

А. Б. КАЖДАН, В. Е. БОЙЦОВ, Д. Ф. ЗИМИН

# ГЕОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Д о п у щ е н о*  
*Министерством высшего и среднего*  
*специального образования РСФСР*  
*в качестве учебника*  
*для геологоразведочных техникумов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»  
МОСКВА 1971

**Геология и методы поисков урановых месторождений.** К а ж д а н А. Б., Б о й ц о в В. Е., З и м и н Д. Ф. М., изд-во «Недра». 1971 г., 192 стр.

Уран является самым тяжелым из природных химических элементов. Геохимия его определяется положением в периодической системе Д. И. Менделеева и зависит от строения ядра атома и его внешних электронных оболочек. Уран обладает переменной валентностью и встречается в природе в шести- и в четырехвалентном состоянии. Установлены три формы нахождения урана в горных породах: в виде самостоятельных минералов, изоморфных примесей и в рассеянном состоянии. Форма нахождения определяется характером эндогенного процесса минералообразования. Как литофильный элемент уран образует только кислородные соединения. Известно около 200 различных урановых минералов, но промышленное значение имеют немногие.

Выделяются девять важнейших промышленных типов урановых месторождений. Каждый из них характеризуется определенным положением в регионально-геологической структуре, составом вмещающих пород, тектоникой, связью с магматизмом и закономерностями пространственного размещения оруденения.

Геологическими основами поисков урановых месторождений являются их региональные и местные поисковые критерии, поисковые призывки и природные условия районов поисковых работ.

Поисковые критерии позволяют судить о возможности и вероятности обнаружения месторождений полезных ископаемых в данной геологической обстановке. Они различны для разных промышленных типов. К числу важнейших поисковых признаков относятся различные проявления урановой минерализации, первичные и вторичные ореолы рассеяния урана (в коренных породах, в рыхлых отложениях, в природных водах, в растениях и в почвенном воздухе). Среди природных условий ведения поисковых работ выделяются области гумидного и аридного климата, области с различным геолого-структурным положением и строением рельефа в связи с особенностями развития ореолов рассеяния урана и его спутников.

Поиски урановых месторождений осуществляются в две последовательные стадии: детальные поиски и поисково-разведочные работы. Основной ведения поисковых работ являются геологические и геофизические съемки. Наиболее широко распространены радиометрические методы поисков, основанные на выявлении радиационных и газовых ореолов урановых месторождений (аэро-, авто-, пешеходная, шпуровая гамма-съемки, эманационная и гелиевая съемки).

В последние годы все более широкое развитие получают геохимические методы поисков по ореолам рассеяния урана и его элементов-спутников в коренных породах, рыхлых отложениях, водах и растениях.

Гамма- и эманационные методы могут применяться не только при поисках урановых месторождений, но и для геологического картирования, поисков и разведок нерадиоактивных полезных ископаемых.

Таблиц 6, иллюстраций 37, библиография 30 названий.

**КАЖДАН АЛЕКСЕЙ БОРИСОВИЧ,  
БОЙЦОВ ВЛАДИМИР ЕМЕЛЬЯНОВИЧ,  
ЗИМИН ДАНИИЛ ФЕДОРОВИЧ**

## **ГЕОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Редактор издательства *С. И. Башмакова* Техн. редактор *В. И. Калужина*  
Корректор *С. С. Борисова*

Сдано в набор 30/X 1970 г. Подписано в печать 12/III 1971 г. Т-05242.  
Формат 60 X 90<sup>1/16</sup>. Печ. л. 12.0. Уч.-изд. л. 12,77. Бумага № 1.  
Индекс 1—4—2. Заказ 2014/3588—4. Тираж 3500 экз. Цена 52 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главолиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский пр., 91.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

В в е д е н и е

4

### Раздел I. ГЕОЛОГИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(В. Е. Бойцов, А. Б. Каждан)

Глава I. Основы геохимии и минералогии урана . . . . .	7
Глава II. Месторождения урана . . . . .	37
Глава III. Условия формирования и регионально-геологические закономерности размещения месторождений урана . . . . .	70

### Раздел II. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (А. Б. Каждан)

Глава I. Поисковые критерии . . . . .	77
Глава II. Поисковые признаки . . . . .	79
Глава III. Природные условия ведения поисковых работ . . . . .	101

### Раздел III. МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (Д. Ф. Зимин, А. Б. Каждан)

Глава I. Общие сведения о методах поисков . . . . .	113
Глава II. Физические основы радиометрических методов поисков и способы регистрации ядерных излучений . . . . .	120
Глава III. Наземные гамма-поиски . . . . .	135
Глава IV. Эманационные поиски . . . . .	143
Глава V. Радиометрическая документация горных выработок и радиометрическое опробование . . . . .	153
Глава VI. Применение гамма- и эманационного методов для геологического картирования, поисков и разведки нерadioактивных полезных ископаемых . . . . .	159
Глава VII. Гамма-каротаж скважин . . . . .	165
Глава VIII. Геохимические методы поисков урановых месторождений . . . . .	173
Глава IX. Лабораторные радиометрические методы определения содержания урана и тория в пробах . . . . .	183
Глава X. Правила техники безопасности при работе с радиоактивными веществами в полевых и лабораторных условиях . . . . .	190

## ВВЕДЕНИЕ

Самый тяжелый из природных химических элементов — уран был открыт немецким химиком Мартином Клапротом в 1789 г. Однако, как выяснилось позже, Клапрот выделил и описал твердый окисел урана, а металлический уран был получен только в 1841 г. французом Е. Пелиго.

Явление естественной радиоактивности урановых солей установлено на рубеже XIX и XX вв. французским физиком Анри Беккерелем. Исследованием этого явления занялись выдающиеся ученые супруги Мария Кюри-Склодовская и Пьер Кюри. В 1898 г. из урановой смолки ими был выделен новый химический элемент — радий, обладающий наиболее сильным радиоактивным излучением, и установлена радиоактивность тория и полония. Природа этого явления успешно изучалась крупнейшим английским физиком Эрнестом Резерфордом. Ему принадлежат исследования свойств альфа- и бета-лучей, а в 1900 г. — открытие гамма-излучения и выяснение его физической природы.

В начале XX в. 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 только как сырье для изготовления красок.

Истинное значение радиоактивности и безграничные возможности практического использования атомной энергии впервые в мире были оценены академиком В. И. Вернадским. Еще в 1910 г. на общем собрании Российской Академии наук он говорил, что в явлениях радиоактивности открываются источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники, какие рисовались человеческому воображению. По его инициативе в 1909 г. в России была создана Радиевая экспедиция Академии наук, а в 1911 г. им составлена первая сводка урановых рудопроявлений мира. В эти же годы под руководством В. И. Вернадского с участием А. Е. Ферсмана, И. Г. Хлопина, К. А. Ненадкевича, В. И. Крыжановского и других ученых в России были начаты поиски урановых месторождений и разработаны основные положения геологии и геохимии радиоактив-

ных элементов. Однако широкий размах и плановность эти работы получили только после Октябрьской революции.

В 1922 г. в Петрограде был создан Радиевый институт, в котором начались систематические исследования в области геохимии радиоактивных элементов и радиоактивных методов определения абсолютного возраста минералов и горных пород.

В эти же годы явления радиоактивности изучались учеными-физиками всего мира. В 1919 г. Эрнесту Резерфорду удалось экспериментально доказать возможность превращения одних элементов в другие при бомбардировке их атомов альфа-частицами, а в 1934 г. Фредериком и Ирен Жолио-Кюри была открыта искусственная радиоактивность и получены первые искусственные радиоактивные изотопы. Дальнейшие исследования выдающихся физиков ряда стран привели в 1942 г. к созданию атомного реактора и осуществлению контролируемой реакции расщепления атомного ядра.

В 1939 г. Ф. Жолио-Кюри, Э. Ферми, О. Ган и Ф. Штрассман почти одновременно доказали возможность искусственного расщепления ядра урана на несколько крупных осколков под воздействием нейтронов. В 1940 г. советские ученые Г. Н. Флеров и К. А. Петряк открыли процесс самопроизвольного (спонтанного) деления тяжелых ядер урана на две довольно близкие по массе части, а исследованиями Ю. Б. Харитона, Я. Б. Зельдовича и ряда зарубежных ученых было установлено, какие условия необходимы для того, чтобы цепная реакция расщепления атомного ядра могла пойти. Впервые такая реакция осуществлена в конце 1942 г. в США под руководством Э. Ферми. Расщепляющиеся радиоактивные элементы получили название ядерного горючего и приобрели значение важнейшего энергетического сырья.

С появлением реальной возможности использования атомной энергии в практических целях во всем мире начался новый этап бурного развития поисков, разведки и добычи урана. За последние четверть века во всех частях земного шара было открыто и освоено огромное количество разнообразных урановых месторождений, изучены их важнейшие генетические и промышленные типы.

В 1943—1945 гг. 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 атомных бомбы были сброшены американскими летчиками на японские города Хиросиму и Нагасаки, хотя это и не диктовалось военной необходимостью. От взрыва атомных бомб в течение нескольких секунд погибли десятки тысяч мирных жителей этих городов, а многие из уцелевших умерли позже от лучевой болезни. Так величайшее открытие человечества было использовано империалистами США в челококонавистнических разрушительных целях. Стремление использовать ядерное оружие для запугивания и шантажа проявляется в империалистических кругах некоторых капиталистических стран и в настоящее время.

Нашей стране принадлежит ведущая роль в разработке проблемы мирного использования атомной энергии. Руководствуясь гуманными целями, Советский Союз последовательно и настойчиво демонстрирует перед всем миром богатейшие возможности использования атомной энергии в народном хозяйстве. Благодаря исследованиям крупнейших советских ученых под руководством И. В. Курчатова у нас освоено проектирование и строительство атомных электростанций; первая из них была пущена в 1954 г. После опубликования опыта советских ученых в докладах на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии строительство атомных электростанций началось в США, Англии, Франции и в других странах. 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 реакторах создаются радиоактивные изотопы, которые находят широкое применение в геологии, металлургии, медицине, в сельском хозяйстве и во многих других отраслях науки и техники. С помощью радиоактивных изотопов исследуются буровые скважины и внутреннее строение металлов. Так называемые меченые атомы позволяют наблюдать за движением вод, биотоков растений и проводить физиологические исследования живых организмов. В наши дни атомная энергия превратилась из энергии будущего в энергию сегодняшнего дня, причем роль ее в общем энергетическом балансе народного хозяйства непрерывно возрастает. Урановые руды как основное ядерное горючее приобрели в настоящее время значение важнейших энергетических ресурсов.

Из года в год во всем мире поиски и разведка урановых месторождений проводятся во все возрастающих объемах. Уже сейчас суммарные мировые запасы разведанного ядерного горючего по своему энергетическому эквиваленту намного больше разведанных запасов угля, нефти и гидроэнергии вместе взятых.

В связи с определенными перспективами использования атомной энергии в народном хозяйстве в Советском Союзе проводятся фундаментальные научные исследования в области геологии урана и непрерывно совершенствуются методы поисков урановых месторождений. Трудом советских геологов за последние четверть века не только создана мощная сырьевая база для развития отечественной атомной промышленности, но и разработаны современные научные основы геологии урановых месторождений. Исследования по выявлению закономерностей формирования урановых месторождений, начатые по инициативе академика В. И. Вернадского, были продолжены Д. И. Щербаковым, А. П. Виноградовым, А. А. Сауковым, В. В. Щербиной и многими другими учеными. Результаты этих исследований легли в основу современных представлений о природе различных типов урановых месторождений, а также о их поисковых критериях и признаках. Правильное использование совокупности всех современных знаний о геологии урановых месторождений обеспечивает высокую эффективность поисковых работ.

## ГЕОЛОГИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## Глава I

## ОСНОВЫ ГЕОХИМИИ И МИНЕРАЛОГИИ УРАНА

## § 1. Геохимические особенности урана

Свойства химических элементов зависят от строения их атомов. Атом представляет 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 на определенных уровнях вокруг ядра и число их равно порядковому номеру элемента. Строением электронных оболочек, окружающих ядро атома, определяются все химические свойства элементов: валентность, величины ионных радиусов, щелочные или кислотные свойства, величины потенциала ионизации и окислительно-восстановительных потенциалов, сродство к кислороду или сере и т. д.

Геохимия урана определяется его положением в периодической системе Д. И. Менделеева. Порядковый номер урана 92, атомный вес 238,07. Он завершает периодическую систему природных элементов и как все тяжелые элементы, начиная с полония, обладает радиоактивностью. Кроме урана-238, который составляет 99,2739%, в природе известны еще два его изотопа:  $U^{235}$  (0,7205%) и  $U^{234}$  (0,0056%). Уран является сравнительно широко распространенным элементом. Его содержание в земной коре  $4 \cdot 10^{-4}\%$ , т. е. значительно выше, чем таких элементов, как Hg, Sb, Bi, Ag, Au, W.

Уран является членом семейства актиноидов, включающего подобно лантаноидам целый ряд элементов от тория до лауренсия. Оба семейства элементов обладают сходным строением электронных оболочек. Накапливание электронов у актиноидов происходит на пяти, а у лантаноидов на четырех оболочках (табл. 1). Эта аналогия позволила в последние годы выдвинуть новую гипотезу о принадлежности семейства актиноидов к третьей группе периодической системы элементов. Однако у атома урана валентные электроны расположены не только на энергетическом уровне «O», но также на уровнях «P» и «Q». Вследствие большого количества электронов происходит экранирование ядра атома и поэтому валентными

являются электроны всех трех внешних энергетических уровней. При максимально возможной валентности  $U^{6+}$  ион приобретает структуру благородного газа:  $U^0 (2-8-18-32-21-9-2)-6 = U^{6+} (2-8-18-32-18-8)$ . В природе уран встречается как в шестивалентном, так и в четырехвалентном состоянии:  $U^0 (2-8-18-32-21-9-2)-4 = U^{4+} (2-8-18-32-20-8)$ .

Таблица 1

Расположение электронов в атомах ведущих элементов семейств лантаноидов и актиноидов

Элемент	Порядковый номер элемента	Энергетические уровни																			
		K		L			M			N				O				P			Q
		s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s		
Лантаноиды (№ 57—71)																					
La	57	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	$\bar{1}$		$\bar{2}$					
Ce	58	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	$\bar{1}$		$\bar{2}$					
Pr	59	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6	$\bar{1}$		$\bar{2}$					
Nd	60	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6	$\bar{1}$		$\bar{2}$					
Актиноиды (№ 89—104)																					
Ac	89	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	$\bar{1}$	$\bar{2}$		
Th	90	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	$\bar{2}$	$\bar{2}$		
Pa	91	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	$\bar{2}$	2	6	$\bar{1}$	$\bar{2}$		
U	92	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	$\bar{3}$	2	6	$\bar{1}$	$\bar{2}$		
Np	93	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	$\bar{5}$	2	6		$\bar{2}$		
Pu	94	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	$\bar{6}$	2	6		$\bar{2}$		

Примечание. Черточками выделены валентные электроны.

Трехвалентное состояние урана не характерно для природных условий, такие соединения получены только лабораторным путем. Кроме этого, торий, протактиний и уран по основным химическим свойствам являются соответственно аналогами 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 этих свойств многие ученые относят уран к шестой группе периодической системы элементов и считают его первым элементом ряда ураноидов. Существуют и другие гипотезы о начале ряда группы элементов с 5f-электронной оболочкой. Таким образом, этот вопрос в настоящее время нельзя еще считать окончательно решенным.

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.



Торий имеет на два электрона меньше, чем уран, поэтому в природе существуют только четырехвалентные соединения тория:  $\text{Th}^0 = (2-8-18-32-19-9-2)-4 = \text{Th}^{4+}(2-8-18-32-18-8)$ . Остальные свойства тория во многом сходны со свойствами урана.

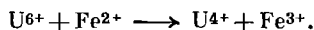
Положение урана в конце последнего периода определяет и величину ионного радиуса. От активности к урану с увеличением порядкового номера и с повышением валентности происходит уменьшение величины ионного радиуса (табл. 2).

Таблица 2

Величины ионных радиусов, по В. Т. Захарясену

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

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



Четырехвалентный уран относится к группе амфотерных окислов, а  $\text{U}^{6+}$  — к группе элементов, стремящихся к образованию комплексных ионов. Несмотря на то что  $\text{U}^{4+}$  относится к группе амфотерных элементов, его свойства как основания проявляются значительно сильнее, чем свойства ангидрида.  $\text{U}^{6+}$  в водных растворах легко образует комплексный катион уранила —  $(\text{UO}_2)^{2+}$ , который в свою очередь может давать еще более сложные соединения с карбонатными, сульфатными, фосфатными и другими анионами. Многие соединения уранила легко растворимы в слабокислых и слабощелочных растворах, что обуславливает широкую миграцию соединений шестивалентного урана.

Переменная валентность урана, способность к миграции и в кислой и в щелочной среде, склонность к комплексообразованию проявились в большом разнообразии его природных соединений и привели к широкому рассеянию в земной коре. Уран содержится повсюду: в горных породах, в водах, в растениях, в живых организмах (табл. 3).

Приведенные в таблице цифры показывают, что наиболее высокие концентрации урана в магматических горных породах характерны

## Содержание урана, тория и радия в Земле и в различных горных породах

Объект исследования	U, n · 10 <sup>-4</sup> %	Th, n · 10 <sup>-4</sup> %	Ra, n · 10 <sup>-10</sup> %
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. Ен- ноградову):			
кислые . . . . .	3,5	18	1,2
средние . . . . .	1,8	7	0,6
основные . . . . .	0,5	3	0,27
ультрасосновные . . . . .	0,003	0,005	0,01
Осадочные породы (по Х. Д. Холланду):			
гранитные . . . . .	3,96		
промежуточные . . . . .	2,61		
основные . . . . .	0,95		
сланцы . . . . .	3,1		
песчаники . . . . .	2,0		
известняк . . . . .	1,3		

для кислых пород, а минимальные — для ультрасосновных. Среди осадочных пород наиболее высокие содержания урана в глинистых породах. В некоторых районах содержание его в морских черных сланцах приближается к промышленному.

Содержание урана в водах обусловлено химическим составом самих вод и окружающих горных пород и в общем случае на два-три порядка ниже, чем в окружающих горных породах. Среднее содержание урана в морских бассейнах  $(0,4-2,3) \cdot 10^{-7}\%$ , причем концентрация его у берега  $n \cdot 10^{-6}\%$ , а в удалении  $n \cdot 10^{-7}\%$ . Содержание в реках различное. Так, например, в Неве оно равно  $n \cdot 10^{-9}\%$ , а в Дунае  $n \cdot 10^{-6}\%$ . В рудничных водах количество урана достигает  $n \cdot 10^{-3}\%$ .

Согласно В. И. Вернадскому, возможны три формы нахождения урана в горных породах.

1. В виде самостоятельных минералов. В природе известно более 100 урановых минералов. Из них около 90% приходится на вторичные урановые минералы с группой уранила  $[UO_2]^{2+}$ . Весьма ограничено число минералов, где уран присутствует в виде  $U^{4+}$ .

2. В виде изоморфных примесей. Уран входит в кристаллическую решетку минералов других элементов, таких как циркон, апатит, монацит, торинит, лопарит в количестве  $n \cdot 10^{-7}$  до  $n\%$ . Больше всего изоморфных примесей урана в аксессуарных минералах горных пород.

3. В рассеянном состоянии. В растворенном состоянии уран проникает во все виды горных пород. Установлено, что рассеянный уран присутствует в горных породах не в виде атомов, а в виде

уранил-группы  $(\text{UO}_2)^{2+}$  или в растворенном виде в составе жидких включений в минералах и в межзерновой жидкости. Уранил-группа  $(\text{UO}_2)^{2+}$  может находиться в адсорбированном состоянии на поверхности зерен минералов или в дефектах кристаллических структур минералов.

Уран в форме рассеяния, а также некоторые формы акцессорного урана, входящего в состав метамиктных минералов, легко переходят в раствор при обработке даже слабыми кислотами. Такой уран, рассеянный в горных породах, называется подвижным. Доля его по отношению к общему количеству урана в горных породах составляет от нескольких процентов до 93%. Степень подвижности урана определяется концентрацией растворов, окислительно-восстановительной обстановкой и формой нахождения в природе. Многочисленными опытами установлено, что из изверженных горных пород значительная часть урана (от 40 до 96%) извлекается разбавленной соляной кислотой, слабым раствором углекислого аммония, соды и другими реактивами.

