

551
А 72

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. АРТЕМА



Ю. И. Антонов
В. В. Елизарьба



РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЯ

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1978

551
A 72

1984

**Министерство высшего и среднего специального
образования СССР**

**Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени
горный институт им. Артема**

**Д.И. Антонов
В.В. Елизарьева**

**РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЯ
(Учебное пособие)**

**(Кафедра гидрогеологии
и инженерной геологии)**

~~163309~~

**Институт горного дела
им. А. А. Скочинского
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА**

**Днепропетровск
1978**

В учебном пособии излагаются факторы, влияющие на обогащение природных вод радиоактивными элементами, их распространенность и возможные формы миграции. Описаны различные типы природных радиоактивных вод и дана их классификация. Приведены сведения об основных методах поисков урановых месторождений, роли радиогидрогеохимического метода в общем комплексе поисковых работ на уран, обоснованы задачи и стадии радиогидрогеологических исследований. Достаточно подробно рассмотрены методы определения радиоактивных элементов в природных водах. Учебное пособие предназначено для студентов специальности "Гидрогеология и инженерная геология", а также для гидрогеологов и других специалистов, занимающихся вопросами радиогидрогеологии.

Табл. 20, ил. 5, список лит. - 13 назв.

Рецензенты:

кафедра гидрогеологии Криворожского горнорудного института;
кандидат геолого-минералогических наук
М.А. Шинкаревский (ДО ИМР).



© Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени
горный институт им. Артема (ДГИ), 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Радиогидрогеология – отрасль гидрогеологии, изучающая закономерности распространения в земной коре природных радиоактивных вод, условия их формирования и циркуляции, обогащения радиоактивными элементами, зональность радиоактивных вод; она также изучает методику исследования радиохимического состава вод и использование результатов этих исследований для поисков месторождений урана.

Систематическому изучению радиоактивности горных пород и минералов, а также природных вод положило открытие на рубеже XIX и XX вв. французским физиком А.Беккерелем явления естественной радиоактивности урановых солей. Исследованием этого явления занялись ученые многих стран и в первую очередь супруги М.Склодовская-Кюри и П.Кюри во Франции и Э.Резерфорд в Англии. В 1898 г. М.и П.Кюри из урановой смолики выделили новый химический элемент – радий и установили радиоактивность тория и полония. Природа радиоактивности успешно изучалась Э.Резерфордом, который исследовал свойства альфа-и бета-лучей, а в 1900 году открыл гамма-излучение и выяснил его физическую природу.

В 1902–1904 гг. в водах некоторых минеральных источников было обнаружено присутствие радона и воды с повышенным содержанием его получили название радиоактивных (радоновых). В дальнейшем радиоактивными стали называть воды с повышенным содержанием и других радиоактивных элементов. Оказалось, что воды, обогащенные радоном, благотворно воздействуют на человеческий организм. Это послужило толчком к организации исследований на радиоактивность многих лечебных минеральных источников как на территории СССР, так и за рубежом. Кроме того, было установлено, что радиоактивное излучение может быть успешно использовано для лечения злокачественных опухолей, ревматизма и других заболеваний. Поэтому с 1906 г. началась промышленная добыча радия из урановых руд, которые до этого использовались лишь как сырье для изготовления красок.

Значение радиоактивности впервые в мире по достоинству было оценено акад. В.И. Вернадским, который еще в 1910 г. на общем собрании Российской Академии наук говорил: "Перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению". По его инициативе в 1909 г. в России была создана Ради-

евая экспедиция Академии наук, а в 1911 г. им составлена первая сводка урановых рудопроявлений мира. В эти годы под руководством В.И.Вернадского с участием А.Е.Ферсмана, И.Г.Хлопина, К.А.Ненадзевича, В.И.Крыжановского, Д.С.Белянкина и других ученых в России были начаты поиски урановых месторождений и разработаны основные положения геологии и геохимии радиоактивных элементов. Однако широкий размах и планомерность эти работы получили только после Великой Октябрьской социалистической революции.

В 1922 г. все учреждения Петрограда, занимавшиеся изучением радиоактивности, были объединены в Государственный радиевый институт, в котором начались систематические исследования в области геохимии радиоактивных элементов, радиоактивных методов определения абсолютного возраста минералов и горных пород и радиохимии и физики атомного ядра.

В 30-х годах XX ст. присутствие значительных количеств радия и его изотопов $MtTh$ и ThX было обнаружено в сильно минерализованных водах ряда нефтяных месторождений; в некоторых случаях содержание их достигало промышленных концентраций. Воды с повышенным содержанием радия получили название радиевых. Дальнейшими исследованиями было установлено, что на территории СССР повышенным содержанием радия отличаются не только воды нефтяных месторождений, но и все высокоминерализованные воды хлоридно-натриево-кальциевого типа, пользующиеся широким распространением.

В 1934 г. Ф. и И. Жолио-Кюри была открыта искусственная радиоактивность и получены первые искусственные радиоизотопы. Дальнейшие исследования выдающихся физиков ряда стран привели к созданию атомного реактора и осуществлению в конце 1942 г. в США под руководством Э.Ферми контролируемой реакции расщепления атомного ядра.

С появлением реальной возможности использования атомной энергии в практических целях во всем мире начался новый этап бурного развития поисков и разведки месторождений урана и его добычи. Интенсивное развитие получила и радиогидрогеология, т.к. оказалось, что месторождения урана можно успешно разыскивать, изучая радиохимический состав природных вод.

Правящие круги США направили работу своих ученых в области ядерной физики исключительно на создание атомного оружия. Первая атомная бомба была создана в 1945 г. и взорвана в опытных целях в июле того же года. В августе 1945 г. две атомные бомбы были сброшены американскими летчиками на японские города Хиросиму и Нагасаки. В этих городах от взрывов, огня и радиоактивного излучения погибло

около 300 тысяч в основном мирных жителей. В этом никакой военной необходимости уже не было. Истинная цель этих варварских актов заключалась в стремлении запугать Советский Союз, другие миролюбивые страны и народы с тем, чтобы диктовать им свои условия. Известный английский физик П.Блэккет справедливо указывал, что применение атомной бомбы было не столько последним военным актом второй мировой войны, сколько первой большой операцией в холодной дипломатической войне против СССР. Так величайшее открытие XX века - радиоактивный распад - было использовано империалистами США в человеконенавистнических разрушительных целях.

При таком положении Советский Союз, безусловно, должен был приложить все усилия к тому, чтобы в кратчайший срок ликвидировать атомную монополию США и создать свое собственное атомное и термоядерное оружие. "Мы хорошо понимали ту огромную ответственность, которая лежала на нас, советских специалистах, - говорил в беседе с корреспондентом "Комсомольской правды" известный ученый чл.-кор. АН СССР В.С.Емельянов. И ценой невероятных усилий, не щадя себя, забыв про сон, отдых, советские ученые сделали все для решения атомной проблемы".^{х)} Уже в 1947 г. в СССР была разработана технология создания атомных бомб, а в последующие годы были созданы атомные и термоядерные виды оружия.

Нашей стране принадлежит ведущая роль в разработке проблемы мирного использования атомной энергии. Исследования крупных советских ученых под руководством И.В.Курчатова позволили освоить проектирование и строительство атомных электростанций и уже в 1954 г. была пущена первая из них. В настоящее время в нашей стране построено еще несколько крупных атомных электростанций и разработаны различные конструкции атомных реакторов, позволяющие использовать ядерное горючее в самых различных целях. В атомных реакторах создаются радиоактивные изотопы, которые находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства (геология, гидрогеология, медицина, сельское хозяйство и многие другие отрасли науки и техники). В наше время атомная энергия превратилась из энергии будущего в энергию сегодняшнего дня, причем роль ее в общем энергетическом балансе страны непрерывно возрастает.

Учитывая перспективы использования атомной энергии в решении

х) В. Емельянов. "О нашем атоме" - "Комсом. правда", 1971, 12 августа.

различных народнохозяйственных задач, в Советском Союзе проводятся фундаментальные научные исследования в области геологии урана, непрерывно совершенствуются методы поисков урановых месторождений, в том числе и геохимические, позволяющие выявлять ореолы рассеяния радиоактивных элементов в горных породах, природных водах и растениях.

Исследования в области геохимии радиоактивных элементов и выявления закономерностей формирования урановых месторождений, начатые по инициативе акад. В.И.Вернадского, были продолжены Д.И.Щербаковым, А.П.Виноградовым, А.Е.Ферсманом, А.А.Сауковым, В.Г.Мелковым, В.В.Щербиной и многими другими учеными.

Настоящее учебное пособие написано доцентом Ю.И. Антоновым на основе лекций, читаемых студентам специальности "Гидрогеология и инженерная геология". Большую помощь в его написании и оформлении оказала асс. кафедры В.В.Елизарьева. В частности, ею написана II глава.

Глава I. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБОГАЩЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ВСД РАДИОАКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В задачу радиогидрогеологических исследований при поисках и разведке месторождений входит выявление и изучение различных факторов, влияющих на обогащение природных вод радиоактивными элементами и формирование радиоактивных вод. Условия обогащения природных вод радиоактивными элементами весьма сложны и разнообразны. Они определяются комплексом геологических, гидрогеологических и физико-химических условий и, прежде всего, условиями миграции радиоактивных элементов в подземных водах и условиями концентрации и рассеяния их в горных породах.

Большая роль в миграции радиоактивных элементов принадлежит подземным водам. Они, с одной стороны, влияют на содержание радиоактивных элементов в горных породах, а с другой - содержание радиоактивных элементов в подземных водах само определяется формой нахождения и концентрацией радиоактивных элементов в горных породах, т.е. между содержанием радиоактивных элементов в подземных водах, циркулирующих по горным породам, устанавливается динамическое равновесие. Это равновесие постоянно нарушается при движении подземных вод по горным породам как в результате радиоактивного распада, так и за счет процессов взаимодействия подземных вод с горными породами (выщелачивание, растворение, окисление, адсорбция, осаждение и др.).

В одних природных условиях подземные воды обуславливают формирование рудных концентраций радиоактивных элементов, в других - приводят к интенсивному разрушению существующих урановых месторождений. Все это определяет необходимость и важность изучения основных закономерностей формирования и распространения различных типов природных радиоактивных вод.

На условия обогащения природных вод радиоактивными элементами влияют: физико-химические свойства радиоактивных элементов; содержание и формы нахождения радиоактивных элементов в горных породах; тип горных пород и руд, их физические свойства; геолого-структурные и гидрогеологические условия; химический состав природных вод; геохимическая обстановка.

1.1. Физико-химические свойства радиоактивных элементов

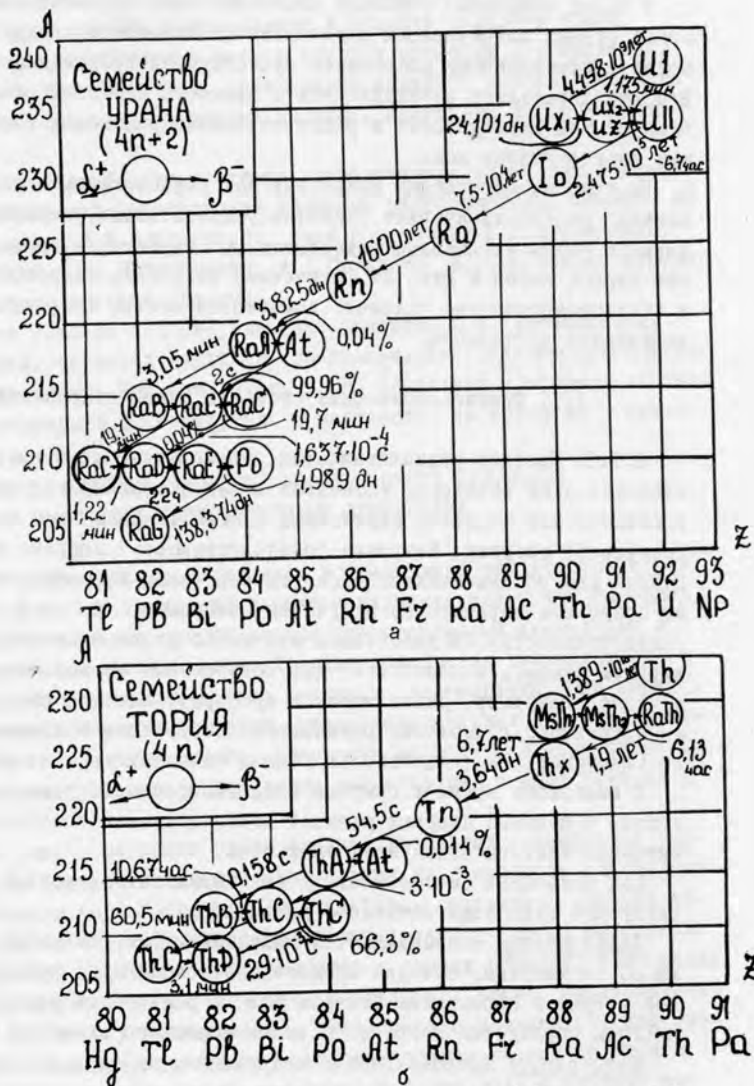
1.1.1. Явление радиоактивности. Радиоактивностью называется свойство ядер некоторых элементов самопроизвольно распадаться с испусканием или захватом заряженных частиц и выделением определенного количества энергии. Название "радиоактивность" впервые предложено П.Кюри для обозначения способности некоторых веществ самопроизвольно испускать характерные излучения (например, α , β или γ - радиоактивность). В дальнейшем это слово стали применять в более широком смысле, в частности, для обозначения способности давать излучение (например, радиоактивный препарат) или для обозначения количественного содержания радиоактивных изотопов в каком-либо веществе (например, радиоактивность воды в единицах кюри на литр).

В настоящее время в природе известно более 60 радиоактивных изотопов. С помощью ядерных реакций можно получить искусственно радиоактивные изотопы почти всех элементов.

Для природных (естественных) радиоактивных элементов известны следующие виды радиоактивного распада.

Альфа-распад сопровождается выделением (испусканием) из ядра атома α - частицы, которая представляет собой ядро атома гелия с массой четыре и порядковым номером два. В результате испускания α - частицы образуется новое ядро атома дочернего элемента (рис. 1.1).

Бета-распад сопровождается испусканием из ядра атома β - частицы (электрона). При этом порядковый номер вновь образованного изотопа увеличивается на единицу, а атомный вес остается без изменения (см.рис. 1.1).



Спонтанное деление ядра представляет вид радиоактивного превращения, который сопровождается расщеплением ядра на два осколка примерно одинакового атомного веса и испусканием 2-3 нейтронов.

Электронный K - захват - это вид радиоактивного превращения, когда ядро атома захватывает электрон с ближайшей к ядру электронной K - оболочки. Из естественных радиоактивных элементов путем K - захвата распадается радиоактивный изотоп калия (K^{40}), атом K^{40} при этом переходит в Ar^{40} .

Гамма (электромагнитное) - излучение. Оно не является самостоятельным видом излучения, которое бы приводило к превращению ядра, а сопровождает излучение тех или иных заряженных частиц (α , β , K - захват). Сущность γ - излучения состоит в том, что при α - или β - распаде некоторые из вновь образовавшихся ядер оказываются в возбужденном состоянии и при переходе в нормальное состояние избыток энергии излучают в виде кванта электромагнитной энергии.

1.1.2. Законы радиоактивных превращений. Радиоактивное превращение или, как его часто называют, распад радиоактивного ядра подчиняется строго определенному закону, установленному Э.Розерфордом и Ф.Содди в 1902 г. на основе опытных данных. Согласно этому закону число распадающихся за малый промежуток времени атомов радиоактивного элемента (dN) пропорционально наличному числу атомов (N), постоянной распада (λ) и промежутку времени (dt), что можно выразить математической формулой

$$-dN = \lambda N dt. \quad (1.1)$$

Для конечного промежутка времени (t) закон (1.1) выражается формулой

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.2)$$

где N_0 - число атомов радиоактивного элемента в начальный момент времени; N_t - число атомов, оставшихся не распавшимися за время t ; e - основание натуральных логарифмов; λ - постоянная распада, выражающая долю наличного количества атомов, распадающихся в единицу времени (ее размерность t^{-1}).

Более наглядной характеристикой скорости радиоактивного распада служит величина периода полураспада (T), т.е. времени, в течение которого распадается половина наличного числа атомов. Период

полураспада (T) связан с константой распада (λ) следующей зависимостью

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.3)$$

Практически полный распад наступает за время десяти периодов полураспада ($10T$).

При радиоактивном распаде, сопровождающемся испусканием заряженной частицы, меняется заряд ядра, а, следовательно, и место, занимаемое элементом в периодической системе.

Ф. Содди и К. Фаянсом на основании эмпирических данных сформулированы "Правила смещения".

1. После испускания α - частицы вновь образовавшийся элемент смещается на 2 места влево в периодической системе; атомный вес при этом уменьшается на 4 единицы.

Например: $U^{238} \rightarrow \alpha = Th^{234}$

Период полураспада $4.51 \cdot 10^9$ лет 24,5 дня

Группа VI IV

Порядковый номер 92 90

2. При испускании β - частицы элемент смещается на одно место вправо; атомный вес остается без изменения.

Например: $Th^{234} \rightarrow \beta = Pa^{234}$

Период полураспада 24,5 дня 1,14 мин.

Группа IV V

Порядковый номер 90 91

3. При k - захвате элемент передвигается на одно место влево; атомный вес остается без изменения (см. I.I.I. Электронный k - захват).

4. Испускание γ - лучей не меняет химической природы атома.

I.I.3. Характеристика ядерных излучений. Излучения, испускаемые радиоактивными веществами, неоднородны по своей природе и состоят из трех резко различных видов излучений: альфа-излучение, состоящее из положительно заряженных частиц, бета-излучение - поток отрицательных частиц и гамма-излучение, не несущее электрического заряда.

Альфа-частицы имеют массу, равную четырем атомным единицам

$\sim 6.6 \cdot 10^{-24}$ примерно в 7000 раз больше массы электрона. Скорость

α - частицы при вылете из ядра достигает около $1/20$ скорости света; траектория α - частиц прямолинейна. Путь, который проходит

α - частица в веществе до полной потери энергии, называется пробегом α - частицы, а длина (величина) этого пути - длиной пробега. Величина пробега α - частицы обратно пропорциональна плотности газа и колеблется от 2 до 8 см; отдельные частицы (одна на миллион), так называемые длиннопробежные, имеют длину пробега до 11 см. Альфа-частицы обладают большой ионизирующей^{х)} способностью, т.е. на 1 см пути пробега в воздухе при нормальном давлении и температуре образуют в среднем порядка 10000 пар ионов на каждую α - частицу. Количество пар ионов, образуемых α - частицей на 1 см пути пробега, называется удельной ионизирующей способностью.

Бета-частицы представляют собой поток быстро движущихся электронов с зарядом, равным одному элементарному заряду с массой, равной $9.1 \cdot 10^{-28}$. Скорость β - частиц колеблется от 0,24 до 0,96 скорости света. Удельная ионизирующая способность β - частиц в воздухе в 1000 раз меньше, чем α - частиц и составляет примерно 100 пар ионов на 1 см пути пробега. Траектория β - частицы не прямолинейна. Длина пробега в воздухе составляет десятки сантиметров.

