

Температурний режим вод

Температура підземних вод значно впливає, з одного боку, на розчинність уранових мінералів і тим самим на надходження у воду урану й радію, а з другого боку, на розподіл радону між рідкою й газоподібною фазами.

Питання про вплив температури на розчинність уранових мінералів вивчено на сьогоднішній день іще недостатньо. Досліди **І. Є. Старика** з розчинення торбеніту при різних температурах показали, що в нейтральному і слабо лужному середовищі підвищення температури води викликає посилення переходу в розчин, головним чином, урану; радій незначно вилужується. Підвищення температури кислого середовища значно збільшує її агресивний вплив на навколишні породи, внаслідок чого відбувається інтенсивний перехід у розчин як урану, так і радію (табл. 12).

Таблиця 12

Інтенсивність переходу урану й радію із торбеніту
в розчин залежно від температури (за **І. Є. Стариком**)

Температура С°	Середовище	Кількість радіоактивних елементів, що перейшли в розчині, % від навески		<u>Ra</u> U
		Ra	U	
15	H ₂ O	1,22	0,13	9,4
60	H ₂ O	1,81	0,67	2,7
15	0,1-н. HCl	2,15	1,43	1,5
60	0,1-н. HCl	7,50	2,78	2,7

На збільшення переходу урану в розчин із підвищенням температури вказують такі досліди над зразками уранових слюдок і черней (табл. 13).

Таблиця 13

Залежність переходу урану в розчин від температури води

Руда	Вміст урану в розчині в г/дм ³ при температури	
	20°	70°
Уранові слюдки	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Уранові черні	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$

Значно краще з'ясовано вплив температури на збагачення підземних вод радоном. Із огляду на те, що радон є газом, підвищення температури підземних вод призводить до посиленого де газування джерел, у зв'язку з чим коефіцієнт розподілу радону між водою й повітрям (коефіцієнт розчинності радону в воді) зменшується. Теоретичне значення коефіцієнта розподілу радону $\alpha = \frac{C_{Rn \text{ води}}}{C_{Rn \text{ повітря}}}$

повітря, за різних температур видно з таблиці 14.

Таблиця 14

Залежність коефіцієнта розчинності радону α
від температури води

Температура води, °С	α	Температура води, °С	α	Температура води, °С	α
0	0,510	30	0,200	70	0,118
5	0,420	40	0,160	80	0,112
10	0,350	50	0,140	90	0,109
20	0,225	60	0,127	100	0,107

Як показали чисельні дослідження, теоретичне значення коефіцієнта α доволі є доволі близькими до тих, що спостерігаються в природі.

У таблиці 15 наводиться вміст радону в воді й газі деяких радіоактивних джерел

Таблиця 15

Вміст радону в воді й газі радіоактивних джерел

Джерело	Температура води, °С	Вміст Rn, М.Е.		Значення α	
		У воді	У газі	Факт.	Теор.
Шивія (Забайкалля)	0,1	16,2	39,6	0,40	0,51
Аршан-Тункінський	8,8	2,4	3,3	0,73	0,36
Кисловодськ	13,6	4,7	7,0	0,67	0,31
Уч-Кайнарський (Пн. Киргизстан)	21,0	5,0	18,5	0,29	0,25
Агура, св. № 6, глибина 300 м	29,6	3,5	10,2	0,34	0,20
Нова Мацеста, св. № 9, глибина 500 м	30,9	0,7	2,4	0,29	0,20
Цхалтубо	34,0	4,3	13,6	0,23	0,18

ТИПИ ПРИРОДНИХ РАДІОАКТИВНИХ ВОД ТА ЇХ ФОРМУВАННЯ

ВМІСТ РАДІОАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПРИРОДНИХ ВОДАХ І ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВОД

У 50-х рр. минулого сторіччя в СРСР у зв'язку з радіогідрогеологічними пошуковими роботами на уран було отримано великий фактичний матеріал за вмістом у водах не лише радону й радію, але й урану. Вміст названих радіоактивних елементів у деяких типах природних вод досягає значних величин, що обумовлено або специфічним гідрогеологічним режимом, або наявністю концентрацій радіоактивних елементів.