Уран, не поддающийся растворению или переходящий в раствор в незначительном количестве, называют «инертным». Большая часть инертного урана сконцентрирована в виде изоморфных примесей или в виде самостоятельных труднорастворимых урановых минералов.

Изо м о р ф и з м о м называется свойство веществ, родственных по химическому составу, кристаллизоваться в близких формах, образуя кристаллы переменного состава. При изоморфном замещении происходит замещение одного элемента в кристаллической решетке другим без существенного ее изменения. Явление изоморфизма определяется следующими тремя условиями:

1) атомы или ионы, образующие изоморфные соединения, должны быть близки по размерам. Относительные отклонения в размере ионных радиусов не должны превышать 15%;

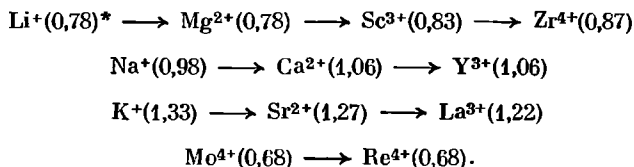
2) изоморфные соединения должны обладать общим типом химического строения. С этим связана их одинаковая поляризационная способность (т. е.  $\text{AX}$  или  $\text{AX}_2$ , например  $\text{PbS}$  и  $\text{PbSe}$ , или  $\text{UO}_2$  и  $\text{ThO}_2$ );

3) должна сохраняться электростатическая нейтральность нового образования.

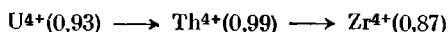
Возможны изовалентный и гетеровалентный изоморфизм. При изовалентном изоморфизме в решетке заменяются ионы одинаковой валентности, например  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  в оливине,  $\text{U}^{4+}$  и  $\text{Th}^{4+}$  в ториаците. При гетеровалентном изоморфизме в решетке происходит замена ионов разной валентности, например  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в плагиоклазах  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  и  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ .

Для определения возможных изоморфных соединений большое значение имеет отмеченная В. И. Вернадским закономерность в изменении величины ионных радиусов по диагональным направлениям в периодической таблице элементов. По близости размеров ионных радиусов гетеровалентных ионов выделяются ряды элементов, среди

которых возможны изоморфные замещения. Эту закономерность А. Е. Ферсман назвал законом диагональных рядов:

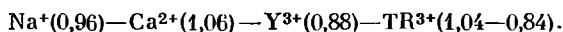


Изовалентный изоморфизм урана определяется близостью в раз-  
мере ионных радиусов следующих элементов:

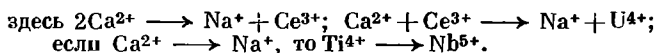
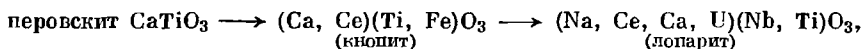
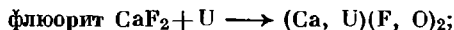
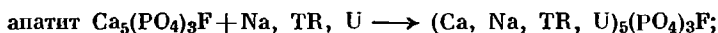
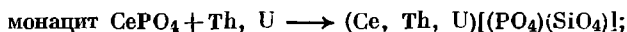


Наиболее широко проявлен изоморфизм урана и тория. В торите ( $\text{ThSiO}_4$ ) может присутствовать до 15% изоморфного урана (ураноторит). В торрианите ( $\text{ThO}_2$ ) содержание урана достигает 10% (ураноторрианит). В меньших количествах (до 1—2%) изоморфные примеси урана отмечаются в цирконах ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Цирконы с изоморфными примесями радиоактивных элементов называются циртолиты и малаконы. В высокотемпературных уранинитах из пегматитов тоже присутствуют изоморфные примеси Th и Zr.

Гетеровалентный изоморфизм урана отличается значительно большим разнообразием форм проявления. Возможны изоморфные соединения урана со следующими элементами:



Уран может присутствовать в виде изоморфной примеси в апатите, монаците, флюорите, перовските и других минералах:



Наиболее активно процесс изоморфизма урана происходит при высоких температурах в системах, богатых кремнеземом и калием, а также торием, редкоземельными элементами и цирконием. Поэтому уран образует изоморфные соединения главным образом в магматическом процессе, входя в состав аксессуарных минералов.

\* В скобках указаны размеры ионных радиусов в ангстремах (Å).

## § 2. Геохимические особенности поведения урана в эндогенных геологических процессах

Уран в магматическом процессе минералообразования. Концентрация урана в магматических горных породах зависит от их состава и от времени формирования интрузивных комплексов. Благоприятными условиями для накопления урана является высокое содержание в породах кремнезема и главным образом калия и низкое — щелочноземельных элементов. При близости химического состава в наиболее поздних магматических образованиях содержание урана выше, чем в ранних интрузивных комплексах.

В магматических горных породах преобладает рассеянная форма нахождения урана. В породообразующих минералах рассеивается от 40 до 80% от общего его количества. Несмотря на общее низкое содержание урана в кварце и полевых шпатах гранитоидных пород, в них находится до 60% всего урана.

В акцессорных минералах тоже сконцентрирована значительная часть урана магматических пород. В интрузивных и особенно кислых породах с акцессорными минералами может быть связано от 20 до 60% урана. В эффузивных породах акцессорного урана значительно меньше.

Собственные минералы урана, образованные при магматических процессах, крайне редки. Имеются сведения о нахождении в гранитоидах тонкорассеянных уранинита, браннерита, торинита и ураноторита, однако их обнаружение сложно вследствие мелких размеров выделений. Из-за рассеяния урана в магматическом процессе промышленных месторождений урана магматического происхождения пока не обнаружено, хотя считается, что магматические горные породы могут служить источниками накопления урана при различных постмагматических процессах. Гранитоиды представляют собой с этих позиций громадный потенциальный источник урана, так как даже при кларковых содержаниях  $1 \text{ км}^3$  гранитов содержит от 9 до 100 тыс. *t* урана.

Изучение ураноносности магматических горных пород имеет большой практический интерес при выделении благоприятных интрузивных комплексов, с которыми парагенетически могут быть связаны гидротермальные месторождения урана. Наиболее благоприятными, потенциально рудоносными следует считать поздние дифференциаты магматического процесса, обладающие повышенным содержанием урана, причем большая часть его должна находиться в рассеянной форме, в виде легкорастворимого (подвижного) урана. Повышенное содержание в магматическом расплаве таких элементов, как Th, Zr, TR и др., создает условия для рассеяния урана в массиве в виде изоморфных примесей и снижает возможности для образования промышленных концентраций урана.

Уран в пегматитовом процессе минералообразования. В настоящее время наиболее распространены две точки зрения на природу редкометалльных пегматитов — А. Е. Ферсмана и А. Н. Заварицкого.

Точка зрения А. Е. Ферсмана основана на предположении о кристаллизации пегматитов из остаточной магмы, обогащенной летучими компонентами и редкими металлами. В зависимости от сходства или различия пегматитового расплава и вмещающих пород им выделяются пегматиты «чистой линии» или «пегматиты скрещения». Кроме того, по связи с материнскими интрузиями выделяются пегматиты, генетически связанные с определенными интрузиями, и пегматиты, образование которых связано с процессами гранитизации и мигматизации, т. е. «пегматиты мигматитов». Для них не установлено подводящих каналов, соединяющих пегматитовые жилы с каким-либо интрузивом, поэтому они не наследуют состава определенных интрузивных пород.

С точки зрения А. Н. Заварицкого редкометалльные пегматиты формируются в связи с интенсивным проявлением метасоматических процессов. Образование пегматитов происходит в результате взаимодействия высокотемпературных постмагматических растворов с ранее выкристаллизовавшимися вмещающими породами. Эти процессы метасоматоза проявляются в альбитизации, окварцевании, грейзенизации, а из высокотемпературных рудоносных растворов образуется разнообразный комплекс минералов: уранинит, урановая смолка, тухолит, сульфиды меди, свинца, железа, молибдена, давидит, вольфрамит, касситерит, золото и др.

Все выделенные типы пегматитов являются ураноносными, однако, как и собственно магматические месторождения, пегматитовые месторождения не представляют большой практической ценности как источник урана. Из большинства пегматитов уран извлекается как попутный компонент при добыче слюды, тантало-ниобатов, сподумена и лишь некоторые разновидности пегматитов могут разрабатываться как небольшие месторождения урана. К ним относятся:

а) уранинитовые пегматиты мигматитовых комплексов (пегматиты мигматитов) (месторождения Банкрофт, Шорлебуа, Северный Саскачеван);

б) давидитовые скаполит-карбонатные пегматиты линии скрещения (пегматиты о. Мозамбик);

в) уранинитовые, настурановые и давидитовые пегматиты, обогащенные темноцветными минералами (месторождение Радиум-Хилл в Южной Австралии).

Благоприятными вмещающими породами для ураноносных пегматитов являются изверженные породы различного состава, сланцы и гнейсы, обогащенные темноцветными минералами, и карбонатные толщи. Как и в горных породах, в пегматитах известны все три формы нахождения урана в природе, однако количественные соотношения урана в них несколько изменяются. Значительно возрастает значение собственно урановых минералов и увеличивается количество урана, находящегося в виде изоморфных примесей, главным образом за счет уменьшения его рассеяния в неурановых минералах.

Большинство урановых и урансодержащих минералов представлено простыми и сложными окислами урана, тория, титана, редких

земель, ниобия, тантала (уранинит, торинанит, урановая смолка, титанаты TR и Th, титанотантало-ниобаты, давидит) и силикатами титана, редких земель, тория и циркония.

В аксессуарных минералах уран ассоциирует с элементами, близкими к нему по кристаллохимическим свойствам (Th, Zr, Hf, Y, TR, Ca). В пегматитовом процессе парагенетические ассоциации элементов урана и тория несколько отличаются: уран образует изоморфные соединения с иттрием, а торий — с церием.

За счет повышения содержания урана в собственно урановых и урансодержащих минералах среднее содержание урана в ураноносных пегматитах повышается до сотых долей процента. В наиболее богатых ураном пегматитах, представляющих промышленный интерес, содержание окиси урана достигает 0,1%. Содержание рассеянного урана в кварц-полевошпатовой массе пегматитов примерно в 2—2,5 раза ниже, чем во вмещающих гранитах.

По данным Л. В. Комлева и А. Н. Лабунцова, изучавших микроклин-плагноклазовые пегматиты, практически весь уран концентрируется в собственно урановых и урансодержащих минералах: уранините, монаците, ксенотиме, цирконе и ортите. В породообразующих минералах, составляющих 99,74% общей массы пегматитов, сохраняется всего лишь 1,15% от общего количества урана.

Изучение ураноносных пегматитов показало, что обогащение пегматитов ураном связано с образованием гидротермально-пневматолитовых жил и с развитием процессов метасоматоза. Формы нахождения и условия переноса урана в расплаве при образовании пегматитов в настоящее время окончательно не установлены. По данным Н. П. Ермолаева и Л. С. Тарасова возможен перенос урана в виде бинарных соединений с кислородом или уранатов. В расплавах, обедненных водой, вероятно, возможен перенос урана в соединениях с летучими компонентами (фтором и хлором).

**Уран в гидротермальном процессе минералообразования.** Гидротермальным процессом называют процесс переноса химических элементов нагретыми водными растворами по системам трещин либо вдоль зон повышенной проницаемости в различных горных породах. В результате этого процесса может происходить концентрация (при благоприятной геологической обстановке — образование гидротермальных месторождений полезных ископаемых) либо рассеяние переносимых химических элементов. На природу гидротермальных растворов существуют две точки зрения. Согласно одной из них источником гидротермальных растворов являются пары воды и газы, выделяющиеся при застывании магмы, согласно другой — растворы образуются в результате погружения и нагревания обычных подземных вод, входящих в состав земной коры.

Гидротермальные растворы представляют собой сложные динамические системы, в составе которых преобладают анионы карбонатов, сульфатов, хлоридов и катионы щелочных и щелочноземельных элементов. В процессе перемещения гидротермальных растворов

по трещинам состав их постоянно изменяется в результате взаимодействия с вмещающими породами.

Все гидротермальные растворы содержат определенное количество урана и поэтому он обнаруживается в большинстве неурановых минералов ( $n \cdot 10^{-3} - n \cdot 10^{-5}\%$ ). На отдельных участках, где создаются условия, благоприятные для выпадения урана, из растворов могут образовываться крупные скопления урана с содержанием до нескольких процентов. В процессе отложения из гидротермальных растворов отмеченные выше формы нахождения урана в природе сохраняются, изменяются лишь количественные соотношения сконцентрированного в них урана. В отличие от магматического и в меньшей степени от пегматитового процесса большая часть урана в гидротермальных месторождениях представлена в виде собственно урановых минералов, среди которых резко преобладают окислы (уранинит, урановая смолка, урановые черни), реже встречаются ураноорганические соединения (тухолит, урансодержащий антраксолит), силикаты (коффинит) и титанаты (браннерит, давидит). Часть урана находится в форме рассеяния среди неурановых минералов и лишь незначительная часть присутствует в виде изоморфных примесей. Резкое уменьшение количества урана, присутствующего в виде изоморфных примесей, существенно отличает гидротермальный процесс минералообразования от магматического и пегматитового. В гидротермальных растворах создаются условия, неблагоприятные для миграции кристаллохимически близких к урану элементов, таких как Th, Zr, TR, Ti, Nb, Ta, и происходит их пространственное отделение от урана.

Гидротермальные урановые месторождения формируются в разнообразных геологических условиях. Они различаются по составу сопутствующих элементов и по составу вмещающих пород.

По особенностям минерального состава руд выделяются шесть урановых формаций: уран-железистая, уран-титановая, настуран-сульфидная, настуран-карбонатная, настуран-флюоритовая, настуран-арсенидная. Исследование минерального состава руд выделенных формаций позволило выявить характерные парагенетические ассоциации урановых минералов с карбонатом, кварцем, флюоритом, молибденитом, селенидами, самородным мышьяком, диарсенидами никеля, кобальта, окислами ванадия и другими минералами.

Урановые месторождения известны в породах самого разнообразного состава. Однако наиболее благоприятными для локализации оруденения являются амфиболиты, хлоритовые сланцы, диабазы, пиритизированные сланцы, т. е. породы, обладающие повышенной восстановительной емкостью за счет двухвалентного железа.

Изучение минерального состава урановых руд, состава вмещающих пород и их изменений около рудных тел позволяет определить условия, в которых происходило отложение урана из гидротермальных растворов.

Температура образования урановых руд определяется по некоторым сопутствующим минералам-индикаторам темпера-



туры. В ассоциации с урановыми минералами отмечены самородный висмут (температура плавления  $271^\circ$ ), гетит (устойчив при температурах  $110\text{--}170^\circ$ ), барит (температура образования  $130\text{--}160^\circ$ ). По данным декрепитации урановой смолки и парагенных с ней минералов установлены температуры ее образования  $200\text{--}250^\circ$ . Это позволяет определить верхнюю температурную границу отложения урановой смолки около  $220^\circ$ ; относительно нижней границы каких-либо ограничений температуры нет.

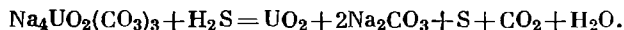
Г л у б и н а ф о р м и р о в а н и я уранового оруденения колеблется от 500 до 2000 м. На этих глубинах возможны давления от 80 до 350 атм.

К и с л о т н о с т ь ураноносных растворов могла изменяться: от слабощелочной среды до слабокислой. Это подтверждается постоянным присутствием в большей части урановых жил карбонатов, пирита и марказита, а в гидротермально измененных вмещающих породах — калиевых и натриевых полевых шпатов.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в последние годы, дают представление об условиях переноса урана в гидротермальных растворах. Высокая растворимость в воде  $U^{6+}$  и его способность образовывать устойчивые в растворах комплексные соединения выдвигают на первое место гипотезу о переносе урана в виде уранил-карбонатных или уранил-силикатных комплексов.

Уранил-карбонатные комплексы щелочных металлов типа  $[UO_2(CO_3)_2(H_2O)_2]^{2-}$  и  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$  и уранил-силикатный комплекс типа  $[(UO_2OH)(HSiO_3)]^{2-}$  устойчивы в растворах при температурах до  $150\text{--}200^\circ$ . По мнению А. Г. Бетехтина, в некоторых случаях возможен перенос  $U^{4+}$  в форме галлоидных соединений типа  $UCl_4$ ,  $UF_4$ .

О т л о ж е н и е урана из рудоносных растворов связано с разрушением урансодержащих комплексных ионов. Экспериментальные работы по осаждению урана из растворов позволили выявить факторы, влияющие на разрушение комплексных ионов и переход урана в твердую фазу. Главной причиной для осаждения урана является восстановление  $U^{6+}$  до  $U^{4+}$  в кислой, нейтральной и слабощелочной средах. Эффективными восстановителями и осадителями урана являются двухвалентное железо, сульфидная сера, органические соединения и некоторые самородные элементы. Так, по данным Р. П. Рафальского, при взаимодействии ураноносных комплексов с сульфидной серой происходит следующая реакция:



Разрушение ураноносного комплекса может быть обусловлено нарушением равновесия при взаимодействии рудоносных растворов с вмещающими породами, когда анионная составляющая переходит в твердую или газовую фазу. Так, например, выпадение карбонатов приводит к уменьшению концентрации углекислоты в рудоносном растворе, что способствует разложению комплекса и выделению

урановых минералов. То же происходит при отделении от рудоносных растворов газовых компонентов по проникновению их в верхние горизонты земной коры, когда парциальное давление какого-либо из растворенных газов превышает общее внешнее давление. В некоторых случаях разрушение рудоносных комплексов может быть обусловлено изменением кислотности раствора, его температуры или величины окислительно-восстановительного потенциала.

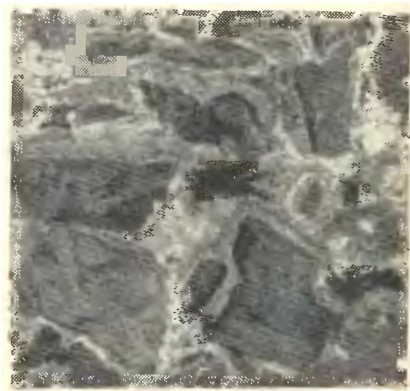


Рис. 1. Фотографии настуран-карбонатных жил, указывающие на многоактность их формирования:

*a* — пересечение донастуранового доломита (ДК) послерудным кальцитом (К); *б* — цементация обломков ранних минералов более поздними; *в* — симметрично-полосчатое строение карбонатной жилы

По поводу причин, обусловивших движение рудоносных растворов, существуют различные точки зрения. По мнению А. Г. Бетехтина, их движение вдоль трещин и ослабленных зон повышенной трещиноватости обусловлено разностью давлений, возникающей при образовании трещин. Движение растворов возникает в тех случаях, когда внешнее давление, под которым находятся растворы, становится меньше внутреннего давления.

Исследование гидротермальных урановых месторождений показало, что процесс их формирования обычно происходит многоактно в связи с неоднократным возобновлением тектонических подвижек. Этим объясняется разнообразие минерального состава и разновозрастность жильных образований. На разрыв во времени образования минеральных комплексов указывают следующие геологические признаки (рис. 1): 1) пересечение ранних жил или прожилков более поздними; 2) цементация обломков ранних минеральных комплексов более поздними в зонах брекчирования; 3) последовательность образования минералов в жилах с полосчатым строением в направлении от зальбандов к центру.

Для обозначения длительности периодов минералообразования обычно используются такие понятия, как «этапы минерализации», «стадии минерализации», «генерации минералов». В настоящее время наиболее распространенными в геологической литературе являются определения этих понятий, предложенные А. Г. Бетехтиным.

Под этапом минерализации подразумеваются периоды минералообразования, хотя и связанные с одним и тем же магматическим источником, но отделенные друг от друга весьма значительными промежутками времени. Таковы, например, магматический, пневматолитовый и гидротермальный этапы эндогенных процессов минералообразования.

Стадия минерализации — это процессы минерализации, разделенные во времени относительно короткими интервалами, но протекающие в течение одного какого-либо этапа минерализации. Стадии минерализации выделяются по результатам полевых наблюдений и изучения рудных штUFFов. Разновозрастность минеральных образований фиксируется по пересечениям жил, по брекчиевым текстурам или по выделению отдельных минералов в жилах с симметрично-полосчатым строением.

Генерациями какого-либо минерала принято называть разновозрастные выделения одного и того же минерала из данного раствора или расплава. В пределах единой стадии минерализации могут выделяться несколько генераций одного и того же минерала.

Особый интерес представляет изучение ассоциаций совместно образовавшихся минералов, которые принято называть парагенетическими ассоциациями. Учение о парагенетических ассоциациях является основой современной минералогии.