Гамма-излучение по своей природе совершенно отлично от α - и β - излучения и представляет собой кванты (порции) электромагнитной энергии, распространяющейся со скоростью света. Гамма-кванты не испытывают отклонений в электрическом и магнитном поле, а также отражений и преломлений в обычных оптических приборах; этим они напоминают рентгеновские лучи. Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью (способно проходить через несколько десятков сантиметров металла) и распространяется прямолинейно.

1.1.4. Семейства радиоактивных элементов. В природе известно три родоначальных элемента: уран-238, актиноуран - 235 и торий - 232, из которых в результате превращений образуются семейства радиоактивных элементов (см. рис. 1.1).

В ряду урана имеется восемь α - излучателей: $U_1 (U^{238})$, $U_{II} (U^{234})$, $J_0 (Th^{230})$, $Ra (Ra^{226})$, $Rn (Rn^{222})$, $RaA (Po^{218})$, $RaC^1 (Po^{214})$, $RaF (Po^{210})$. Бета-излучателями являются: $UX_1 (Th^{234})$, $UX_2 (Pa^{234})$, $RaB (Pb^{214})$, $RaC (Bi^{214})$, $RaD (Pb^{210})$, $RaE (Bi^{210})$. Основными γ -

^{х)} Ионизация - способность отщеплять электроны с внешней оболочки атома.

излучателями являются RaB , RaC и RaC' .

В ряду тория семь α -излучателей: Th (Th^{232}), $PaTh$ (Th^{228}), ThX (Ra^{224}), Th (Rn^{220}), ThA (Po^{216}), ThC (Bi^{212}) и ThC' (Po^{212}). Основными β -излучателями являются $MsTh$, (Ra^{228}), $MsTh_2$ (Ac^{228}), ThB (Pb^{212}), ThC (Bi^{212}), ThC'' (Tl^{208}), а γ -излучателями $MsTh_2$, ThB и ThC .

Семейство актиноурана - это ряд AcU^{235} . В ряду восемь основных α -излучателей (U^{235} , Pa^{231} , Th^{227} , Ra^{223}

Rn^{219} , Po^{215} , Bi^{211}) и четыре β -излучателя (Th^{231} , Ac^{227} , Pb^{211} и Tl^{207}). В природных радиоактивных образованиях содержание актиноурана составляет всего 0,7% от содержания урана.

Ряд тория относится к типу $4n$ (n - целое число). Все члены этого ряда имеют атомные веса, кратные четырем. Например атомный вес Th^{232} : $232 = 4 \times 58$; атомный вес Ra^{228} : $228 = 4 \times 57$ и т.д. Ряд урана относится к типу $4n + 2$. Действительно, атомный вес U^{238} : $238 = 4 \times 59 + 2$; атомный вес Ra^{226} : $226 = 4 \times 56 + 2$ и т.д. Атомные веса членов ряда актиноурана выражаются формулой $4n + 3$:

$$U^{235} : 235 = 4 \times 58 + 3.$$

Ряд $4n + 1$ не был обнаружен в природе. Изотопы, являющиеся членами этого ряда, получены в результате искусственных ядерных реакций. Это так называемый ряд нептуния (Np^{237}_{93}), имеющий период полураспада $2,25 \cdot 10^6$ лет. Считают, что значительная часть природного висмута обязана своим происхождением исчезнувшему ряду нептуния. В состав семейства нептуния входят изотопы урана, тория, протактиния, таллия, свинца, полония, а также почти неизвестных в природе элементов - нептуния, плутония, америция, франция, астата. Открытие новых радиоактивных элементов и изотопов позволяет постепенно восстанавливать цепочку от конца к началу.

Конечными стабильными продуктами в семействах урана, тория и актиноурана являются изотопы свинца (соответственно Pb^{206} , Pb^{208} и Pb^{207}), а в ряду нептуния - таллий (Tl^{205}).

Из большого количества известных в настоящее время радиоактивных элементов в природных водах обнаружены далеко не все. Значительное

распространение в природных водах получили элементы уранового ряда: U , Ra и Rn ; в малых количествах отмечено присутствие короткоживущих продуктов распада Rn : RaA , RaB , RaC , RaD и RaE .

Из радиоактивных элементов ториевого ряда в некоторых типах вод в значительных количествах присутствуют ThX и $MSTh_1$, а в незначительных также $RaTh$, Tn и короткоживущие продукты его распада - ThA , ThB и ThC .

Из радиоактивных элементов актиноуранового ряда в природных водах отмечено присутствие небольших количеств Ac , AcX и An .

1.1.5. Единицы измерения радиоактивности. При радиогидрогеологических исследованиях возникает необходимость в определении количества и концентрации радиоактивных элементов в природных водах. Количество радиоактивного элемента (радиоизотопа) в системе СИ выражается (табл. 1.1) в килограммах (кг), производных от него граммах (г) и миллиграммах (мг).

Таблица 1.1

Вес одного кури некоторых естественных радиоактивных элементов (изотопов)

Изотоп	Вес 1 кури	Изотоп	Вес 1 кури
Th 232	9 т	Th 238 ($RaTh$)	1,2 кг
U 238	3 т	Ra 224 (ThX)	6,2 мг
U 235	465 кг	Po 210	0,22 кг
Th 230 (Io)	53 г	K 40	146 кг
Ra 231	22 г	K (природная смесь)	1230 г
Ra 226	1 г	Pb 87	14,9 т
Ac 227	13,6 мг	Pb (природная смесь)	53,5 т
Pb 210 (RaD)	18,8 мг	Sm 144	273 т
Ra 228 ($MSTh_1$)	4,25 мг	Sm (природная смесь)	1820 т

Внесистемными единицами являются кури и миллиграмм-эквивалент радия (мг-экв Ra).

Кури - количество любого радиоактивного вещества, в котором в 1 секунду распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомных ядер. Это универсальная единица для измерения радиоактивного изотопа. Так как кури большая

единица, на практике применяются производные от кюри единицы: милликюри ($1 \cdot 10^{-3}$ кюри); микрокюри ($1 \cdot 10^{-6}$); нанокюри ($1 \cdot 10^{-9}$ кюри); пикокюри ($1 \cdot 10^{-12}$ кюри).

Единица мг-экв. Ра применяется для выражения количества гамма-излучающих препаратов. Миллиграмм-эквивалент радия - это такое количество радиоактивного вещества, которое создает γ - излучение, эквивалентное γ - излучению 1 мг Ра в одинаковых условиях измерения.

Концентрация любого радиоактивного изотопа в веществе выражается в единицах кюри или ее производных на единицу объема или массы (кюри/л, кюри/кг, кюри/м³ и т.д.).

Концентрация радона в воде или воздухе выражается в эманах: 1 эман соответствует $1 \cdot 10^{-10}$ кюри/л.

1.1.6. Геохимические свойства радиоактивных элементов. Свойства химических элементов зависят от строения их атомов, представляющих собой нейтральную электромагнитную систему, в которой заряд ядра равен суммарному заряду электронов. Численное выражение заряда ядра соответствует порядковому номеру элемента и определяет его положение в периодической системе Д.И.Менделеева. Электроны располагаются вокруг ядра на определенных уровнях и число их равно порядковому номеру элемента. Строением электронных оболочек определяются все химические свойства элементов: валентность, щелочные или кислотные свойства, величины ионных радиусов и окислительно-восстановительных потенциалов, сродство к кислороду или сере и т.д.

Родоначалником наиболее важного ряда радиоактивных элементов является уран. Геохимия его определяется положением в периодической системе Д.И.Менделеева и зависит от строения ядра атома и его внешних электронных оболочек.

Уран является самым тяжелым из химических элементов, порядковый номер его 92, атомный вес 238,07. Он завершает периодическую систему природных элементов и, как все тяжелые элементы, начиная с полония (порядковый номер 84, атомный вес 210), обладает радиоактивностью. Кроме урана-238, который составляет 99,2739% в природе, известны еще два его изотопа

$$U^{235} = 0,7205\%;$$

$$T = 7,13 \cdot 10^8 \text{ лет};$$

$$U^{234} = 0,0056\%;$$

$$T = 2,475 \cdot 10^5 \text{ лет}.$$

Важнейшими промежуточными продуктами радиоактивного распада урана являются: ионий с периодом полураспада 83000 лет, радий с $t =$

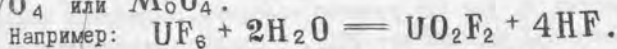
1590 лет и радон с $T = 3,825$ суток.

Уран — сравнительно хорошо распространенный элемент. Содержание его в земной коре $4 \cdot 10^{-4}\%$ (4 г/т) относительно высокое, т.е. значительно выше, чем таких элементов, как ртуть, сурьма, висмут, серебро, золото, вольфрам.

Уран — один из элементов семейства актиноидов и с этой точки зрения принадлежит к третьей группе периодической системы Д.И. Менделеева. Однако, благодаря большому числу планетарных электронов, в атоме урана происходит экранирование ядра атома и валентными являются не только лежащие на его внешних оболочках электроны, но и на внутренних, обуславливая максимальную устойчивую валентность урана, равную шести. При максимальной возможной валентности U^{6+} ион приобретает структуру благородного газа.

В природе уран встречается как в шестивалентном, так и в четырехвалентном состоянии. Трехвалентное состояние урана нехарактерно для природных условий, такие соединения получены только лабораторным путем, хотя эта валентность отвечает группе актиноидов. Кроме того, торий, протактиний и уран по основным химическим свойствам являются аналогами соответственно гафния, тантала и вольфрама, а не редкоземельных элементов, а первые трансурановые элементы — нептуний, плутоний и америций — ближе к урану, чем к актинию и торию. На основании этого многие ученые относят уран к шестой группе периодической системы Д.И. Менделеева и считают его первым элементом ряда ураноидов. Однако следует заметить, что этот вопрос в настоящее время нельзя считать окончательно решенным.

Шестивалентный уран, благодаря значительно большому размеру своего иона, обладает свойствами слабого основания в отличие от других шестивалентных элементов (вольфрам, молибден), являющихся "кислотообразующими" окислами. Однако ион U^{6+} энергетически неустойчив, соединения U^{6+} немедленно гидролизуются с образованием солей двухвалентного катиона — уранила (UO_2)²⁺ вместо анионов типа WO_4 или MoO_4 .



Четырехвалентный уран фигурирует в виде катиона, образующего соли типа UCl_4 или $U(SO_4)_2$.

Невстречающийся в природе трехвалентный уран отвечает главной валентности актиноидов. Соединения его окисляются даже водой с выделением водорода.

Положение урана в последнем ряду периодической системы определяет и величину ионного радиуса. С увеличением порядкового номера от

актиния к урану и с повышением валентности происходит уменьшение величины ионного радиуса (табл. I.2), а не увеличение, как это обычно наблюдается с переходом к элементам больших порядковых номеров.

Таблица I.2
Величины ионных радиусов (по В.Т.Захариасену)

Элемент	Валентность			
	3+	4+	5+	6+
Ac	1,11	-	-	-
Th	1,08	0,99	-	-
Pa	1,05	0,96	0,90	-
U	1,03	0,93	0,87	0,83

Все элементы, ионы которых приобретают структуру благородных газов, обладают четко выраженным сродством к кислороду. Поэтому и уран встречается в природе только в виде солей кислородных кислот и не образует соединений с серой, селеном и мышьяком, а также не встречается в самородном виде.

Окислительная способность урана определяется состоянием среды: в кислой среде U^{4+} является восстановителем по отношению к таким элементам, как Fe^{3+} , Mn^{4+} , V^{5+} , Mo^{6+} , Cr^{6+} , а U^{6+} может окислять Cu^{+} , Sn^{2+} , Ti^{3+} , V^{2+} , Cr^{2+} ; в щелочной среде U^{6+} ведет себя как окислитель по отношению к Fe^{2+} , восстанавливаясь при этом до U^{4+} ($U^{6+} + Fe^{2+} \rightleftharpoons U^{4+} + Fe^{3+}$).

Очень большое значение для урана имеют сорбционные процессы, т.к. ими в значительной степени обусловлены накопления урана в углях, торфах, некоторых бурых железняках, глинах и частично фосфоритах. Количество сорбированного урана зависит от условий образования породы (полезного ископаемого), возраста, степени метаморфизма, структуры и особенностей состава. Согласно исследованиям В.В.Щербины и Г.Б.Наумова сорбируемость урана в осадочных породах возрастает в ряду: песчаники - известняки - глины - бурные железняки - фосфориты - углистые породы и угли.

I.2. Содержание и формы нахождения радиоактивных элементов в горных породах

Уран в горных породах, согласно В.И.Вернадскому, может находить-

ся в виде самостоятельных минералов, в рассеянном состоянии и в виде изоморфных примесей.

В настоящее время известно более 100 собственно урановых минералов, из которых около 90% приходится на вторичные урановые минералы с группой уранила (UO_2)²⁺. Они объединяются во II и III классы урановых минералов по классификации В.Г. Мелкова и включают большую группу разнообразных по химическому составу минералов - окислов, гидроокислов и солей кислородных кислот (силикаты, фосфаты, арсенаты, ванадаты, сульфаты, карбонаты, молибдаты).

Окислы урана представлены тремя минеральными видами: уранинитом, настураном и урановыми чернями (табл. I.3). Они образуются в разных геологических условиях и отличаются по характеру примесей, морфологией выделений и по соотношению $U^{4+} : U^{6+}$.

Уранинит отличается наибольшим количеством примесей: в нем могут присутствовать торий, свинец и редкоземельные элементы. В зависимости от количества примесей и степени окисления содержание UO_2 и UO_3 колеблется в широких пределах соответственно от 38 до 74% и от 16 до 50%. Цвет уранинита черный, блеск смолистый, излом раковистый, твердость 4-7, удельный вес 6,5-10, сингония кубическая. Характерная особенность уранинита - хорошо выраженная форма кристаллов, что является единственным признаком, позволяющим отличать его от настурана.

Настуран - важнейший промышленный минерал урана. Содержание UO_2 изменяется от 40 до 70%; UO_3 - от 29 до 52%. По физическим свойствам похож на уранинит (цвет черный, блеск смолистый, твердость 4-6, уд. вес 6,5-9, сингония кубическая). Основной морфологической особенностью настурана является почковидная, натежная форма выделений.

Урановые черни представляют собой рыхлые порошковатые скопления черного цвета с матовым блеском; твердость их 2-4, удельный вес переменный, но не выше 6,5.

Из урановых минералов, составляющих большую группу урановых слюдов, следует отметить фосфаты, арсенаты и ванадаты урана. Химический состав их определяется формулой $R(UO_2)_2 \cdot (MO_4)_2 \cdot nH_2O$. Они представляют собой соли ортофосфорной, ортомышьяковой и ортованадиевой кислот, где радикал M может быть представлен фосфором (P), мышьяком (As) или ванадием (V), а радикал

R - различными одно-двух- и трехвалентными основаниями (Na , K , Ca , Mg , Cu , Ba , Pb , Mn , Fe , Al , Bi). Содержание UO_3 в них изменяется от 18 до 78%, при среднем содержании около 60%. Урановые

Таблица 1.3

Некоторые основные урановые минералы

Минерал	Химическая формула	Содержание U и Th, %			
		UO ₂	UO ₃	U ₃ O ₈	Th O ₂
I. Окислы урана					
а. Безводные окислы					
Уранинит	KUO ₂ ·mUO ₃ ·nPbO	38-74	16-50	79-94	0-8
Настуран (урановая смоляная обманка, урановая смолка)	KUO ₂ ·mUO ₃ ·nPbO	40-70	29-52	80	0-2
Урановая чернь ..	KUO ₂ ·mUO ₃ ·nPbO	40	9-40		3
б. Гидроокислы урана					
Беккерелит	3 UO ₃ ·5H ₂ O		87-91		
Скудит	4 UO ₃ ·9H ₂ O		88		
Кюрит	2 PbO·5UO ₃ ·4H ₂ O		73-74		
II. Карбонаты урана					
Резерфордин	UO ₂ ·CO ₃		84		
Шарпит	(UO ₂) ₆ ·(CO ₃) ₅ ·(OH)·7H ₂ O		81		
III. Сульфаты урана					
Иоганнит (урановый купорос)	CuO·2UO ₃ ·2SO ₃ ·7H ₂ O		52-61		
Уранопилит (урановая охра)	(UO ₂) ₆ ·(SO ₄) ₄ ·(OH) ₁₀ ·12H ₂ O		80-81		
IV. Силикаты урана					
Соддиит	(UO ₂) ₅ ·(SiO ₄) ₂ ·(OH) ₂ ·5H ₂ O		86		
Казолит	Pb(UO ₂)·SiO ₄ ·nH ₂ O		48-50		
V. Фосфаты урана					
Фосфуранилит	(UO ₂) ₃ ·(PO ₄) ₂ ·6H ₂ O		72-78		
Отенит	Ca(UO ₂) ₂ ·(PO ₄) ₂ ·10H ₂ O		60-63		
Торбернит	Cu(UO ₂) ₂ ·(PO ₄) ₂ ·12H ₂ O		57		
VI. Арсенаты урана					
Трегерит	(UO ₂) ₃ ·(AsO ₄) ₂ ·12H ₂ O		64-66		
Цейнерит	Cu(UO ₂) ₂ ·(AsO ₄) ₂ ·12H ₂ O		52-56		

I	2	3	4	5	6
УП. <u>Ванадаты</u> <u>урана</u>					
Карнотит	$K_2(UO_2)_2 \cdot (VO_4)_2 \cdot 3H_2O$		62-66		
Троянунит	$Ca(UO_2)_2 \cdot (VO_4)_2 \cdot 8H_2O$		52-65		
УШ. <u>Молибдаты</u> <u>урана</u>					
Умохсит	$UO_2MoO_4 \cdot 4H_2O$		67(?)		
IX. <u>Органические</u> <u>соединения</u> <u>урана</u>					
Тухолит				6 (в 30- ле 40)	6 (в 30- ле 46)
Карбуран			54 в золе		

слюдки образуют порошковидные агрегаты, налеты, пленки на стенках трещин, заполняют пустоты. Цвет их обычно желтый или желтовато-зеленый с различными оттенками, блеск перламутровый или стеклянный, твердость 3-4, удельный вес колеблется от 2,5 до 5,65. Наиболее характерными представителями урановых слюдок, имеющими большое промышленное значение, являются: отенит, цейнерит и карнотит (табл. I.3).

В рассеянном состоянии уран присутствует в горных породах в виде уранил-группы (UO_2)²⁺, находящейся в адсорбированном состоянии на поверхности зерен минералов или в растворенном виде в составе жидких включений в минералах. Уран, рассеянный в горных породах, легко переходит в раствор при обработке даже слабыми кислотами. Поэтому он называется подвижным в отличие от "инертного" урана, не поддающегося растворению. Доля подвижного урана по отношению к общему количеству урана в горных породах по данным В.Е.Бойцова и А.Б.Каждана составляет от нескольких до десятков процентов.