У поверхневих водах, як правило, вміст радіоактивних елементів є нижчим, ніж у підземних; винятками є деякі безстічні озера, у водах яких вміст урану доходить до $4 \cdot 10^{-2}$ г/дм³. За **А. П. Виноградовим**, вміст радію в водах морів у середньому становить $1 \cdot 10^{-13}$ г/дм³ і урану $2 \cdot 10^{-6}$ г/дм³, що вказує на відсутність рівноваги між радієм та ураном.

У підземних водах вміст радіоактивних елементів значно коливається. Це пояснюється, по-перше, відмінністю вмісту й різними формами знаходження радіоактивних елементів, тобто різним ступенем зараження та збагачення порід радіоактивними елементами. По-друге, умовами й темпами міграції води й особливостями її складу, тобто гідродинамічним режимом і гідрохімічними умовами, які впливають на перехід радіоактивних елементів у воду. Середній вміст радію в підземних водах складає $4 \cdot 10^{-12}$ г/дм³ і урану $7 \cdot 10^{-6}$ г/дм³ при їх співвідношенні $6 \cdot 10^{-7}$; що є меншим, ніж вміст їх у гірських породах у сотні разів.

Найбільший вміст радіоактивних елементів спостерігається у водах уранових родовищ (урану до $9 \cdot 10^{-2}$ г/дм³, радію до $9 \cdot 10^{-9}$ г/дм³ і радону до 50000 еман). За межами уранових родовищ в умовах інтенсивного водообміну підвищений вміст радіоактивних елементів відзначається тільки в водах кислих магматичних порід – переважно в гранітних масивах (урану до $3 \cdot 10^{-5}$ г/дм³, радію до $6 \cdot 10^{-12}$ г/дм³ і радону до 400 еман, а також у водах осадових і метаморфічних гірських порід із підвищеним вмістом радіоактивних елементів (урану до $6 \cdot 10^{-4}$ г/дм³, радію до $5 \cdot 10^{-10}$ г/дм³ і радону до 150 еман. У зоні надзвичайно ускладненого водообміну підвищений вміст радіоактивних елементів є відомим в осадових гірських породах із нормальним вмістом радіоактивних елементів (радію до $2 \cdot 10^{-8}$ г/дм³ і урану до $3 \cdot 10^{-6}$ г/дм³).

Окрім того, необхідно відзначити, що для всіх типів вод, крім вод, пов'язаних із підвищеною концентрацією урану в гірських породах, радіоактивну рівновагу зазвичай зміщено в бік радію ($Ra/U = 3,4 \cdot 10^{-7}$, див. табл. 1).

Таблиця 1

Вміст урану, радію і радону в природних водах

Тип вод	Природні умови	Rn, еман			Ra, г/дм ³			U, г/дм ³			Ra
		мін.	макс.	середн.	мін.	макс.	середн.	min	max	середн.	U
Поверхневі води	Океани і моря	0	0	0	$8 \cdot 10^{-14}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$
	Озера	0	0	0	$1 \cdot 10^{-13}$	$8 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
	Річки	0	0	0	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Води осадових порід	Зона інтенсивного водообміну	1,0	50,0	15,0	$1 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
	Зона надзвичайно ускладненого водообміну	1,0	20,0	6,0	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Води кислих магматичних порід	Зона інтенсивного водообміну (води вивітрювання)	10,0	400,0	100,0	$1 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

	Зона ускладненого водообміну(води глибоких тектонічних тріщин)	8,0	400,0	100,0	$2 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Води уранових родовищ	Зона інтенсивного водообміну (води окиснення)	50,0	50000,0	1000,0	$8 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$
	Зона ускладненого водообміну (води зони відновлення)	50,0	3000,0	500,0	$1 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Зіставляючи дані за вмістом урану й радію в різних типах підземних вод з їх вмістом у морській воді й гірських породах, можна визначити коефіцієнти концентрації (збагачення чи збідніння) урану й радію для різних типів вод.