Рис. 2. Одновременная кристаллизация востурана (белое) и кварца (черное) в кальцитнастурановых жилах Рудных гор (штриховка — карбонатно-халькопиритовый прожилков, белый пунктир — поверхность роста кварца (по В. Л. Барсукову)

Выделение парагенезисов позволяет правильно понять процесс формирования руд и горных пород, определить поисковые признаки, характерные для каждой парагенетической ассоциации, и правильно наметить направление поисковых работ. А. Г. Бетехтин под парагенетической ассоциацией понимал группу минералов, совместно образовавшихся на той или иной стадии развития процесса минералообразования. Вопрос о парагенетических ассоциациях до сих пор привлекает внимание ученых всех стран, работающих в области изучения рудных месторождений. В 1966 г. он специально обсуждался во Фрейберге (ГДР) на Международном коллоквиуме, где было принято следующее определение: парагенезис минералов — это минеральная ассоциация, возникшая закономерно в ходе одного процесса, ограниченного в пространстве и времени и протекавшего в определенных физико-химических условиях.

Постоянство физико-химических условий определяется по равновесному сочетанию минералов, что подтверждается наличием структур, лишенных признаков коррозии или замещения одного минерала парагенетической ассоциации другим. На одновременность образования минералов указывают структуры одновременного роста, взаимные прорастания и т. п. (рис. 2).

### § 3. Минералы урана

Как литофильный элемент уран образует только кислородные соединения в ассоциации с различными элементами. Отсутствие галлоидных соединений, соединений с серой (сульфидов), селеном (селенидов), азотом (нитратов), вольфрамом (вольфраматов), теллуrom (теллуридов) является характерной особенностью минералогии урана.

Количество урановых и урансодержащих минералов в настоящее время достигает 200, а состав их весьма разнообразен. Это объясняется переменной валентностью урана и сравнительно высокой химической активностью. Переменная валентность урана определяет не только минеральный состав, но и условия образования урановых минералов. Образование минералов, содержащих  $U^{4+}$ , связано главным образом с магматическим и пегматитовым процессами, в гидротермальных минералах присутствуют и  $U^{4+}$  и  $U^{6+}$ , а в гипергенных исключительно  $U^{6+}$ . Поэтому обычная классификация минералов по типам природных соединений: самородные элементы, окислы, силикаты, карбонаты и т. д. — не отражает генезиса урановых минералов. В. Г. Мелков в 1957 г. предложил более рациональную классификацию урановых минералов по валентности урана, входящего в состав минералов, разделив их на три класса.

I класс объединяет сложные окислы урана, титана, тория, железа, силикаты урана, тория, циркония, фосфаты и силикаты редких земель. Уран в них присутствует преимущественно в четырехвалентной форме. Минералы этой группы обладают сложным составом, в них широко проявлен изоморфизм, поэтому и содержание урана изменяется от десятков процентов до сотых долей процента

(браннерит, давидит, торинит, ураноторит, уфертит, эвксенит, эпинит, самарскит, бетафит, ортит, ксенотим, монацит). Эти минералы характерны для некоторых типов изверженных горных пород, распространены в пегматитах и встречаются в высокотемпературных гидротермальных месторождениях. Они устойчивы в зоне окисления, обладают высоким удельным весом и могут накапливаться в россыпях. Промышленное значение как источник урановой руды представляет лишь браннерит; уран остальных минералов может использоваться лишь как попутный компонент при добыче редких земель, титана, ниобия и других элементов.

II класс объединяет в основном собственно урановые минералы, содержащие уран в четырехвалентной и шестивалентной форме. По составу это преимущественно окислы — уранинит и настуран, реже встречаются силикаты урана (коффинит) и еще реже молибдаты (умохоит). Минералы урана этого класса немногочисленны, но являются основным источником урана. Они образуются в самых разнообразных условиях: при гидротермальных, метаморфогенных и экзогенных процессах рудообразования. К этому же классу относят ураноорганические соединения типа тухолита, карбурана. Минералы этого класса неустойчивы в зоне окисления и сравнительно легко поддаются химическому выветриванию.

III класс объединяет большую группу разнообразных по химическому составу минералов, в состав которых входит группа уранила  $[UO_2]^{2+}$ . По химическому составу это гидроокислы урана и соли кислородных кислот (силикаты, фосфаты, арсенаты, ванадаты, сульфаты, карбонаты, молибдаты). К ним относится около 100 собственно урановых минералов. Все они образуются в зоне гипергенеза в результате изменений минералов  $U^{4+}$  или путем осаждения из растворов шестивалентного урана различными анионами —  $(SO_4)^{2-}$ ,  $(PO_4)^{3-}$ ,  $(VO_4)^{3-}$ ,  $(AsO_4)^{3-}$ ,  $(CO_3)^{2-}$ . Для минералов этого класса процессы изоморфизма не характерны. При благоприятных геологических условиях — в зоне цементации гидротермальных урановых месторождений, на границе окислительно-восстановительного барьера в инфильтрационных месторождениях — образуются крупные скопления минералов  $U^{6+}$ , представляющие промышленный интерес.

Ниже приводится краткое описание минералов, имеющих в настоящее время существенное промышленное значение.

Окислы урана представлены тремя минеральными видами: уранинитом, урановой смолкой, или настураном, и урановыми чернилами. Эти минералы образуются в разных геологических условиях и отличаются морфологией выделений, по соотношению  $U^{4+} : U^{6+}$  и по характеру примесей.

Уранинит  $UO_2$  образуется в месторождениях в основном пегматитового и реже скарново-метасоматического, гидротермального и метаморфогенного происхождения. Среди остальных окислов урана уранинит отличается наибольшим количеством примесей: в нем могут присутствовать свинец, торий и редкоземельные элементы. Разности, обогащенные редкоземельными элементами (до

15%), выделяют как клеветит. С торием уран образует непрерывный изоморфный ряд уранинит — ураноторианит — торинит:  $UO_2-(U, Th)O_2-ThO_2$ . В ураноторианите соотношение  $UO_2:ThO_2 \approx 1$ . В зависимости от количества примесей и от степени окисления содержание  $UO_2$  и  $UO_3$  колеблется в широких пределах, соответственно от 6 до 74% и от 16 до 60%. Наибольшее количество примесей тория и редких земель характерно для уранинита из пегматитов; в уранинитах из гидротермальных и метасоматических месторождений эти примеси полностью пропадают или сохраняются в ничтожных количествах.

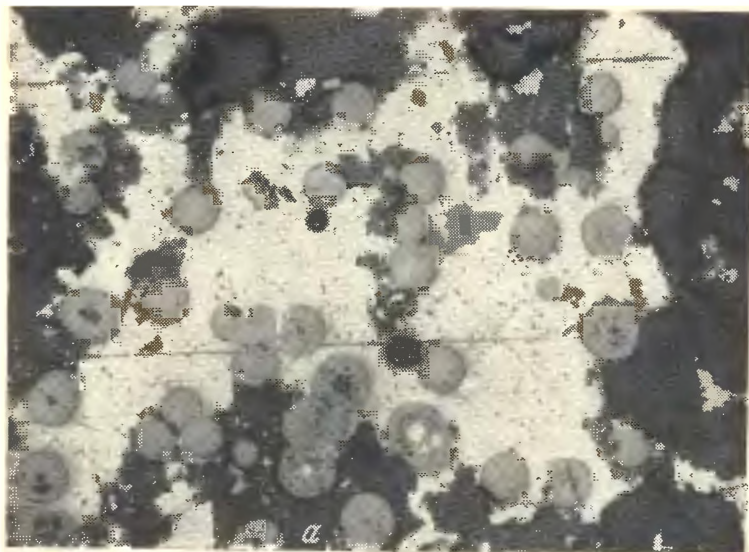
Цвет минерала черный, блеск смолистый, излом раковистый. Твердость 4—7, удельный вес 6,5—10. Сингония кубическая с параметрами решетки  $a_0 = 5,425-5,555 \text{ \AA}$ . Характерная особенность минералов — хорошо выраженная форма кристаллов, часто кубического габитуса. Макроскопически это единственный признак, позволяющий отличить уранинит от урановой смолки.

**Настуран (урановая смолка)**  $kUO_2mUO_3nPbO$  является важнейшим промышленным минералом урана, из которого до настоящего времени добывается большая часть урана. Настуран образуется при гидротермальных, метасоматических, осадочных и метаморфических процессах минералообразования. Содержание  $UO_2$  изменяется от 26 до 60%,  $UO_3$  — от 22 до 55% при среднем содержании урана в минерале 68—90%. Соотношение  $UO_2:UO_3$  может изменяться от 2,17 до 2,50. В отличие от уранинита в нем практически отсутствуют изоморфные примеси тория и редкоземельных элементов. По физическим свойствам похож на уранинит: цвет черный, блеск смолистый. Твердость 4—6, удельный вес 6,5—9. Сингония кубическая с параметрами решетки  $a_0 = 5,368-5,494$ .

Главной морфологической особенностью настурана является характерная почковидная, натечная, сфероидальная форма выделений (рис. 3). Это дает основания некоторым исследователям связывать образование настурана с выпадением его из коллоидов. Кроме характерных для раскристаллизованных коллоидов метакolloидных и колломорфных структур, это подтверждалось широким развитием в выделениях настурана трещин усыхания или синерезиса.

Д. П. Григорьевым на основании детального изучения почковидных форм выделений малахита, гетита, сфалерита, гематита и других минералов было высказано предположение о возможности кристаллизации почковидных выделений из истинных растворов. В работах Ю. М. Дымкова и других исследователей приведены фотографии и зарисовки, подтверждающие одновременный рост почковидных выделений настурана и кристаллов адуляра, кварца, карбоната (см. рис. 2), а также метасоматическое замещение настураном карбоната, плагиоклазов, сульфидов и других минералов. Эти факты подтверждают возможность образования настурана путем кристаллизации из истинных растворов.

**Урановые черни**  $kUO_2mUO_3nPbO$  представляют собой рыхлые порошковатые скопления черного цвета, в составе которых



**Рис. 3. Формы выделений настурана и коффинита:**

**а** — почковидные выделения настурана в берцелианите (светлое). Аншлиф, увел. 70; **б** — псевдоморфозы настурана по коффиниту. Аншлиф, увел. 115.  
Микрофото Б. В. Бродина



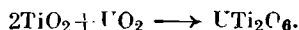
резко преобладает  $U^{6+}$  ( $m \gg k$ ). Урановые черни могут образоваться в результате окисления других первичных урановых минералов (остаточные черни) или выделяться из растворов вследствие повышения восстановительного потенциала среды и восстановления  $U^{6+}$  до  $U^{4+}$  (регенерированные черни). Остаточные урановые черни преобладают в зоне окисления, образуя иногда псевдоморфозы по первичным урановым минералам; регенерированные черни формируются в зоне цементации в виде небольших корочек и порошковатых налетов на неурановых минералах.

Урановые черни обладают матовым блеском. Твердость их 2—4, удельный вес переменный, но не выше 6,5. Черни широко распространены в зоне окисления и цементации различных генетических типов урановых месторождений. Для некоторых крупных экзогенных месторождений урановые черни являются основным промышленным минералом.

Титанаты, силикаты и другие соединения урана объединяют разнообразные по составу минералы, среди которых наибольшее промышленное значение имеют браннерит, давидит, коффинит, уранофан и минералы группы урановых слюдок.

**Б р а н н е р и т**  $UTi_2O_6$  — минерал, в котором уран может изоморфно замещаться Th и реже Ca, TR, Pb, а Ti — частично  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Mg, Mn, Sn. Содержание урана 40—52% ( $UO_2$  8—41%;  $UO_3$  9—43%). Минерал получил название по имени геолога Дж. К. Браннера. Впервые был установлен в пегматитах, позднее в древних конгломератах, в гидротермальных и осадочных месторождениях. В последние годы приобрел значение важного промышленного минерала для получения урана.

Браннерит из ураноносных конгломератов месторождения Блайнд-Ривер (Канада) подробно описан П. Рамдором, который объясняет образование браннерита как результат реакции между уранинитом и рутилом при метаморфизме древних россыпей:



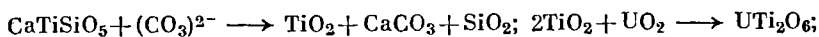
Эта реакция по имени рудника Пронто, в рудах которого она впервые установлена, названа «пронтореакцией».

М. Ф. Стрелкин считал необходимым условием образования браннерита — наличие щелочной среды. Ti и U — элементы амфотерные, но основные свойства у титана проявлены сильнее, чем у урана, и поэтому в щелочной среде у титана проявляются свойства ангидрида, а у урана — основания.

При образовании уранотитанатов двуокись титана обычно заимствуется из вмещающих пород, за счет разрушения таких титансодержащих минералов, как сфен ( $CaTiSiO_5$ ) и ильменит ( $FeTiO_3$ ), а уран привносится гидротермальными растворами. Разрушение титансодержащих минералов происходит при воздействии на них углекислоты и анионов серы, а дальнейшее взаимодействие освобо-



ждающейся двуокиси титана с ураном приводит к образованию уранотитанатов:



Поэтому для браннерита характерно образование псевдоморфоз по титановым минералам: ильмениту, сфену, рутилу. Значительно реже проявлены прожилковые выделения браннерита. По-видимому, для их формирования требуется высокая щелочность среды, в которой возможен перенос титана в виде комплексных анионов.

Цвет браннерита черный, буровато-желтый до буровато-зеленого. Черта темно- или зеленовато-бурая. Блеск алмазный, полуметаллический до стеклянного у неизменных разностей. Сильно радиоактивен. Вокруг выделений браннерита кварц и полевой шпат приобретают буроватую окраску. Твердость 5—5,5, удельный вес 4,5—5,4. Вследствие небольших размеров выделений макроскопически определить его довольно трудно. Для достоверного определения необходимы рентгеноструктурные анализы и изучение оптических свойств. Браннерит — метамиктный минерал, поэтому для рентгеноструктурного анализа требует предварительного прокалывания при температуре 800—1000°.

Д а в и д и т  $(\text{Fe}^{2+}, \text{La}, \text{Ce}, \text{U})(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_5\text{O}_{12}$  распространен значительно меньше, чем браннерит, и промышленное значение его как источника урана невелико. Содержание урана в нем может достигать 20%, в среднем составляет 9,8%. Образуется в пегматитах, скарпах, высокотемпературных гидротермальных жилах в виде сплошных массивных выделений размером до нескольких десятков сантиметров. Спайность не выражена. Излом раковистый. Очень хрупок. Цвет черный, серо-черный, черта серовато-черная, темно-серая. Твердость 6—7, удельный вес 4,4—4,6. По внешним свойствам очень похож на ильменит, но отличается сильной радиоактивностью. Давидит является главным минералом урановых руд на некоторых высокотемпературных гидротермальных месторождениях Австралии.

К о ф ф и н и т  $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ , так же как и браннерит, в последние годы приобрел значение промышленно важного уранового минерала. Содержание  $\text{UO}_2$  в нем составляет 68%. Первоначально обнаружен в залежах ураноносных битумов в песчано-глинистых и карбонатных породах. Позднее он установлен в рудах многих гидротермальных урановых месторождений в ассоциации с урановой смолкой, сульфидами, кварцем, гематитом и другими минералами. Обычно коффинит находится в тесной пространственной близости с урановой смолкой и выделить чистый коффинит довольно трудно.

Коффинит относится к минералам тетрагональной сингонии, поэтому кристаллические выделения его имеют таблитчатую или

ромбическую форму (см. рис. 3, б). Цвет черный. Блеск алмазовидный, стеклянный, просвечивает лишь в тонких сколах. Твердость 5—6, удельный вес 5,1. Макроскопически выделить коффеинит очень трудно. Для его надежного определения, кроме изучения оптических свойств, требуются рентгенографические анализы и инфракрасная спектроскопия.

Уранофан  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  является типичным минералом зоны окисления. Содержание  $\text{UO}_3$  в нем 65—67%. Образует порошокватые налеты, корочки по стенкам трещин и псевдоморфозы по другим урановым минералам. Характерной особенностью уранофана как минерала ромбической сингонии является игольчатый или призматический облик кристаллов, размер которых до нескольких миллиметров в длину. Цвет его соломенно-желтый, блеск стеклянный. Твердость 2—3, удельный вес 3,7—3,9. Уранофан отличается от других урановых минералов зоны окисления характерной призматической формой кристаллов, слабой желтовато-зеленой люминесценцией в ультрафиолетовых лучах и легкой растворимостью в слабых кислотах с выделением при этом студня кремнезема. Довольно часто силикаты урана в ассоциации с гидроокислами образуют промышленные скопления.

Фосфаты, арсенаты и ванадаты урана составляют большую группу урановых слюдок, химический состав которых определяется формулой  $R(\text{UO}_2)_2(\text{MO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Это соли ортофосфорной ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), ортомышьяковой ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) и ортованадиевой ( $\text{H}_3\text{VO}_4$ ) кислот, где радикал  $M$  может быть представлен P, As или V. В катионной части (радикал  $R$ ) могут быть различные одновалентные, двухвалентные и трехвалентные основания Na, K, Cu, Mg, Ca, Ba, Pb, Mn, Fe, Al, Bi. Минералы группы урановых слюдок отличаются разнообразием состава, однако у них есть много общего, что позволяет объединить их в одну группу. Для них характерна весьма совершенная спайность по базису (001), пластинчатый облик кристаллов и принадлежность к тетрагональной или ромбической сингонии. Среднее содержание  $\text{UO}_3$  в них около 60%. Урановые слюдки образуют порошокватые агрегаты, налеты, пленки, корочки на стенках трещин, выполняют пустоты. Цвет желтый или желтовато-зеленый с различными оттенками, блеск перламутровый или стеклянный. Многие урановые слюдки обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах. Твердость их 3—4, удельный вес колеблется от 2,50 до 5,65.

Все урановые слюдки являются типичными минералами зоны окисления урановых месторождений и расцениваются как важный поисковый признак на уран. Некоторые из них широко развиты и могут разрабатываться как хорошие урановые руды. Наибольшее поисковое значение и промышленный интерес имеют отенит, цейнерит, карнотит.

Отенит  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  образует характерные чешуйчатые налеты, скопления неправильной формы и тонкоаблитчатые кристаллы. Сингония тетрагональная. Цвет желтый с сероватым или

зеленоватым оттенком. Отличается яркой желтовато-зеленой люминесценцией. В зоне окисления отенит может давать крупные скопления и обрабатываться вместе с окисленными первичными рудами.

Цейнерит  $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  обычно представлен хорошо выраженными таблитчатыми и пластинчатыми кристаллами. Отличается от отенита зеленым цветом и отсутствием люминесценции в связи с наличием катиона меди, который гасит люминесценцию. В остальном подобен отениту.



Рис. 4. Развитие антраколита (темно-серое) по настурану (светло-серое). Аншлиф, увел. 70. Микрофото Ю. М. Дымкова

Карнотит  $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  встречается в виде порошковатых, землистых выделений неправильной формы. Сингония моноклиная. Цвет желтый различных оттенков, блеск перламутровый. Твердость 2–2,5, удельный вес 4,7. В ультрафиолетовых лучах обнаруживается слабая люминесценция буровато-зеленого цвета. Минерал имеет поисковое значение, так как образуется в зоне окисления различных типов месторождений. В залежах и линзах ураноносных песчаников в континентальных отложениях карнотит является одним из основных промышленных минералов на уран.

Урансодержащие углеводородные комплексы представляют собой смеси углеводородов и тонкорассеянных окислов урана типа урановой смолки и уранинита. Образуются они в самых разнообразных геологических условиях: в месторождениях ураноносных битумов, в метаморфизованных конгломератах, в гидротермальных урановых месторождениях.

В зависимости от содержания урана и степени метаморфизма углеводородов среди урансодержащих углеводородов выделяют тухолит, карбуран, согренит, антраксолит и др. Эти минералы образуют скопления неправильной формы, прожилковидные выделения или псевдоморфозы по урановой смолке и ураниниту. Все они имеют черный цвет. Твердость от 3 до 5,5, удельный вес от 1,6 до 2,2. Для тухолита кроме урана характерно присутствие тория, свинца, редких земель и кремнезема. Зольность его до 30%, а содержание в золе  $U_3O_8$  достигает 58%,  $ThO_2$  до 48%. Согренит был отмечен в карбонатных жилах в ассоциации с сидеритом, анкеритом и пиритом. Тория в согрените не обнаружено. Зольность его 60%. Антраксолит отмечен на многих жильных месторождениях карбонатно-смолковой формации, где он развивается после урановой смолки, замещая ее (рис. 4).

