

РАДОНОВІ ВОДИ

Радонові води являють собою дуже поширену групу радіоактивних вод, що формуються в районах розвитку кислих магматичних порід із підвищеним вмістом радіоактивних елементів. Цим водам властиве формування в розкритих структурах центральних і крайових зон гірських складчастих споруд, що характеризуються інтенсивною, іноді ускладненою циркуляцією підземних вод і розвитком окислювальних процесів. За своїми радіологічними характеристиками цей тип вод характеризується вмістом радону більше 50 еман, радію – менше $1 \cdot 10^{-11}$ г/дм³, і урану – менше $3 \cdot 10^{-5}$ г/дм³.

Залежно від характеру циркуляції води, а також геотермічних, газових і геохімічних особливостей, у цьому типі радіоактивних вод можна виділити три групи:

- води кори вивітрювання;
- води тектонічних тріщин;
- води еманувальних колекторів.

РАДОНОВІ ВОДИ КОРИ ВИВІТРЮВАННЯ

Радонові води кори вивітрювання є найбільш поширеним та вивченим типом радіоактивних вод. Це тріщинні ґрунтові води кори вивітрювання й неглибоких тектонічних тріщин у кислих магматичних породах, що циркулюють на глибині, яка визначається глибиною зони «активної» тріщинуватості порід, що рідко перевищує 30–50 м. Хімічний склад вод обумовлено переважно процесами розкладення силікатів під дією води й вуглекислоти повітря, внаслідок чого води відрізняються малою мінералізацією одні від інших (до 0,5 г/дм³) гідрокарбонатно-кальцієво-магнієвого й гідрокарбонатно-кальцієво-натрієвого типів. Інколи буває певною мірою підвищений вміст сульфатів; рН вод – завжди більше 7.

Мінерали магматичних гірських порід, що утворилися при високих температурах і тиску, є нестійкими в термодинамічних умовах поверхневої

зони. Під впливом різних фізико-хімічних процесів (коливання температури, вплив кисню й вуглекислоти повітря і води, дії рослинних і тваринних організмів і продуктів їх розкладання) вони зазнають значних змін у складі, перетворюючись на мінерали, стійкі в нових термодинамічних умовах.

Товща земної кори, де відбуваються ці процеси вивітрювання, знаходиться між земною поверхнею та рівнем ґрунтових вод. Однією з основних властивостей зони вивітрювання є та обставина, що вуглекислота тут витісняє кремнекислоту із її сполук.

Схема класифікації природних радіоактивних вод СРСР (за А. Н. Токарєвим)

Радіологічний тип вод		Генетичний тип вод		Гідрогеологічний тип вод	Газовий склад вод
Води простого радіологічного складу	Радонові води	Води, пов'язані з розсіяним вмістом радіоактивних елементів або з їх незначними місцевими концентраціями	Води кори вивітрювання (верхня тріщинувата зона гранітів)	Третинні ґрунтові води	O ₂ и CO ₂
			Води еманувальних колекторів	Третинні напірні води	
			Води тектонічних тріщин у гранітах		
	Радієві води		Води осадових і метаморфічних порід	Пластові та пластово-тріщинні напірні води	H ₂ S, CH ₄ , N ₂
	Уранові води		Воды поверхневих водойм	Води замкнутих водойм і струмків	O ₂
Води складного радіологічного складу	Урано-радієві води		Води осадових і метаморфічних порід, збагачених розсіяним ураном	Пластові та пластово-тріщинні ґрунтові й напірні води	O ₂ CH ₄
	Урано-радонові води		Води магматичних порід, збагачених акцесоріями, а також зон подрібнення магматичних порід або контакту магматичних і осадових порід	Тріщинні, пластово-тріщинні та пластові води	O ₂ , H ₂ S, CH ₄
	Урано-радоно-радієві води	Води, пов'язані з рудними концентраціями радіоактивних елементів	Води зони окиснення родовищ урану		
	Радоно-радієві води		Води зони первинних руд і відновлення родовищ урану	Тріщинні та пластово-тріщинні напірні води	N ₂ , CO ₂