В виде изоморфных примесей уран входит в кристаллическую решетку минералов и других элементов, таких как циркон, апатит, монацит, торинит, лопарит и др. в количестве от $n \cdot 10^{-1}$ до $n \%$, относящихся к I-му классу урановых минералов [5]. При изоморфном замещении происходит замещение одного элемента в кристаллической решетке другим без существенного ее изменения. При этом: 1) атомы или ионы, образующие изоморфные соединения, должны быть близки по размерам; 2) изоморфные соединения должны обладать общим типом химического строения; 3) должна сохраняться электростатическая нейтральность ю-

вого образования. Больше всего изоморфных примесей урана в аксессуарных минералах горных пород.

Содержание основных радиоактивных элементов в различных типах горных пород и в земной коре в целом приведено в табл. I.4, данные которой показывают, что наиболее высокие концентрации урана, тория, и радия в магматических горных породах характерны для кислых пород, а минимальные - для ультраосновных. Среди осадочных пород наиболее высокие содержания урана отмечены в глинах; в некоторых районах содержание его в морских черных сланцах приближается к промышленному.

Таблица I.4

Содержание радиоактивных элементов в Земле и в различных горных породах

Горные породы	U $\mu\cdot 10^{-4}\%$	Th $\mu\cdot 10^{-4}\%$	Ra $\mu\cdot 10^{-10}\%$
Земная кора (по Г.В.Войткевичу):			
Гранитный слой (~ 20 км)	4	13,5	1,4
Базальтовый слой (~ 40 км)	1	4	0,34
Мантия Земли (~ 2900 км)	0,012	0,05	0,004
Ядро Земли (~ 3410 км)	0,003	0,01	0,001
Магматические породы (по А.П.Виноградову):			
кислые	3,5	18	1,2
средние	1,8	7	0,6
основные	0,5	3	0,27
ультраосновные	0,003	0,005	0,01
Осадочные породы (по Х.Д.Холланду):			
гранитные	3,96		
промежуточные	2,61		
основные	0,96		
сланцы	3,1		
песчаники	2,0		
известняки	1,3		

I.3. Физические свойства горных пород, руд и подземных вод

На обогащение природных вод радиоактивными элементами влияют: эманулирующая способность горных пород и руд, их адсорбционные свойства.

ства и температура подземных вод.

1.3.1. Эманирующая способность горных пород. Эманированием горных пород называется процесс миграции продуктов радиоактивного распада, главным образом, радона. Так как радон адсорбируется в горных породах в ничтожных количествах, процесс эманирования его определяется, в основном, диффузией из "капилляров" горной породы в окружающую жидкую или газовую фазу.

Из горных пород радон может выделяться диффузионным путем в значительных количествах в двух случаях [4]:

1) когда радий, из которого образуется радон, расположен на поверхности породы, соприкасающейся с водой, а не в глубине капилляров ("эманирующий коллектор");

2) когда радон образуется из радия, находящегося в глубине горной породы, но вся порода сильно разрушена.

Эманирование подчиняется законам парциального давления и не зависит от химического состава подземных вод.

Эманирование горных пород характеризуется эманирующей способностью или коэффициентом эманирования. Эманирующая способность - количество радона, выделяемое 1 г породы за время, достаточное для установления радиоактивного равновесия. Коэффициент эманирования - отношение количества радона, выделяющегося из 1 г породы в течение времени, достаточного для установления радиоактивного равновесия, ко всему количеству радона, находящемуся в равновесии с радием, содержащимся в 1 г породы. Эманирующая способность выражается в граммах радия, находящегося в равновесии с выделяющимся радоном, а коэффициент эманирования - в процентах.

Эманирующая способность горных пород зависит от степени раздробленности пород, температуры, давления и их влажности. С увеличением раздробленности пород эманирование их увеличивается. Повышение температуры пород приводит к увеличению эманирования, а повышение давления, наоборот, уменьшает эманирующую способность. Влажные породы эманируют больше, чем сухие.

Наибольшей эманирующей способностью при одинаковой степени раздробленности и в равных прочих условиях обладают кислые магматические породы, а среди них - гранит-пегматиты, наименьшей - кварцевые порфиры. Несмотря на значительные колебания значений коэффициента эманирования для отдельных образцов горных пород и руд (от 0,01 до 100%), средняя величина эманирования является довольно постоянной. Так, для кислых магматических пород средний коэффициент эманирования

колеблется от 15 до 30%, а для осадочных и метаморфических - от 10 до 25%. Более высокий коэффициент эманирования (32-91%) характерен для рудных образований.

Максимальное количество радона, выделяющегося из горных пород, может быть приближенно определено по формуле:

$$Q = \frac{K \cdot g \cdot P}{d} \cdot 10^3 \text{ кюри / л,} \quad (1.4)$$

где K - коэффициент эманирования;
 g - содержание радия в 1 г породы;
 d - плотность породы;
 P - пористость породы.

1.3.2. Адсорбционные процессы. Как известно, в верхних слоях земной коры исключительно широкое развитие получили коллоиды. Наиболее распространенными из положительных коллоидов являются: $Fe(OH)_3$, $Al(OH)_3$, $Cr(OH)_3$, $Ti(OH)_4$, $Zr(OH)_4$, $Ce(OH)_4$ и $Cd(OH)_2$, а из отрицательных - глинистые коллоиды, гумусовые вещества, SiO_2 , MnO_2 , SnO_2 , V_2O_5 , Sb_2S_3 , PbS , As_2S_3 и др. сульфиды, а также золото, серебро, платина.

В природных условиях распространены, за исключением $Fe(OH)_3$ и $Al(OH)_3$, главным образом, отрицательно заряженные коллоиды, способные сорбировать положительные ионы, в том числе урана и радия.

Радий хорошо адсорбируется глинистыми и органическими веществами (глины, уголь, торф), а также железисто-марганцевыми отложениями. На это указывают резкое обогащение радием осадков, отлагаемых радиоактивными источниками, и избыточное содержание радия в породах ряда месторождений урана (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Содержание радия в воде и отложениях минеральных источников (по В.И.Баранову и А.М. Овчинникову)

Источник	Характер отложений	Содержание Ra		Ra отлож.
		в воде, $10^{-10}\%$	в отложениях, $10^{-8}\%$	Ra воды
1	2	3	4	5
Молоковка	Железистый осадок	0,07	15,3	21000

1	2	3	4	5
Ямкун	Травертин	0,01	1,4	14000
Железноводск	" "	0,21	0,46	220
" "	Железистый осадок	0,15	6,0	4000
Пятигорск	Травертин	0,003	0,18	6000
" "	Марганцевый осадок	0,003	41,0	1350000
" "	Железистый осадок	0,003	8,1	270000
Обершлем	Глинистый осадок	0,06	238,0	471700
Вишневогорск	Торф	0,001	0,2	20000
Баку	Железистый осадок	0,9	0,78	87
Ухта	" "	7,48	40,0	240

К процессам адсорбции близко примыкают процессы соосаждения, характерные для элементов с близкими ионными радиусами. Так, по данным О.Хана осаждение органических и неорганических солей бария всегда сопровождается соосаждением соединений радия, что объясняется близостью ионных радиусов. Таким образом, выпадение из подземных вод солей бария (например, $BaSO_4$) приводит к обеднению их радием и осаждению его на стенках водопроводящих трещин. Небольшие количества радия соосаждаются также вместе с карбонатом кальция. Этим, вероятно, объясняется обогащение травертинов радием, приводящее в ряде случаев к образованию высокорadioактивных радоновых вод. Однако следует отметить, что карбонатом кальция не захватывается в осадок уран, также как сульфатами и хлоридами кальция и магния - радий.

Уран также может интенсивно адсорбироваться глинистым и органическими веществами, гидроксидами железа и марганца, на что указывает образование месторождений ураноносных углей, сланцев и "железных шлам".

Итак, адсорбционные процессы способствуют удалению радиоактивных элементов из растворов, нарушению радиоактивного равновесия между радием и ураном как в породах, так и в водах. В случае адсорбции радия образуются "эманлирующие коллекторы", дополнительно обогащающие подземные воды радоном.

I.3.3. Температурный режим подземных вод. Влияние температуры

подземных вод на растворимость урановых минералов и тем самым на поступление в воду урана и радия в настоящее время изучено недостаточно. Опыты И.Е.Старика по растворению торбернита при различных температурах показали, что в нейтральной и слабо щелочной среде повышение температуры воды вызывает усиление перехода в раствор, главным образом, урана, а в кислой среде - и урана и радия (вследствие повышения агрессивности, табл. I.6 и I.7).

Таблица I.6

Интенсивность перехода урана и радия из торбернита в раствор в зависимости от температуры (по И.Е.Старику)

Температура, °C	Среда	Количество радиоактивных элементов, переходящих в раствор, % от навески		$\frac{Ra}{U}$
		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-n HCl	2,15	1,43	1,5
60	0,1-n HCl	7,50	2,78	2,7

Таблица I.7

Зависимость перехода урана в раствор от температуры воды

Руда	Содержание урана в растворе в г/л при температуре, °C	
	20	70
Урановые слюды	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Урановые черны	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$

Содержание радона в воде также зависит от температуры. Являясь газом, радон при повышении температуры в меньшем количестве растворяется в воде, при понижении температуры - наоборот (табл. I.8).

I.4. Геолого-структурные и гидрогеологические условия формирования радиоактивных вод

Большое значение для обогащения природных вод радиоактивными элементами имеют: степень раскрытости геологических структур или

Таблица I.8

Зависимость коэффициента растворимости радона
(α) от температуры воды

Температура воды, °C	α	Температура воды, °C	α	Температура воды, °C	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

их элементов, климат и гидрогеологические условия.

К перспективным относятся раскрытые геологические структуры, слабо перекрытые с поверхности чехлом водонепроницаемых отложений. Горы, слагающие такие структуры, наиболее подвержены процессам физического и химического выветривания. Основными факторами физического выветривания являются колебания температуры и связанные с ними процессы периодического замерзания и оттаивания пород. Физическое выветривание способствует обогащению природных вод радием (за счет увеличения коэффициента эманации пород и степени выщелачивания радия). Атмосферные осадки, насыщенные кислородом и углекислотой, попадая в породы, повышают интенсивность их разрушения (химическое выветривание), а также интенсивность окисления урановых и ураносодержащих минералов; тем самым они способствуют переходу в природные воды урана. Следовательно, выветривание, совершающееся обязательно в окислительных условиях, является тем процессом, в ходе которого постоянно возникают воднорастворимые соединения урана; сущность процесса заключается в переходе U^{4+} в U^{6+} .

В полузакрытых и закрытых геологических структурах обогащение подземных вод ураном протекает крайне слабо и формирование химического состава вод исчисляется геологическим временем.

Климатические условия района также существенно влияют на формирование радиоактивных вод. В областях с аридным климатом концентрация урана в воде повышается за счет интенсивных процессов испарения. Иногда в таких районах в водах озер содержание урана достигает $2 \cdot 10^{-2}$ г/л. В районах, где осадки резко преобладают над испарением, высокие концентрации урана встречаются только на ограниченных участках (в местах развития ураноносных пород). Ореолы рассеяния в таких условиях имеют ограниченные размеры и концентрация урана в воде по

мере удаления от источника обогащения резко снижается. В районах с холодным влажным климатом процессы окисления и разрушения пород протекают медленно. В связи с этим и обогащение вод ураном незначительно.

Благоприятными гидрогеологическими показателями являются: водообильность пород, степень их проницаемости, характер водообмена и интенсивность циркуляции, условия питания и др. Распределение в природных водах урана и других растворенных компонентов подчинено "вертикальной" зональности, которая проявляется в изменении вниз по разрезу состава и количества растворенных солей, газов, микроорганизмов, величины pH , Eh и других показателей.

Согласно А.И.Германову наблюдается два крайних типа зональности, различающихся характером биохимических и химических реакций, которые протекают в ходе геологической истории.

В первом типе вертикальной гидрогеохимической зональности в нижних частях водоносного горизонта (в породе и водном растворе) содержится биологически активное вещество (битумы и др. органические соединения), способное участвовать в биохимических или химических реакциях в качестве сильного восстановителя. Во втором типе гидрогеохимического разреза в водоносном горизонте нет такого органического вещества. Границы между гидрогеохимическими зонами проводятся условно, по количеству растворенных солей. В обоих разрезах имеет место возрастание общей минерализации воды по мере погружения водоносного горизонта.

В гидрогеохимическом разрезе первого (битуминозного) типа наблюдается 4 геохимических зоны: кислородная (включающая зоны - аэра-гли, колебаний уровня и насыщения), бескислородных вод (углекисло-азотных и азотно-углекислых), углекисло-сероводородных вод и углевodородных вод. Во втором типе гидрогеохимического разреза имеется всего две зоны: кислородных вод и бескислородных азотных или углекисло-азотных (углекислых) вод.

В гидрогеохимическом разрезе битуминозного типа отчетливо проявляется резкое различие между крайними зонами в отношении распределения в водах урана и других показателей. В кислородной зоне, где развиты воды с высоким окислительно-восстановительным потенциалом (Eh более 300 мв), происходит окисление U^{4+} , урановых и ураносодержащих минералов до U^{6+} . В результате этого на всю глубину проникновения кислорода широко протекает процесс миграции урана, извлекаемого из горных пород и руд. В нижней части разреза развиты воды восстановительной обстановки, характеризующиеся нали-

нием углеводородных газов, относительно большим количеством органического вещества и низкими значениями Eh (от - 50 до 400 мв). Они содержат уран в очень малых количествах ($n \cdot 10^{-7}$ - $n \cdot 10^{-8}$ г/л) и очень редко до $2 \cdot 10^{-6}$ г/л.

Во втором типе гидрогеохимического разреза в кислородной зоне также идет интенсивный переход урана из пород и руд в подземные воды. В зоне азотных или углекисло-азотных вод процесс окисления урановых и ураносодержащих минералов имеет место, поскольку они характеризуются все еще положительными значениями Eh (от 300 мв до 0), однако он протекает более умеренно.

В геотектонически мобильных регионах древние рассольные воды за счет глубокого проникновения интенсивного водообмена довольно быстро разбавляются и вытесняются инфильтрационными. Благодаря этому здесь даже на глубинах 3-4 км часто циркулируют подземные воды с небольшим содержанием солей; об этом свидетельствует преобладание среди минеральных источников пресных и солоноватых. Распределение радиоактивных элементов в подземных водах этих регионов и факторы, их определяющие, изучены еще недостаточно. Имеющиеся данные свидетельствуют о большом диапазоне содержания урана в минеральных водах (от $2 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ г/л). Здесь также отчетливо проявляется роль окислительно-восстановительных условий, т.к. низкие концентрации урана характерны для вод, содержащих сероводород и углеводороды, обладающие восстановительным по отношению к U^{6+} состоянием (Eh меньше - 50 мв). Минеральные воды окислительной обстановки (Eh больше 100 мв) содержат больше урана в тех случаях, когда они циркулируют в породах, более богатых ураном. Углекислые воды характеризуются более высокими содержаниями урана, чем обычные подземные воды зоны активного водообмена, приуроченные к тем же породам в одинаковых климатических условиях. Это связано с более интенсивным изменением водоносных пород углекислыми водами, что облегчает переход урана из большей части пород. Если же в углекислых водах содержатся восстановители (H_2S , битумы и др. органические вещества), то выщелачивание урана из пород практически не происходит; в этих условиях подземные воды содержат уран в количествах $1 \cdot 10^{-6}$ - $n \cdot 10^{-7}$ г/л.

I.5. Химический состав природных вод

На обогащение природных вод ураном существенное влияние оказывает ее анионный состав. Наибольшее влияние на растворимость урановых минералов оказывают гидрокарбонаты, которые образуют легко раствори-

мые соединения типа $\text{Na}_4\text{UO}_2(\text{HCO}_3)_3$, наименьшее - хлориды (табл. I.9).

Таблица I.9

Зависимость растворимости урана от
анионного состава растворов (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Содержание урана в воде и в 0,05%-н. солевых растворах							
	H_2O		NaCl		Na_2SO_4		NaHCO_3	
	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески
Кварцевый порфир с настураном	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,78	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,48	$2,0 \cdot 10^{-3}$	2,88	$4,3 \cdot 10^{-2}$	62,7
Кварцевый порфир с чернью	$6,1 \cdot 10^{-3}$	5,10	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1,80	$5,5 \cdot 10^{-3}$	4,90	$5,7 \cdot 10^{-2}$	47,6
Кварцевый порфир со слюдками	$5,1 \cdot 10^{-4}$	1,20	$5,5 \cdot 10^{-4}$	0,13	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,56	$4,1 \cdot 10^{-2}$	93,1
Известняк с чернью	$4,3 \cdot 10^{-4}$	0,55	$3,2 \cdot 10^{-3}$	2,6	$3,7 \cdot 10^{-3}$	3,88	$8,3 \cdot 10^{-2}$	86,0

Исследования показывают, что для устойчивого содержания в подземных водах повышенных концентраций урана достаточно, чтобы в них содержалось 100-300 мг/л HCO_3^- ; при содержании HCO_3^- менее 100 мг/л устойчивость урана в растворе снижается.

Анионы SO_4^{2-} и Cl^- при pH, близких к нейтральным, не влияют на интенсивность растворения урана.

Катионный состав воды заметно влияет на растворимость урана только в гидрокарбонатных водах. Среди распространенных катионов наибольшее влияние оказывает Mg^{2+} , затем Ca^{2+} и Na^+ - они образуют легко растворимые соединения урана (табл. I.10).

Еще в большей степени влияет катионный состав природных вод на выщелачивание из пород и минералов радия (табл. I.11). Чем больше химическое сродство элемента к радия, чем ближе его ионный радиус к ионному радиусу радия, тем сильнее он вытесняет радий из минералов и пород. По силе воздействия на выщелачиваемость радия катионы располагаются в следующий ряд: $\text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} >$

$> \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Следовательно, наиболее охотно радий пород обменивается на катион бария, растворенный в воде. Но если в воде присутствует ион SO_4^{2-} , то образуется труднорастворимая соль

Таблица I.10

Зависимость растворимости урана от катионного
состава растворов (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Содержание урана в воде и 0,05 -н. солевых растворах							
	H ₂ O		NaCl		CaCl ₂		MgCl ₂	
	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески
Кварцевый порфир с насураном	5,4.10 ⁻⁴	0,80	1,8.10 ⁻⁴	0,27	-	-	5,3.10 ⁻⁴	0,80
Кварцевый порфир с чернью	6,1.10 ⁻³	5,08	1,6.10 ⁻³	1,33	2,6.10 ⁻³	2,38	1,1.10 ⁻²	9,17
Кварцевый порфир со слюдками	5,1.10 ⁻⁴	1,19	3,3.10 ⁻⁴	0,80	4,2.10 ⁻⁴	0,99	6,3.10 ⁻⁴	1,47
Известняк с чернью	7,2.10 ⁻³	6,55	5,7.10 ⁻³	5,09	5,6.10 ⁻³	5,09	1,3.10 ⁻²	11,82
Доломитизированный известняк с чернью	4,3.10 ⁻⁴	0,50	1,5.10 ⁻³	1,56	2,9.10 ⁻³	3,02	5,2.10 ⁻³	5,41
Максимально известный с толяунитом	6,7.10 ⁻⁴	0,07	7,2.10 ⁻⁴	0,07	8,6.10 ⁻⁴	0,09	1,5.10 ⁻³	0,13

BaSO_4 , которая выпадает в осадок и увлекает за собой большую часть радия. Вследствие этого большинство радиеносных вод являются бессульфатными.