Тухолит, карбуран и антраксолит представляют промышленный интерес при добыче урана.

#### § 4. Геохимия урана в зоне окисления

Интенсивность развития процессов окисления урановых минералов в приповерхностных зонах окисления определяется целым рядом геологических факторов, таких как преобладающая форма нахождения урана в горных породах, химическая устойчивость руд, их структурные и текстурные особенности, условия залегания и состав вмещающих пород, химизм вод, климат и скорость эрозии. Как уже отмечалось, рассеянный уран наиболее легко извлекается из горных пород и минералов при обработке их кислыми или щелочно-карбонатными растворами. Состав собственно урановых минералов определяет интенсивность их растворения: быстрее всего переходят в раствор урановые черни, хорошо растворяется урановая смолка и значительно труднее браннерит, давидит и коффеинит. Уран, находящийся в виде изоморфных примесей в таких минералах, как циркон, апатит, ортит и др., практически не подвергается процессам окисления. Поэтому в зоне окисления основным источником урана, переходящего в растворы из горных пород, является уран, находящийся в форме рассеяния, и часть урана заимствуется из собственно урановых минералов, особенно если они находятся в виде легко-растворимых соединений.

Развитие геохимических процессов в зоне окисления определяется химическим составом подземных вод, который зависит от химических, физико-химических и биохимических условий их формирования. Наиболее важными компонентами природных вод являются ионы  $Cl^-$ ,  $(SO_4)^{2-}$ ,  $(HCO_3)^-$ ,  $(CO_3)^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  и особенно  $H^+$  и  $OH^-$ , концентрация которых определяет pH среды, а также растворенные в водах газы:  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ , Rn. Химический состав подземных вод во многом зависит от минерального состава руд и вмещающих пород, а также от климатических условий. Ведущее значение в формировании газового и ионного состава подземных

вод принадлежит деятельности микроорганизмов. Их роль особенно отчетливо проявляется в условиях влажного климата; в районах с сухим климатом влияние жизнедеятельности микроорганизмов уменьшается, здесь преобладают физико-химические процессы растворения и испарительной концентрации.

Растворимость урана и условия его миграции в подземных водах во многом зависят от концентрации в них кислорода и углекислоты. Повышенные содержания углекислоты и кислорода в подземных водах создают благоприятную обстановку для миграции урана, так как они способствуют образованию хорошо растворимых уранил-карбонатных комплексов. Экспериментальными работами доказано, что насыщение дистиллированной воды углекислотой повышает извлечение урана из урановых руд в 10—15 раз.

Повышенное содержание в подземных водах анионов  $(\text{SO}_4)^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$  не влияет на интенсивность миграции урана из руд в раствор.

Возможны разнообразные формы переноса урана в природных водах в зависимости от их химического состава и pH среды:

1) в виде уранил-карбонатного комплекса  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  с натрием, кальцием и магнием при повышенном содержании ионов  $(\text{HCO}_3)^-$  и  $(\text{CO}_3)^{2-}$  и при значениях pH от 4,5 до 6,5;

2) в виде ионов  $(\text{UO}_2)^{2+}$  и  $\text{UO}_2(\text{OH})^+$  при значениях pH вод от 4,5 до 7,5;

3) в виде сульфатных соединений в сильно кислой среде при pH менее 4. В связи с неустойчивостью комплекса  $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_m$  возможна миграция только на близкие расстояния;

4) в виде ураноорганических соединений в слабощелочных и слабокислых водах.

Если на пути движения подземных вод создается обстановка, благоприятная для осаждения урана, может происходить накопление урановых руд вплоть до формирования промышленных месторождений. Осаждение происходит при изменении химического состава вод, при повышении восстановительной емкости пород, что сопровождается восстановлением  $\text{U}^{6+}$  до  $\text{U}^{4+}$ , при адсорбции и коагуляции коллоидов.

Важное значение для осаждения урана имеют процессы взаимодействия растворов с окружающими вмещающими породами. Благоприятными для осаждения урана являются породы, обогащенные органическим веществом, сульфидами, минералами двухвалентного железа, фосфаты и глинистые минералы.

Минеральный состав зоны окисления зависит от влияния климатических условий района и первичного минерального состава собственно урановых руд и сопутствующих минералов.

В безводных пустынных районах образуются хорошо растворимые уранил-карбонатные комплексы, которые при дальнейшем взаимодействии с вмещающими породами разрушаются с образованием вторичных минералов урана — карбонатов и силикатов. Обилие влаги и разлагающихся растительных остатков способствует образованию органических кислот. В этих условиях формируются

устойчивые в растворах соли уранила, которые могут мигрировать на значительные расстояния. В зоне окисления создается обстановка, не благоприятная для образования на поверхности вторичных урановых минералов.

В зависимости от состава первичных руд Г. С. Гриценко, Л. Н. Беловой, Р. В. Гецевой и К. Т. Савельевой выделяются следующие типы зон окисления.

Для собственно урановых месторождений:

гидроокисно-силикатный тип, характеризующийся преобладанием гидронастурана и уранофана. Образуется над месторождениями, весьма бедными сульфидами;

собственно силикатный тип, отличающийся преобладанием силикатов урана (уранофан, соддит, казолит и др.). Этот тип зоны окисления развивается над месторождениями, более богатыми сульфидами, чем предыдущий тип.

Для сульфидно-урановых месторождений:

силикатно-слюдковый тип, характеризующийся появлением отенита (группа урановых слюдок) совместно с силикатами урана. Образуется над сульфидно-урановыми месторождениями с незначительным содержанием сульфидов;

собственно слюдковый тип, представленный в основном минералами группы урановых слюдок (отенит, торбернит, цейнерит, ураноспинит и др.). Вместе с ними в подчиненном количестве развиваются карбонаты и силикаты урана. Подобные зоны окисления развиваются над урановыми месторождениями, содержащими пирит, халькопирит, арсенопирит и другие сульфиды;

слюдково-лимонитовый и собственно лимонитовый тип, образующийся над урановыми месторождениями, обогащенными пиритом. Обилие пирита обуславливает образование свободной серной кислоты, что приводит к выщелачиванию и выносу урана из зоны окисления. Лишь часть урана сохраняется в виде отенита или торбернита или сорбируется лимонитом. При интенсивном развитии процессов выщелачивания образуется собственно лимонитовый тип зоны окисления, представленный урансодержащими лимонитами без видимых урановых минералов.

Состав минералов зоны окисления позволяет правильно понять развитие процесса выщелачивания первичных руд и дать прогнозную оценку качественного состава руд на глубине.

## § 5. Методы исследования урановых минералов

Применение новейших достижений в области кристаллохимии, электронной микроскопии, использование рентгеноструктурных анализов, инфракрасной спектрометрии и других современных методов исследования позволило детально изучить многие минералы, промышленное значение которых возросло в последние годы (коффинит, браннерит и др.). Однако еще многие урановые минералы определены только ориентировочно: не установлены их сингония,

химический состав (неадаквит, ураноорганические соединения, минералы из группы титано-тантало-ниобатов). Трудности изучения урановых минералов обусловлены сложностью состава большинства урансодержащих минералов, небольшими размерами выделений, наличием тесных взаимных прорастаний и псевдоморфоз. Кроме того, присутствие урана затрудняет определение других элементов при спектральных анализах. Рентгеноструктурные исследования осложняются метамиктным состоянием некоторых урановых минералов, когда под воздействием  $\alpha$ -частиц, образующихся при радиоактивном распаде, происходит перестройка кристаллической решетки и минерал приобретает свойства аморфного соединения, т. е. становится оптически изотропным и не обнаруживает дифракции рентгеновских лучей (браннерит, давидит, пироклор, циркон и др.).

Наиболее важным свойством урановых минералов, позволяющим применять радиометрическую аппаратуру для выявления радиоактивных минералов и установления природы радиоактивности в отдельных образцах, в пробах или непосредственно в коренном залежании, является естественная радиоактивность. Явления естественной радиоактивности урановых минералов проявляются также в способности гамма-лучей воздействовать на эмульсию фотопленок или пластинок, вызывая их потемнение. На этом основан радиографический метод исследования, когда исследуемый образец приполированной поверхностью устанавливается в темноте на фотопленку (желательно рентгеновскую). Время экспозиции зависит от концентрации урановых элементов и может изменяться от нескольких часов (для урановой смолки) до нескольких суток. После этого, не снимая образца, пленка засвечивается для фиксации контура образца и проявляется как обычная фотопластинка. Положение урановых минералов соответствует участкам почернения на пленке. Этот метод позволяет не только установить присутствие радиоактивного минерала, но и определить его положение в исследуемом образце (рис. 5).

Важное свойство урановых минералов заключается в их способности люминесцировать в ультрафиолетовых лучах. Многие вторичные урановые минералы люминесцируют в естественном природном состоянии и все урановые минералы люминесцируют при сплавлении их с перлом фтористого натрия. Люминесценция — это испускание световых квантов под влиянием различных энергетических воздействий (ультрафиолетовые, катодные, рентгеновские лучи, химические процессы, трение, удар, нагревание и т. д.). Сущность люминесценции заключается в том, что под влиянием световых квантов ультрафиолетовой части спектра электроны атома переходят в возбужденное энергетическое состояние. При обратном переходе электронов в первоначальное состояние происходит излучение части возбужденной энергии в виде светового пучка видимой или невидимой части спектра. В зависимости от энергии, возбуждающей люминесценцию, различают фото-, катодо-, рентгено-, термо-, хемо-, биолюминесценцию.



*a*



*b*

Рис. 5. Фотография (а) и радиография (б) штуфа. Карбонат-настурановые прожилки обрастают обломки аплита (экспозиция 12 часов)



Для обнаружения урановых минералов используют фотолюминесценцию, возбуждаемую ультрафиолетовыми лучами с длиной волны от 1850 до 4000 Å. В катодных лучах люминесцирует шеелит, в рентгеновских — алмаз и т. д. Интенсивность люминесценции зависит от длины волны излучателя, от концентрации урана и от расстояния от источника возбуждения. Если интенсивность люминесценции определять в перле, вес которого постоянный, и иметь источник облучения постоянной интенсивности и длины волны, то интенсивность люминесценции до определенного предела будет зависеть от концентрации урана. На этом основан перлово-люминесцентный анализ, позволяющий достаточно точно определять содержание урана в небольших навесках. Для количественного определения небольшая навеска урана вплавляется в перл фтористого натрия и путем сравнения интенсивности люминесценции с эталонами при помощи фотометра определяется содержание урана в пробе.

При изучении вторичных минералов в их природном состоянии по наличию люминесценции определяется принадлежность их к урановым минералам, а по яркости и цвету люминесценции можно ориентировочно определить их состав (группа урановых слюдок, силикаты, карбонаты и т. д.). Элементы, такие как Cu, Fe, Ni и некоторые другие, присутствующие в минералах, гасят эффект люминесценции.

Указанные методы анализа урановых минералов позволяют получить первые сведения о природе радиоактивности, характере распределения урановой минерализации и составе урановых минералов.

Для точного определения природы вторичных урановых минералов необходимы микрочимические реакции и замеры оптических констант в иммерсионных жидкостях. При микрохимических реакциях целесообразно вначале определить анионную часть минерала. Для этого тщательно отобранную навеску минерала растворяют последовательно в воде, в 20%-ной соляной, а потом в азотной кислоте. По степени растворимости можно определить группу минерала. В случае растворения минерала производится определение в растворе анионов  $(AsO_4)^{3-}$ ,  $(PO_4)^{3-}$ ,  $(SO_4)^{2-}$  и т. д.

При исследовании первичных урановых минералов основным методом является изучение руд под микроскопом (минераграфия). Минераграфические исследования позволяют достаточно достоверно определить основные оптические и физические свойства минералов, такие как отражательную способность, цвет, анизотропию, двуотражение, форму выделения минералов, их микротвердость, выявить микротектурные и структурные особенности руд, определить последовательность формирования минералов и характерные парагенетические ассоциации. По этим признакам можно определить большинство распространенных урановых минералов.

Знание особенностей внутреннего строения руд, закономерностей распределения в них полезных компонентов и размеров их выделений

имеет важное значение для правильного опробования рудных тел и для выбора рациональной схемы обогащения руд.

Оптические наблюдения не всегда позволяют достаточно достоверно определить некоторые минералы, особенно новые и малоизученные. Для этого используют различные методы точных исследований, такие как спектральный, рентгеноструктурный, термический, химический, электронномикроскопический, микронзондирование и др.

Спектральные анализы являются в настоящее время самыми распространенными. Преимуществом их являются высокая производительность, малая стоимость, небольшое количество исходного материала. Спектральные анализы позволяют определить приблизительное количество почти всех элементов периодической системы, за исключением таких, как В, Р, F, S, Se, Cs, Rb Li. При изучении новых минералов спектральные анализы помогают получить первое представление о возможном составе исследуемого минерала.

Рентгеноструктурные анализы применяются для изучения внутренней кристаллической структуры минерала и определения размера элементарной ячейки. В практике минералогических исследований чаще всего используется метод Дебая, когда в результате облучения порошка исследуемого минерала рентгеновскими лучами получают «порошкограмму» или дебаеграмму. Сравнивая расстояние между отдельными линиями и их интенсивность с известными эталонными по дебаеграммам, можно определить принадлежность исследуемого вещества к тем или иным минералам. Для анализа необходимо около 5 мм<sup>3</sup> исследуемого минерала, но он должен быть без посторонних примесей.

Термические анализы основаны на выявлении эндо- и экзотермических эффектов, обусловленных физическими и химическими превращениями, происходящими в исследуемом веществе при его нагревании. Результаты анализа фиксируются в виде кривых, которые вычерчиваются автоматически в процессе нагревания минерала. На графике, получаемом в результате термоанализа, по оси ординат отсчитывается температура, по оси абсцисс — время, а на самой кривой дифференциальной записи пики с вершинами, направленными вниз, указывают на эндотермический эффект (поглощение тепла), а с направленными вверх — на экзотермический эффект (выделение тепла). Термические превращения в минералах обусловлены выделением воды, окислением, восстановлением, переходом в новую полиморфную модификацию и т. п. Поэтому характерные термограммы дают минералы, содержащие воду, гидроксил и углекислоту. Принадлежность исследуемого минерала к тому или иному виду определяется путем сравнения полученной термограммы с эталонными.

Химические анализы позволяют наиболее полно изучить химический состав минерала и рассчитать его химическую формулу. Однако это сравнительно трудоемкий и дорогой метод и применять его следует главным образом при изучении новых

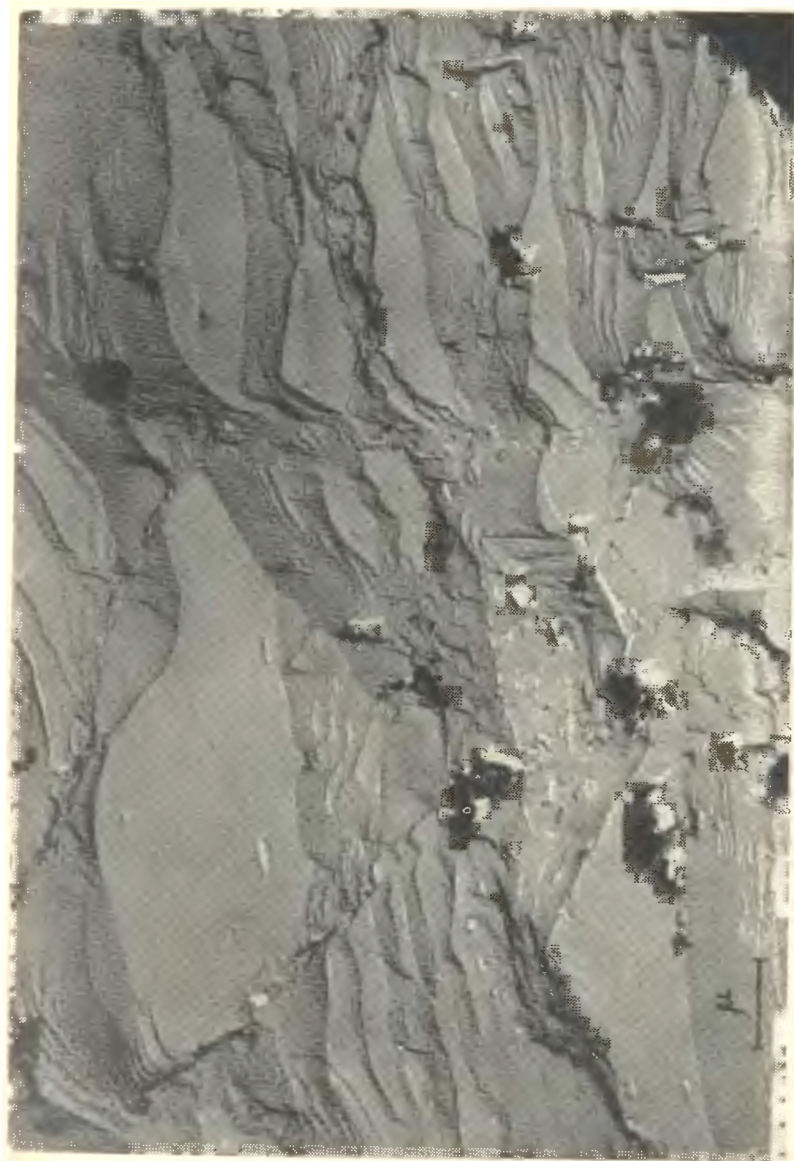


Рис. 6. Ступенчато-раковинистый излом настурана. Электронномикроскопическое фото, увел. 11 000

минералов, отличающихся по оптическим свойствам от известных минералов. Для химического анализа требуется чистое, освобожденное от всех примесей вещество. Количество его зависит от числа элементов, которые следует определить в пробе, и должно составлять не менее 1—2 г. Это осложняет возможность применения химических анализов для редко встречающихся и рассеянных в руде минералов.

Электронно-микроскопические исследования применяются для изучения внутреннего строения минералов. Современные электронные микроскопы дают электронно-оптическое увеличение от нескольких тысяч до 200 000 раз. Это позволяет наблюдать строение крупных молекул, коллоидных частиц, плоские

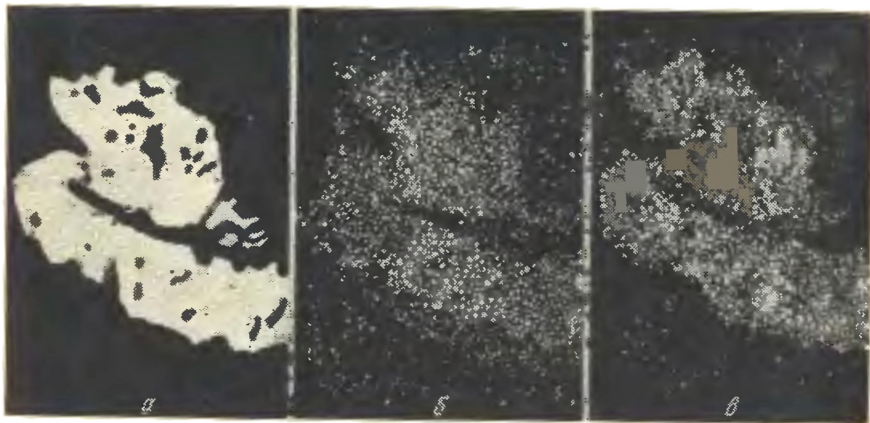


Рис. 7. Результаты исследований браннерита при помощи рентгеновского микроанализатора: электронное изображение выделения браннерита (а) и распределение (светлые точки) урана (б) и титана (в) в исследуемом минерале

сетки кристаллических решеток, изучать морфологию и особенности внутреннего строения мельчайших минеральных частиц.

В зависимости от свойств изучаемых минералов, форм выделения, строения агрегатов применяются различные методы их изучения под электронным микроскопом и различные способы приготовления препаратов для наблюдений. В настоящее время при электронно-микроскопических исследованиях широко используется метод суспензий, который позволяет судить о форме, размерах изучаемых частиц, о наличии или отсутствии примесей других минералов. Для изучения поверхностей сколов минералов и минеральных агрегатов широко используется метод одноступенчатых угольных и двухступенчатых целлюлозо-угольных реплик. Для определения отдельных минералов применяется методика получения реплик с экстракцией. Электронномикроскопические исследования позволяют выявлять специфические особенности внутреннего строения минералов, не доступные для других методов (рис. 6).