Продовження таблиці 4

Радіологічний тип вод		Умови формування					
		літологічні	структурні	гідродинамічні	геохімічні	термічні	Фізико-хімічні
Води простого радіологічного складу	Радонові води	Масиви кислих магматичних порід	Розкриті структури (центральна й крайова зони гірських складчастих споруд)	Зона інтенсивного водообміну Зона ускладненої циркуляції	Окисна зона Відновна зона	До 20 °С Більше 20 °С	Еманування (вилужування, адсорбція, розчинення)
	Радієві води	Осадів і метаморфічні породи	Закриті структури (западнини)	Зони надзвичайно ускладненої циркуляції	Відновна зона		Вилужування (відновлення, розчинення)
	Уранові води	Контакт із кислими магматичними породами, збагаченими ураном	Формування відбувається у безстічних водоймах при значному випаровуванні поверхні (що є більшим або дорівнює притоку)				Концентрація (осадження, відновлення)
Води складного радіологічного складу	Урано-радієві води	Осадів і метаморфічні породи, збагачені ураном	Розкриті структури Напіврозкриті структури	Зона інтенсивного водообміну Зона ускладненого водообміну	Окисна зона Окисно-відновна зона	Різні	Вилужування
	Урано-радонові води	Кислі магматичні породи	Розкриті структури	Зона інтенсивного водообміну	Окисна й окисно-відновна зона	До 20 °С	Окиснення, розчинення, еманування (осадження, адсорбція)
	Урано-радоно-радієві води	Родовища уранових руд	Розкриті й напіврозкриті структури (центральна і крайова зони гірських складчастих споруд)	Зона ускладненої циркуляції		Різні	Вилужування, еманування (адсорбція, розчинення)
	Радоно-радієві води						

Продовження таблиці 4

Радіологічний тип вод		Хімічний склад вод			Радіологічна характеристика				
		pH	Мінералізація, г/дм ³	Формула хімічного складу	Rn	Ra	U	$\frac{Rn}{Ra}$	$\frac{Ra}{U}$
Води простого радіологічного складу	Радонові води	6,0–7,0	0,2–4,0	Звичайно	> 50	< 1·10 ⁻¹¹	< 3·10 ⁻⁵	>> рівн.	~ рівн.
	Радієві води	6,5–7,0	До 300,0	Звичайно	< 50	> 1·10 ⁻¹¹	< 3·10 ⁻⁵	~ рівн.	>> рівн.
	Уранові води	Різна			< 50	< 1·10 ⁻¹¹	> 3·10 ⁻⁵	< рівн.	< рівн.
Води складного радіологічного складу	Урано-радiєві води	7,0–7,5 6,5–7,0	До 5,0 До 100,0	Різна Різна	< 50	< 1·10 ⁻¹¹	> 3·10 ⁻⁵	~ рівн.	< рівн.
	Урано-радонові води	3,5–8,5	До 100,0	Різна	< 50	> 1·10 ⁻¹¹	> 3·10 ⁻⁵	~ рівн.	~ рівн.
	Урано-радоно-радiєві води				> 50	> 1·10 ⁻¹¹	> 3·10 ⁻⁵	> рівн.	< рівн.
	Радоно-радiєві води	6,5–8,5	0,2–5,0	Різна	> 50	> 1·10 ⁻¹¹	< 3·10 ⁻⁵	> рівн.	> рівн.

Інакше кажучи, відбувається розпад кремнекислих сполук, що є достатньо стійкими в нових термодинамічних умовах.

Найголовнішим агентом, що обумовлює руйнування магматичних гірських порід, є вода, насичена CO_2 . Дія такої води на гірські породи виражається передусім у вилужуванні розчинних солей, що входять до складу силікатів.

Усі процеси хімічного вивітрювання магматичних і метаморфічних порід (за **А. А. Сауковим**), зводяться до:

- окиснення (дія кисню вод на сполуки, що містять алюмосилікати й важкі метали);
- гідратації;
- винесення катіонів ($\text{Na}\cdot$, $\text{K}\cdot$, $\text{Li}\cdot$, $\text{Ca}\cdot\cdot$, $\text{Mn}\cdot\cdot$ та ін.);
- накопичення в осаді колоїдів (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 та ін.).