Таблица I.11

Выщелачивание радия различными солями
(по И.Е.Старику)

Среда	% выщелачивания	Среда	% выщелачивания
H_2O	0,012	0,0001 - н. BaCl_2	0,04
0,001 - н. NaCl	0,016	0,0001 - н. BaCl_2	0,08
0,001 - н. CaCl_2	0,032	0,001 - н. BaCl_2	0,15
0,001 - н. SrCl_2	0,036	0,01 - н. BaCl_2	0,15
0,001 - н. PbCl_2	0,068		

Увеличение общей минерализации воды мало сказывается на обогащении вод ураном. Только увеличение гидрокарбонат-иона повышает возможность миграции урана (табл. I.12). Значительно больше концентрация солей в растворе сказывается на выщелачиваемости радия (табл. I.13).

Подземные воды с высоким содержанием радия формируются в результате омыwania ими месторождений урановых руд. Высокое содержание радия может быть также в сильно минерализованных водах хлоридно-кальциевого состава, т.к. высокая минерализация и присутствие в них хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов, с одной стороны, уменьшают адсорбцию радия горными породами, а с другой - способствуют процессам катионного обмена и увеличению выщелачиваемости радия из пород.

I.6. Влияние геохимической обстановки на формирование радиоактивных вод

Значительное влияние на формирование природных радиоактивных вод оказывают их газовый состав, концентрация водородных ионов (pH) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh).

Из большого количества природных газов в подземных водах в значительных количествах присутствуют лишь немногие, в частности, O_2 , CO_2 , CH_4 и тяжелые углеводороды, благородные газы. Свободный кислород является определяющим в процессах окисления. При этом элементы с переменной валентностью переходят в ионы с более высокой валентностью. Уран из труднорастворимой четырехвалентной формы пере-

Таблица 1.12

Растворимость урана в растворах, близких по составу
к природным водам (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Количество растворившегося урана							
	В гидрокарбонатно-натриевой воде с минерализацией 1,4 г/л		В гидрокарбонатно-кальциевой воде с минерализацией 0,35 г/л		В сульфатно-кальциевой воде с минерализацией 1,4 г/л		В хлоридно-натриево-кальциевой воде с минерализацией 100 г/л	
	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески	г/л	% от навески
Кварцевый порфир с настураном	-	-	-	-	$7,6 \cdot 10^{-3}$	11,4	$1,3 \cdot 10^{-2}$	18,9
Кварцевый порфир с чернью	$8,9 \cdot 10^{-2}$	7,42	$1,0 \cdot 10^{-2}$	8,69	$2,3 \cdot 10^{-2}$	18,92	$1,3 \cdot 10^{-2}$	12,2
Кварцевый порфир со слюдками	$3,0 \cdot 10^{-2}$	77,3	$1,7 \cdot 10^{-2}$	40,52	$1,3 \cdot 10^{-2}$	29,5	$7,4 \cdot 10^{-3}$	10,89
Известняк с чернью	$6,5 \cdot 10^{-2}$	59,8	$6,8 \cdot 10^{-2}$	62,12	$5,2 \cdot 10^{-2}$	47,3	$5,6 \cdot 10^{-2}$	50,9
Доломитизированный известняк с чернью	$3,1 \cdot 10^{-2}$	32,3	$2,7 \cdot 10^{-2}$	28,3	$2,5 \cdot 10^{-2}$	26,0	$2,8 \cdot 10^{-2}$	28,6
Мраморизованный известняк с толунитом	$1,4 \cdot 10^{-2}$	1,4	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,29	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,23	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,37

Таблица I,13

Зависимость растворимости урана и радия от
концентрации солей в растворе (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Содержание урана и радия (в г/л) в растворе $NaCl$ с концентрацией							
	I г/л		20 г/л		100 г/л		200 г/л	
	U	Ra	U	Ra	U	Ra	U	Ra
Гранодиорит со следами	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$
Гранодиорит с чернью	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	не опред.	$8,4 \cdot 10^{-3}$	не определ.
Известняк с чернью	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
Известняк с тоямунитом	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-9}$

ходит в легкорастворимую шестивалентную форму. Углекислый газ играет основную роль в миграции урана. Углекислота, присутствующая практически во всех природных водах, способствует растворению урановых минералов и созданию карбонатной среды, в которой шестивалентный уран образует легкоподвижные комплексные карбонатные соединения. Кислород оказывает и большее влияние на переход урана в раствор из настурана и черней, а углекислый газ - из карбонатных пород (табл. I.14).

Таблица I.14

Зависимость растворимости урана от газового состава вод (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Количество урана, перешедшего в раствор					
	Н ₂ O		Н ₂ O + O ₂		Н ₂ O + CO ₂	
	г/л	%	г/л	%	г/л	%
Кварцевый порфир с настураном	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,51	$2,3 \cdot 10^{-3}$	2,99	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,8
Кварцевый порфир с чернью	$6,1 \cdot 10^{-3}$	5,1	$1,5 \cdot 10^{-2}$	12,51	$8,4 \cdot 10^{-3}$	6,91
Кварцевый порфир со слюдками	$5,1 \cdot 10^{-4}$	1,2	$9,1 \cdot 10^{-4}$	2,1	$6,2 \cdot 10^{-3}$	13,95
Известняк с чернью	$4,3 \cdot 10^{-4}$	0,55	$1,9 \cdot 10^{-2}$	20,99	$3,6 \cdot 10^{-2}$	38,96

Насыщение воды углекислотой способствует ее обогащению и радием (табл. I.15).

Метан сам по себе на миграцию урана не влияет только в присутствии сульфатов кальция, при восстановлении последних, образуется сероводород, являющийся осадителем урана. Азот и благородные газы не оказывают какого-либо влияния на переход урана из пород в воду. Сероводород, создавая восстановительные условия, способствует переводу шестивалентного урана в четырехвалентный и выпадению его в осадок (табл. I.16).

Все магматические и осадочные горные породы, в которых уран находится в рассеянном состоянии, и минералы урана, подвергаясь воздействию природных вод с различной величиной pH и различным химическим составом, растворяются неодинаково.

Согласно данным А.И.Перельмана в водах бикарбонатного состава

Таблица 1.15

Зависимость растворимости радия от газового
состава вод (по А.Н.Токареву)

Р у д а	Содержание радия в растворах, г/л					
	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{CO}_2$	Ca SO_4	$\text{Ca SO}_4 + \text{CO}_2$	NaCl	$\text{NaCl} + \text{CO}_2$
Гранодиорит с чернью	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$7,0 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-10}$
Кварцевый порфир со слюдами	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$6,9 \cdot 10^{-10}$
Известняк с чернью	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$8,2 \cdot 10^{-9}$	$7,0 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Известняк с толяунитом	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$	$9,8 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-9}$

Таблица I.16

Выпадение урана из растворов при насыщении
их сероводородом (по А.Н.Токареву)

В исходном раство- ре, г/л	Содержание урана	
	После насыщения его H_2S	
	г/л	%
$8,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	4,2
$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,3
$6,7 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	8,3
$5,7 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	3,5
$2,8 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	2,0
$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	3,4

со слабощелочной реакцией ($pH - 7,5 - 8,0$) легко растворяются карбонаты, сульфаты, ванадаты, а также окислы урана. В слабоминерализованных нейтральных бикарбонатных водах растворяются сульфаты, сульфоканкарбонаты, карбонаты и окислы урана. В щелочных карбонатных водах (pH более 8), а также в кислых сульфатных водах растворяются все урановые минералы, даже сложные окислы, содержащие четырехвалентный уран; причем вторичные минералы переходят в раствор более интенсивно, чем первичные. В нейтральных сульфатных и хлоридных водах хорошо растворяются только минералы группы сульфатов и некоторые карбонаты.

Электрохимическая активность природных вод определяется, в первую очередь, величиной окислительно-восстановительного потенциала. Величина E_h , измеряемая с помощью потенциометров, дает возможность судить о характере преобладающих процессов, происходящих под воздействием природных вод, - окисления или восстановления. Величина E_h подземных вод с глубиной уменьшается строго закономерно. По данным А.В.Щербанова для нижней границы зоны окисления величина E_h равна примерно 250-300 мВ. Следовательно, по величине E_h можно определять глубину зоны окисления, а также судить о возможности обогащения вод ураном. Если подземные воды характеризуются высоким E_h (более + 250 мВ), то урановые соединения имеют возможность окисляться и переходить в наиболее растворимые шестивалентные соединения. При низких значениях E_h (менее 0 мВ) в восстановительных условиях уран может находиться главным образом в четы-

рехвалентной форме и переходить в воду не способен (рис. I.2). К аналогичным выводам приходит и А.К.Лисицин. Величина Eh , являясь показателем интенсивности процессов окисления, зависит от солевого и газового состава природных вод, при этом с увеличением содержания в водах кислорода величина Eh увеличивается, а с увеличением содержания сероводорода - уменьшается (рис. I.3 и I.4).

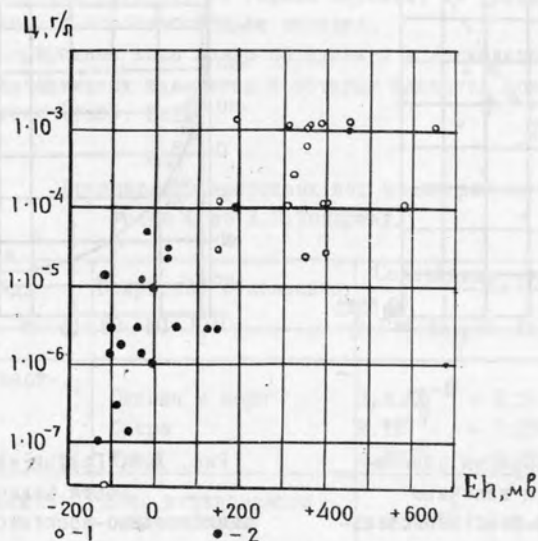


Рис. I.2. График зависимости содержания урана в водах от величины окислительно-восстановительного потенциала:

1 - пробы, в которых есть кислород; 2 - пробы, в которых есть сероводород.

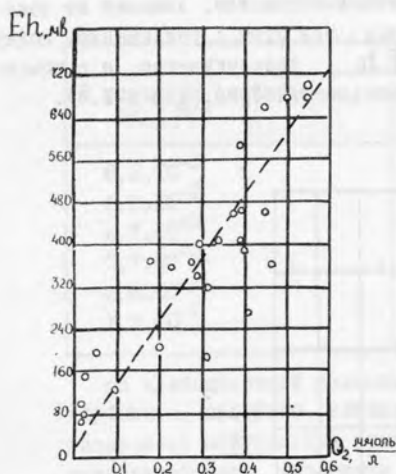


Рис. I.3. График зависимости величины окислительно-восстановительного потенциала от содержания кислорода в водах.

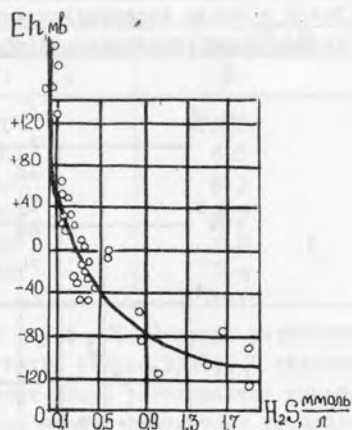


Рис. I.4. График зависимости величины окислительно-восстановительного потенциала от концентрации сероводорода в водах.

Глава II. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И ВОЗМОЖНЫЕ ФОРМЫ МИГРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

За последние годы в зарубежной и отечественной литературе накоплен материал, который позволяет судить о содержании, широком распространении и интенсивной миграции основных радиоактивных элементов - урана, радия и радона.

II.1. Содержание радиоактивных элементов в подземных водах

Радиоактивность природных вод обусловлена нахождением в них растворенных урана, радия и радона. Содержание радиоактивных элементов в подземных водах колеблется в зависимости от формы нахождения радиоактивных элементов в горных породах, от условий и темпов миграции воды и особенностей ее состава.

Все природные воды можно объединить в несколько групп, содержащие радиоактивных элементов в которых является более или менее постоянным (табл. II.1).

Таблица II.1

Группировка природных вод и содержание в них урана (по А.Н.Токареву)

Тип воды	Природная обстановка	Содержание, г/л	
		от - до	среднее
1	2	3	4
Поверхностные	Океаны и моря	$3,6 \cdot 10^{-8} - 2,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
	Озера	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-6}$
	Реки	$2 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Осадочных пород	Зона интенсивного водообмена	$2 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
	Зона весьма затрудненного водообмена	$2 \cdot 10^{-8} - 6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Кислых магматических пород	Зона интенсивного водообмена (воды коры выветривания)	$2 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$
	Зона затрудненного водообмена (воды глубоких тектонических трещин)	$2 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Урановых месторождений	Зона интенсивного водообмена (воды зоны окисления)	$5 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$
	Зона затрудненного водообмена (воды зоны восстановления)	$2 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы видно, что содержание урана резко повышается в природных водах, циркулирующих на площадях урановых месторождений. В этих водах содержание урана доходит до $9 \cdot 10^{-2}$ г/л, радия - до $9 \cdot 10^{-9}$ г/л и радона - до 50000 эман. Такие воды сменяются менее активными средними водами участков, удаленных от руды, которые переходят в фоновые воды безрудных пород, содержащих нормальное для данного района количество урана.

За пределами урановых месторождений, в условиях интенсивного водообмена, повышенное содержание радиоактивных элементов наблюдается в водах кислых магматических пород (преимущественно в гранитных массивах) - урана до $3 \cdot 10^{-5}$ г/л, радия - до $6 \cdot 10^{-12}$ г/л и радона - до 400 эман; в водах осадочных и метаморфических горных пород - урана до $6 \cdot 10^{-4}$ г/л, радия - до $5 \cdot 10^{-10}$ г/л, радона - до 150 эман. В зоне затрудненного водообмена повышенное содержание радиоактивных элементов отмечено в осадочных горных породах с нормальным содержанием радиоактивных элементов - урана до $3 \cdot 10^{-6}$ г/л, радия - $2 \cdot 10^{-8}$ г/л.

II.2. Формы миграции радиоактивных элементов

Впервые особенности миграции радиоактивных элементов исследовал И.Е.Старик. Им выделено два рода миграции радиоактивных элементов.

Миграция I рода - переход урана, тория и актиния, находящихся в кристаллической решетке минералов, из пород в воду вследствие растворения минералов. Этому процессу способствует химический состав и кислотность раствора, количество свободного кислорода, температура и т.д.

Миграция II рода - переход продуктов распада вышеуказанных радиоактивных элементов, радона, радия и их изотопов, находящихся в "капиллярах" породы в растворе или в адсорбированном состоянии на стенках "капилляров", из пород в воду. Этот процесс может происходить без растворения минералов.

И.Е.Старик разграничил три процесса, которые способствуют переходу радиоактивных элементов из твердой среды в жидкую:

- 1) эманирование (выделение газообразных продуктов распада);
- 2) растворение (выделение всех радиоэлементов с разрушением кристаллической решетки минералов);
- 3) выщелачивание (переход радиоэлементов в жидкую фазу без нарушения решетки минералов).

Родоначальники радиоактивных рядов уран, торий и актиний являются структурной единицей кристаллической решетки, так как входят в

минералы в момент их образования и могут мигрировать в основном при растворении. Продукты их распада образуются позже и могут попадать в нарушенные зоны минерала ("капилляры", трещины и др.), обычно заполненные водой, и мигрировать путем выщелачивания.

По степени связи с рудой воды подразделяются на рудные, ореольные и фоновые.

Рудные воды циркулируют по рудному телу и характеризуются наиболее высоким (аномальным) содержанием рудных элементов. Ореольные воды находятся за пределами рудного тела, но еще содержат в значительной степени аномальное количество рудных элементов. Фоновые воды - это воды безрудных горных пород, которые содержат нормальное (фоновое) количество радиоэлементов.

Уран, радий, торий являются элементами различной химической природы. Размеры и характер их ореолов рассеяния не одинаковы в различных геохимических условиях. В окислительной среде, в щелочных, гидрокарбонатных водах наибольшей подвижностью отличается уран. Торий в этих условиях менее подвижен, а миграция радия незначительна. В восстановительной среде, наоборот, очень хорошо мигрирует радий и плохо - уран.

Следует различать "первичную миграцию" - процесс перехода радиоактивных элементов из пород в воду в результате окисления, выщелачивания, диффузии, эманирования и "вторичную миграцию" - процессы, протекающие при движении радиоактивных элементов по породам вместе с водой (осаждение, адсорбция, дезэманирование).

II.2.1. Миграция урана, связанная с зоной окисления урановых месторождений. Процессы окисления находятся в прямой зависимости от химизма вод и состава первичных руд наряду с такими факторами как климат, особенности металлогении, структура и текстура первичных руд, условия залегания и характер вмещающих пород.

В.В.Шербина отмечает, что для зоны окисления урановых месторождений характерны следующие реакции:

1. Окисление, переводящее U^{4+} в U^{6+} , Fe^{2+} в Fe^{3+} .
2. Образование труднорастворимых соединений в результате взаимодействия уранила с анионами PO_4^{3-} , AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} .
3. Гидролиз.
4. Сорбция урана гидрооксидами железа, глинистыми минералами, опалом и другими адсорбентами.

В ходе формирования зоны окисления происходит изменение химизма среды. Нейтральные и слабощелочные условия сменяются сернокислыми

и наоборот. Смена условий обуславливает стадийность в развитии процессов окисления. Так, Г.С.Грицаенко выделяет три основные стадии формирования зоны окисления сульфидно-урановых месторождений: гидроокисно-силикатную; слюдковую, и собственно-силикатную.

Формирование гидроокисно-силикатной стадии характерно только для карбонатных руд. При окислении этих руд создается щелочная среда и происходит окисление настурана. Щелочная среда способствует подвижности кремнезема и осаждению урана в форме силикатов уранила. Этот процесс происходит раньше, чем окисление основной массы сульфидов. Слюдковая стадия сопровождается окислением основной массы сульфидов и появлением кислых растворов. Происходит образование слюдов. Собственно-силикатная стадия наступает по мере израсходования сульфидов, при этом рН воды повышается. Эта стадия сопровождается образованием небольших количеств скупита и параскупита.

По мнению Г.С.Грицаенко [8] при длительном развитии процесса в верхней части рудного тела окисляются все сульфиды и настуран, образуется зона полного окисления.