Исследования при помощи рентгеновского микроанализатора дают возможность получить распределение интересующих нас элементов в контуре изучаемого минерала. Этот метод особенно эффективен при изучении мелких выделений минералов сложного состава. На рис. 7 приведено электронное изображение мелкого выделения исследуемого минерала. Контуры распространения урана и титана совпадают, что в совокупности с другими диагностическими признаками позволило определить исследуемый минерал как браннерит.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

Бетехтин А. Г. Минералогия. Госгеолиздат, 1950.

Евсеева Л. С., Перельман А. И. Геохимия урана в зоне гипергеза. Госатомиздат, 1962.

Мелков В. Г., Пухальский Л. Ч. Поиски месторождений урана. Госгеолтехиздат, 1957.

Основные черты геохимии урана. Под ред. акад. А. П. Виноградова. Изд-во АН СССР, 1963.

Хейнрих Э. Минералогия и геохимия минерального сырья. Изд-во иностр. лит., 1962.

## Г л а в а II

### МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА

#### § 1. Принципы классификации урановых месторождений

Месторождения урана отличаются исключительным разнообразием минерального состава руд и условий их образования. Они встречаются в самых различных геолого-структурных условиях и приурочены к различным по составу вмещающим породам. Разнообразие природных типов урановых месторождений связано с высокой геохимической подвижностью урана в эндогенных, экзогенных и метаморфических процессах.

В основу большинства опубликованных классификаций урановых месторождений положены процессы образования руд или состав вмещающих оруденение пород. На генетическом принципе основаны классификации Д. И. Щербакова, А. Г. Бетехтина, Д. Я. Суражского, В. С. Домарева, В. Н. Котляра и многих других исследователей. Почти во всех этих классификациях выделяются три основных класса урановых месторождений: а) эндогенные, б) экзогенные и в) метаморфогенные. Дальнейшая систематизация внутри основных классов проводится уже по признакам, подчеркивающим особенности рудообразующего процесса, минерального состава руд (рудной формации) или состава вмещающих пород. В классе эндогенных урановых месторождений обычно выделяются группы магматических, пегматитовых, контактово-метасоматических (скарновых), гидротермальных и метасоматических месторождений. В свою очередь

каждая из этих групп подразделяется на подгруппы месторождений по признаку рудной формации. Так, например, среди высокотемпературных гидротермальных месторождений выделяют давидитовую и браннеритовую формации, а среди низкотемпературных — смолково-карбонатную, смолково-сульфидную (в частности, настуран-молибденовую), смолково-флюоритовую и смолково-арсенидную.

В классификации экзогенных месторождений В. И. Данчева и Т. А. Лапинской в качестве основного признака используется состав вмещающих оруденение пород. Все экзогенные месторождения урана разделяются по этому признаку на месторождения в горючих сланцах и угленосных формациях, в фосфоритоносных породах, в карбонатных породах, в обломочных породах континентальных и прибрежных фаций и в битуминозных породах.

Среди большого разнообразия природных типов урановых месторождений далеко не все из них играют существенную роль в балансе запасов и добыче этого вида сырья, хотя отдельные месторождения многих генетических типов и используются промышленностью. В связи с этим появляется необходимость особого выделения так называемых промышленных типов месторождений, которые являются основными поставщиками урана и занимают ведущее место в балансе мировых запасов урана и добыче урановых руд.

Понятие о промышленных типах месторождений и их первая классификация по главным видам минерального сырья были введены В. М. Крейтером в 1940 г. В. М. Крейтер считает промышленным типом такой тип месторождений, за счет которого обеспечивается не менее 1% мировой добычи данного полезного ископаемого. Кроме того, понятие «промышленный тип» применимо лишь к месторождениям, зарекомендовавшим себя в горнорудной практике как устойчивый поставщик сырья, обеспечивающий экономическую рентабельность его разработки. Применительно к урановым месторождениям группировка промышленных типов была предложена в 1956 г. Д. Я. Суражским, а в 1966 г. А. Б. Кажданом.

Знание промышленных типов месторождений необходимо геологам на стадиях поисковых работ для оценки аномалий и рудопроявлений, а на стадии поисково-разведочных работ — для предварительного суждения о перспективах изучаемых рудопроявлений и их геолого-экономической оценки. Именно на этих ранних стадиях изучения недр широко применяется метод аналогий, а из-за неполноты фактических данных особенно остро ощущается необходимость в проверенных практикой эталонах. Классификация промышленных типов урановых месторождений способствует выявлению таких особенностей их геологического строения и пространственного размещения, которые в первую очередь могут быть использованы в прикладной геологии.

Для классификации промышленных типов урановых месторождений используется совокупность признаков, определяющих промышленную ценность отдельных групп месторождений и методические приемы их поисков и разведки. В основу классификации при-

няты, насколько это возможно, генетические признаки, а для выделения отдельных промышленных типов используется совокупность следующих классификационных признаков:

1) характер связи оруденения с элементами геологического строения и тип рудоконтролирующей структуры, влияющий на локализацию рудных тел;

2) минеральный и химический состав руд, определяющий их качество, технологические свойства и комплекс промышленно ценных минералов;

3) морфологические особенности рудных тел и закономерности распределения рудных компонентов в контурах промышленного оруденения;

4) масштаб месторождения и относительное значение данного типа как поставщика металла.

Совокупностью перечисленных классификационных признаков определяются в значительной мере и поисковые критерии месторождений каждого промышленного типа. Понятие «промышленный тип» является понятием историческим. Оно изменяется в процессе выявления и разведки новых месторождений, а также в процессе совершенствования технологии и технических средств ведения горных работ. Так, на первых этапах развития урановой промышленности были известны только жильные месторождения, потом появились урановые месторождения в песчаниках, в конгломератах, в асфальтах и в других природных образованиях. Появление новых промышленных типов происходит главным образом за счет месторождений, крупных по запасам, но бедных по содержанию металла, а богатые, но мелкие по масштабу месторождения постепенно теряют свое промышленное значение.

В настоящее время богатыми считаются руды с содержанием урана более 0,2—0,3%, рядовыми — руды с содержанием урана порядка 0,1—0,2% и бедными — руды с содержанием урана менее 0,1%. Месторождения урана с запасами в десятки тысяч тонн относятся к крупным, в один-два десятка тысяч тонн — к средним и менее десяти тысяч тонн металлического урана — к мелким по масштабу.

По классификации А. Б. Каждана среди разнообразных урановых месторождений, вовлеченных в сферу промышленного использования, выделяются девять промышленных типов:

1. Минерализованные зоны дробления или брекчирования с существенно урановым оруденением.

2. Гидротермальные жилы и жильные зоны с существенно урановым оруденением в изверженных или древних метаморфических породах.

3. Штокверкообразные залежи прожилково-вкрапленных урановых руд в осадочно-эффузивных и субвулканических породах.

4. Пласто- и штокообразные залежи урановых и железо-урановых руд в метасоматически измененных древних метаморфических породах.

5. Сложные пластообразные залежи и штокверки урановых руд в песчано-глинистых и углистых толщах осадочно-метаморфических пород.

6. Пласто- и линзообразные залежи урановых руд в метаморфизованных конгломератах.

7. Пластовые залежи ураноносных глин с костными остатками ископаемых рыб.

8. Пластовые залежи и линзы ураноносных песчаников и углей в континентальных отложениях.

9. Залежи ураноносных битумов в песчано-глинистых и карбонатных породах.

## § 2. Месторождения первого промышленного типа. Минерализованные зоны дробления или брекчирования с существенно урановым оруденением

К этому типу относятся средне- и низкотемпературные гидротермальные месторождения, сформированные на глубинах порядка первых километров от дневной поверхности. Многие из них тяготеют к краевым областям древних щитов вблизи их сопряжений со складчатыми поясами или с зонами тектоно-магматической активности. Некоторые месторождения располагаются в центральных частях древних щитов и платформ. Характерна приуроченность рудных полей и месторождений к линейным зонам крупных разломов длительного развития, которые прослеживаются по простиранию на десятки километров.

Рудовмещающими являются как сами крупные разломы, так и сопряженные с ними трещины оперения. Благоприятны для рудоотложения участки изгибов рудоносных зон по простиранию и падению, места сопряжения с оперяющими трещинами, участки пересечения зон различного направления. Сочетание благоприятных структурных факторов рудоконтроля определяет положение рудных тел и склонение рудных столбов в рудоносной зоне.

Вмещающими породами являются древние допалеозойские хлорит-эпидотовые сланцы, биотитовые парагнейсы, сильно метаморфизованные гнейсы и гранитоиды. Хотя на месторождениях данного типа и не наблюдается четко выраженного литологического контроля оруденения, состав пород часто оказывает определенное влияние на развитие рудоносных зон и на формирование оруденения.

По составу руд это существенно урановые месторождения, в качестве сопутствующих компонентов на некоторых из них приобретают промышленный интерес графит и шпирт ранних стадий минерализации. Главные урановые минералы представлены настураном, реже встречаются браннерит, коффинит и уранинит. В зоне окисления развиваются урановые черни, силикаты урана, урановые слюдки и другие вторичные урановые минералы. На некоторых месторождениях глубина зоны окисления достигает 100 м и более, что суще-



ственно осложняет их оценку при поисках и разведке. Интенсивному развитию зоны окисления способствует широкое развитие пирита в предрудную стадию образования метасоматитов.

Образование минералов, слагающих рудные жилы, происходит в несколько последовательных стадий минерализации. Для урановых руд некоторых месторождений характерны парагенетические ассоциации настурана с браннеритом. Формированию браннеритового оруденения способствуют широкое развитие процессов метасоматоза и повышенная щелочность среды, благоприятная для образования комплексных анионов метатитановой кислоты.

Для ураноносных провинций с месторождениями данного промышленного типа часто характерен железо-медно-золоторудный металлогенический фон.

Гидротермальный метаморфизм проявляется в графитизации, пиритизации, хлоритизации, альбитизации, окварцевании и серицитизации пород. Выделяют изменения пород, связанные с различными стадиями гидротермального процесса. На ранних стадиях они обычно проявлены наиболее отчетливо, ореолы измененных пород достигают нескольких метров по мощности и хорошо выделяются макроскопически. Представлены они метасоматитами, в составе которых преобладают карбонат, серицит, ширит, рутил, каолинит, калиевый полевой шпат, или интенсивно осветленными породами, где все первичные минералы замещены карбонатом, серицитом, пиритом, кварцем и глинистыми минералами.

Изменения вмещающих пород около жил урановорудной стадии минерализации обычно проявлены слабо и только в непосредственной близости от рудной жилы, что ограничивает возможности использования их как поискового признака. Для урановорудной стадии характерны карбонатизация, хлоритизация и покраснение боковых пород.

Оруденение локализуется в контурах рудоносных зон мощностью в первые десятки метров и ограничивается тектоническими нарушениями или определяется по ореолу гидротермально измененных пород. В контурах рудоносной зоны урановое оруденение представлено мелкими прожилками, тонкорассеянной вкрапленностью настурана в хлорите или браннерита в ассоциации с пиритом. Рудные тела имеют форму линз размером в сотни метров при мощности от десятков сантиметров до нескольких метров. Контуры рудных тел нечеткие и определяются только по данным опробования (рис. 8). Текстуры руд вкрапленные, полосчатые, пятнистые, брекчиевые.

Поскольку контуры отдельных рудных линз нечеткие и устанавливаются только по результатам опробования, морфология рудных тел зависит от кондиционных требований, по которым производится их оконтуривание. Распределение оруденения в контурах рудных линз неравномерное, выделяются участки пустых пород и некондиционных руд. Руды относятся к типу слабо- и умеренно контрастных, поэтому их радиометрическая сортировка не всегда дает положительные результаты.

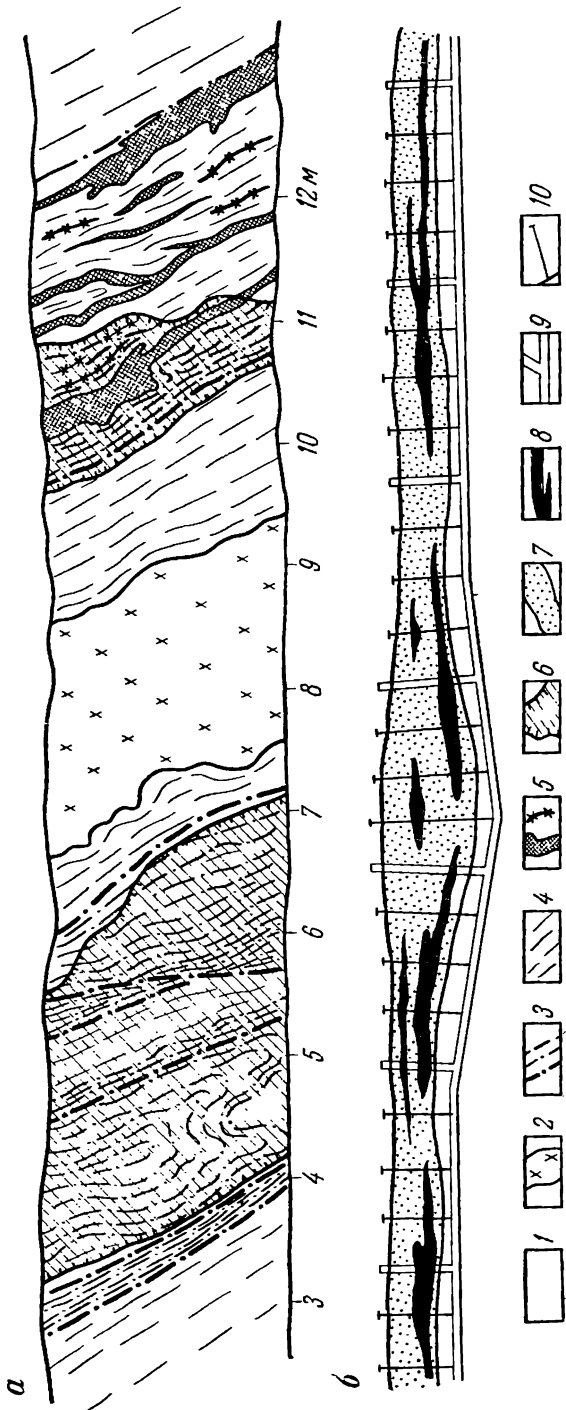


Рис. 8. Строение рудоносной зоны в стенке органа (а) и на погоризонтном плане (б)

1 — биотитовые параgneисы; 2 — габбро; 3 — габброидные сланцы и прожилки; 4 — трещины; 5 — карбонатные жилы и прожилки; 6 — контуры рудных тел по данным радиометрического опробования; 7 — рудоносная зона; 8 — рудные тела; 9 — горные выработки; 10 — разведочные штольи

Для месторождений первого промышленного типа наиболее типичны следующие поисковые критерии:

1) приуроченность уранового оруденения непосредственно к зонам крупных древних разломов в породах кристаллического основания или к их лежащим бокам, а в пределах этих структур к местам их изгибов по падению и простираению;

2) связь рудных залежей с зонами метасоматически измененных хлоритизированных, карбонатизированных и пиритизированных вмещающих пород;

3) преимущественное развитие оруденения в породах повышенной основности (в амфибол-пироксен-биотитовых гнейсах, в гранито-гнейсах, метасоматитах и др.);

4) расположение рудных полей и месторождений в широком экзоконтакте послескладчатых гранитоидных интрузивов или малых интрузий повышенной щелочности.

По запасам эти месторождения крупные и средние.

### § 3. Месторождения второго промышленного типа.

Гидротермальные жилы и жильные зоны с существенно урановым оруденением в изверженных или древних метаморфических породах

К этому типу относятся гидротермальные урановые месторождения, сформировавшиеся на небольших глубинах (1—3 км) в обстановке низких и средних температур, в пределах крупных складчатых поясов в краевых и реже центральных частях внутренних (жестких) массивов. Пространственно месторождения тяготеют к контактовым зонам послескладчатых массивов кислых гранитоидных пород, завершающих тектоно-магматическую деятельность геосинклинального периода развития. Положение рудных полей определяют крупные региональные разломы, а отдельные месторождения приурочены к оперяющим их структурам второго и третьего порядка.

Урановое оруденение приурочено к отдельным трещинам различной протяженности — от первых десятков до последних сотен метров. В зависимости от особенностей геологического строения района образуются различные типы рудовмещающих трещин:

а) крупные трещины скалывания протяженностью в сотни метров, возникающие как трещины оперения на участках изгибов рудоконтролирующих разломов и представляющие по отношению к ним структуры второго и третьего порядка;

б) пучки сближенных сильно ветвящихся жил в зонах сбросов, оперяющих главный разлом. Рудные тела представлены небольшими маломощными жилами, выполняющими трещины отрыва и скалывания. Мощность таких жил не превышает первых десятков сантиметров, а длина по простираению 150—200 м;

в) сближенные субпараллельные жилы в экзоконтакте крупных массивов гранитоидов. Положение жил контролируется крупными антиклинальными складками или разломами.

Месторождения залегают в древних метаморфических породах (парагнейсы, сланцы, амфиболиты и др.), в экзоконтакте массивов двуслюдяных калиевых гранитов или в эндоконтакте этих гранитных массивов.

По составу руды весьма разнообразны. В зависимости от преобладания определенных минеральных комплексов, ассоциирующихся с урановым оруденением, выделяются настуран-карбонатная, настуран-сульфидная, пятиметалловая (уран-никель-кобальт-висмут-серебряная), настуран-мышьяковая и настуран-селенидная минеральные ассоциации.

Процесс гидротермальной деятельности характеризуется многостадийностью формирования. Так, например, на месторождении Эльдorado (Полярная Канада) выделяются четыре стадии минерализации (кварц-настурановая, кварц-арсенидная, карбонат-сульфидная, карбонат-серебряная). В формировании жильных урановых месторождений Саксонских Рудных гор выделяются шесть стадий минералообразования: силикатно-окисную, кварц-сульфидную, кварц-карбонатно-настурановую, флюорит-баритовую, арсенидную, кварц-гематит-сульфидную.

На некоторых месторождениях этого типа жилы сложены преимущественно карбонатом, который присутствует во всех стадиях минерализации и отличается лишь составом, цветом и размером зерен. Здесь выделяются четыре стадии минерализации (сидерит-сульфидная, манганокальцитовая, смолково-кальцитовая, кальцит-пиритовая). Иногда в ассоциации с урановым оруденением появляются селениды (см. рис. 3, а).

Во всех жильных месторождениях формирование жил происходило в основном путем выполнения открытых полостей, поэтому большинство жил имеет четкие контакты с вмещающими породами (см. рис. 1). Довольно часто формировались жилы в обстановке неоднократного приоткрывания единого тектонического шва и последовательного отложения минералов различных стадий. В результате на отдельных участках все стадии минерализации проявлялись в пределах единой жилы, что способствовало растворению и перестроению минералов ранних стадий последующими гидротермальными растворами. Однако процессы метасоматоза развиты только внутри жилы и обычно не выходят за ее пределы.

Урановое оруденение представлено настураном, подчиненное значение имеют коффинит и антраксолит. В зоне окисления преобладают урановые слюдки и силикаты урана. Несмотря на разнообразие минерального состава, промышленный интерес представляет только урановое оруденение.

Настуран ассоциирует с самыми разнообразными по составу минералами: кальцитом, молибденитом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, диарсенидами никеля и кобальта, самородным висмутом, самородным мышьяком, селенидами меди, свинца, серебра и др.

Разнообразие минеральных ассоциаций, сопровождающих урановое оруденение, объясняется сложностью условий его формиро-

вания. В результате многостадийности гидротермального процесса и пространственного совмещения минералов различных стадий минерализации происходило наложение уранового оруденения на ранее сформированные рудные образования или наложение более поздней минерализации на ранее сформированные урановые жилы, что способствовало усложнению минерального состава.

Состав жил, характер околужильных изменений, а иногда и положение рудных тел во многом зависят от состава вмещающих пород. Для всех месторождений, залегающих в основных породах, главными минералами рудных жил являются к а л ь ц и т и н а с т у р а н. В качестве второстепенных минералов выделяются гематит, полевой шпат, кварц, флюорит, хлорит и сульфиды. Гидротермальные изменения около карбонатно-настурановых жил проявляются в хлоритизации роговой обманки, биотита, пироксена, в слабой серицитизации плагиоклазов, в образовании карбоната, эпидота и гематита. Макроскопически эти изменения фиксируются по покраснению пород за счет тонкорассеянного гематита.

На жильных месторождениях, приуроченных к породам кислого состава (граниты, гранулиты и др.), н а с т у р а н ассоциирует не с карбонатом, а с к в а р ц е м и п и р и т о м. В качестве второстепенных минералов присутствуют барит, флюорит, галенит, сфалерит, халькопирит.