Із геохімічної точки зору надзвичайно важливим є відокремлення одно- і двовалентних катіонів від три- і чотиривалентних, унаслідок чого шляхи міграції тих та інших розходяться. Особливо легко переходять у розчини одновалентні катіони ($\text{Na}\cdot$, $\text{K}\cdot$, $\text{Li}\cdot$). Трохи важче – двовалентні ($\text{Ca}\cdot\cdot$, $\text{Mn}\cdot\cdot$, $\text{Fe}\cdot\cdot$ та ін.), іще важче – три- і чотиривалентні. Останні значною мірою накопичуються на місці й переносяться головним чином механічним шляхом.

Збагачення підземних вод тим чи іншим катіоном являє собою надзвичайно складний процес, що залежить від таких факторів:

- 1) петрографічний склад руйнівних порід;
- 2) ступінь **зруйнованості** того чи іншого силікату. Проведені дослідження показали, що за ступенем **зруйнованості** силікати можна розташувати в ряд: піроксени – амфіболи – плагіоклази – слюди – ортоклаз;
- 3) розчинність того чи іншого утвореного карбонату;
- 4) міграційна здатність того чи іншого катіона.

Міграційна здатність елементів, що виносяться із магматичних і метаморфічних порід, відрізняється від їх здатності переходити в розчин, що

пояснюється біохімічними ґрунтоутворювальними й адсорбційними процесами. Дані про міграційні здатності елементів наводяться в таблиці 5.

Таблиця 5

Міграційна здатність елементів (за Б. Б. Полиновим)

№ ряду	Міграційний ряд елементів	Склад міграційного ряду	Вміст у воді, г/дм ³
1	Енергійно виносяться	Cl, Br, J, S	$n \cdot 10$
2	Легко виносяться	Ca, Na, Mg, K	$n \cdot 1$
3	Рухливі	SiO ₂ (силікатів), P, Mn	$n \cdot 10^{-1}$
4	Слабкорухливі	Fe, Al, Ti	$n \cdot 10^{-2}$
5	Нерухомі	SiO ₂ (кварц)	$n \cdot 10^{-3}$

Температура радонових вод кори вивітрювання – низька й визначається температурою повітря. Дебіт джерел – різний і залежить від атмосферних опадів.

Основним фізико-хімічним процесом, що визначає формування радонових вод кори вивітрювання, є еманування. Відповідно, радіоактивність вод залежить від коефіцієнта еманування порід і абсолютного вмісту радіоактивних елементів у породі. У цьому зв'язку характерною особливістю радонових вод кори вивітрювання є чіткий зв'язок їх радіоактивності з петрографічним складом і ступенем руйнування порід, якими вони циркулюють.

Вміст урану й радію у водах кори вивітрювання кислих магматичних порід загалом незначний (радiю $n \cdot 10^{-13}$ – $n \cdot 10^{-12}$ г/дм³ і урану $n \cdot 10^{-7}$ – $n \cdot 10^{-6}$ г/дм³), хоча в окремих районах і спостерігається дещо підвищений вміст урану до $3 \cdot 10^{-5}$ г/дм³). У тих випадках, коли циркуляція радіоактивних вод відбувається тонкими, ізольованими одна від одної тріщинами, радіоактивність вод протягом кількох метрів нерідко змінюється дуже сильно: від одиниць до кількох десятків еман.

Особлива роль циркуляції радонових вод належить пегматитовим утворенням. Характеризуючись значною тріщинуватістю, пористістю, а іноді навіть кавернозністю, пегматитові жили часто є гарними колекторами, що

акумулюють окремі водяні струмені. Вихід джерел на поверхню часто пов'язаний із пегматитовими жилами, води яких відрізняються великим дебітом при тому самому середньому вмісті радону.

РАДОНОВІ ВОДИ ТЕКТОНІЧНИХ ТРІЩИН

До цього типу радонових вод належать напірні води глибоких тектонічних тріщин у ділянках молодих орогенетичних рухів (альпійського віку). Формування їх відбувається у зонах деформації гранітних масивів, унаслідок чого вони мають форму штоковидних та інших тіл. Живлення вод глибоких тектонічних тріщин відбувається за рахунок атмосферних вод, які завдяки глибокій циркуляції тріщинами можуть набувати високої температури і специфічного хімічного і газового складу; однак ділянки живлення часто розташовано на значній відстані від ділянки розвантаження.

