний склад і кислотність розчину, кількість вільного кисню, температура та ін.

Продукти розпаду трьох вищеназваних радіоактивних елементів (радон, радій та їхні ізотопи) знаходяться в «капілярах» породи, напевно, частково в розчині, а частково в адсорбованому стані на стінках «капілярів». Тому перехід їх із породи в воду, що називається *міграцією другого роду*, може не пов'язуватися з розчиненням мінералів. Міграція ізотопів еманаций визначається процесом еманування, тобто виділенням породами радіоактивних еманаций, що утворюються в породах із уміщених у них родоначальних елементів.

Перехід радію та його ізотопів із порід у воду відбувається внаслідок вилужування порід. Сутність процесу вилужування полягає в переході елемента із мінералу в розчин без порушення цілісності кристалічних ґраток.

Вилужування – явище поширене, причому зазвичай із ним пов'язаний цілий ряд інших природних явищ. Унаслідок вилужування відбувається порушення радіоактивної рівноваги. Радій мігрує із уранових матеріалів, і в цих мінералах виникає нестача радію. Особливо сильно процес вилужування

впливає на вторинні уранові матеріали, з яких радій може мігрувати в значній кількості; при цьому радій, що залишається в мінералах, часто складає лише 10 – 15 % від тієї кількості, яка має знаходитися в них при радіоактивній рівновазі з ураном.

Можна вважати, що процес вилужування складається із трьох стадій:

- 1) радій та його ізомери внаслідок реактивного віддавання накопичуються в «капілярах» породи, заповненої водою;
- 2) встановлюється адсорбційна рівновага між радієм у розчині й радієм на стінках «капілярів»;
- 3) завдяки дифузії встановлюється рівновага:

$R_a$  в «капілярній» воді  $\leftrightarrow$   $R_a$  в гравітаційній воді.

Дифузія радію із «капілярів» у гравітаційну воду відбувається у край повільно. Про це свідчить зниження його вилужуваності при повторних вилужуваннях; навіть через рік дифузійна рівновага не встигає встановитися.

Таблиця 5

Вилучення радію з породи при повторних вилужуваннях

№ з/п	Проміжок часу між повтореннями дослідів	Кількість радію, що вилужувався, %
1	На початку дослідів	0,0150
2	Через 13 днів	0,0088
3	Через 26 днів	0,0040
4	Через 15 місяців	0,0073

Швидкість дифузії радію із «капілярів» у гравітаційну воду сильно залежить від питомої поверхні частинок породи. Чим більша тонкодисперсними є частинки породи, тим більша швидкість дифузії радію, тим більша кількість радію переходить із порід у розчин.

Таблиця 6

Залежність вилужуваності радію від дисперсності породи

Питома поверхня частинок, см <sup>2</sup> /г	0,54	0,96	1,33	2,73
Кількість вилуженого радію, %	0,00	0,003	0,008	0,01
	25	7	0	50

Усі процеси переходу радіоактивних елементів із порід у крапельно-рідку (гравітаційну) воду, як-от: окиснення, вилужування, розчинення, дифузю, еманування прийнято об'єднувати під загальною назвою «первинної міграції», на відміну від «вторинної міграції», під якою розуміються всі процеси, що відбуваються при русі радіоактивних елементів породами разом із гравітаційною водою, наприклад, осадження, адсорбція, деєманування та ін.

Сукупність усіх цих процесів призводить до порушення рівноваги між радіоактивними елементами як у водах, так і в породах і рудах, до їх окремої міграції, до формування різних типів радіоактивних вод.

### **Лекція «ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВОД»**

Особлива роль у формуванні радіоактивних вод належить гідрогеологічним умовам. Радіоактивні води зустрічаються серед різноманітних груп природних вод, їх типи характеризуються надзвичайно

розмаїтими умовами живлення, циркуляції, виходу на поверхню й утворюють родовища різної величини й форми.

Збагачення вод тими чи іншими радіоактивними елементами відбувається лише в певних кліматичних зонах, певних гідрогеологічних структурах, за певних гідродинамічних умов циркуляції підземних вод. Характер водообміну, інтенсивність циркуляції підземних вод, тривалість зіткнення вод із породами – все це визначає умови переходу радіоактивних елементів із порід у води.

### *Значення клімату району*

Роль клімату як чинника, що визначає характер і хід процесів вивітрювання гірських порід у поверхневих частинах землі, величезна.