Околужильные изменения макроскопически тоже проявляются в покраснении вмещающих пород около рудных жил. Меняется и химический состав пород: темноцветные минералы (биотит и роговая обманка) замещаются агрегатом хлорита, серицита и карбоната, а плагиоклазы — калиевым полевым шпатом или альбитом с карбонатом и гематитом. Интенсивность околужильных изменений увеличивается по мере приближения к контакту с жилой. Наибольшее практическое значение как поисковый признак имеет покраснение боковых пород. Остальные изменения выявляются лишь при изучении пород под микроскопом.

Урановое оруденение в виде отдельных линз неправильной формы и различных размеров весьма неравномерно распределено в плоскости жилы. Отдельные линзы имеют четкие ограничения и разделены между собой безрудными участками. Общая мощность их — первые десятки сантиметров. Коэффициент рудоносности жил невысокий, обычно не превышает десятых или сотых долей процента. Часто распределение рудных линз в плоскости жилы имеет определенные закономерности и контролируется линиями сопряжения с оперяющими трещинами (рис. 9), линиями пересечения с трещинами отслоения или межпластового скольжения, участками искривления жильных трещин по простиранию и по падению или благоприятным литологическим составом вмещающих пород. Наиболее продуктивные участки жил залегают обычно в породах, богатых двухвалентным железом или органическим веществом, т. е. в амфиболитах, хлоритовых, роговообманковых и углистых сланцах, скарнах. Благоприятными для уранового оруденения являются породы различного

агрегатом с вкрапленностью пирита. Березитизация боковых пород является характерным поисковым признаком для месторождений данного типа.

В жилах анкерит-сульфидной стадии минерализации кроме анкерита развиты сфалерит, пирит, арсенопирит, галенит, гематит, магнетит и кварц. Гидротермальный метаморфизм около жил этой стадии проявлен на расстоянии 20—70 см от жилы. Характер около-жилых изменений в породах кислого или среднего состава существенно не отличается. Выражены они в интенсивной серицитизации, карбонатизации и хлоритизации вкрапленников полевых шпатов, в замещении биотита мусковитом и лейкоксером, а роговой обманки — хлоритом и кальцитом. Макроскопически измененные породы выделяются по серо-зеленой окраске на общем буроватом фоне вмещающих пород.

Для рудной стадии минерализации характерна тесная пространственная и генетическая связь уранового оруденения с молибденитом, что позволяет выделить подобные месторождения в самостоятельную ураново-молибденовую формацию. Минералы этой стадии образуют следующие парагенетические ассоциации: молибденит — настуран — кварц; настуран — блеклая руда — бурнонит — галенит; настуран — клейофан — галенит — халькопирит — хлорит — кальцит.

В ассоциации с настураном часто встречаются криптокристаллические разности молибденита, имеющие вид черных порошковатых скоплений и не обнаруживающие эффекты анизотропии даже при самых больших увеличениях. Такой сульфид молибдена назван иордизитом. Настуран образует с молибденитом и иордизитом тесные парагенетические ассоциации: совместные колломорфные образования, спутанноволокнистые агрегаты, тонкоагрегативные смеси.

Влияние рудоносных растворов на вмещающие породы около жил рудной стадии минерализации проявилось еще слабее, чем в предыдущих стадиях. Ореол интенсивного изменения пород распространяется всего на 2—3 см. Макроскопически он выявляется по темно-вишневой окраске пород около рудных жил. Околожилые изменения в кислых и средних породах сходны между собой и проявляются в замещении калиевого полевого шпата, плагиоклаза и биотита пелитом, карбонатом, хлоритом, кварцем и серицитом. Вдоль микротрещин полевые шпаты пигментированы гематитовыми частицами, что обусловило покраснение пород около рудных жил.

С заключительной кварц-баритовой стадией минерализации связано образование парагенетических ассоциаций, в составе которых преобладают следующие: кварц — карбонат; кварц — магнетит — пирит — халькопирит — хлорит; кальцит — галенит — клейофан — пираргирит — марказит — киноварь; барит — гематит и др.

В месторождениях, сформированных на различных глубинах, наблюдается неодинаковое пространственное размещение гидротермальных образований разных стадий минерализации. На глубоко залегающих месторождениях наблюдается пространственное



Рис. 10. Строение столбообразного штокверка, приуроченного к сложному субвулканическому интрузиву (по Н. П. Лаврову):

а — план; б — разрез; в — вертикальная проекция  
 1 — лампрофиты; 2 — гранодиорит-порфиры; 3 — кварцевые порфиры; 4 — кластолавы и лавобрекчи липаритов; 5 — пепловые туфы; 6 — туфогенные песчаники; 7 — андезиты и их туфы; 8 — рудные тела; 9 — тектонические разрывы

совмещение всех стадий минерализации. С уменьшением глубины формирования преимущественно развиты минеральные комплексы более поздних стадий минерализации. С глубиной меняется и парагенетическая ассоциация настурана. Для молибденит-настурановой парагенетической ассоциации существует определенная оптимальная глубина формирования — от 800 до 1500 м. Выше этого интервала

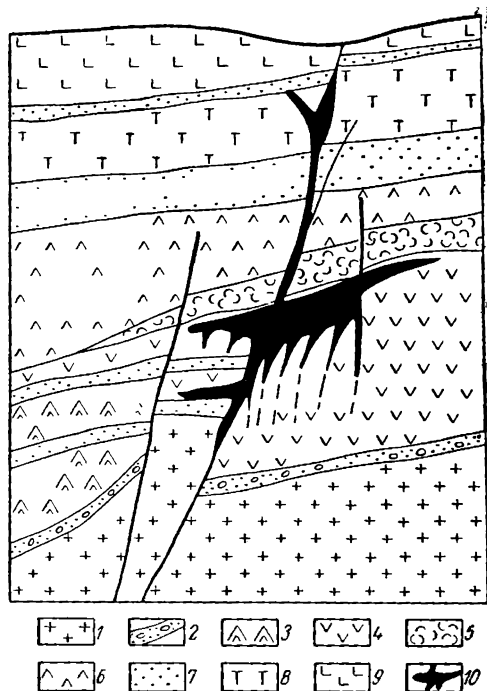


Рис. 11. Урановые рудные залежи сложной формы в горизонтах благоприятных пород (поперечный разрез) (по Н. П. Лаверову)

1 — граниты; 2 — конглобрекчи; 3 — андезитобазальты; 4 — дациты и их туфы; 5 — туфы; 6 — диабазовые порфириды; 7 — конгломераты; 8 — андезитовые порфириды; 9 — туфоловы кварцевых порфиров; 10 — минерализованные разрывы и рудные тела

наибольшее значение приобретают сульфидно-настурановая и карбонатно-сульфидно-настурановая ассоциации, а ниже преобладает кварцнастурановая с пиритом и марказитом. Таким образом, на месторождениях данного типа наблюдается определенная закономерность в изменении минерального состава не только во времени, но и в пространстве.

Руды обладают хорошей контрастностью, поддаются радиометрической сортировке и поэтому после радиометрического обогащения содержание урана в рудах заметно повышается. Месторождения являются комплексными и при подсчете запасов кроме урана учитывается также и молибден, содержание которого в рудах составляет первые десятки — последние сотые доли процента.

В зависимости от условий образования среди урановых месторождений данного промышленного типа выделяются три самостоятельные группы, отличающиеся [морфологией

рудных тел и вещественным составом руд:

1. Месторождения прожилково-вкрапленных руд в корневых частях кислых субвулканических интрузивов, заполняющих крупные тектонические разрывы в породах нижних структурных ярусов.

2. Штокверковые месторождения в субвулканических кислых интрузивах, залегающих в основании верхних структурных ярусов (рис. 10).

3. Трещинно-жилвные месторождения в кислых эффузивно-протокластических породах, связанные с жерловыми фациями и структу-



рами древних аппаратов в породах верхних структурных ярусов (рис. 11).

Немаловажную роль в локализации рудных тел играет внутреннее строение и текстурные особенности вмещающих пород. Так, положение и морфология рудных тел, залегающих в фельзитах, во многом определяются флюидалностью последних (рис. 12). Часто рудные тела приурочены к местам наиболее резких изгибов флюидалности, где урановое оруденение распределяется вдоль мелких трещин, согласных с флюидалностью. В результате рудные тела приобретают сложное строение, внутри них выделяются участки

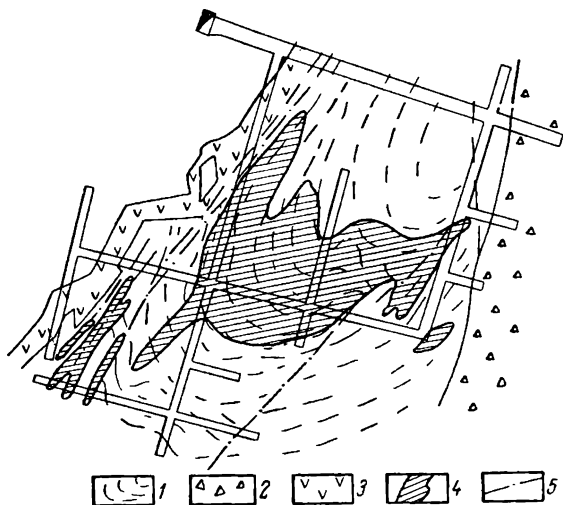


Рис. 12. Рудные тела, контролируемые флюидалностью фельзитов

1 — фельзиты с флюидалной структурой; 2 — туфобрекчи фельзитов; 3 — кварцевые микродиориты; 4 — рудные тела; 5 — тектонические нарушения

пустых пород и некондиционных руд, а коэффициент рудоносности изменяется от 0,6 до 0,9. Распределение урана в контурах рудных тел неравномерное.

Для месторождений третьего промышленного типа установлен следующий комплекс поисковых критериев:

1) расположение рудных полей и месторождений в пологих прогибах, выполненных вулканогенно-пирокластическими образованиями преимущественно кислого состава;

2) проявления многофазного гранитоидного магматизма поздних стадий геосинклиального развития обязательно в эффузивной, субвулканической и интрузивной формах;

3) пространственная связь рудных полей и месторождений с экзоконтактовыми зонами гранитоидных интрузивов, прорывающих толщи вулканогенно-пирокластических пород;

4) контроль оруденения крупными трещинами, отражающими положение глубинных разломов в породах нижних структурных этажей, зонами малых интрузий и даек, контактами субвулканических интрузивов, горизонтами вулканогенных пород, обладающих оптимальной эффективной пористостью (трещиноватостью) и структурами древних вулканических аппаратов;

5) связь оруденения с зонами березитизации или гидротермальной аргиллизации вмещающих пород.

При поисках урановых месторождений этого типа первостепенное значение приобретает детальное геологическое картирование, позволяющее по положению экструзивных и субвулканических образований наметить и проследить положение древних рудоконтролирующих разломов.<sup>1</sup>

Запасы урана на месторождениях составляют сотни или первые тысячи тонн. Отдельные рудные тела и месторождения в пределах рудных полей располагаются группами, образуя в общей сложности крупные по запасам объекты, имеющие важное промышленное значение.

#### § 5. Месторождения четвертого промышленного типа.

##### Пласто- и штокообразные залежи урановых и железо-урановых руд в метасоматически измененных древних метаморфических породах

Месторождения данного промышленного типа залегают в метаморфических породах докембрийского возраста в пределах древних щитов и иногда приурочены к региональным зонам высокотемпературного натрового метасоматоза. Характерной особенностью геологического строения месторождений является отсутствие зависимости от крупных дизъюнктивных нарушений. Положение их определяется главным образом пликативной тектоникой и во многом зависит от состава вмещающих пород. Месторождения приурочены к участкам резкого изгиба региональных складчатых структур, а для рудоотложения наиболее благоприятными являются складчатые деформации второго и высшего порядков или сложные узлы сочетания складчатых и разрывных нарушений.

Формирование руд происходило путем избирательного замещения урановыми минералами материала вмещающих пород, что объясняет влияние состава пород на распределение оруденения. Известны месторождения подобного типа в железистых роговиках, в углистых и кремнистых доломитизированных сланцах, в метаморфизованных песчаниках, в хлоритизированных гранитах. По составу среди месторождений этого типа выделяются собственно урановая, железо-урановая и медно-урановая рудные формации.

Наибольший интерес представляют месторождения железо-урановой формации, залегающие в осадочно-метаморфических породах

протерозойского возраста. Характерной чертой их геологического строения является интенсивное проявление метасоматических процессов. В формировании месторождения выделяют три стадии метасоматоза: железистый, натровый и углисто-магнезиально-кальциевый. Урановое оруденение связано главным образом с третьей (карбонатной) стадией. Ранние стадии метасоматоза проявились в интенсивном околорудном изменении вмещающих пород с образованием таких минералов, как куммингтонит, магнетит, альбит, эгирин. В заключительные стадии метасоматического процесса сформировались урано-карбонатные и кварц-сульфидные жилы.

Урановое оруденение в виде тонко рассеянной вкрапленности сравнительно равномерно распределено в контуре рудного тела. Первичные урановые минералы представлены в основном настураном и уранинитом, реже встречаются браннерит, ненадкевит, циртолит и малакон.

Вопрос о генезисе железо-урановых месторождений до сих пор является предметом дискуссий. Одни исследователи рассматривают их как осадочно-метаморфогенные образования, другие — связывают их образование с деятельностью гидротермальных растворов. Вторая точка зрения представляется более убедительной. Она подтверждается пространственной связью уранового оруденения с интрузиями кислых гранитов и мигматитов, наличием в урановых рудах таких типоморфных элементов-спутников, как бериллий, олово, серебро, которые присутствуют в гранитах и мигматитах и не обнаружены в железных рудах, и возрастом гранитов, близким к возрасту уранового, оруденения.

На железо-урановых месторождениях по составу выделяются мартит-гидрогематитовые, амфибол-магнетитовые, урансодержащие карбонатно-гематитовые руды и бурые железняки. Наибольший интерес представляют амфибол-магнетитовые руды, которые образуют

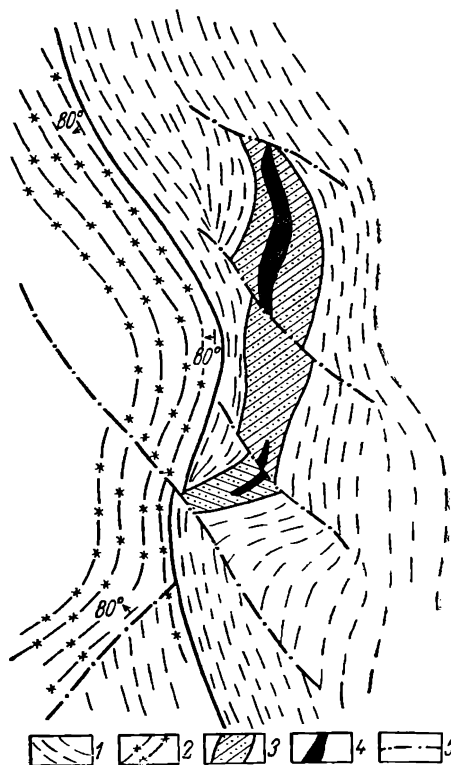


Рис. 13. Схематическая геологическая карта месторождения. Рудные тела приурочены к перегибу крыла складки  
 1 — хлорит-биотитовые сланцы; 2 — амфибол-магнетитовые роговики; 3 — амфибол-гематит-магнетитовые руды; 4 — урановые руды; 5 — тектонические нарушения

пластообразные, линзообразные и столбообразные метасоматические рудные тела, залегающие согласно с вмещающими породами. Урансодержащие карбонатно-гематит-магнетитовые рудные залежи обычно повторяют форму железорудных тел и залегают согласно с ними. Амфибол-магнетитовые рудные залежи приурочены к замковым частям изгибов и представляют собой линзообразной формы тела, залегающие согласно с вмещающими породами (рис. 13). В некоторых случаях рудовмещающими структурами являются и разрывные нарушения, однако они не контролируют положение основных промышленных залежей.

Контакты урансодержащих карбонатно-магнетитовых рудных тел с железорудными залежами обычно нечеткие. Однако на отдельных участках, где положение контакта совпадает с тектоническими рудными нарушениями, которые экранировали распределение уранового оруденения, контакты рудных тел четкие, тектонические. Метасоматические контакты характеризуются постепенным уменьшением содержания урана, и контуры таких рудных тел определяются только по данным опробования.

Крупные рудные тела имеют пластообразную форму, более мелкие — трубо-, жило-, штоко- и линзообразную. По составу выделяются силикатные, железисто-карбонатные и карбонатные руды.

Для месторождений четвертого промышленного типа наиболее характерны следующие поисковые критерии:

1) тесная пространственная связь уранового оруденения с зонами гранитизации или высокотемпературного натрового метасоматоза (метасоматически измененные пегматоидные граниты, альбититы, зоны окварцевания и апатитизации);

2) согласное положение рудных залежей с элементами залегания метасоматически измененных гнейсов, кристаллических сланцев и мигматитов;

3) контроль оруденения зонами послынных срывов, элементами складчатой тектоники и отсутствие четких связей оруденения с секущими тектоническими нарушениями.

По масштабу запасов эти месторождения средние и крупные.

## § 6. Месторождения пятого промышленного типа.

**Сложные пластообразные залежи и штокверки урановых руд в песчано-глинистых и углистых толщах осадочно-метаморфических пород**

Осадочно-метаморфические образования, в которых залегают месторождения пятого промышленного типа, представляют собой отложения средних стадий развития древних геосинклиналей. Продуктивные толщи представлены слюдисто-глинистыми, углисто-кремнистыми и углисто-глинистыми сланцами с прослоями карбонатных пород. Углистые сланцы обогащены органическим веществом и рассеянным пиритом, что придает им черную окраску.

Рудовмещающие толщи несут отчетливые следы регионального метаморфизма, смяты в складки и разбиты на блоки разломами различных направлений. Для пород продуктивной толщи характерна повсеместная зараженность их ураном.

В одном из наиболее крупных месторождений этого типа оруденение распределено в стратиграфическом разрезе многоярусно, а общая мощность рудовмещающей толщи составляет десятки метров. Большая часть запасов урана концентрируется в продуктивном горизонте углисто-глинистых и глинисто-кремнистых сланцев.

Положение месторождений в рудном поле во многом определяется особенностями развития складчатых и разрывных деформаций. Особо благоприятными для локализации оруденения являются участки переклиналивого замыкания антиклиналей. Внутри этих участков большинство рудных тел размещается в блоках сильно трещиноватых пород, разбитых системой послескладчатых разрывных нарушений.

Для месторождений данного типа довольно четко проявляется стратиграфо-литологический контроль оруденения. Сущность литологического контроля сводится главным образом к влиянию физико-механических и химических свойств вмещающих пород. Прочные породы являются наиболее хрупкими и под действием нагрузок в них возникает система трещин, создающая благоприятные условия для циркуляции рудоносных растворов. Среди карбонатных пород наиболее благоприятными для локализации оруденения являются доломитовые глинистые мергели, а чистые доломиты и известняки не несут уранового оруденения. Кроме того, наблюдается тесная пространственная связь уранового оруденения с породами, обогащенными рассеянным органическим веществом.

Большая часть руд характеризуется рассеянным невидимым оруденением, реже наблюдаются урановые минералы в виде настурана, коффинита (?) и урановых черней. В процессе метаморфизма происходило перераспределение урана из первичных минералов, что привело к образованию многочисленных мелких скоплений и прожилков, выполненных кварцем, карбонатом с сульфидами и настураном. На месторождениях подобного типа устанавливается прямая корреляционная зависимость в распределении урана, молибдена, ванадия, хрома, углерода, никеля, кобальта и меди. Состав типоморфных элементов-спутников определяется составом вмещающих пород и используется при проведении геохимических поисков и металлотометрической съемки.

Рудные тела имеют форму гнезд и линз со сложными неправильными контурами в плане и в разрезе. Контакты рудных тел с вмещающими породами нечеткие и устанавливаются только по данным опробования. Обычно длина рудных тел измеряется десятками и сотнями метров при мощности до нескольких десятков метров. Морфология их определяется сочетанием благоприятных складчатых структур с разрывными нарушениями (шарниры и флексурные изгибы складок, мелкие послонные срывы, зоны брекчирования

и милонитизации и т. д.). В зависимости от структурной обстановки рудные тела могут иметь форму пластообразных седловидных уплотненных линзовидных залежей или вытянутых маломощных рудных тел жильного типа.

Между жильными и пластовыми рудными телами наблюдаются постепенные переходы от мелких рудных гнезд жильного типа к пластообразным рудным телам со сравнительно выдержанным распределением урана и более низким содержанием его.