Усі води тектонічних тріщин є газу вальними (виділяють, головним чином, азот і вуглекислоту). Утворення вод того чи іншого газового складу, на думку **А. А. Смирнова**, пов'язано із явищем термодифузії, тобто розподіл газів атмосфери за об'ємною вагою при зміні температури. При цьому більш легкі гази (азот та інертні) зв'язані з водами високої температури, а більш важкі (вуглекислота) – з низькотемпературними водами.

За температурними умовами, хімічним і газовим складом у групі радонових вод тектонічних вод виділяються:

- 1) радонові води азотних терм;
- 2) радонові вуглекислі води.

Радонові води азотних терм

До цього типу належать напірні термальні води глибоких тектонічних тріщин у крайових зонах гірських складчастих споруд. Значна глибина циркуляції підземних вод зумовлює їх високу температуру (до 100 °С). У зв'язку зі зміною фізико-хімічних умов на глибині гідрокарбонат-іон поверхневих вод заміщується на хлор- і сульфат-іони, а кальцій- і магній-іони – на натрій-іони, внаслідок чого води набувають залежно від глибини

циркуляції від гідрокарбонатно-натрієвого до сульфатно-хлоридно-натрієвого і хлоридно-сульфатно-натрієвого складу. Для цих вод характерними є невелика мінералізація (до 1 г/дм³, частіше 0,2 – 0,4 г/дм³), високі значення рН (7,6 – 8,5) і значний вміст кремнезему (до 0,1 г/дм³). Газовий склад вод характеризується виділенням N₂ із домішкою CO₂, O₂ та інертних газів (Ar, Ne, Xe).

Як приклад у таблиці 6 наводиться газовий склад азотних терм Терської Ала-Тау.

Унаслідок високої температури (до 100 °С) і значного дебіту термальних вод вміст радону в них нижчий, ніж у радонових водах кори вивітрювання, і в середньому становить 50 еман, хоча в окремих випадках доходить і до 200 – 300 еман. Наявність відновних умов на глибині перешкоджає збагаченню вод ураном, незважаючи на їх високу температуру.

Сміст урану в термальних водах – менший за середній вміст його у водах кори вивітрювання і становить $2 \cdot 10^{-6}$ – $8 \cdot 10^{-6}$ г/дм³. Навпаки, висока температура води і наявність у ній кремнієвої кислоти сприяє більшому збагаченню вод радієм ($2 \cdot 10^{-12}$ – $8 \cdot 10^{-12}$ г/дм³) порівняно з водами кори вивітрювання.

Таблиця 6

Газовий склад (у %) азотних терм Терської Ала-Тау

(За І. М. Прокопенком)

Джерело	H ₂ S	CO ₂	O ₂	CH ₄	N ₂ і благородні газы
Джети-Огуз	0,1	0,4	0,1	2,0	97,4
Тон	0,4	0,5	0,4	1,5	97,2
Кизил-Су	-	0,6	0,2	0,4	98,8
Ак-Су	-	-	-	-	100,0
Бозщук	-	0,9	6,0	-	93,1

Режим термальних радонових вод зі зміною температури повітря та кількістю атмосферних опадів не пов'язаний як за дебітом, температурою, хімічним і газовим складом, так і за радіоактивністю.

Радонові вуглекислі води

До цієї групи радонових вод належать тріщинні води, що газують вуглекислою. Аналогічно водам попереднього типу, їх формування приурочено до зона молодих деформацій гранітних масивів. Температура вуглекислих вод, що циркулюють на менших глибинах, - невелика – не перевищує 10–15 °С. За хімічним складом вони належать до гідрокарбонатно-кальцієвого типу з мінералізацією 0,2–0,5 г/дм³. Вміст вуглекислоти у водах досягає 3,6 г/дм³. У тих випадках, коли вуглекислі води не виходять безпосередньо із тріщин у кристалічних породах, а здійснюють більш чи менш тривалий шлях по осадових породах, що перекривають їх чи прилягають до них, вони можуть підвищувати свою температуру і збагачуватись різними водорозчинними солями, набуваючи різної мінералізації й хімічного складу (вуглекислі води Кавказьких Мінеральних Вод). Режим радонових вуглекислих вод пов'язано з атмосферними опадами й температурою повітря.