Коливання температури повітря призводить до фізичного вивітрювання порід, тобто до їх дезінтеграції. Основними факторами фізичного вивітрювання є сезонні й добові коливання температури й пов'язані з ними процеси періодичного замерзання й відтанення порід. Фізичне вивітрювання сприяє збагаченню підземних вод радоном і радієм (збільшення коефіцієнта еманування порід і ступеня вилужування радію).

Атмосферні опади, збагачені киснем та вуглекислою повітря, потрапляючи в земну кору, підвищують інтенсивність розкладання гірських порід (хімічне вивітрювання), а також інтенсивність окиснення рудних тіл; тим самим вони сприяють переходу в розчин багато чисельних елементів, в тому числі й радіоактивних. Як встановлено, загальна кількість радіоактивних елементів, що виносяться з породи, виявляється значно більшою при більших дебітах (і, відповідно, при відносно малій концентрації їх у розчині), ніж при малих дебітах (і при більшій концентрації їх у розчині). Таким чином, великі дебіти води повинні різко знижувати вміст радіоактивних елементів у породі, з якої відбувається їх винесення. У природних умовах велика кількість атмосферних опадів сприяє руйнуванню

уранового зруднення, інтенсивному винесенню радіоактивних елементів із меж родовища та збідненню ними підземних вод.

В областях із сухим спекотним кліматом велике значення має випаровування. Тут унаслідок інтенсивного випаровування дуже часто спостерігається концентрація радіоактивних елементів (особливо урану) в підземних і поверхневих водах і навіть випадіння їх із розчину. Особливо великою є роль випаровування у збагаченні поверхневих водойм.

### *Значення гідродинамічної зональності стратисфери*

Геолого-структурні й фаціально-літологічні особливості території разом із комплексом фізико-географічних умов створюють природні умови, що визначають напрям гідрогеологічних процесів. Самі по собі геолого-структурні й фаціально-літологічні умови дуже часто не можуть пояснити спостережений розподіл і формування відомих у наш час типів радіоактивних вод.

Щоб зрозуміти умови формування й характер розподілу підземних радіоактивних вод у тому чи іншому районі, необхідно звернути особливу увагу на динамічність підземних вод. Гідрогеологічний аналіз, що проводиться з урахуванням геологічних, фізико-географічних та інших даних, повинен: а) розкрити характерні елементи динаміки й режиму радіоактивних підземних вод і б) встановити геохімічні особливості в розподілі різних типів радіоактивних вод.

У розподілі радіоактивних вод та їх формуванні спостерігаються певні закономірності регіонального характеру, тобто радіогідрогеологічна зональність.

Регіональні зміни режиму, динаміки й радіохімічного складу вод зазвичай залежать від структурного й гіпсометричного положення водоносних комплексів, які він займає протягом тривалого відрізка геологічного часу. Найбільш повно зональність у розподілі підземних

радіоактивних вод виражена в ділянках широкого й потужного розвитку осадових утворень платформ. Тут частіше за все можна встановити наявність п'яти гідрогеологічних зон, кожна з яких характеризується певною динамікою, режимом і радіохімічним складом підземних вод.

У формуванні й розподілі підземних вод, за **Н. К. Ігнатовичем**, спостерігається горизонтальна зональність (закономірна зміна всіх гідрогеологічних факторів за падінням пластів), котра виявляє провідну роль поверхневих чинників для неглибоко залеглих водоносних комплексів, і вертикальна, в якій особливо чітко видно роль динаміки підземних вод.

Виділяються такі вертикальні зони:

1. *Зона аерації (зона тимчасового просочення вод)*. Ця зона розташована між поверхнею землі й рівнем ґрунтових вод. Атмосферна вода, потрапляючи в цю зону, стає енергійним агентом вивітрювання. Достатньо легко й швидко пересуваючись, вода, багата на кисень та вуглекислоту, механічно, фізично й хімічно впливає на породи й мінерали (в тому числі й урані), призводячи їх до руйнування, вилужування й розчинення. Радіоактивні води можуть утворюватися тут лише в період випадіння й просочування атмосферних опадів. Потужність зони аерації є різноманітною; вона коливається від нуля в заболочених рівнинних просторах до багатьох десятків, а іноді й сотень метрів у гірських ділянках із сильно розчленованим рельєфом.
2. *Зона коливання рівня підземних вод* Коливання рівня підземних вод визначається співвідношенням між надходженням води на поверхню водоносного горизонту й витратою її при відтіканні. Якщо кількість води, що просочується більша, ніж її витрата, то рівень підземних вод знижується й тим самим збільшується потужність зони інтенсивного водообміну, що залягає нижче;

якщо випаровування або підземний стік перевищує інфільтрацію, то рівень підземних вод знижується і збільшується потужність зони аерації, що залягає вище.