Л.С.Евсеева и А.И.Перельман [2] отмечают, что все особенности окислительных процессов на урановых месторождениях в зависимости от характера водоносных пород можно объединить в следующие три типа.

1 . Вмещающие породы обводнены более или менее равномерно и вода, следовательно, имеет одинаковый доступ ко всем участкам месторождения. В этих условиях окисление происходит равномерно, с четко ограниченной зоной окисления и примерно одинаковым изменением пород. Подобные условия характерны для пластов песчаных и обломочных пород.

2 . Вмещающие породы трещиноваты, но трещиноватость развита неравномерно. Породы слабообводненные, с плохо развитой дренирующей гидрографической сетью. Здесь не наблюдается четких границ зоны окисления. Рядом с полностью окисленными минералами встречаются черни и настуран.

3 . Вмещающие породы сильно трещиноваты, подвержены процессам карстообразования, но обводнены неравномерно. Здесь процессы окисления проникают по отдельным трещинам на значительную глубину и если имеется боковой сток подземных вод — происходит разубоживание месторождения.

Процесс формирования зоны окисления экзогенных месторождений отличается от процессов, протекающих в эндогенных месторождениях. Растворы, которые циркулируют в верхней части экзогенных месторождений, имеют менее кислый характер, что вызвано небольшим содержанием в рудах дисульфидов. Отмечено, что местами окисление протекает даже

в условиях щелочной среды.

Для зон окисления многих осадочных месторождений характерны следующие силикаты уранила - уранофан и казолит. Миграция урана в зоне окисления осадочных месторождений может осуществляться в виде солей гидроокиси и комплексных солей органических кислот.

II.2.2. Миграция урана, связанная с процессами растворения и выщелачивания урана из руд, минералов и пород природными водами. Обогащение подземных вод ураном происходит в результате растворения и выщелачивания урана, находящегося в породе в рассеянном виде, или в виде рудных концентраций. Интенсивность поступления урана в природные воды зависит от следующих условий:

- 1) химического и газового составов природных вод;
- 2) вещественного состава пород и руд, формы присутствия урана в породах;
- 3) гидродинамических условий циркуляции подземных вод.

И.Е.Старик опытным путем установил, что растворимость урана повышается при увеличении кислотности или щелочности раствора.

В карбонатной среде хорошо растворяются простые и комплексные арсенаты, карбонаты, молибдаты, фосфаты, сульфаты, ванадаты шестивалентного урана. Окислы четырехвалентного урана в карбонатной среде растворяются только при наличии окислителя. В щелочной среде растворяются фосфаты и гуматы урана.

В водах бикарбонатного состава со слабощелочной реакцией при $pH = 7,5 - 8,0$ происходит интенсивное растворение карбонатов, сульфатов, ванадатов и окислов урана. В этих же водах, отличающихся слабой минерализацией и нейтральной реакцией, наиболее растворимы сульфаты, сульфокарбонаты и карбонаты урана, которые не дают высоких концентраций урана в воде.

Воды карбонатного типа с $pH = 8$ активно растворяют первичные и вторичные урановые минералы. Благодаря щелочной реакции вод активно растворяются урановые минералы силикатной группы.

Сульфатные кислые воды - хороший растворитель для всех урановых минералов, в том числе и для сложных окислов, содержащих UO_2 .

В нейтральных сульфатных и хлоридных водах растворимость урановых минералов такая же, как в дистиллированной воде.

Следует отметить, что одни и те же минералы, но из различных месторождений, обладают разной растворимостью.

На скорость растворения минералов урана влияют такие факторы, как растворимость минералов, состав воды, скорость движения воды, харак-

тер распределения минералов во вмещающих породах, агрегатное состояние минералов и др.

Л.С.Евсеева и А.И.Перельман [2] отмечают, что формы переноса урана в природных водах многообразны и зависят от pH раствора и химического состава воды.

1. Для кислых сульфатных вод характерен перенос урана в виде сульфатных соединений. Соприкасаясь с первичными минералами урана, кислые сульфатные воды обогащаются четырехвалентным ураном. Поэтому сульфатные соединения четырехвалентного урана обладают хорошей растворимостью. Миграция урана в четырехвалентном состоянии может осуществляться только на близкие расстояния.

2. Большинство природных вод имеет pH в пределах от 6 до 8.

При значении pH = 4,5 - 7,5 уран в растворе находится преимущественно в виде ионов UO_2^{2+} и $UO_2(OH)^+$, а также в виде недиссоциированных молекул $UO_3 \cdot H_2O$ или $UO_3 \cdot 2H_2O$. Гидрат трехокси урана в воде образует коллоидные агрегаты и перенос урана может происходить в виде золь гидроксидов. Золи образуются в растворе при pH, близком к нейтральному.

3. Форма переноса урана в виде ионов $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ и $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ может осуществляться в водах, содержащих ионы HCO_3^- и CO_3^{2-} .

4. Уранорганические соединения существуют в слабощелочных, слабощелочных водах в форме щелочно-гуматных соединений.

По мере движения воды от источника обогащения ураном химические формы нахождения урана изменяются. Это явление можно объяснить изменением pH, химического состава воды при переходе из одной геохимической обстановки в другую, а также при смешении подземных вод с поверхностными.

II.2.3. Миграция урана, связанная с процессами осаждения урана из водных растворов. Осаждение урана из водных растворов происходит в результате целого ряда химических процессов, среди которых Л.С.Евсеева и А.И.Перельман [2] выделяют две группы.

К первой относятся процессы, в которых ведущая роль принадлежит реакциям взаимодействия пород с растворенным ураном; ко второй - процессы, связанные с метаморфизмом химического состава вод, влиянием явлений испарения, смешением вод различных типов и т.д. Хорошо известны химические реакции осаждения урана из водных растворов анионами PO_4^{3-} , VO_4^{3-} , AsO_4^{3-} , в результате которых возникают устойчивые минералы: фосфаты, ванадаты, арсенаты. В результате реакции восстановления шестивалентного урана образуются труднораствори-

мые соединения четырехвалентного урана.

Сульфиды, соединения железа, фосфаты и глинистые минералы - хорошие осадители урана, наряду с такими газами как сероводород, водород, метан. Сульфиды при неполном окислении в условиях окислительно-восстановительной среды оказывают восстанавливающее действие на уран.

В процессе нейтрализации водных растворов вмещающими породами создаются восстановительные условия и происходит выпадение урана из раствора. Присутствие железа в растворе также приводит к осаждению урана. Фосфаты образуют с ураном труднорастворимые уранофосфатные соединения, выпадающие в осадок. Но если фосфаты содержат более 2% CO_2 , то они теряют способность связывать уран.

Уран может осаждаться с большинством солей, выпадающих из природных вод. В окислительных условиях такими солями являются карбонаты и сульфаты кальция, магния, гидроокислы железа, марганца, меди, фосфаты кальция, кремнекислота. В восстановительных условиях уран может соосаждаться с солями двухвалентного железа и других металлов, карбонатами, кремнекислотой, фосфатом кальция и сульфидами.

Кроме того, осаждение урана из грунтовых вод может происходить вследствие испарения. При этом осаждаются силикаты, ванадаты, сульфат-карбонаты уранила и др.

При коагуляции коллоида, существующего в водном растворе в форме гидроокиси состава $[\text{UO}_2(\text{OH})_2]_n$, происходит осаждение урана. Такое же явление наблюдается при коагуляции коллоидов кремнекислоты и железа, хорошо адсорбирующих уран. Если в природных водах нарушается карбонатное равновесие, то выделяется углекислота, и в результате дегазации уран осаждается.

И.2.4. Миграция урана, связанная с процессами адсорбции. Радиоактивные элементы, находящиеся в природных водах, интенсивно адсорбируются различными коллоидами, что приводит к их удалению из природных вод.

Адсорбционными свойствами по отношению к уранил-иону обладают некоторые глинистые минералы (монтмориллонит), органические вещества, а также гидроокислы железа и марганца.

Органические вещества играют большую роль в процессах миграции и осаждения урана. Механизм связывания урана органическими веществами довольно сложный и главная роль в этом процессе принадлежит явлениям адсорбции, ионного обмена, осаждения урана под действием восстановительных свойств органических веществ и связанных с ними газов.

Путем адсорбции соединений урана глинистым и органическим веществами, находящимися в сланцах, произошло обогащение ураноносных сланцев в обширных морских бассейнах.

В результате интенсивной адсорбции урана гидроокислами железа и марганца образовались месторождения ураноносных углей, ураноносных "железных шляп", в которых уран минералогически не выражен. В природных водах довольно широко распространен процесс осаждения урана фосфатами, связанный с процессами адсорбции.

По мнению Л.С.Евсеевой и А.И.Перельмана [2] важнейшими химическими свойствами, которые определяют миграционную способность урана, являются следующие:

- 1) разная валентность урана в зоне гипергенеза, малая подвижность соединений четырехвалентного урана и высокая подвижность шестивалентного. Значительная роль в миграции и осаждении принадлежит окислительно-восстановительным реакциям;
- 2) образование шестивалентным ураном катиона уранила, отличающегося крупными размерами и подвижностью в кислых растворах;
- 3) легкая растворимость карбонатных комплексов уранила, устойчивых в нейтральных и слабощелочных средах;
- 4) образование уранилом труднорастворимых соединений с PO_4^{3-} , AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , SiO_2 ;
- 5) адсорбция иона уранила отрицательно заряженными коллоидами.

И.2.5. Миграция радия. Миграция радия определяется его химическими свойствами, особенностями его состояния в минералах и растворах. Радий образуется в ряду распада урана после трех α и двух β превращений. Энергии, образовавшейся в результате одного α - распада, достаточно для прохождения радием нескольких десятков межузловых расстояний в кристаллической решетке минерала. Атомы радия могут удаляться на значительное расстояние от материнского атома и попасть в механические нарушения кристаллической решетки минерала ("капилляры"). Из "капилляров" атомы радия легко выщелачиваются.

На миграцию радия сильно влияет состав и концентрация катионов, величина их pH, оказывающая на катионы Ra^{2+} десорбирующее действие.

Выщелачиваемость радиоактивных элементов является прямой функцией степени сохранности минералов. Чем больше количество нарушений, тем больше вероятность попадания атомов, образованных за счет энергии радиоактивной отдачи, в эти зоны.

Радиоактивные атомы, попавшие в нарушенные части минералов, мо-

гут частично адсорбироваться на стенках "капилляров" и трещин, а частично раствориться в воде этих нарушений при условии, что в решетке минерала нет кристаллохимических аналогов данных атомов. Между растворенными и адсорбированными атомами устанавливается подвижное равновесие. Вследствие выщелачивания происходит нарушение радиоактивного равновесия. Радий мигрирует из урановых минералов, в результате чего в минералах возникает недостача радия. Миграция радия связана с частичным выщелачиванием пород.

Максимальная концентрация радия в природных водах достигает $n \cdot 10^{-7}$ г/л.

Сильно сказывается процесс выщелачивания на вторичных урановых минералах. Из них радий может мигрировать в значительных количествах - до 85-90% от общего количества, которое должно находиться во вторичных урановых минералах при радиоактивном равновесии с ураном.

Выщелачиваемость радия находится в прямой зависимости от химического состава подземной воды, соприкасающейся с породами.

А.Н.Токарев и А.В.Щербаков [11] выделяют три стадии в процессе выщелачивания:

- 1) радий в результате реактивной отдачи скапливается в "капиллярах" породы, заполненных водой;
- 2) устанавливается адсорбционное равновесие между радием в растворе и радием на стенках "капилляров";
- 3) благодаря диффузии устанавливается равновесие:

Ra в "капиллярной" воде $\rightleftharpoons Ra$ в гравитационной воде.

По данным И.Е.Старика [10] при соприкосновении радиоактивных горных пород с нерадиоактивной или малорадиоактивной водой вследствие разности концентраций радия в этой воде и в воде "капилляров" начинается диффузия из "капилляров" в воду. Диффузия радия в гравитационную воду происходит медленно. Скорость диффузии радия зависит от удельной поверхности частиц породы (табл. П.2).

Таблица П.2
Зависимость выщелачиваемости радия от дисперсности пород

Удельная поверхность частиц, см ² /г	0,54	0,96	1,33	2,73
Количество выщелоченного радия, %	0,0025	0,0037	0,0080	0,0150

Радий с подземными водами мигрирует на незначительное расстояние от урановых руд. Это объясняется плохой растворимостью его вторичных солей и подверженностью радия сорбционным процессам.

П.2.6. Миграция радона. Миграция радона сильно отличается от миграции радия. Процесс миграции радона называется эманированием. Эманирование, т.е. выделение радона из породы в окружающую воду или воздух, определяется структурой породы, наличием в ней таких ходов, по которым радон, образующийся внутри породы из радия, мог бы выделить-ся из этой породы в окружающую среду.

Чем больше будет разрушена кристаллическая решетка минералов, т.е. чем больше будет в породе развита сеть капилляров, тем легче радон выделяется наружу.

Существуют, особенно в тектонических зонах, породы, выделяющие наружу весь тот радон, который образуется в них из радия, т.е. коэффициент эманирования этих пород равен 100%. Радон - короткоживущий изотоп ($T \approx 3,8$ дня) и при малых или умеренных скоростях фильтрации воды он не может далеко уйти от источника обогащения.

Учитывая небольшой период полураспада радона, радоновые воды можно встретить среди неглубоко залегающих грунтовых и артезианских вод в зонах интенсивного водообмена.

Миграция радона в природных водах подчиняется законам парциального давления газов и не зависит от химического состава воды. Так как радий в рассеянном состоянии содержится во всех горных породах, все породы обладают способностью в той или иной степени эманировать и обогащать циркулирующие по ним воды радоном.

Обычное эманирование пород дает содержание радона в водах порядка нескольких десятков эман, урановые руды - порядка сотен и тысяч эман.

Водонепроницаемые породы являются препятствием для движения радона. Передвигаясь вверх по трещинам, пустотам и порам в горных породах, радон довольно часто скапливается под отложениями водоупорных пород.

II.3. Образование ореолов рассеяния вокруг урановых месторождений

П.3.1. Первичные ореолы рассеяния. В результате сложных процессов миграции радиоактивных элементов в верхних частях земной коры вокруг залежей урановых руд образуются ореолы и потоки рассеяния

радиоактивных элементов и элементов-спутников.

Различают по происхождению первичные (эндогенные) ореолы рассеяния и вторичные (гипергенные) ореолы.

Первичные ореолы возникают одновременно с формированием самого уранового месторождения. Это внешние зоны повышенных концентраций химических элементов вокруг рудных скоплений и коренных пород. Элементарный состав эндогенных ореолов имеет полное сходство с элементарным составом рудных залежей. Формы эндогенных ореолов подобны формам рудных тел.

Размеры ореолов бывают различными и зависят от степени водоносности пород, химизма процессов, протекающих в породах и водной среде, и могут достигать сотен метров по протяженности в направлении стока подземных вод.

Если водная аномалия имеет генетическую связь с урановыми рудами, то в ореольных водах, кроме урана, будут индикаторные элементы: радон, радий, изотопы урана и радия, которые мигрируют вместе с ураном.

Радон в водных ореолах рассеяния прослеживается на меньшее расстояние, чем уран - до 100 м. Связано это с его особыми свойствами - летучестью и коротким периодом полураспада.

Радий образует ореолы рассеяния значительно меньших размеров, чем радон и уран. Это объясняется плохой растворимостью его солей и сорбционными процессами. Повышенное содержание в водах радия одновременно с ураном и радоном указывает на близость уранового оруденения.

II.3.2. Вторичные ореолы рассеяния. Вторичные ореолы рассеяния урановых месторождений образуются в современных континентальных отложениях.

К факторам, обуславливающим образование вторичных ореолов, относятся химическое перемещение и переотложение рудного материала, растворение, осаждение солей, адсорбция коллоидами и др.

Образование вторичных ореолов рассеяния урановых минералов находится в тесной связи с геохимическими и геологическими условиями.

Радиоактивные аномалии образуются в алювиальных отложениях как от мелких, так и от крупных месторождений. На крупных месторождениях аномалии прослеживаются на расстоянии до 1600 м вниз по течению.

Вторичные ореолы рассеяния в коренных породах формируются в результате процессов окисления, растворения, а также путем выноса урана из рудной залежи и последующего выделения из водных растворов

в виде труднорастворимых солей или в результате сорбции породы.

Обычно ореолы располагаются по трещинам и порам в зоне сезонных и вековых колебаний уровня грунтовых вод и капиллярного поднятия влаги. В зависимости от положения рудного тела по отношению к уровню грунтовых вод формируются разные по форме ореолы рассеяния урана.

В случае, если рудное тело находится выше зоны сезонных колебаний уровня грунтовых вод и увлажнение его происходит только в период выпадения осадков за счет инфильтрации, то ореол рассеяния будет распространяться только вниз от рудного тела до уровня грунтовых вод. Если же рудное тело находится в зоне сезонных колебаний уровня грунтовых вод, то ореол рассеяния распространяется в направлении движения грунтовых вод и только на незначительное расстояние вверх за счет диффузии.

Если рудное тело находится в условиях аридного климата, когда накопление элемента в коре выветривания преобладает над выносами, в ореолах рассеяния наблюдается высокое содержание урана, который может быть в виде вторичных минералов-силикатов, ванадатов, фосфатов и других.

При геохимических поисках урановых месторождений используются в качестве поискового признака первичные и вторичные ореолы рассеяния.

II.4. Радиоактивные элементы в круговороте природных вод

Происхождение гидросферы Земли теснейшим образом связано с возникновением самой планеты и особенностями ее внутреннего строения.

В результате плавления и дегазации мантии к настоящему времени сформировалась гидросфера с объемом свободных вод $1,85 \cdot 10^{24}$ см³.

Природные воды - атмосферные, поверхностные и подземные - находятся в постоянном круговороте, образуя единую гидросферу. Вместе с ними вовлекаются в гидросферу химические элементы, относительные количества которых в различных частях гидросферы неодинаковы.

Природные воды находятся в сложных динамических взаимоотношениях с горными породами, атмосферой и организмами. По В.И.Вернадскому, основное водное равновесие земной коры может быть выражено следующей схемой:



Характер взаимодействия природных вод с горными породами очень сложен.

Уран, растворенный в природных водах, участвует в общем круговороте вод планеты. В гидросфере (включая подземную гидросферу) и в атмосфере в непрерывной миграции находится значительное количество растворенного урана. Эти количества больше запасов месторождений урана, известных в настоящее время.

Наибольшее количество растворенного урана находится в мировом океане - приблизительно 98%, т.е. около 2 млрд. т. На втором месте по количеству растворенного урана находятся подземные воды.

Ежегодно в океан поступают десятки, а возможно и сотни тонн растворенного урана. Приблизительно такое же количество урана осаждается вместе с илами и временно выходит из круговорота природных вод. Осаждение вызывается сорбцией глинистых частиц, поглощением живыми существами, остатки которых оседают на дне, восстановлением U^{6+} до U^{4+} .