У загальному балансі гідросфери морська вода складає більше 90 %. Отже, середній вміст у морській воді $U = 2 \cdot 10^{-7} \%$ і $Ra = 1 \cdot 10^{-14} \%$ можуть сприйматися як кларки цих елементів для гідросфери в цілому. Тоді, приймаючи величини кларків земної кори рівними для урану $4 \cdot 10^{-4} \%$ і для радію $2 \cdot 10^{-10} \%$, можна отримати такі відношення кларків цих елементів для гідросфери й літосфери:

?

Ці величини є коефіцієнтами розподілу урану й радію між гірськими породами й водами земної кори. Вони показують, що гідросфера збіднена ураном порівняно з літосферою у 2000 разів, а радієм – у 20000 разів.

Зіставляючи вміст урану й радію в підземних водах із кларками урану й радію гідросфери, отримуємо для деяких типів підземних вод коефіцієнти концентрації урану і радію, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти концентрації урану і радію
для різних типів підземних вод

Тип вод	Природні умови	n_d		n_r	
		U	Ra	U	Ra
Води осадових порід	Зона інтенсивного водообміну	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	n	n
	Зона надзвичайно ускладненого водообміну	$n \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-1}$	n	$n \cdot 10^{-3}$

Води кислих магматичних порід	Зона інтенсивного водообміну (води кори вивітрювання)	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	n	n
	Зона надзвичайно ускладненого водообміну (води глибоких тектонічних тріщин)	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-3}$	n	$n \cdot 10$
Води уранових родовищ і порід, збагачених ураном	Зона інтенсивного водообміну (води зони окиснення)	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$
	Зона надзвичайно ускладненого водообміну (води зони первинних руд і зони відновлення)	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-1}$	n	$n \cdot 10^{-2}$

До 50-х років минулого сторіччя радіоактивні води було прийнято ділити на три групи:

1. **Радонові** – з підвищеним складом еманції радію;
2. **Радієві** – з підвищеним складом солей радію;
3. **Радоново-радієві** – з підвищеною кількістю радію та надлишковою над рівноважною кількістю радону;
4. **Урано-радоно-радієві** води гідротермальних родовищ;
5. **Урано-радієві** води осадових родовищ.

Групи 4 і 5 додав В. В. Іванов 1946 року. Ці класифікації, гарно обґрунтовані радіологічно, на жаль, носили формальний характер і мало відображали геолого-гідрогеологічні й геохімічні умови формування радіоактивних вод.

Першу спробу складання генетичної класифікації радіоактивних вод зробив **А. Н. Токарєв** 1948 р. За основу він узяв розподіл усіх природних радіоактивних вод на три групи:

1. Води радонового ряду.

2. Води радієвого ряду.

3. Води уранового ряду.

Запропонована нижче класифікація радіоактивних вод є результатом подальшої розробки цієї схеми на основі узагальнення великого фактичного матеріалу, накопиченого за останні роки. В основі цієї класифікації покладено два принципи:

1) зміст і форма знаходження радіоактивних елементів у гірських породах, що визначають можливість збагачення природних вод радіоактивними елементами;

2) гідрогеодинамічна зональність літосфери, що визначає геохімічні умови переходу радіоактивних елементів із гірських порід і руд у природні води (хімічний і газовий склад, електрохімічні властивості й температурний режим вод).