По поводу генезиса месторождений подобного типа в процессе их разведки и отработки возникали самые разнообразные гипотезы. В различное время их относили к осадочно-сингенетическому, осадочно-эпигенетическому, инфильтрационному, гидротермальному и осадочно-метаморфогенному генетическим типам. В настоящее время первые три гипотезы отпали и продолжают дискутироваться две последние. Гипотеза об осадочно-метаморфическом происхождении месторождений данного типа основана на следующем фактическом материале:

1) промышленные скопления урана локализованы в продуктивной толще, обогащенной ураном в процессе седиментации и диагенеза;

2) наблюдается прямая корреляционная связь урана с такими элементами осадочной толщи пород, как углерод, молибден и ванадий.

3) имеются реликты органических соединений урана в рудных черных сланцах.

Предполагается, что в процессе седиментогенеза происходило накопление тонкозернистых осадков и обогащение их ураном, ванадием, молибденом и другими элементами. В стадии диагенеза уран сорбировался на органическом веществе, а при распаде органических остатков образовались ураноорганические соединения. В карбонатных породах уран сорбировался на глинистом веществе. В процессе низкотемпературного регионального метаморфизма происходила мобилизация и перераспределение урана вдоль разрывных нарушений и вдоль зон повышенной трещиноватости, при этом образовывались небольшие скопления богатых контрастных руд.

Наиболее существенными поисковыми критериями для месторождений пятого промышленного типа являются:

1) контроль оруденения горизонтами метаморфизованных углесто-глинистых сланцев и подстилающих их карбонатных пород. Внутри рудовмещающих горизонтов оруденение контролируется послыжными нарушениями, зонами брекчирования, милонитизации и шарнирами складок;

2) широкий ореол повышенных концентраций урана в органическом веществе вмещающих оруденение пород далеко за пределами месторождений.

По запасам эти месторождения средние и крупные.

## § 7. Месторождения шестого промышленного типа.

### Пласто- и линзообразные залежи урановых руд в метаморфизованных конгломератах

Типичными представителями данного типа являются месторождения Витватерсранд в Южно-Африканской Республике и месторождение Блайнд-Ривер в Канаде. Они приурочены к протерозойским образованиям и залегают в краевых прогибах древних геосинклинальных зон или в приплатформенных парагеосинклинальных областях. В этих месторождениях сосредоточено около половины всех мировых запасов урана.

Поля развития ураноносных конгломератов прослеживаются на больших площадях и характеризуются многоярусным залеганием. Продуктивная толща приурочена к основанию верхнего структурного этажа, породы которого трансгрессивно залегают на древнем складчатом основании. Месторождения представлены несколькими горизонтами плотных метаморфизованных конгломератов, залегающих в мощной толще допалеозойских кварцитов. Наиболее благоприятными для ураноносных конгломератов являются синклинальные структуры.

Конгломераты состоят из кварцевой гальки, цементированной тонкозернистой смесью кварца с пиритом, серицитом, хлоритом и пирофиллитом. Среди рудных минералов резко преобладает пирит, составляющий до 20% цементирующего материала. В ассоциации с ним отмечены небольшие количества и других сульфидов, таких как халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин и др. В конгломератах встречаются типичные минералы россыпей: циркон, рутил, ильменит, хромит, монацит, касситерит.

В африканских и канадских конгломератах имеются и некоторые различия в составе рудных минералов. На месторождении Витватерсранд основным промышленным минералом является золото, а содержание урана не превышает первых сотых долей процента. Главными урановыми минералами здесь являются уранинит, урановая смолка и тухолит; с ними ассоциируют арсенопирит, линнеит, магнетит, миллерит, эвксенит, лейкоксен, ксенотим.

На месторождении Блайнд-Ривер основная масса урана представлена браннеритом, уранинитом и урансодержащим монацитом; золото практически отсутствует, а руды по составу являются ураноториевыми с повышенным содержанием редких земель. Содержание урана в рудах значительно выше — около 0,1% (на отдельных участках до 1,5%), он имеет здесь значение главного промышленного элемента. В ассоциации с браннеритом находятся гематит, молибденит и ураноторит. Рудные минералы образуют тонкие прожилки, встречаются в виде зерен неправильной формы или выполняют межзерновые пространства среди других минералов цемента.

Урановое оруденение и золото концентрируются в базальных горизонтах продуктивных толщ. В плане распределение уранового оруденения в пределах отдельных пластов тоже неравномерное:

отдельные рудные залежи группируются в рудоносные зоны, ширина которых достигает первых километров, а длина по простиранию — десятков километров. Размеры отдельных рудных залежей измеряются десятками и сотнями метров. Внутреннее строение их весьма сложное, распределение оруденения неравномерное, контуры рудных залежей определяются только по результатам опробования. Поэтому и морфология их будет во многом зависеть от величины установленного бортового содержания. Там, где уран развивается вместе с золотом, корреляции между ними не существует, что еще больше осложняет оконтуривание рудных залежей. Обычно мощности рудных залежей измеряются первыми метрами. В пределах одного пласта конгломератов часто выделяется несколько кулисообразных залежей, которые представляют собой сложное чередование линз конгломератов, кварцитов и аркозов, причем мощности отдельных конгломератовых линз изменяются от 0,3 до 0,9 м. Таким образом, строение рудных горизонтов является довольно сложным, состав их и содержание полезного компонента изменяются даже на небольшом расстоянии. В зависимости от минерального состава содержание урана изменяется как по мощности, так и по простиранию залежи. Строгой зависимости между содержанием металла и мощностью рудного тела нет, однако установлена зависимость содержания урана от состава пород. Как правило, оно повышается при увеличении сгруженности галек в конгломерате. В породах с меньшим количеством галечного материала, в аркозах, содержание урана снижается.

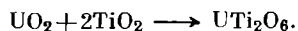
Приуроченность урановых минералов и золота к нижним частям конгломератовых пластов дало основание некоторым исследователям считать данные месторождения древними метаморфизованными россыпями. Однако, как и для месторождений предыдущего типа, по поводу генезиса этих месторождений существовали различные точки зрения. В настоящее время господствуют две гипотезы об условиях образования месторождений в древних конгломератах — гидротермальная и осадочно-метаморфогенная.

Согласно гидротермальной гипотезе образование всех рудных минералов — золота, урановых и сульфидов — связывается с воздействием горячих магматических растворов. Эта гипотеза основывается на сходстве данных руд с рудами гидротермальных месторождений, на явно эпигенетических формах выделения настурана, тухолита, золота и сульфидов, а также на неустойчивости уранинита как минерала россыпей.

Сторонники осадочно-метаморфогенного происхождения считают, что первоначальное накопление всех рудных компонентов происходило гравитационным путем, причем браннерит, тухолит, настуран и золото в их современной форме возникли в процессе регионального метаморфизма. Это подтверждается окатанностью зерен уранинита, тесной пространственной ассоциацией урановых минералов с типичными минералами россыпей, локализацией рудных залежей в отдельных стратиграфических горизонтах. Явления метаморфизма



проявились в образовании таких минералов, как браннерит, тухолит и настуран. Браннерит, по мнению П. Рамдора, мог образоваться в процессе взаимодействия уранинита и рутила в обстановке высоких температур и давления по схеме:



Тухолит образовался в результате частичного замещения уранинита углеводородами, а настуран — в результате растворения и переотложения уранинита.

Постоянная связь урана с торием тоже противоречит гидротермальной гипотезе и подтверждает положение о «россыпном» происхождении месторождений. Таким образом, по совокупности известных геологических факторов осадочно-метаморфогенная гипотеза представляется более убедительной.

Для месторождений шестого промышленного типа установлены следующие поисковые критерии:

1) контроль положения рудных залежей в базальных горизонтах продуктивных толщ депрессиями фундамента и древними русловыми каналами;

2) приуроченность уранового оруденения к определенным стратиграфическим горизонтам;

3) связь урановой минерализации с кварцевыми конгломератами и аркозами. Повышение содержаний урана с увеличением количества галечного материала.

По запасам эти месторождения крупные.

## § 8. Месторождения седьмого промышленного типа.

### Пластовые залежи ураноносных глин с костными остатками ископаемых рыб

Месторождения приурочены к синклиналильным структурам, сложенным осадочными отложениями платформенного типа, формировавшимися в мелководных морских условиях. Рудные залежи локализуются в пологих депрессиях морского дна, поверхность которого несет следы продольного размыва. Положение оруденения четко контролируется определенными стратиграфическими горизонтами, представленными песчано-глинистыми осадками шельфовой зоны. Они отличаются выдержанностью на значительных площадях, измеряемых первыми десятками километров, и включают маломощные прослои темных ураноносных глин, обогащенных костным детритом ископаемых рыб, чередующихся с безрудными прослоями светлых глин. Уран связан с фосфатизированными остатками скелетов и чешуи рыб.

Руды представлены скоплениями фосфатизированных костных остатков рыб, сцементированных пирит-мельниковитом, глинистыми минералами и карбонатами (кальцитом и доломитом). В подчиненных количествах также присутствуют обломки обуглившихся растительных остатков, кварц, полевые шпаты, целестин, глауконит, биотит, ильменит, магнетит, барит, ставролит, циркон, рутил, апатит, анатаз,

эпидот, мусковит, хлорит, опал, халцедон, турмалин, сфалерит, топаз. Соотношения главных компонентов следующие: минералы глин с опалом и халцедоном 50%, пирит-мельниковит до 30%, костные остатки 15—20%, карбонаты — от первых процентов до 20%.

Костные остатки различных частей скелета и покровных частей рыб и морских животных состоят из неорганической части в виде фосфата кальция; органическая часть костей сохранилась в очень небольших количествах. Наилучшей сохранностью отличаются зубы, позвонки, в меньшей степени ребра. Плавники, чешуя, челюстные и плоские кости головы сохранились в основном в виде мелких осколков. Ориентировка костных остатков преимущественно горизонтальная, в плоскости слоистости глин, а размер их изменяется от сотых долей миллиметра до 5 см (преобладает размер 0,05—0,5 мм). Крупные костные остатки встречаются редко и представлены чаще всего позвонками и ребрами.

Поры и пустоты в костных остатках выполнены карбонатом и пирит-мельниковитом. Окраска остатков изменяется от темно-бурой до светло-бурой или коричневой. Темная окраска обусловлена включениями пирит-мельниковита и магнетита, а бурая присутствием костной органики.

Наряду с ураном и фосфором с костными остатками в сорбированной форме находятся редкие земли цериевой группы. В контурах уранового оруденения содержатся также пирит-мельниковит и в незначительных концентрациях молибден, никель и кобальт. Содержание фосфора в рудах колеблется в пределах 6—12%.

Образование месторождений происходило в несколько этапов. На стадии седиментогенеза накапливались костные остатки различных видов рыб. Отсутствие целых скелетов рыб, раздробленность костных остатков и их частичная окатанность указывают на последующий размыв и перестроение продуктивных слоев. Присутствие в рудосносных породах остатков древесины свидетельствует о накоплении осадков в прибрежной шельфовой зоне морского бассейна.

Урановое оруденение формировалось главным образом в две стадии: в седиментационную и диагенетическую. В первую происходило накопление костного детрита и частичное осаждение урана в результате сорбционных процессов. В стадию диагенеза накопление урана продолжалось еще более интенсивно. Этому способствовало установление восстановительных условий в придонной среде и длительное существование морского режима.

Залежи ураноносных глин с костными остатками относятся к группе рудных тел, залегающих согласно с напластованием вмещающих пород и занимающих в разрезах продуктивных свит строго определенное положение. Рудные залежи обычно выдержаны по простиранию на значительных площадях, форма их в плане лентообразная или изометрическая. Длина рудных залежей измеряется километрами, а ширина составляет последние сотни метров — первые километры.

В разрезе рудных залежей наблюдается один или несколько сближенных рудных пластов, разделенных пачками безрудных или слабо оруденелых глин. Мощности рудных залежей варьируют в пределах первых метров. Характерно, что как рудные пласты, так и пачки безрудных или слабо оруденелых глин имеют переменную мощность. Распределение урана в контурах рудных залежей довольно равномерное. Контакты рудных пластов с вмещающими породами в одних случаях четкие, устанавливаются визуально, в других постепенные и устанавливаются только по данным радиометрического опробования.

Для месторождений седьмого промышленного типа установлены следующие поисковые критерии:

- 1) приуроченность уранового оруденения к определенным стратиграфическим горизонтам песчано-глинистых отложений мелководных морских бассейнов;
- 2) темная окраска глинистых слоев, обогащенных костными остатками, вследствие высокого содержания в них тонкорассеянного пирита и мельниковита;
- 3) широкий площадной ореол повышенной концентрации фосфатизированных костных остатков в горизонте продуктивных глин;
- 4) приуроченность месторождений к склонам мелких антиклинальных поднятий, сформированных одновременно с накоплением рудоносных осадков.

По запасам месторождения данного промышленного типа относятся к средним и крупным.

### § 9. Месторождения восьмого промышленного типа. Пластовые залежи и линзы ураноносных песчаников и углей в континентальных отложениях

Урановые месторождения данного промышленного типа широко распространены в различных районах земного шара и имеют значительный удельный вес в общем балансе добычи урана. Рудные поля и месторождения приурочены к краевым частям межгорных или предгорноравнинных впадин, выполненных горизонтально залегающими или слабо дислоцированными осадочными породами. Формирование месторождений связано с отложением урана из низкотемпературных нисходящих подземных вод в породах, обладающих повышенной восстановительной емкостью. Поэтому положение рудных залежей определяется как литологическим составом осадочных пород, так и величиной окислительно-восстановительного потенциала. Месторождения подобного типа называют инфильтрационными. По составу пород рудовмещающей толщи выделяются две разновидности месторождений:

- 1) месторождения ураноносных песчаников и гравелитов, обогащенные сульфидами железа и углефицированными растительными остатками, в аллювиальных и дельтовых отложениях;
- 2) месторождения ураноносных углей в песчано-глинистых толщах.

Месторождения ураноносных песчаников и гравелитов по масштабу запасов и добыче урана значительно превышают месторождения ураноносных углей.

Положение экзогенного уранового оруденения определяется стратиграфическими, литолого-фациальными факторами, а также направлением и скоростью движения подземных вод. Четкий стратиграфический контроль оруденения проявляется в приуроченности месторождений к определенным крупным стратиграфическим единицам в общем разрезе осадочных отложений. В пределах продуктивных стратиграфических горизонтов рудные залежи располагаются многоярусно и ограничиваются кровлей и почвой благоприятных в литологическом отношении пластов.

Месторождения ураноносных песчаников и гравелитов обнаруживают тесную пространственную связь с русловыми отложениями, выполняющими древние эрозионные каналы, или приурочены к отложениям, формировавшимся в аллювиальноравнинных условиях осадконакопления. В комплексе этих отложений нередко выделяются фации речных потоков, которые и контролируют расположение рудных тел в плане.

С факторами фациального контроля оруденения тесно связываются и литологические, так как общность фациальной обстановки накопления рудоносных пород (русловые отложения) накладывает определенные черты и на литологические особенности пород. Рудомещающими породами являются средне- и крупнозернистые песчаники, а также гравелиты. Среди минералов песчаников резко преобладает кварц и обязательно присутствует мусковит, характерно наличие углефицированных растительных остатков, которые в некоторых случаях являются главными агентами осаждения урана.

Урановое оруденение формируется в результате окислительно-восстановительных процессов, протекающих на границе выклинивания межпластовых зон окисления. Ведущая роль окислительно-восстановительных реакций в процессах эпигенетического рудообразования урана в осадочных породах с органическим веществом подтверждается анализом природных условий, экспериментальными данными и термодинамическими расчетами. Осаждение и накопление урана в осадочных породах в результате восстановления можно считать общей чертой геохимических условий образования месторождений данного промышленного типа. Очевидно, что общей чертой является также привнос урана в шестивалентном состоянии в виде уранил-иона разбавленными водными растворами.

В плане зоны межпластового окисления обычно напоминают глубокие заливы и прослеживаются по падению на первые десятки километров при ширине от первых до десяти километров. Мощности интервалов окисления пород достигают десятков метров.

Промышленные концентрации урана локализуются на контакте окисленных и неокисленных пород. Ширина промышленно ценной полосы руд зависит от многих причин, основными из которых являются литологический состав вмещающих пород и структурные

особенности отдельных участков. В плане эта полоса напоминает ленту, повторяющую контур линии выклинивания зоны межпластового окисления, протяженность которой достигает первых десятков километров. В пределах полосы наблюдаются своеобразные рудные

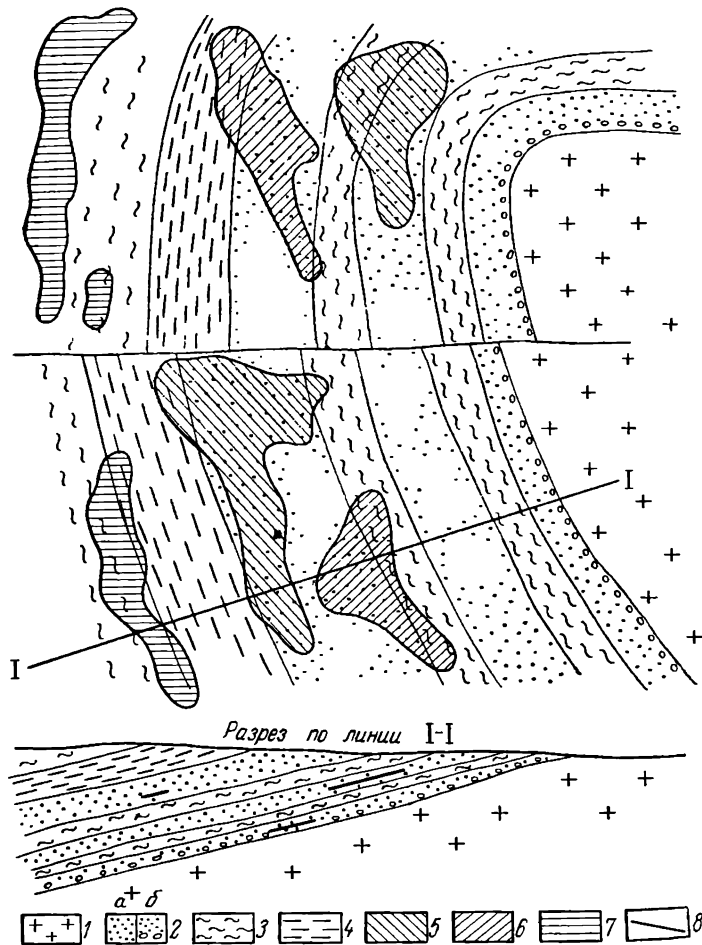


Рис. 14. Схематическая геологическая карта месторождения с проекциями рудных тел на горизонтальную плоскость

1 — граниты; 2 — песчаники (а) и песчаники с конгломератами (б); 3 — глины; 4 — алевриты; 5, 6, 7 — рудные тела соответственно нижнего, среднего и верхнего рудоносных горизонтов; 8 — рудные тела в разрезе

тела, известные в литературе под названием «роллов», которые залегают в целом согласно с вмещающими породами (рис. 14).