Круговороты природных вод и растворенных в них компонентов, в том числе и урана, в каждой климатической зоне, на континентах и в мировом океане совершаются по-своему. Разница заключается в масштабах миграции компонентов, в направлении миграции.

ГЛАВА III. ПРИРОДНЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ВОДЫ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ

§ 3.1. Классификация радиоактивных вод

До недавнего времени радиоактивные воды использовались только в целях бальнеологии или же для извлечения из них радия. В связи с этим классификации радиоактивных вод носили радиологический характер и были подчинены, в основном, бальнеологическим целям. Среди радиоактивных вод выделялось три группы: а) радоновые воды, содержащие только эманацию радия (радон); б) радиевые (радиевые) воды, содержащие повышенные количества солей радия; в) радонно-радиевые воды, содержащие повышенные количества радия и избыточные сверхравновесные количества эманации.

В 1946 г. В.Б.Ивановым к вышеуказанным группам радиоактивных вод были добавлены еще две группы, учитывающие содержание урана в природных водах: г) урано-радоно-радиевые воды гидротермальных месторождений; д) урано-радиевые воды осадочных месторождений.

Следует однако сказать, что эти классификации учитывают только содержание радиоактивных элементов и, следовательно, хорошо обоснова-

ны радиологически, но мало отражают геолого- гидрогеологические и геохимические условия формирования радиоактивных вод.

Первая попытка составления генетической классификации природных радиоактивных вод была сделана А.Н.Токаревым в 1948 г., которая позднее им была дополнена и усовершенствована. В основу классификации А.Н.Токарева положено два принципа: а) содержание и формы нахождения радиоактивных элементов в горных породах, определяющих возможность обогащения природных вод радиоактивными элементами; б) гидродинамическая зональность стратисферы, определяющая геохимические условия перехода радиоактивных элементов из горных пород и руд в природные воды. По этой классификации (табл. III.1) месторождения радиоактивных вод делятся на семь групп:

1) радоновые воды, связанные с зонами интенсивного и затрудненного водообмена в массивах кислых магматических пород;

2) радиевые воды, связанные с зоной весьма затрудненного водообмена в осадочных и метаморфических породах;

3) урановые воды поверхностных водоемов или воды, связанные с зоной интенсивного водообмена в осадочных и метаморфических породах, обогащенных рассеянным ураном;

4) урано-радиевые воды, связанные с зоной затрудненного водообмена в осадочных и метаморфических породах, обогащенных рассеянным ураном;

5) урано-радоновые воды, связанные с зоной окислений гидротермальных осадочных месторождений урана, реже - с зоной интенсивного водообмена в магматических породах, обогащенных аксессуориями, а также с зонами дробления магматических пород или контактами магматических пород с осадочными;

6) урано-радоно-радиевые воды, связанные с зоной окисления гидротермальных и осадочных месторождений;

7) радоно-радиевые воды, связанные с зонами первичных руд и восстановления месторождений урана.

Согласно А.Н.Токареву радиоактивными являются воды, характеризующиеся следующим содержанием радиоактивных элементов $U > 3 \cdot 10^{-5}$ г/л; $Ra > 1 \cdot 10^{-11}$ г/л; $Rn > 50$ эман.

III.2. Радоновые воды

Радоновые воды представляют собой наиболее распространенную группу радиоактивных вод. Они формируются в районах развития кислых магматических пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов

Таблица III.1

Схема классификации природных радиоактивных вод СССР (по А.Н.Токареву)

Радиологический тип вод	Генетический тип вод	Гидрогеологический тип вод	
I.	II.	III.	
Воды простого радио- логического состава	Радоновые воды	Воды коры выветривания (верх- няя трещиноватая зона гранитов)	Трещинные грунтовые воды
	Радиевые воды	Воды эмануирующих коллекторов	Трещинные напорные воды
	Урановые воды	Воды тектонических трещин в гранитах	
	Урано-радиевые воды	Воды осадочных и метаморфичес- ких пород	Пластовые и пласто- во-трещинные напор- ные воды
	Урано-радоновые воды	Воды поверхностных водоемов	Воды замкнутых водо- емов и ручьев
Воды сложного радио- логического состава		Воды осадочных и метаморфичес- ких пород, обогащенных рассеянными ураном	Пластовые и пластово- трещинные грунтовые и напорные воды
	Урано-радо- радиевые воды	Воды магматических пород, обогащен- ных акцессориями, а также зон дроб- ления магматических пород или кон- такта магматических и осадочных пород	Трещинные, пластово- трещинные и пласто- вые воды
	Радоно-радиевые воды	Воды зоны окисления месторождений урана	

Условия формирования

IV.

Литологические	Структурные	Гидродинамические	Геохимические	Термические	Физико-химические
I	2	3	4	5	6
Массивы кислых магматических пород	Раскрытые структуры (центральная и краевая зоны горно-слагающих сооружений)	Зона интенсивного водообмена Зона затрудненной циркуляции	Окислительная зона Восстановительная зона	До 20°C Выше 20°C	Змирирование (выщелачивание, выщелачивание, раскисление, восстановление)
Осадочные и метаморфические породы	Закрываемые структуры (впадины)	Зона весьма затрудненной циркуляции	Восстановительная зона		Выщелачивание (растворение, восстановление)
Контакты с кислыми магматическими породами, обогащенными ураном	Формирование происходит в бессточных водоемах при значительном испарении с поверхности (превышающем или равном притоку)				Концентрация (осаждение, восстановление)
Осадочные и метаморфические породы обогащенные ураном	Раскрытые структуры Полураскрытые структуры	Зона интенсивного водообмена Зона затрудненного водообмена	Окислительная зона Окислительная восстановительная зона	Различные	Выщелачивание

Продолжение табл. Ш. I

I	2	3	4	5	6
Кислые магматические породы	Раскрытые структуры	Зона интенсивного обмена		До 20°C	Окисление, растворение, эмансирование (осаждение, адсорбция)
Месторождения урановых руд	Раскрытые и полураскрытые структуры (центральная и крайняя зоны горно-слагающих сооружений)	Зона загрузки и циркуляции	Окислительная и окислительно-восстановительная зона	Различные	Выщелачивание, эмансирование (адсорбция, растворение)

Продолжение табл. III. I

Газовый состав вод	Химический состав вод			Радиологическая характеристика				
	У1.			УП.				
У.	pH	Минерализация, г/л	Формула химического состава	Rn, эквив	Ra, г/л	U, г/л	$\frac{Rn}{Ra}$	$\frac{Ra}{U}$
O ₂ и CO ₂	6,0-7,5	0,2-4,0	Обычно $\frac{HCO_3}{CaMgNa}$	> 50	< 1.10 ⁻¹¹	< 3.10 ⁻⁵	» равн.	» равн.
CO ₂ и N ₂	6,5-7,0	До 300,0	Обычно $\frac{Na \cdot Ca}{Na \cdot Ca}$	< 50	> 1.10 ⁻¹¹	< 3.10 ⁻⁵	» равн.	» равн.
H ₂ S, CH ₄ , N ₂	Различные			< 50	< 1.10 ⁻¹¹	> 3.10 ⁻⁵	< равн.	< равн.
O ₂	7,0-7,5	До 5,0	Различная	< 50	< 1.10 ⁻¹¹	> 3.10 ⁻⁵	» равн.	< равн.
CH ₄	6,5-7,0	До 100,0	Различная	< 50	> 1.10 ⁻¹¹	> 3.10 ⁻⁵	» равн.	» равн.
O ₂ , H ₂ S, CH ₄	3,5-8,5	До 100,0	Различная	> 50	> 1.10 ⁻¹¹	< 3.10 ⁻⁵	> равн.	< равн.
N ₂ , CO ₂	6,5-8,5	0,2-5,0	Различная	> 50	> 1.10 ⁻¹¹	< 3.10 ⁻⁵	> равн.	> равн.

в условиях раскрытых структур центральных и краевых зон горно-сладчатых сооружений. Эти воды характеризуются содержанием радона более 50 эман.

В зависимости от характера циркуляции, геотермических, газовых и гидрохимических особенностей радоновые воды можно разделить на:

- а) воды коры выветривания;
- б) воды глубоких тектонических трещин;
- в) воды эманулирующих коллекторов.

III.2.1. Радоновые воды коры выветривания. Радоновые воды коры выветривания широко распространены. Это трещинные грунтовые воды коры выветривания и неглубоких тектонических трещин в кислых магматических породах. Глубина циркуляции их зависит от глубины развития "активной" трещиноватости и редко превышает 60-80 м. Химический состав этих вод преимущественно гидрокарбонатно-магний и гидрокарбонатно-кальциево-натриевый, обусловлен процессами разложения силикатов под действием воды и углекислоты воздуха, благодаря чему они характеризуются малой минерализацией (до 0,5 г/л); иногда бывает несколько повышенное содержание сульфатов. В водах этой группы pH всегда больше 7. Температура радоновых вод коры выветривания низкая и определяется температурой воздуха. Дебит источников различен и зависит от атмосферных осадков.

Основным физико-химическим процессом, определяющим формирование радоновых вод коры выветривания, является эманирование. Следовательно, их радиоактивность зависит от коэффициента эманирования пород и абсолютного содержания радиоактивных элементов в породах. Для этих вод характерна отчетливая связь радиоактивности с петрографическим составом и степенью разрушенности пород, в которых они циркулируют.

Выветривание кислых магматических пород по А.А.Саукову происходит главным образом под воздействием воды, содержащей CO_2 . При этом выщелачиваются растворимые соли, входящие в состав силикатов. В результате этого разобьются разновалентные элементы, вследствие чего пути миграции их расходятся. Особенно легко переходят в растворы одновалентные катионы (Na^+ , K^+ , Li^+), несколько труднее - двухвалентные (Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} и др.) еще труднее - трех- и четырехвалентные. Поэтому последние накапливаются на месте и переносятся, в основном, механическим путем.

Особая роль в циркуляции радоновых вод принадлежит пегматитовым жилам. Они обладают значительной трещиноватостью, пористостью, инст-

да даже кавернозностью и поэтому являются хорошими коллекторами. К ним, как правило, и приурочены источники радоновых вод.

Примером радоновых вод коры выветривания являются воды источников Увильды и Сунгуля на Урале.

Ш.2.2. Радоновые воды глубоких тектонических трещин. К этому типу радоновых вод относятся напорные воды, циркулирующие по трещинам в областях альпийской складчатости и приуроченные к зонам деформаций в гранитных массивах.

Питание вод глубоких тектонических трещин происходит за счет атмосферных осадков. Благодаря глубокой циркуляции они могут иметь высокую температуру, специфический химический и газовый составы. Все воды глубоких тектонических трещин являются газифицированными, главным образом азотом и углекислотой.

По температуре, химическому и газовому составам в группе радоновых вод глубоких тектонических трещин выделяются радоновые воды азотных терм и радоновые углекислые воды. Первые имеют высокую температуру (до 100°C), небольшую минерализацию (0,2 - 0,4 г/л, редко до 1 г/л) и гидрокарбонатно-натриевый или сульфатно-хлоридно-натриевый состав, а вторые - низкую температуру ($10-15^{\circ}\text{C}$) и гидрокарбонатно-магнийсодержащий состав.

Для радоновых вод азотных терм характерны высокие значения pH (7,6 - 8,5) и значительное содержание кремнезема (до 0,1 г/л). Из газов, растворенных в этих водах, преобладает N_2 , содержание которого, например, в водах Терской-Алатау изменяется от 93,1% (источник Бозшук) до 100% (источник Аксу). Другие газы (CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4) имеют подчиненное значение, их содержание, как правило, не превышает долей единицы (в%). Содержание радона в них меньше, чем в водах коры выветривания и в среднем равно 50 эман, хотя в отдельных случаях и доходит до 200-300 эман. Режим радоновых вод азотных терм как по дебиту, температуре, химическому и газовому составу, так и по радиоактивности не зависит от температуры воздуха и атмосферных осадков. Пример радоновых вод азотных терм - воды источников Аксу в Киргизии и Белокурихи на Алтае.

Радоновые углекислые воды также характеризуются низкой минерализацией (0,2 - 0,5 г/л); содержание углекислоты (CO_2) в них достигает 3,6 г/л. Если эти воды не выходят на поверхность, а попадают в осадочные породы и циркулируют по ним, они могут повышать свою температуру и, обогащаясь различными воднорастворимыми солями, изменять минерализацию и химический состав (примером являются углекислые

воды Кавказских Минеральных Вод). Содержание радона в этих водах в среднем равно 100 аман. Режим радоновых углекислых вод в отличие от термальных радоновых вод, наоборот, тесно связан с атмосферными осадками и температурой воздуха. Пример радоновых углекислых вод - воды источников Молоковки, Ургучана и Шивии в Забайкалье.

Ш.2.3. Радоновые воды эманулирующих коллекторов. Радоновые воды эманулирующих коллекторов имеют локальное распространение и связаны с участками вторичной концентрации радия на стенках водопроводящих трещин или в отложениях источников. Вторичное накопление радия может происходить в результате процессов адсорбции при потере водой своей агрессивности (например, в результате взаимодействия с карбонатными породами). Образуются активно эманулирующие коллекторы.

При выходе на поверхность подземные воды, насыщенные углекислотой, теряют ее, вследствие чего они образуют известковые отложения (травертины). Одновременно с выпадением из воды углекислого кальция (CaCO_3) нередко выпадают железистые и железисто-марганцевые соединения, которые в результате процессов соосаждения увлекают с собой в осадок, находящийся в воде радий. Поэтому эти осадки оказываются сильно обогащенные радием. Так, если в обычных карбонатных породах содержание радия составляет $n \cdot 10^{-11} \%$, то в травертинах - $n \cdot 10^{-8} \%$.

При медленной циркуляции по таким породам воды могут интенсивно обогащаться радием.

Пример радоновых вод данной группы - воды источников Ямкуна в Забайкалье, Джеты-Огуз в Киргизии, Пятигорска и Истису на Кавказе.

Ш.3. Радиевые воды

Благодаря своим геохимическим особенностям радиевые воды имеют исключительно широкое распространение. Они формируются в закрытых структурах с весьма затрудненным водообменом, характеризующихся восстановительной обстановкой и наличием высокоминерализованных вод хлоридно-натриево-кальциевого состава. Наиболее часто радиевые воды приурочены к нефтяным месторождениям и имеют повышенное содержание Br , J , H_2S , CH_4 и тяжелых углеводородов.

Радиевые воды образуются за счет выщелачивания рассеянного в породе радия вследствие благоприятного химического состава и медленного движения воды. Кроме радия, они содержат в повышенном количестве его изотопы ThX и MsTh_1 . Обогащение радиевых вод радием

движение воды. По характеру циркуляции они могут быть пластовыми и пластово-трещинными, грунтовыми и напорными. Если их формирование происходит в раскрытых структурах с интенсивным водообменом, то они обогащаются только ураном, обогащение радием не случается вследствие малой минерализации воды и быстрой их циркуляции. В этом случае формируются урановые воды. В зоне затрудненного водообмена воды обогащаются ураном и радием, причем с глубиной содержание радия увеличивается, а урана — уменьшается.

Ш.6. Урано-радоновые и урано-радоно-радиевые воды

Урано-радоновые и урано-радоно-радиевые воды формируются непосредственно на месторождениях урановых руд, вследствие чего имеют узко локальное распространение. Приурочены они, главным образом, к центральным и краевым зонам горно-складчатых сооружений, где в прошлые геологические эпохи разгружались ураноносные растворы и образовались урановые месторождения. Эти воды отличаются высоким содержанием всех радиоактивных элементов: урана — до $9 \cdot 10^{-2}$ г/л, радия — до $9 \cdot 10^{-9}$ г/л и радона — до 50000 аман.

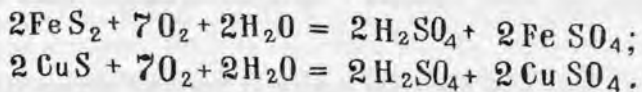
По условиям формирования и радиохимическому составу в данных группах радиоактивных вод можно выделить:

- 1) воды зоны окисления гидротермальных урановых месторождений;
- 2) воды зоны окисления осадочных урановых месторождений.

Ш.6.1. Воды зоны окисления гидротермальных урановых месторождений. Воды зоны окисления гидротермальных урановых месторождений приурочены к массивам кислых магматических или осадочно-метаморфических пород, в которых они циркулируют по трещинам или зонам тектонического дробления. Так как трещиноватость магматических пород с глубиной резко уменьшается, то это обычно безнапорные воды неглубокой циркуляции с низкой температурой и минерализацией. В некоторых случаях они могут смешиваться с инфильтрующимися атмосферными осадками или напорными водами, циркулирующими по крупным тектоническим разломам и их да поднимающимися с больших глубин.

Формирование урано-радоновых и урано-радоно-радиевых вод зоны окисления гидротермальных урановых месторождений происходит следующим образом [11]. Как известно, спутниками гипогенных урановых минералов являются сульфиды железа, меди и других металлов. Инфильтрующиеся атмосферные осадки содержат свободный кислород и углекислоту и обладают хорошей растворяющей способностью. Проникая в зону

уранового оруденения, они окисляют сульфиды железа, меди и других металлов:



При этом образуются сульфаты, более растворимые, чем сульфиды, и серная кислота, вследствие чего воды становятся кислыми, агрессивными (с $\text{pH} < 7$). Кислые воды активно растворяют урановые соединения. В водах накапливается уран в форме сернокислых соединений типа UO_2SO_4 (уран шестивалентный). Содержание урана может достигать $n \cdot 10^{-2}$ г/л. В водах также накапливаются радий и радон в количествах до $n \cdot 10^{-9}$ г/л и до 50000 эман соответственно.

Образовавшиеся таким образом урано-радоно-радиевые воды могут вместе с потоком подземных вод выходить за пределы месторождения или проникать глубже, в зону цементации месторождения. Так как сернокислые соединения урана неустойчивые, то в зоне цементации происходит восстановление урана до четырехвалентного и образование труднорастворимых соединений типа урановых черней (см. Ш.7. Радоно-радиевые воды). В верхней части месторождения соединения типа UO_2SO_4 переходят в более устойчивые, т.е. менее растворимые карбонаты, арсенаты, фосфаты и силикаты и вместе с водой мигрируют за пределы месторождения. При циркуляции урано-радоно-радиевых вод по породам, не содержащим урановых соединений, а также сульфидов, их состав изменяется. Прежде всего, вследствие адсорбции содержание радия уменьшается. Поэтому на некотором расстоянии от уранового месторождения подземные воды можно уже классифицировать как урано-радоновые, т.к. содержание радия в них становится ничтожным. Содержание радона и урана в подземных водах по мере удаления от месторождения также уменьшается. Оресл аномальных урано-радоно-радиевых вод может проследиваться от месторождения вниз по потоку подземных вод на расстояние в десятки метров, урано-радоновых вод - первые сотни метров. Повышенное же содержание урана в подземных водах может проследиваться при благоприятных условиях на расстояние в сотни метров от месторождения. Таким образом, происходит раздельная миграция урана, радия и радона.