- 3.** *Зона інтенсивного водообміну.* Ця зона характеризується дуже інтенсивною циркуляцією підземних вод. Окремі її площини постійно заповнені водою, що поповнюється за рахунок атмосферних опадів. Тут формується підземний стік із великими динамічними ресурсами. Води цієї зони – сучасного походження, багаті на кисень. За хімічним складом вони належать переважно до слабо мінералізованих гідрокарбонатних, іноді сульфатних, а в засушливих районах і до сульфатно-хлоридних типів. До зони інтенсивного обміну належать не тільки ґрунтові води, але й ті артезіанські, що залучаються до інтенсивного водообміну й підземного стоку. Це зона впливу дренажу річкової мережі. Поширюється вона до глибини 300 м і більше.

У межах масивів осадових порід із кларковим вмістом радіоактивних елементів у зоні інтенсивного водообміну радіоактивні води не утворюються внаслідок низького вмісту радіоактивних елементів і значних швидкостей руху води.

У межах родовищ урану в цій зоні відбувається збагачення підземних вод трьома головними радіоактивними елементами – ураном, радієм і радоном (розчинення), а в масивах осадових і метаморфічних гірських порід – збагачення розсіяним ураном, – тільки ураном (вилужування).

У межах масивів кислих магматичних порід у зоні інтенсивного водообміну відбувається збагачення вод радоном. Цей процес повністю залежить від швидкості та довжини шляху фільтрації води.

Теорію збагачення вод радоном розробив іще 1910 р. П. Махе, а потім **А. Н. Огільві, І. Є. Старик** та В. І. Баранов. Під час руху підземних вод



тріщинуватими породами збагачення вод радоном керується такою математичною залежністю (за В. І. Барановим):

$$Q = \frac{E}{\lambda} (1 - e^{\frac{-S_1 l_1}{\omega} \lambda}) e^{\frac{-S_2 l_2}{\omega} \lambda}, \text{ де}$$

$Q$  – кількість радону в воді;

$E$  – кількість радону, що виділяєть 1 см<sup>2</sup> поверхні каналу в активній породі за 1 с;

$S_1$  – площа поперечного перетину каналу в активній породі;

$S_2$  – площа поперечного перетину каналу в неактивній породі;

$l_1$  – довжина каналу в радіоактивній породі;

$l_2$  – довжина каналу в нерадіоактивній породі;

$\omega$  – кількість води, що протікає за 1 с через 1 см<sup>2</sup> каналу;

$\lambda$  – константа.

Під час руху підземних вод пористими породами спостерігається така залежність:

$$Q = \frac{E}{p_1 \lambda} (1 - e^{\frac{-p_1 l_1}{\omega} \lambda}) e^{\frac{-p_2 l_2}{\omega} \lambda}, \text{ де}$$

$Q$  – кількість радону в воді;

$E$  – кількість радону, що виділяє за 1 с 1 см<sup>2</sup> породи;

$p_1$  – пористість радіоактивної породи;

$p_2$  – пористість нерадіоактивної породи;

$l_1$  – довжина шляху фільтрації в радіоактивній породі;

$l_2$  – довжина шляху фільтрації в нерадіоактивній породі;

$\omega$  – кількість води, що протікає за 1 с через 1 см<sup>2</sup> каналу;

$\lambda$  – константа.

Аналізуючи ці формули, отримуємо три випадки залежності радіоактивності води від швидкості її фільтрації;

а) вода витікає з активного шару з дуже великою довжиною шляху фільтрації – радіоактивність води не залежить від швидкості її фільтрації;

б) вода витікає із активного шару з невеликою довжиною шляху фільтрації – радіоактивність води зменшується зі збільшенням швидкості її фільтрації;

в) вода витікає із потужного шару активної породи, прихованої за шаром неактивної, – радіоактивність води збільшується зі збільшенням швидкості її фільтрації.

Характерним є те, що збільшення швидкості фільтрації води (наприклад, при відкачуванні), що обмиває рудне тіло, призводить до різкого збагачення води радоном, у той час як у водах, що циркулюють безрудними породами, такого збільшення не спостерігається (таблиця 7). Цю обставину видно на всіх уранових родовищах, що може бути пошуковою ознакою уранового зрудніння.