Для віднесення вод до радіоактивних беруться такі межі вмісту в них радіоактивних елементів:

$$Rn > 50 \text{ еман}; Ra > 1 \cdot 10^{-11} \text{ з/дм}^3; U > 3 \cdot 10^{-5} \text{ з/дм}^3.$$

Розглядаючи схему формування радіоактивних вод (таблиця 3), бачимо, що в різних типах порід, але в одній і тій самій гідродинамічній зоні можуть формуватися різні за радіологічним складом типи вод. Однак в одних і тих самих породах, але в різних гідродинамічних зонах формуються різні за радіологічним складом типи вод. Отже, раціональна класифікація радіоактивних вод повинна базуватися на генетичній ознаці, а не на кількісному вмісті того чи іншого елемента.

Таблиця 3

Схема формування природних радіоактивних вод (за А. Н. Токарєвим)

Тип гідрогеологічних умов	Тип породи ступінь збагачення їх радіоактивними елементами	Нормальний (кларковий) розсіяний стан радіоактивних елементів		Підвищений розсіяний стан радіоактивних елементів		Концентрації радіоактивних елементів		
		Осадіві породи	Магматичні породи	Осадіві й метаморфічні породи	Магматичні породи	Рудні концентрації осадового типу	Рудні концентрації гідротермальн ого типу	Вторинні концентрації радію (адсорбція)
Інтенсивний водообмін (окисне середовище)	- (Радіоактивні води не утворюються)		Радонові слабко мінералізовані води кори вивітрювання й неглибоких тектонічних тріщин	Урано-радієві води осадових і метаморфічних порід, збагачених розсіяним ураном	Урано-радонові води метаморфічних порід, збагачених акцесоріями, або зон подрібнення в магматичних породах	Урано-радоно-радієві води зони окиснення	Урано-радоно-радієві й урано-радонові води зони окиснення	Радонові води делювіальних, травертинових і залізо-марганцевих відкладень
Ускладнений водообмін (окисно-відновне середовище)	- (Радіоактивні води не утворюються)		Радонові води глибоких тектонічних тріщин	Урано-радієві води осадових і метаморфічних порід	?	Радоново-радієві води зони окиснення	Урано-радонові й урано-радонові води зони окиснення	Радонові води еманувальних «коллекторів» у

	утворюються)	(азотні й вуглекислі)	порід, збагачених розсіяним ураном		відновлення і первинних руд	радієві води зони концентрації первинних руд	тектонічних тріщинах
Надзвичайно ускладнений водообмін (відновне середовище)	Радієві хлоридно-натрієво-кальцієві води високої мінералізації в закритих структурах	- (Підземні води відсутні)	Урано-радієві, рідше радієві води осадових і метаморфічних порід, збагачених розсіяним ураном	?	?	?	?

У запропонованій **А. Н. Токарєвим і А. В. Щербаковим** класифікації радіоактивних вод (таблиця 4), всі радіоактивні води, або точніше, родовища радіоактивних вод* діляться на сім груп:

1. **Радонові води**, пов'язані із зонами інтенсивного та ускладненого водообміну в масивах кислих магматичних порід.
2. **Радієві води**, пов'язані із зоною надзвичайно ускладненого водообміну в осадових і метаморфічних породах.
3. **Уранові води поверхневих водойм** або води, пов'язані із зоною інтенсивного водообміну в осадових і метаморфічних породах, збагачених розсіяним ураном.
4. **Урано-радієві води**, пов'язані із зоною ускладненого водообміну в осадових і метаморфічних породах, збагачених розсіяним ураном.
5. **Урано-радонові води**, пов'язані із зоною окиснення гідротермальних і осадових родовищ урану, радше – із зоною інтенсивного водообміну в магматичних породах, збагачених акцесоріями, а також із зонами подрібнення магматичних порід чи контакту магматичних порід з осадовими.
6. **Урано-радоно-радієві води**, пов'язані із зоною окиснення гідротермальних і осадових родовищ.
7. **Радоно-радієві води**, пов'язані із зонами первинних руд і відновлення родовищ урану.