При вскрытии гидротермальных месторождений урана горными выработками, процесс окисления сульфидов и обогащения подземных вод сернокислыми соединениями урана усиливается. С другой стороны, вследствие образования депрессионной воронки к месторождению устремляются не только воды самих рудных тел, но и воды существенно иного

состава, часто пресные гидрокарбонатно-кальциевые. Происходит соединение вод, что может привести к выпадению сульфатов урана из раствора.

III.6.2. Воды зоны окисления осадочных урановых месторождений. В зоне окисления осадочных урановых месторождений также формируются урано-радоно-радиевые воды, а в ореоле рассеяния - урано-радоновые и урановые воды. Процесс их формирования в основном сходен с процессом формирования радиоактивных вод в зоне окисления гидротермальных месторождений урана, но есть и некоторые отличия. Как известно, осадочные месторождения урана (урано-ванадаты, ураноносные угли и сланцы) приурочены к краевой зоне горных сооружений, осложненной вторичными тектоническими нарушениями. Поэтому формирующиеся на них радиоактивные воды представлены линзообразными и пластообразными телами моноклиналильных структур или линзообразными телами мелких антиклинальных структур и могут быть как грунтовыми, так и артезианскими, как пресными гидрокарбонатно-кальциевыми, так и сильно минерализованными хлоридно-натриево-кальциевыми.

Месторождения урано-ванадатов сохранились в условиях засушливого климата, вот почему для них характерна слабая водообильность пород и слабая их проницаемость. Здесь встречаются высокоминерализованные хлоридно-натриевые воды, а также воды нефтяного типа со значительным содержанием сероводорода.

Месторождения ураноносных углей также встречаются в областях с аридным климатом и также слабо обводнены. Однако здесь распространены слабо кислые сульфатно-натриево-кальциевые воды с минерализацией 2-5 г/л. Они формируются в результате окисления рассеянного в углях пирита, растворения вторичного гипса и катионного обмена.

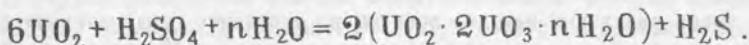
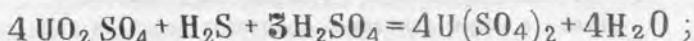
На месторождениях ураноносных сланцев формируются слабо минерализованные гидрокарбонатно-кальциевые воды, в некоторых случаях с повышенным содержанием сульфатов (при наличии пирита).

Содержание радиоактивных элементов в водах зоны окисления осадочных месторождений урана значительно и может достигать: урана - до $7,5 \cdot 10^{-3}$ г/л, радия - до $2,2 \cdot 10^{-9}$ г/л, радона - 200-300 эман (в редких случаях - до 3000 эман).

III.7. Радоно-радиевые воды

Предположительно, радоно-радиевые воды формируются в зоне первичных руд, не затронутых окислением. Их формирование представляется

следующим образом. Кислые подземные воды, содержащие сульфосоли железа, меди и урана (FeSO_4 , CuSO_4 , UO_2SO_4), опускаясь вниз из зоны окисления, на некоторой глубине образуют зоны цементации или вторичного обогащения. В этой зоне сульфаты урана переходят в мало-растворимые урановые черни ($\text{UO}_2 \cdot 2\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$):



Вследствие слабой растворимости урановых черней содержание в воде урана уменьшается. Первоначальные урано-радоно-радиевые воды становятся радоно-радиевыми.

В общем случае глубина зоны цементации определяется глубиной, до которой могут проникать кислые растворы, насыщенные ураном. Ниже идет зона первичных сульфидных и урановых руд, где, очевидно, циркулируют гидрокарбонатные воды, обогащенные щелочами.

ГЛАВА IV. ОБОСНОВАНИЕ РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ

IV.1. Основные методы поисков урановых месторождений

Для поисков месторождений урана используют, как правило, комплекс разнообразных геологических, геофизических и геохимических методов. Выбор методов определяется прежде всего поставленной задачей, геологическим строением и природными условиями. К основным методам поисков относятся: радиометрические, газовые и геохимические (таб. IV.1). В основе всех существующих методов лежат различные приемы обнаружения тех или иных поисковых признаков урана в виде коренных выходов руд и ореолов рассеяния вокруг урановорудных залежей.

Радиометрические методы основаны на выявлении радиационных ореолов урановых месторождений; поиски же урановых месторождений по ореолам радиоактивных и нерадиоактивных газов производятся соответственными методами эманационных и гелиевых съемок.

Геохимические методы поисков используются для обнаружения первич-

ных и вторичных ореолов рассеяния урана в коренных породах, породах выветривания и рыхлых отложениях (уранометрические), водных ореолов радиоактивных элементов (радиогидрогеохимические) и биохимических ореолов (биогеохимические).

IV.2. Условия применения радиогидрогеохимического метода в общем комплексе поисковых работ на уран

В последние годы всё более широкое развитие в практике геологических исследований получают геохимические методы поисков урановых месторождений по ореолам рассеяния урана в коренных породах, рыхлых отложениях, природных водах и растениях.

Среди различных методов поисков по вторичным геохимическим ореолам видное место занимает радиогидрогеохимический^{*)}, выявляющий ореолы рассеяния радиоактивных и сопутствующих им элементов в природных водах.

Таблица IV.1

Основные методы поисков урановых месторождений

М е т о д ы		
Радиометрические	Газовые	Геохимические
1. Наземные гамма-съемки	1. Эманионные съемки	1. Уранометрические
2. Воздушная гамма-съемка	2. Гелиевая съемка	2. Радиогидрогеохимические (радиогидрогеологические)
		3. Флуориметрические (биогеохимические)

Радиогидрогеохимический метод разрабатывается сравнительно недавно, поэтому некоторые вопросы еще недостаточно изучены. Однако уже имеющиеся сведения позволяют рекомендовать его для широкого использования в комплексе с другими методами поисков месторождений урана как выходящих на поверхность, так и скрытых на глубине. Он является одним из наиболее глубоких методов поисков урановых месторождений. Сущность радиогидрогеохимического метода состоит в отборе проб поверхностных и подземных вод, анализе этих проб на содержание урана (U^{238}), продуктов его распада (радон, радий и в некоторых

*) В литературе известен также как "радиогидрогеологический" и "радиохимический".

случаях U^{234}) и элементов - спутников (обычно это молибден, свинец, мышьяк, ванадий, фосфор, селен), а также в выяснении закономерностей размещения их водных ореолов. Результаты анализов проб воды наносятся на специальную радиогидрогеологическую (или геологическую) карту. Оценку радиогидрогеологических данных необходимо производить с учетом материалов геологических, геофизических, геохимических и других специализированных исследований. Это позволит избежать ошибок в определении их поисковой ценности.

Основная задача радиогидрогеохимического метода поисков - определение аномальных концентраций урана, радия, радона в водах, превышающих их фоновые концентрации в 3-5 раз и более. Поэтому для правильного выявления аномальных значений очень важно установить местный радиогидрогеохимический фон для каждого элемента, который находится в сильной зависимости от климатических, геолого-гидрогеологических, геоморфологических и физико-химических условий.

Это хорошо можно проиллюстрировать на примере урана. Содержание урана в воде морей и океанов колеблется в пределах $n \cdot 10^{-7}$ - $n \cdot 10^{-6}$ г/л, в водах рек, ручьев, озер, а также в подземных водах - в пределах $n \cdot 10^{-8}$ - $n \cdot 10^{-5}$ г/л. Причем наиболее низкие концентрации характерны для подземных вод зоны активного водообмена гумидных областей, характеризующихся наибольшей водообильностью и проницаемостью, а более высокие - для подземных вод зоны активного водообмена в аридных областях, отличающихся недостатком влаги и сильным испарением. Как указывалось ранее, наибольшей миграционной способностью уран обладает в окислительной обстановке, где он находится в форме шестивалентных соединений; в этих условиях и создается наиболее благоприятная обстановка для перехода урана в подземные воды ($n \cdot 10^{-5}$ - $n \cdot 10^{-2}$ г/л). В условиях, переходных от окислительных к восстановительным, содержания урана наблюдаются в пределах $n \cdot 10^{-7}$ - $n \cdot 10^{-6}$ г/л, а в водах, находящихся в восстановительных условиях, концентрация урана по данным Г.Ф.Новикова и Ю.Н.Капкова не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-6}$ г/л.

Геолого-гидрогеологические и геоморфологические условия влияют также на форму и размеры радиогидрогеохимических ореолов. Ореол, как правило, бывает вытянут в направлении движения подземных вод. На размеры ореола немало влияет интенсивность водообмена. Самые большие по протяженности ореолы характерны для вод зоны активного водообмена (в горных районах они достигают 800 м и даже 1,5-2,0 км, а в равнинных - лишь 50-70 м, причем, как считает Н.А.Титаева, эта закономерность справедлива как для горизонтальных, так и для вертикальных

размеров ореола, что в свою очередь определяет глубинность радиогидрогеохимического метода: несколько сотен метров - для горных районов и всего лишь несколько десятков метров - для равнинных.

IV.3. Гидрогеологические основы поисков урановых месторождений

Гидрогеологические основы поисков урановых месторождений включают знание радиогидрогеологических поисковых критериев.

Поисковыми критериями называется совокупность данных о природных водах (их минерализации, химическом составе, радиоактивности, условиях циркуляции и т.д.), позволяющих выявить их роль в формировании и разрушении концентраций урана и оценки ураноносности геологической структуры. Поисковые критерии могут быть местными, указывающими на связь подземных вод с оруденением, и региональными, позволяющими устанавливать взаимосвязь между радиоактивностью подземных вод и геологическими структурами.

Как видно, поисковые критерии в узком смысле слова - это определенные поисковые признаки, на основании которых может быть установлена генетическая связь подземных радиоактивных вод с первичными концентрациями урановых руд.

Как указывают Д.Ф.Зимин и А.Б.Калдан, к числу положительных поисковых признаков можно отнести следующие:

- 1) совместное нахождение в водах аномальных количеств всех трех радиоактивных элементов - урана, радия и радона; причем резко повышенные концентрации радона указывают на непосредственную близость ураново-рудных концентраций;
- 2) благоприятный изотопный состав радиоактивных элементов в водах, в частности, относительно низкое отношение $U^{234} : U^{238}$ при высоком содержании урана;
- 3) повышенное содержание в водах элементов - спутников урана - молибдена, свинца, меди, цинка и др.

Для установления радиогидрогеологических поисковых критериев и их применения необходимо детально изучить: 1) особенности формирования различных типов природных радиоактивных вод; 2) условия растворения, переноса и отложения радиоактивных элементов в подземных водах; 3) геолого-гидрогеологические условия образования уранового оруденения.

IV.4. Содержание радиоактивных элементов в природных водах как поисковый признак

Абсолютное содержание радиоактивных элементов в воде не может являться достаточно надежным и достоверным поисковым критерием, т.к. радиоактивные воды могут формироваться не только в горных породах с концентрациями урана и радия, но также и в обычных горных породах с кларковым содержанием радиоактивных элементов. Однако в совокупности с другими данными оно может иметь большое значение, поэтому этот вопрос заслуживает внимания.

IV.4.1. Содержание в водах радона. Присутствие радона характерно для большинства подземных вод. Он довольно легко мигрирует по трещинам горных пород, растворяется в природных водах и увлекается нередко на значительные расстояния от места своего образования (первые сотни метров). В большинстве случаев радон содержится в водах в количествах, во много раз превышающих то, которое соответствует радиоактивному равновесию с растворенным в воде радием.

Повышенные концентрации в подземных водах радона могут быть: а) при высоком коэффициенте эманирования вследствие повышенной раздробленности пород (в зонах тектонических нарушений); б) при вторичной обогащенности пород радием в результате сорбционных процессов ("эманлирующие коллекторы"); в) при наличии в породах рудных концентраций урана.

Для пород с нормальным рассеянным содержанием радиоактивных элементов содержание радона зависит от петрографического состава пород. В подземных водах осадочных, метаморфических и основных магматических пород оно колеблется, по А.Н.Токареву и А.В.Щербакову, в пределах 20-50 эман. Для подземных вод, циркулирующих в кислых магматических и метаморфических породах, концентрация радона может достигать 100-300 эман. В водах, контактирующих с породами, содержащими адсорбированный радий, концентрация радона может быть до 1000 и более эман. В водах гидротермальных урановых месторождений она достигает десятков тысяч эман, в то время как в водах осадочных месторождений урана - не более 50 эман и только в исключительных случаях - до 200-300 эман.

Приведенные примеры показывают, что одинаковые концентрации радона могут быть и в водах, омывающих урановое оруденение, и в водах, циркулирующих по безрудным породам, а в некоторых случаях концентра-

ции радона в водах, циркулирующих в безрудных породах, могут быть даже большими, чем в водах урановых месторождений.

Следовательно, содержание радона не может служить надежным поисковым критерием для осадочных месторождений урана, но является весьма хорошим признаком наличия уранового оруденения гидротермального типа, в особенности в массивах кислых магматических пород.

Как видно, даже значительные концентрации радона в природных водах не во всех случаях признак наличия уранового оруденения. Для однозначного ответа надо выяснить, является ли данное повышенное содержание радона аномальным по отношению к радиогидрогеохимическому фону и что оно не связано со вторичными эманулирующими коллекторами. Кроме того, необходимо учитывать величины расходов воды (дебитов скважин, источников). Длительное соприкосновение воды с горными породами способствует накоплению в воде радона. Поэтому в природных условиях в водах источников с малыми дебитами концентрации радона обычно больше, чем в водах высокодебитных источников. Только при омывании водами мощных эманулирующих коллекторов и рудных тел большие концентрации радона могут быть и при больших дебитах.

IV.4.2. Содержание в водах радия. Радий в горных породах может находиться: а) в рассеянном состоянии в толще пород; б) в адсорбированном состоянии на стенках водопроводящих трещин, в осадках источников (травертины, охры и т.п.), в изоморфной смеси с другими элементами (радиобариты); в) в рудных концентрациях урана.

Радий может переходить из горных пород в подземные воды в результате их растворения и выщелачивания, поэтому для обогащения вод радием важнейшее значение имеет их химический состав. Наиболее благоприятны для растворения и выщелачивания урановых руд кислые воды. Радий в подземных водах хорошо коррелируется с их общей минерализацией. Наиболее низкие концентрации радия ($n \cdot 10^{-12}$ - $n \cdot 10^{-13}$ г/л) отмечены в слабоминерализованных холодных водах; в высокоминерализованных водах концентрация радия в некоторых случаях достигает

$n \cdot 10^{-9}$ г/л. В таких водах, как указывают В.И.Баранов и Н.А.Титаева, концентрацию радия определяет их химический состав. В минерализованных водах осадочных пород высокие концентрации радия ($n \cdot 10^{-11}$ - $n \cdot 10^{-9}$ г/л) отмечаются только для хлоридно-натриево-кальциевых вод. В сульфатных и гидрокарбонатных водах концентрация радия находится в пределах $n \cdot 10^{-12}$ - $n \cdot 10^{-13}$ г/л.

Повышенные концентрации радия ($5 \cdot 10^{-11}$ г/л и более) нередко отмечаются в углекислых гидрокарбонатно-кальциевых водах, связанных

с кислыми магматическими породами [11]. В слабо минерализованных холодных и термальных неуглекислых водах концентрация радия обычно не превышает $1 \cdot 10^{-12}$ - $2 \cdot 10^{-12}$ г/л. Таким образом, одно только высокое содержание радия в подземных водах необязательно связано с наличием уранового оруденения. Для установления связи подземных вод с повышенными концентрациями в них радия с урановым оруденением следует учитывать химический состав вод, а также содержание в них других радиоактивных элементов.

Признаком наличия уранового оруденения может быть:

а) концентрация радия более $1 \cdot 10^{-10}$ г/л в сульфатных, сульфатно-хлоридных или гидрокарбонатных водах в осадочных породах (известняках, углях, песчаниках, сланцах и т.д.);

б) повышенные концентрации радия и радона в водах любого состава, циркулирующих в осадочных породах;

в) повышенные концентрации радия или радия и радона в водах магматических пород.

IV.4.3. Содержание в водах урана. Подземные воды могут обогащаться ураном в результате растворения урановых минералов, содержащихся в горных породах либо в виде рудных концентраций, либо в рассеянном состоянии. Поэтому как и при растворении радия на переход урана в воду существенно повлияет ее химический состав. По данным А.И.Германова содержание урана в подземных водах варьирует в широких пределах: от $1 \cdot 10^{-8}$ до 2 г/л. Наиболее высокие концентрации урана обнаружены в кислых рудничных водах ($n \cdot 10^{-2}$ - 2 г/л). В породах с нормальным рассеянным содержанием радиоактивных элементов подземные воды содержат уран в значительно меньших количествах ($n \cdot 10^{-6}$ - $n \cdot 10^{-7}$ г/л). Поэтому концентрация урана более $n \cdot 10^{-4}$ г/л во всех случаях является признаком повышенного содержания его в горных породах, а в хлоридно-натриево-кальциевых водах осадочных горных пород - более $n \cdot 10^{-5}$ г/л. При этом надо учитывать, что вследствие хорошей миграционной способности урана повышенное содержание его в воде может быть и на значительном удалении от месторождения (оруденения).

Приведенные данные показывают, что повышенные концентрации урана в подземных водах не надежный признак наличия промышленного оруденения урана; необходимо учитывать также химический и газовый состав подземных вод, геохимический характер среды и содержание в водах других радиоактивных элементов.

Наиболее надежными признаками наличия уранового оруденения будут:

а) повышенные концентрации урана и радона в подземных водах магматических пород.

тических пород;

б) повышенные концентрации урана и радия в подземных водах осадочных и осадочно-метаморфических пород.

Подводя итоги вышесказанному, надо отметить, что, оценивая содержание радиоактивных элементов (радона, радия, урана) в подземных водах с точки зрения поисковых критериев на наличие уранового оруденения, необходимо учитывать также гидрогеохимическую обстановку, химический и газовый составы вод, литологию пород и их эманулирующую способность, условия циркуляции воды и другие факторы.

IV.5. Стадии и задачи радиогидрогеологических исследований

Радиогидрогеологические исследования, производящиеся для выявления урановых месторождений и радиоактивных вод бальнеологического и промышленного назначения, разделяются на следующие стадии: рекогносцировочные, площадные и детальные исследования.

Рекогносцировочные радиогидрогеологические исследования служат для выявления участков с повышенной радиоактивностью подземных вод в благоприятных для уранового оруденения геологических структурах. Они охватывают значительные территории и выполняются на геологической основе масштабов 1:500000 - 1:200000. Опробование водопунктов (родников, мочежин, колодцев, шурфов, скважин, горных выработок, поверхностных водотоков и водоемов) производится отдельными маршрутами. Пробы воды отбираются более или менее равномерно со всей территории поискового района. Одна проба должна отбираться с площади 3,5-35,0 км² [4] в зависимости от сложности геолого-гидрогеологических условий района.

По данным рекогносцировочных исследований составляются схематические радиогидрогеологические карты масштабов 1:500000 - 1:200000.