Таблиця 7

### Зміна радіоактивності води при відкачуванні

Водоносна порода	Вміст Rn в еманах	Водоносная порода	Вміст Rn в еманах
------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Граніти із вторинними мінералами		Піщаники з карнотитом	
До відкачування	200	До відкачування	35
Після відкачування	830	Після відкачування	120
Безрудні граніти		Безрудні піщаники	
До відкачування	85	До відкачування	2
Після відкачування	120	Після відкачування	5

1. *Зона ускладненого водообміну.* Ця зона характеризується порівняно уповільненою циркуляцією підземних вод. Більшість вод цієї зони є висхідними, тобто напірними та дренованими ерозійною мережею, але можуть бути й низхідними (на широких водороздільних площах). В осадових породах води мають зазвичай підвищену мінералізацію, особливо в слабо промитих структурах; за складом вони належать до перехідного типу від сульфатних до хлоридних. Відповідні гіпсометричні й тектонічні умови, зокрема наявність великих порушень (гірські складчасті ділянки), створюють передумови для глибокого водообміну і призводять до того, що тут формуються дуже молоді води лужного типу, що іноді є висхідними термами. На платформах ця зона розвинена до глибин 500 – 600 м., а в складчастих ділянках – до 1000 – 2000 м; води цієї зони повільно оновлюються, заміщуючись більш молодими. Геохімічно зона ускладненого водообміну часто характеризується окисно-відновними умовами.

У межах масивів осадових гірських порід із кларковим вмістом у зоні ускладненого водообміну радіоактивні води не утворюються із тих же причин, що й у зоні інтенсивного водообміну.

У межах родовищ урану в зоні ускладненого водообміну внаслідок розчинення уранових сполук, а також осадження їх із розчинів води можуть збагачуватися ураном, радієм і радоном або ж лише радієм і радоном.

У межах масивів осадових і метаморфічних гірських порід, збагачених розсіяним ураном, унаслідок процесів вилужування води збагачуються ураном і радієм.

У межах масивів кислих магматичних порід, з яких складаються гірські складчасті споруди, відбувається збагачення радоном вод глибоких тектонічних тріщин.

2. *Зона надзвичайно ускладненого водообміну.* Відмітними особливостями цієї зони є надзвичайно ускладнений рух вод, відновні геохімічні умови та відносна стабільність хімічного й газового складу вод на окремих ділянках. У гірських складчастих ділянках ця зона відсутня. У платформних умовах майже повна відсутність водообміну на глибинах призводить до того, що завдяки гравітації, випаровування, дифузії, катіонного обміну та інших фізико-хімічних процесів тут формуються води, збагачені радієм, хлоридно-натрієво-кальцієвого складу з високою мінералізацією (іноді до граничного насичення солями). Підземний стік у цій зоні виявляється в масштабі геологічного часу, внаслідок чого води можуть мати стародавній вік.

Теорію збагачення вод радієм розробила **Є. С. Щепотьєва**. Згідно з її поглядами, збагачення вод ізотопами радію, а отже, і межа цього збагачення, обумовлені тим, що при зіткненні вод із радіоактивними породами виникають два потоки радіоелементів. Як уже було вказано, кожна порода

має мережу внутрішніх «капілярів», заповнених водою. Радіоеlementи в гірських породах розподілені вкрай нерівномірно, тому до зіткнення із гравітаційною водою частина цих «капілярів», що знаходиться в радіоактивних акцесорних матеріалах, або поблизу них, буде містити ізоtopи радію, інша ж частина, що знаходиться в «пустій» породі, практично не буде їх вміщувати. При зіткненні породи з гравітаційною водою, в якій раніше не було ізоtopів радію, починається дифузія цих елементів із тих капілярів, де вони знаходяться, в гравітаційну воду, а звідти – у воду «капілярів», що спочатку не містили ізоtopів радію. Концентрація радію та його ізоtopів у гравітаційній воді визначається величиною та характером зміни в просторі й часі цих двох потоків. Унаслідок того, що дифузія відбувається дуже повільно, застійний режим вод при високій їх мінералізації сприяє збагаченню цих вод радієм.

Вказана вертикальна зональність (закономірна зміна зони інтенсивного обміну зоною надзвичайно ускладненого водообміну) найбільш чітко виявляється в ділянці Російської платформи. У передгірних областях звичайно спостерігається обернена закономірність: зона надзвичайно ускладненого водообміну знаходиться вище, ніж зона інтенсивного водообміну. Нарешті, в гірських областях спостерігається розвиток лише зони інтенсивного водообміну і тільки у глибоких частинах тектонічних порушень – зони ускладненого водообміну.