Унаслідок того, що формування вуглекислих вод відбувається на невеликій глибині, в окисних і відновних умовах, вони у багатьох випадках характеризуються підвищеним вмістом урану (до $2 \cdot 10^{-5}$ – $3 \cdot 10^{-5}$ г/дм³). Наявність у водах значної кількості вуглекислоти визначає підвищений вміст у них і радію. Це пояснюється тим, що агресивна дія вуглекислоти на стінки водопровідних тріщин створює сприятливі умови для певного збагачення вод радієм, яке при цьому не виходить за межі кларку (до $1 \cdot 10^{-11}$ – $2 \cdot 10^{-11}$ г/дм³).

Нерідко внаслідок фізико-хімічної взаємодії вуглекислих вод із навколишніми породами води втрачають свою агресивність і більш чи менш значна частина радію адсорбується на стінках водопровідних тріщин. або в делювіальних, травертинових і залізо-марганцевих відкладеннях у місці виходу джерела на поверхню землі. Це сприяє створенню еманувальних колекторів і додатковому збагаченню вод радоном (понад те, якого води набувають за рахунок еманування магматичних порід). Унаслідок усього цього, а також низької температури вміст радону у вуглекислих водах вищий,

ніж у водах азотних терм, і в середньому становить 100 еман (але може досягати 250–300 еман).

РАДОНОВІ ВОДИ ЕМАНУВАЛЬНИХ КОЛЕКТОРІВ

Для пояснення походження підземних вод із високим вмістом радону, свідомо не пов'язаних із рудними концентраціями урану і радію, доводиться припустити наявність у породах вторинних концентрацій радію, що утворюються внаслідок випадіння радію із водних розчинів у результаті вищеописаних процесів адсорбції (в тектонічних, мілоїтизованих зонах, у тріщинах, заповнених глинистим матеріалом, у карбонатних відкладеннях, делювіальних і залізо-марганцевих відкладеннях). При цьому радій, накопичуючись на стінках водопровідних тріщин, утворює колектори, що інтенсивно еманують, які зумовлюють сильне збагачення вод радоном.

За характером циркуляції радонові води еманувальних колекторів можуть бути як ґрунтовими, так і напірними. Вони мають різний хімічний і газовий склад. Вміст радону в них може досягати кількох тисяч еман, вміст урану і радію – незначний (урану $n \cdot 10^{-6}$ г/дм³ і радію $n \cdot 10^{-12}$ г/дм³). Найбільш вивченими є вуглекислі радонові води в травертинових відкладеннях.

Підземні води, насичені вуглекислою, при виході на поверхню землі втрачають вуглекислоту, внаслідок чого вони можуть відкладати вапнякові відкладення – травертини, до іноді досягають значної потужності. Одночасно із випадінням із води вуглекислого кальцію нерідко відбувається відкладення залізистих і залізо-марганцевих сполук у вигляді жовтуватих, червонуватих або майже чорних охристих осадів. При випадінні із вуглекислих вод карбонатних або залізо-марганцевих осадів у більшості випадків до осаду залучається радій, що міститься у водах, навіть у незначних концентраціях, унаслідок процесів співосаду. Як наслідок, травертинові й особливо залізисті осадки сильно збагачуються радієм.

Цілком можливо, що збагачення осадків радієм відбувається не лише у процесі самого опадоутворення, але й після закінчення седиментації,

внаслідок адсорбційних процесів, що відбуваються при русі вуглекислих чи інших радійвмісних вод по раніше відкладених осадах. Якщо вміст радію у звичайних карбонатних породах складає $n \cdot 10^{-11}$ %, то збагачення радієм травертинових відкладень у сотні й тисячі разів більше ($n \cdot 10^{-8}$ %). Природно, що такі відкладення мають значну еманувальну здатність. При повільній циркуляції такими породами води можуть інтенсивно збагачуватися радоном.

Таким чином, радіоактивні води травертинових відкладень утворені завдяки вторинним процесам концентрації радію й не пов'язані з жодними рудними концентраціями урану. Радіоактивність вод травертинових відкладень тісно пов'язана з умовами циркуляції вод, розміром водопровідних тріщин і швидкістю руху води. Найбільш радіоактивні води зазвичай мають незначний дебіт.