Площадные радиогидрогеологические исследования отличаются от рекогносцировочных значительно большей полнотой и выполняются в масштабе 1:100000 - 1:50000. Они заключаются в опробовании всех имеющихся на территории естественных и искусственных водопунктов, причем одна проба должна отбираться с площади 0,5 - 2,5 км² [4]. По материалам, полученным на этой стадии исследований, составляются среднemasштабные радиогидрогеологические карты, которые должны позволить установить связь повышенных концентраций радиоактивных элементов в подземных водах с определенными типами горных пород, дать перспективную оценку выявленных радиогидрогеологических аномалий и ореолов рассеяния урана в природных водах и определить направление дальней-

ших, более детальных исследований.

Детальные радиогидрогеологические исследования производятся в масштабе 1:25000 - 1:5000 и служат для детализации ранее выявленных аномалий. Они сопровождаются разведочными работами и наблюдениями за режимом подземных вод в скважинах. Детальные радиогидрогеологические исследования должны позволить [41]:

- 1) определить контуры ореолов рассеяния урана в подземных водах путем сплошного их опробования по площади и на глубину (по Г.Ф.Симину и А.Б.Каждану одна проба должна отбираться с площади 0,05 - 0,35 км²);
- 2) установить условия распространения, глубину залегания и водообильность водоносных горизонтов, с которыми связаны очаги радиоактивных вод, а также условия питания и стока подземных вод;
- 3) выявить условия движения подземных вод и положение участков с радиоактивными водами по отношению к водоносным горизонтам, с которыми они связаны;
- 4) установить условия формирования подземных радиоактивных вод и выявить предполагаемые очаги обогащения вод радиоактивными элементами.

Радиогидрогеологические исследования на этой стадии производятся также для детальной разведки ранее выявленных участков с урановым оруденением и для промышленной оценки месторождений. В этих случаях радиогидрогеологическое картирование производится в масштабе 1:5000 и сопровождается большим объемом буровых работ. В результате должна быть получена детальная геолого-гидрогеологическая характеристика месторождения.

ГЛАВА V. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

V.1. Определение содержания урана

Относительно простыми по выполнению, высокочувствительными и экспрессными для проведения анализа являются люминесцентные и колориметрические методы определения урана с предварительным концентрированием элемента адсорбцией, соосаждением, экстракцией или ионным обменом. Другие методы (объемный и полярографический) в последнее время находят все меньшее применение в лабораториях геологической службы страны, в связи с чем рассматриваться нами не будут.

Наиболее известными и популярными являются люминесцентные методы

П.Н.Жарова, А.А.Резникова и Е.П.Муликовской. Они основаны на адсорбции урана из природных вод активированным углем при pH раствора, равном 5-6, последующей десорбции его раствором углекислого натрия и дальнейшим измерением свечения перла с фтористым натрием путем сравнения со стандартными эталонами *). Эти методы позволяют определять от $1 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ г/л урана при анализе из объема 500 мл воды до $5 \cdot 10^{-4}$ г/л - из объема 100 мл.

Точность определения урана указанными методами зависит от содержания элемента в воде и колеблется в пределах $\pm 15 - 25\%$. Оба метода достаточно производительны, не требуют сложного лабораторного оборудования и позволяют определять уран в различных типах природных вод, а возможность применения их в полевых условиях делает их незаменимыми в практике радиогидрогеологических исследований.

Люминесцентный метод Н.Х.Айдинян основан на соосаждении урана в исследуемой пробе с гидратом окиси алюминия и дальнейшим его определением в перле с фтористым натрием. Этим методом определяют от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ г/л урана из 100 мл исследуемой воды. В зависимости от содержания урана необходимо менять объем анализируемой воды от 100 до 200 мл (при содержании урана менее $1 \cdot 10^{-6}$ г/л). Порог чувствительности метода $2 \cdot 10^{-7}$ г/л. Метод достаточно надежен, прост в исполнении и по точности не уступает методам П.Н.Жарова, А.А.Резникова и Е.П.Муликовской. Однако в применении к сильно минерализованным водам метод трудоемок, менее производителен и требует нагревательных приборов; последнее обстоятельство делает его мало удобным в полевых условиях.

Определению урана данным методом мешают железо, медь, марганец и большие количества кальция и магния. Наличие указанных элементов в ходе анализа обычно обнаруживается по характеру цветных гидратных осадков или окрашенных перлов.

Метод М.П.Белой, основанный на измерении интенсивности свечения перла фтористого натрия, сплавленного с соединениями урана и выделенного соосаждением на 1 л воды, является трудоемким и малопродуктивным. Он требует сложного технического оснащения лаборатории и высококвалифицированных исполнителей.

Колориметрические методы более многочисленны. Среди них выделяют методы П.Н.Жарова, М.П.Белой, А.А.Резникова и Е.П.Муликовской, С.Б.Саввина, Н.В.Озеровой и Л.А.Сидоровой.

Определение урана по методу П.Н.Жарова производится с ортоокси-

*) Сравнение производится визуально на приборе МИ-1 или на фотометрах типа ЛЮТ, ФАС и др.

азоарсоновой кислотой после десорбции элемента из активированного угля раствором углекислого натрия. В зависимости от содержания элемента объем анализируемой пробы воды может достигать до 500 мл. Порог чувствительности равен $1 \cdot 10^{-6}$ г/л урана, а точность определения $\pm 20\%$. Этот метод, как и люминесцентный, отличается простотой, надежностью и достаточной производительностью; он может являться вполне объективным контролем результатов анализа, полученных другими методами. Колориметрическому определению урана мешают алюминий и большое количество органических веществ.

Определение урана в природных водах методом М.П.Белой основано на образовании характерной желто-зеленой окраски при действии перекиси водорода на его соли в щелочной углекислой среде. Концентрирование и отделение урана от мешающих элементов (железо, алюминий, титан, хром, марганец, кобальт, никель, ванадий, молибден), как и в люминесцентном варианте метода, достигается путем соосаждения с хлорным железом и дальнейшим растворением урана из 1 литра воды. Порог чувствительности метода $-5 \cdot 10^{-5}$ г/л. Следует отметить, что из-за большого количества мешающих элементов метод не нашел широкого применения в практике.

Следуя А.А.Резникову и Е.П.Муликовской, содержание урана определяют по интенсивности синего окрашивания комплекса урана с арсеназо-І после сорбции элемента активированным углем и последующей десорбции углекислым натрием. Метод позволяет определить $1-3 \cdot 10^{-6}$ г/л урана из 1 л исследуемой воды. Точность определения $\pm 25\%$. Измерения производят в компараторе сравнением со стандартной шкалой или на фотоколориметре в кювете, объемом 30 мл. Основным достоинством метода является его избирательность (кроме U^{6+} ни один элемент не образует синюю окраску с арсеназо-І). Он достаточно производителен, несложен по выполнению и может с успехом проводиться в полевой лаборатории. Однако широкое применение метода в последние годы сдерживается дефицитностью реагента арсеназо-І.

Метод С.Б.Саввина основан на определении следов урана в воде путем соосаждения уранила с гидроокисью алюминия, восстановлении шестивалентного урана до четырехвалентного висмута и фотометрировании с арсеназо-Ш. Метод позволяет определить до 1 мкг/л урана из 1 л анализируемой воды с относительной ошибкой не более 5%. Метод достаточно прост по выполнению и применяемым реагентам, однако не относится к экспрессным (анализ длится 3-4 часа) и производится только в стационарных лабораторных условиях.

Интересный, с точки зрения экспрессности, метод определения урана

предложен Н.В.Озеровой и Л.А.Сидоровой. Они предлагают производить визуальное определение урана в природных водах разного типа с арсеназо-Ш непосредственно у водоисточника с вариантами: а) прямого определения урана; б) путем предварительного концентрирования. Прямое определение урана осуществляется для пресных и слабосоленых вод из 20 мл анализируемой пробы воды и содержании урана более $1 \cdot 10^{-6}$ г/л. При малых содержаниях урана и высокоминерализованных водах (до 200 г/л) применяется предварительное концентрирование раствором трибутилфосфата; мешающие элементы связываются трилоном Б. Продолжительность прямого определения урана 3-5 мин., а с предварительным концентрированием - 15-20 мин. Точность определения $\pm 25-30\%$.

Анализируя рассмотренные методы с точки зрения чувствительности, точности и экспрессности, можно рекомендовать определение урана в природных водах люминесцентным методом и колориметрическим с арто-оксизаорсоновой кислотой или с арсеназо-Ш.

У.2. Определение содержания радона

Определение содержания радона в водах производится циркуляционным и вакуумным методами. Наибольшее распространение в практике радиогидрогеологических исследований получил вакуумный метод. Он не требует большого объема воды для исследования (менее 250 мл), прост и надежен в работе, позволяет перевести весь радон из воды в ионизационную камеру. Количество радона (Q_{Rn}), поступившего в камеру (рис.У.1), по измерениям ионизационного тока определяется по формуле

$$Q_{Rn} = j \cdot N, \quad (У.1)$$

где j - чувствительность эманометра в кюри/дел./мин;
 N - ионизационный ток пробы.

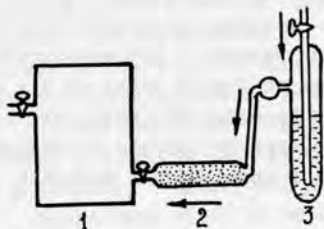


Рис. У.1. Схемы введения радона в камеру:
 1 - камера; 2 - осушитель;
 3 - барботер.

Количество радона в пробе в момент измерения (Q_{Rn}^t) очевидно со временем за счет распада будет меньше, чем в момент отбора пробы (Q_{Rn}^0). В этом случае:

$$Q_{Rn}^t = Q_{Rn}^0 e^{-\lambda_{Rn} t} \quad (7.2)$$

или

$$Q_{Rn}^0 = \frac{Q_{Rn}^t}{e^{-\lambda_{Rn} t}}, \quad (7.3)$$

где t - время с момента отбора пробы до момента измерения;
 λ - постоянная распада радона.

Для определения концентрации радона в пробе (g_{Rn}) количество радона необходимо отнести к объему пробы:

$$g_{Rn} = Q_{Rn}^0 \cdot \frac{1000}{V_B} = \frac{j N}{e^{-\lambda t}} \cdot \frac{1000}{V} \text{ кюри/л}, \quad (7.4)$$

где V_B - объем пробы воды в мл.

Если объем пробы воды более 250 мл, то переводить радон в камеру можно циркуляционным способом. В этом случае содержащийся в воде радон равномерно распределяется в объеме камеры, соединительных емкостях, трубках и груше; в камеру попадает только часть общего количества радона, содержащегося в пробе.

Концентрацию радона в пробе воды в момент отбора пробы определяют по формуле:

$$g_{Rn} = \frac{j N}{e^{-\lambda t}} \cdot \frac{V_{\text{общ}}}{V_K} \cdot \frac{1000}{V_B}, \quad (7.5)$$

где $V_{\text{общ}}$ - общий объем камеры, соединительных трубок, емкостей и груши, мл;

V_K - объем камеры, мл;

V_B - объем пробы воды, мл;

t - время с момента отбора пробы до момента измерения.

7.3. Определение содержания радия

Определение содержания радия в водах производится радиохимическим и физическим методами.

Содержание радия в природных водах обычно на 3-5 порядков меньше, чем урана, поэтому перед определением радиохимическим методом [9]

производится его концентрирование соосаждением с сульфатом бария. Полученный осадок сплавляется с Na_2CO_3 , KHSO_3 и, после тщательного промывания 1%-ным горячим раствором соды, растворяется в фильтре 5%-ным раствором соляной кислоты. Затем раствор переливается в обычный барботер, пробу "продувают" атмосферным воздухом путем прокачивания с помощью резиновой груши в течение 5-10 минут, и, закрыв зажимами концы трубок, оставляют на накопление радона в течение 7-10 дней. Измерение количества радона производится на электрометре типа СТ-1М или СМ-2М. Количество накопившегося за это время радона в пробе определяется по формуле:

$$Q_{Rn} = Q_{Ra} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (7.6)$$

где Q_{Ra} - количество радия в пробе, г;

t - время накопления радона (от момента закрытия сосуда до момента введения радона в камеру).

По найденному количеству радона определяем содержание радия (при вакуумном введении радона в камеру):

$$Q_{Ra} = \frac{Q_{Rn}}{(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{j \cdot N}{(1 - e^{-\lambda t})} \cdot \frac{1000}{V_b} \text{ г/л} \quad (7.7)$$

Радиохимический метод имеет большую чувствительность ($1 \cdot 10^{-13}$ г/л) и точность ($\pm 10\%$) и, несмотря на длительность, широко применяется.

Физический метод [9] более прост, аппаратурно быстр, но менее точен, чем радиохимический. Применяется для определения радия и радона в водах в полевых условиях с циркуляционным или вакуумным вариантом измерений радона. Содержание радия (при циркуляционном введении радона в камеру) определяется по формуле:

$$Q_{Ra} = \frac{Q_{Rn}}{(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{j \cdot N}{(1 - e^{-\lambda t})} \cdot \frac{V_{\text{общ.}}}{V_k} \cdot \frac{1000}{V_b} \text{ г/л} \quad (7.8)$$

В последние годы широко распространен ускоренный метод определения радия в природных водах [9]. Он основан на соосаждении радия карбонатом кальция совместно с активированным углем из объема от 0,5 до 10 л. Чувствительность и точность метода аналогичны радиохимическому, а быстрота выполнения и простота применяемых реактивов позволяет производить анализы в полевых условиях.

Список литературы

1. Баранов В.И., Титаева Н.А. Радиогеология. М., Изд-во МГУ, 1973. 243 с.
2. Евсеева Л.С., Перельман А.И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М., Госатомиздат, 1957. 240 с.
3. Каждан А.Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов. М., "Высшая школа", 1966. 280 с.
4. Каждан А.Б., Бойцов В.Е., Зимин Д.Ф. Геология и методы поисков урановых месторождений. М., "Недра", 1971. 192 с.
5. Мелков В.Г., Пухальский Л.И. Поиски месторождений урана. М., Госгеолтехиздат, 1957. 220 с.
6. Миграция химических элементов в подземных водах СССР. М., "Наука", 1974. с.16-31. Авт.: В.П.Зверев, В.И.Кононов, В.А.Ильин и др.
7. Минералогические типы зон окисления гидротермальных урановых и сульфидно-урановых месторождений СССР. М., Атомиздат, 1959, (труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958). 178 с. Авт.: Г.С.Грицаенко, Л.Н.Белова, Р.В.Гецева и др.
8. Основные черты геохимии урана. Под ред. акад. А.П.Виноградова. М., Изд. АН СССР, 1963. 352 с.
9. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации. М., Изд. МГ СССР, 1974. 142 с.
10. Старик И.Е. Основы радиохимии. Л., "Наука", 1969. 648 с.
11. Токарев А.Н., Шербаков А.В. Радиогидрогеология. М., Госгеолтехиздат, 1956. 264 с.
12. Хан О. Прикладная радиохимия. М., Госхимиздат, 1947. 276 с.
13. Черепнин В.К. Геохимия и типы месторождений урана. Томск, Изд-во Томск. гос. ун-та, 1966. 314 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

стр.

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава I. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБОГАЩЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД РАДИОАКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	6
I.1. Физико-химические свойства радиоактивных элементов	7
I.1.1. Явление радиоактивности	7
I.1.2. Законы радиоактивных превращений	10
I.1.3. Характеристика ядерных излучений	11
I.1.4. Семейства радиоактивных элементов	12
I.1.5. Единицы измерения радиоактивности	14
I.1.6. Геохимические свойства радиоактивных эле- ментов	15
I.2. Содержание и формы нахождения радиоактивных элементов в горных породах	17
I.3. Физические свойства горных пород, руд и под- земных вод	21
I.3.1. Эманирующая способность горных пород	22
I.3.2. Адсорбционные процессы	23
I.3.3. Температурный режим подземных вод	24
I.4. Геолого-структурные и гидрогеологические усло- вия формирования радиоактивных вод	25
I.5. Химический состав природных вод	28
I.6. Влияние геохимической обстановки на формирова- ние радиоактивных вод	31
Глава II. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И ВОЗНИКШИЕ ФОРМЫ МИГРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.	38
II.1. Содержание радиоактивных элементов в подземных водах	39
II.2. Формы миграции радиоактивных элементов	40
II.2.1. Миграция урана, связанная с зоной окисления урановых месторождений	41
II.2.2. Миграция урана, связанная с процессами рас- творения и выщелачивания урана из руд, мине- ралов и пород природными водами	43
II.2.3. Миграция урана, связанная с процессами осаж- дения урана из водных растворов	44
II.2.4. Миграция урана, связанная с процессами адсорбции	45

	стр.
П.2.5. Миграция радия	46
П.2.6. Миграция радона	48
П.3. Образование ореолов рассеяния вокруг урановых месторождений	48
П.3.1. Первичные ореолы рассеяния	48
П.3.2. Вторичные ореолы рассеяния	49
П.4. Радиоактивные элементы в круговороте природ- ных вод	50
Глава III. ПРИРОДНЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ВОДЫ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ. .	51
III.1. Классификация радиоактивных вод	51
III.2. Радоновые воды	52
III.2.1. Радоновые воды коры выветривания	57
III.2.2. Радоновые воды глубоких тектонических трещин	58
III.2.3. Радоновые воды аэрирующих коллекторов	59
III.3. Радиевые воды	59
III.4. Урановые воды поверхностных водоемов	60
III.4.1. Воды морей и океанов	60
III.4.2. Воды рек и озер	61
III.5. Урано-радиевые воды	61
III.6. Урано-радонные и урано-радоно-радиевые воды..	62
III.6.1. Воды зоны окисления гидротермальных урано- вых месторождений	62
III.6.2. Воды зоны окисления осадочных урановых место- рождений.	64
III.7. Радоно-радиевые воды.	64
Глава IV. ОБОСНОВАНИЕ РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ.	65
IV.1. Основные методы поисков урановых месторождений	65
IV.2. Условия применения радиогидрогеохимического метода в общем комплексе поисковых работ на уран	66
IV.3. Гидрогеологические основы поисков урановых месторождений	68
IV.4. Содержание радиоактивных элементов в природ- ных водах как поисковый признак	69
IV.4.1. Содержание в водах радона	69
IV.4.2. Содержание в водах радия	70
IV.4.3. Содержание в водах урана	71

IV.5. Стадии и задачи радиогидрогеологических исследований	72
Глава V. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ	73
У.1. Определение содержания урана	73
У.2. Определение содержания радона	76
У.3. Определение содержания радия	77

Юрий Иванович Антонов
Виктория Васильевна Елизарьева

РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЯ

Ответственный за выпуск доцент Антропцев А.М.

Редакционно-издательский отдел ДГИ,
г. Днепропетровск, пр.К.Маркса, 19.

БТ62457. Подписано к печати II октября 1978 г.

Объем 3,7 уч.-изд.л. Тираж 500 экз. Зак. №182 . Цена 16 к.

Ротапринт Днепропетровского горного института им.Артема.

320600, г.Днепропетровск, пр.К.Маркса, 19.