В роллах различают следующие их составные части (рис. 15):

а) нижнее крыло, располагающееся в подошве зоны межпластового окисления на границе окисленных и неокисленных пород;

*a*

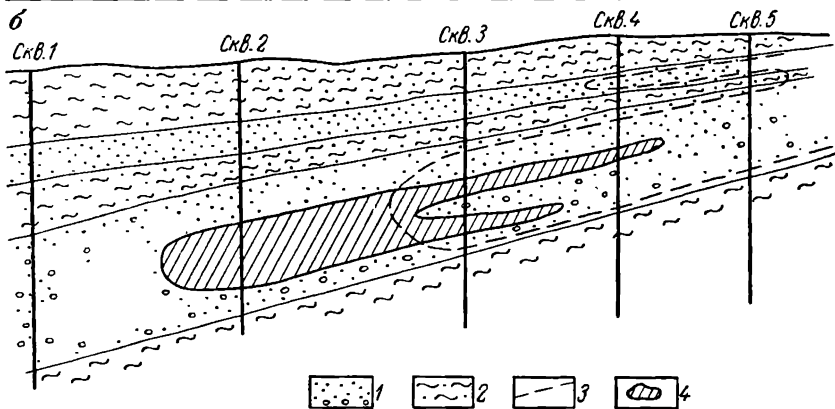
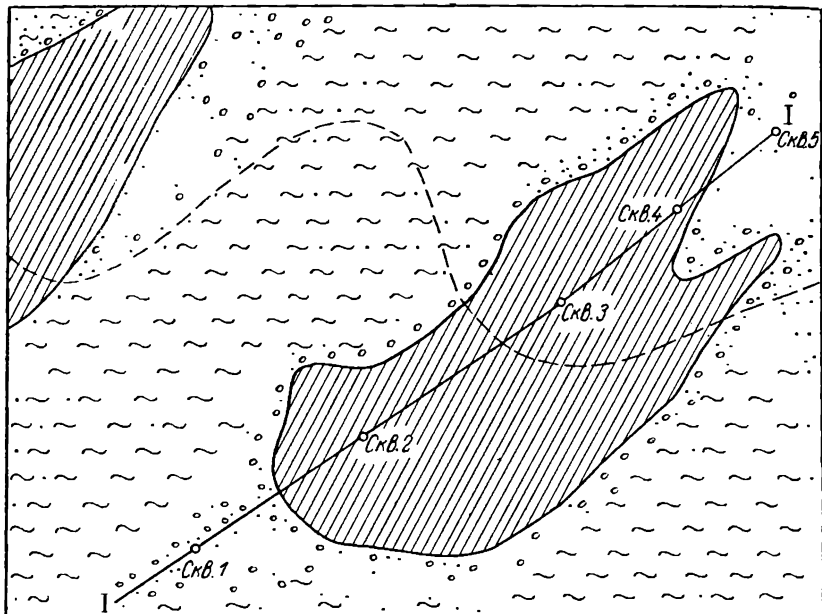


Рис. 15. Строение ролла:

*a* — разрез в плоскости рудоносного пласта; *б* — вертикальный разрез по линии I—I  
1 — конгломераты и песчаники; 2 — глинистые песчаники; 3 — граница зоны межпластового окисления; 4 — рудное тело

б) верхнее крыло, располагающееся в верхней части этой зоны;  
 в) мешковую часть, располагающуюся за линией выклинивания зоны межпластового окисления и образовавшуюся в результате смыкания верхнего и нижнего крыльев.

Формы и размеры рудных роллов контролируются линией выклинивания межпластовой зоны окисления, конфигурация поперечного сечения которой в свою очередь зависит от литологического состава пород рудовмещающей пачки. В плане роллы образуют лентообразные тела протяженностью по падению от первых сотен до первых тысяч метров при ширине первые сотни метров. Мощности роллов изменяются от первых десятков сантиметров до первых метров.

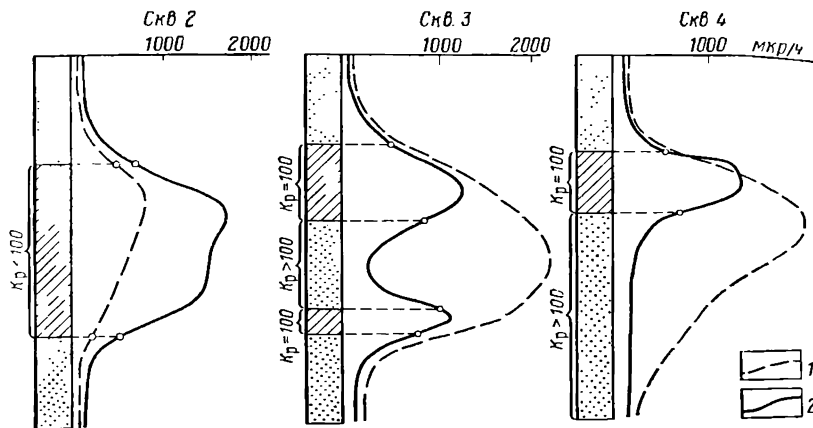


Рис. 16. Колонки рудных интервалов по скважинам (см. рис. 15)

1 — фактические кривые гамма-каротажа; 2 — кривые гамма-каротажа после внесения поправок за смещение радиоактивного равновесия

Увеличения концентрации урана и мощности характерны для мешковых частей роллов. Если инфильтрация и перераспределение урана происходит и в настоящее время (или закончилось в недавнем прошлом), то в различных участках рудных тел наблюдаются резкие смещения радиоактивного равновесия в рудах. В нижних, мешковых, частях рудных тел смещение радиоактивного равновесия наблюдается в сторону недостатка Ra ( $K_p < 1$ ), а в верхних выщелоченных породах — в сторону избытка его ( $K_p > 1$ ). В промежуточных участках рудных залежей радиоактивное равновесие может быть смещено как в ту, так и в другую сторону в зависимости от локальных рудоконтролирующих факторов (рис. 16). Это обстоятельство значительно усложняет, а иногда и вообще исключает возможность применения радиометрического опробования при поисках и разведке молодых или современных месторождений.

Руды большинства месторождений являются комплексными и помимо урана содержат также ванадий, медь, селен, а в незначительных количествах кобальт, никель, свинец, молибден. В зависимости от соотношения главных компонентов в месторождениях по веществ-

венному составу могут быть выделены следующие типы руд: собственно урановые; ванадиево-урановые с отношением  $V_2O_5$  к  $U_3O_8$ , равным (1—20) : 1; ванадиевые урансодержащие с отношением ванадия к урану, равным (20—40) : 1; медно-урановые; урано-селеновые.

Руды сложены урановой смолкой, урановыми чернями, коффеинитом, карнотитом, тюмунитом, ванадатами кальция, монтрозитом, халькопиритом, борнитом, халькозином, самородным селеном, а также второстепенными минералами: пиритом, галенитом, сфалеритом, герсдорфитом, шмальтином. Из нерудных иногда в незначительном количестве присутствуют карбонаты, барит, гипс, флюорит, цеолиты. Рудные минералы вышлеивают поры, импрегнируют или замещают цемент и часто тесно связаны с углефицированными растительными остатками и тонкорассеянным органическим веществом.

Месторождения ураноносных углей локализуются главным образом в лимнических бассейнах молодых платформ и особенно межгорных впадин складчатых поясов.

Промышленные концентрации урана наблюдаются только в слабо метаморфизованных каменных, бурых углях или лигнитах мезозойского и более молодого возраста, в то время как угли древнего возраста, представленные антрацитами или сильно метаморфизованными разностями каменных углей, содержат уран в крайне незначительных количествах.

В лимнических бассейнах угленосные формации, как правило, залегают несогласно, часто после значительного континентального перерыва, на более древнем складчатом фундаменте. Они обычно формируются в условиях аллювиальных равнин, озер и болот и представлены грубообломочными осадками, чередующимися с глинисто-алевролитовыми угленосными фациями. Иногда существенную роль в их строении играют эффузивно-осадочные породы и пирокластический материал. Обычно отдельные горизонты осадочных пород и пласты углей характеризуются фациальной неустойчивостью по падению и простираанию и частыми сменами одних разновидностей пород другими; широко развиты также седиментационные несогласия и внутриформационные размывы.

Выделения урановых минералов в угленосных отложениях встречаются редко. Лишь в некоторых случаях при микроскопических исследованиях были установлены урановая смолка и урановые черни, которые нередко окаймляют конкреции пирита и марказита. По-видимому, преобладающее количество урана связано непосредственно с органическим веществом углей, возможно в форме ураноорганических комплексов. В приповерхностных выходах отмечаются вторичные урановые минералы, ассоциирующие с гипсом и кальцитом, представленные циппейтом, шрекингеритом, отенитом, метацейнеритом, уранопилитом, уранофаном и др.

Кроме урана угленосные пласты иногда содержат незначительные количества молибдена, ванадия, редких земель, галлия, германия, селена, бериллия, которые могут быть предметом попутной до-



бычи. В связи с этим некоторые месторождения в угленосных отложениях могут рассматриваться как комплексные. При разработке ураноносных углей главным полезным компонентом является уран, а уголь используется попутно как местное энергетическое сырье.

В плане рудные залежи имеют неправильную или лентообразную форму и приурочены к горизонтам углей, углистых глин, а также алевролитов и песчаников, обогащенных углистым материалом. Оруденение часто бывает многоярусным, т. е. связанным с различными стратиграфическими горизонтами.

Содержание урана в угольных пластах весьма изменчиво как по падению и простиранию, так и по мощности. Нередко оруденение переходит из угольного пласта во вмещающие песчаники, в связи с этим контуры ураноносных залежей могут быть установлены только по данным опробования.

Для месторождений восьмого промышленного типа наиболее характерны следующие поисковые критерии:

1) фациальная неустойчивость вмещающих пород, представленных континентальными или дельтовыми отложениями;

2) наличие хорошо фильтрующих прослоев гравелитов или песчаников (древних русловых отложений), перемежающихся с песчано-глинисто-алевролитовыми горизонтами, обогащенными дисульфидами железа, органическими остатками или прослоями бурых углей;

3) развитие зон межпластового окисления в виде лимонитизации вмещающих пород;

4) связь рудных залежей с фронтом зоны межпластового окисления на участках повышенной фильтрационной способности продуктивных свит.

По запасам эти месторождения средние и крупные.

## § 10. Месторождения девятого промышленного типа.

### Залежи ураноносных битумов в песчано-глинистых и карбонатных породах

Месторождения приурочены к платформенным отложениям в куполовидных центральных частях межгорных и предгорных депрессий. Благоприятными для рудоотложения являются участки, испытавшие сложные разрывно-складчатые деформации в сводах и крыльях соляных, нефтегазоносных куполов и антиклинальных складчатых структур второго и третьего порядков. Подобные складчатые сооружения в совокупности с трещинной тектоникой создавали благоприятные условия для проникновения и разгрузки холодных и термальных ураноносных растворов, поднимавшихся из глубин в приповерхностную зону по каналам трещинного типа. Подземные воды, проникая в нефтяные залежи, разрушали их, превращая нефть в асфальтоподобные вещества. Последние, в свою очередь, способствовали отложению урана из растворов. В отличие от месторождений предыдущего типа здесь возрастает рудоподводящая роль разрывных нарушений, благоприятными для рудоотложения явля-

ются не пологозалегающие пласты, а антиклинальные структуры и куполовидные поднятия.

Месторождения ураноносных битумов сравнительно широко распространены и известны уже давно, однако выделение их в самостоятельный промышленный тип стало возможным после выявления крупного месторождения Амброзия-Лейк в США.

Большинство залежей ураноносных битумов расположено в нефтегазоносных районах и урановое оруденение пространственно тяготеет к скоплениям нефти или приурочено к соляным куполам. Однако известны ураноносные битумы и в удалении от нефте- и газоносных районов. Вмещающие породы представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами, известняками и доломитами. Наиболее благоприятными для рудоотложения являются породы, обладающие повышенной пористостью и содержащие органику или другие компоненты, способствующие отложению урана.

Формированию урановых месторождений предшествовало накопление битумов в благоприятных структурных ловушках: в антиклинальных структурах, в нефтегазоносных и соляных куполах, в диапировых складках. Битумы активно замещали прежде всего глинисто-карбонатный цемент песчаников, при более интенсивном проявлении процессов замещаются и обломочные зерна кварца и полевого шпата, реже встречаются самостоятельные секущие и послойные прожилки битумов. При отложении битумы реагировали с вмещающими породами и прежде всего с окисными соединениями железа. При этом битумы окислялись, а железо восстанавливалось до закисного и частично выносилось. В результате вмещающие породы около скоплений битумов всегда осветлены. Некоторые исследователи связывают осветление пород и полимеризацию битумов с воздействием ураноносных растворов. В результате окисления жидкие нефтяные битумы превращены в оксикериты и оксиантракосолиты. Окисленные кериты и антракосолиты часто называют общим термином «асфальтиты».

Кериты по химическому составу сходны с тощими каменными углями, а антракосолиты — это сильно метаморфизованные битумы, содержащие незначительное количество водорода и приближающиеся по составу к чистому углероду. Урансодержащие кериты и антракосолиты обладают смолистым блеском, повышенной хрупкостью и характерным раковистым изломом. Уран присутствует в них в виде тонкорассеянной вкрапленности урановой смолки и коффинита или образует ураноорганические комплексы. Обычно содержание урана в рудах находится в прямой зависимости от количества асфальтита.

Эпигенетические изменения вмещающих пород около рудных залежей проявляются весьма отчетливо и являются важным поисковым признаком. Они выражаются в повышении интенсивности их осветления по мере приближения к рудной залежи. По этому принципу выделяются отдельные зоны: неизменные красноцветные породы, зеленоцветные разности, сероцветные породы и максимально измененные обеленные породы. Изменение вмещающих пород свя-

зано с развитием вторичных процессов пиритизации, карбонатизации, окремнения, гидрослюдизации, каолинизации. Рудовмещающие породы отличаются повышенным содержанием общего и органического углерода, железа, серы и обладают более высокой восстановительной емкостью. Для всех измененных разностей характерно повышенное содержание пирита и марказита.

Залежи ураноносных битумов представлены в основном телами пластообразной, трубообразной и жильной формы мощностью от 0,3 до 30 м (в среднем 3,3 м). Содержание урана в асфальтитах изменяется от сотых долей процента до нескольких процентов, составляя в среднем 0,3—0,4%. Распределение уранового оруденения неравномерное, выделяются отдельные гнезда, разделенные участками пустых пород и некондиционных руд.

Наиболее характерными поисковыми критериями для месторождений девятого промышленного типа являются:

1) связь уранового оруденения с толщами битуминозных пород, обладающих повышенной фильтрационной способностью;

2) эпигенетические изменения продуктивных толщ в виде окварцевания и каолинизации. Отсутствие четких связей в положении рудных залежей и фронта зоны окисления;

3) четкий структурный контроль урановых залежей антиклинальными структурами, нефтегазонасытыми и соляными куполами. Преимущественное расположение рудных залежей в сводах, крыльях и периклинальных замыканиях антиклиналей, в зонах развития трещин разрыва и скалывания, в воронках обрушения соляных куполов и в скрытовулканических трубках взрыва.

По запасам эти месторождения мелкие, средние и крупные.

Помимо перечисленных промышленных типов небольшая часть урана добывается из месторождений других генетических типов либо попутно с разработкой других видов минерального сырья. Среди них следует отметить ураноносные гранитные пегматиты, гранатовые, актинолитовые или диопсидовые скарны с уранинитом, магнетитом и ортитом, урансодержащие морские песчаники и известняки, ураноносные фосфориты платформенного и геосинклинального типов, прибрежные монацитовые россыпи, при разработке которых уран добывается как побочный продукт.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Батулин С. Г., Головин Е. А. и др. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Атомиздат, 1965.

Данчев В. И., Лапциска Т. А. Месторождения радиоактивного сырья. Изд-во «Недра», 1965.

Евсеева Л. С., Фомпа Н. П., Кочетков В. И., Суражский Д. Я. К вопросу об условиях образования и классификации экзогенных эпигенетических месторождений урана. В сб. «Вопросы прикладной радигеологии». Атомиздат, 1967.

Каждан А. Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов. Изд-во «Высшая школа», 1966.

Котляр В. Н. Геология месторождений урана. Госгеолтехиздат, 1961.

Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. Атомиздат, 1960.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕГИОНАЛЬНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

## § 1. Ураноносные эпохи и провинции

Формирование урановых месторождений происходило в самые различные периоды геологической истории — от архея до четвертичного периода включительно. Еще сравнительно недавно считалось, что урановое оруденение на земном шаре приурочено главным образом к двум тектоно-магматическим циклам — протерозойскому и позднепалеозойскому. В настоящее время уже установлено шесть эпох эндогенного и пять эпох экзогенного рудообразования.

Формирование эндогенных, главным образом гидротермальных урановых месторождений происходило в среднепротерозойскую (2000—1900 млн. лет), позднерифейскую (700—600 млн. лет), раннепалеозойскую (500—400 млн. лет), позднепалеозойскую (300—200 млн. лет), юрскую (примерно 150 млн. лет) и меловую — неогеновую (90—10 млн. лет) эпохи. С двумя равными эпохами связано образование метасоматических месторождений четвертого промышленного типа и подавляющего большинства гидротермальных месторождений первого промышленного типа. В позднепалеозойскую эпоху сформировались жильные урановые месторождения второго и некоторые прожилково-вкрапленные месторождения третьего промышленного типа. Для раннепалеозойской и двух последних эпох характерно широкое развитие прожилково-вкрапленных месторождений третьего типа и гидротермальных месторождений первого промышленного типа.

Образование экзогенных — осадочных и инфильтрационных урановых месторождений происходило в позднепротерозойскую — рифейскую (800—600 млн. лет), раннепалеозойскую (500—400 млн. лет), позднепалеозойскую (300—200 млн. лет), юрско-меловую (150—70 млн. лет) и палеоген-неогеновую (30—10 млн. лет) эпохи. С наиболее древней из них связано формирование ураноносных конгломератов (шестой промышленный тип), а с раннепалеозойской эпохой — урановых месторождений в углисто-глинистых сланцах (пятый промышленный тип). На современный облик этих месторождений большое влияние оказали процессы последующего метаморфизма пород и руд, вследствие чего они классифицируются как метаморфогенные. В позднепалеозойскую и юрско-меловую эпохи образовалось большинство ураноносных песчаников, углей и битумов, которые относятся к месторождениям восьмого и девятого промышленных типов, а в палеогеновую эпоху — ураноносные глины (месторождения седьмого промышленного типа).

В соответствии с новыми представлениями о связи процессов уранового рудообразования с важнейшими тектоно-магматическими циклами в истории развития земной коры изменились и представления о продуктивности образований различных геологических эпох. Если до недавнего времени считалось, что ведущая роль в этом

отношении принадлежит протерозойской и позднепалеозойской эпохам, то сейчас потенциальная рудоносность остальных ураноносных эпох оценивается в сопоставимых с ними соотношениях.

Территории земного шара, в которых наряду с месторождениями других полезных ископаемых существенную роль играют месторождения урана, называются урановыми провинциями. В отличие от металлогенических провинций многих других видов минерального сырья, каждая урановая провинция характеризуется урановыми месторождениями не одного, а нескольких разновозрастных генетических и промышленных типов. Эта характернейшая особенность урановых провинций объясняется высокой подвижностью урана как в эндогенных, так и в экзогенных процессах, происходящих в верхних частях земной коры. Так, например, в пределах Западно-Европейской урановой провинции известны верхнепалеозойские ураноносные жилы и жильные зоны, нижнепалеозойские углисто-кремнистые сланцы, а также верхнепалеозойские и мезозойские инфильтрационные урановые месторождения в бурых углях и песчаниках. Подобного рода ассоциации разновозрастных эндогенных и экзогенных месторождений урана характерны и для других отечественных и зарубежных урановых провинций.

Характер металлогении (металлогенический фон) внутри каждой урановой провинции отражает особенности ее положения в региональных структурах, а также зависит от возраста и происхождения важнейших месторождений. Во многих докембрийских щитах гидротермальное урановое оруденение проявляется в тесной связи с железорудным, а в палеозойских и более молодых складчатых сооружениях — с редкометалльно-полиметаллическим, вольфрамово-оловянным, молибденовым или флюоритовым оруденением.

Для урановых провинций с широким развитием экзогенных месторождений характерна тесная связь урана с проявлениями ванадиевой, молибденовой и селеновой минерализации.

## § 2. Связь эндогенного уранового оруденения с региональными геологическими структурами

Металлогенические провинции с широким проявлением эндогенного уранового оруденения располагаются в складчатых областях или в пределах древних щитов, в районах развития гранитоидных магматических пород и интенсивной тектонической деятельности. Большинство исследователей подчеркивают тесную связь уранового оруденения с участками повышенной жесткости внутри или по окраинам складчатых зон, с краевыми частями щитов в областях сочленения их со складчатыми поясами или с зонами активизации древних щитов и платформ. Формирование урановых месторождений связано во времени с заключительными этапами геосинклинального развития подвижных поясов либо с последними стадиями тектоно-магматической активизации древних жестких массивов.

В зависимости от регионально-геологического положения выделяются следующие ураноносные районы:

- 1) в краевых областях древних щитов;
- 2) в складчатых обрамлениях и в периферических зонах древних кристаллических глыб;
- 3) внутри складчатых поясов в срединных массивах с отчетливым геосинклинальным режимом их развития;
- 4) в пределах активизированных щитов и платформ.

В краевых областях древних щитов преобладают месторождения урано-железистой и настуран-сульфидной формаций, относящиеся к первому и четвертому промышленным типам.

В складчатых обрамлениях древних кристаллических глыб находятся месторождения карбонатно-настурановой и кварц-настурановой формаций, к которым принадлежат многие месторождения второго промышленного типа.

К срединным массивам, представляющим собой блоки с отчетливым геосинклинальным режимом внутри подвижных поясов, приурочены месторождения третьего промышленного типа. Как правило, они относятся к настуран-молибденовой, реже к настуран-сульфидной рудной формациям.

В пределах активизированных платформ и щитов встречаются месторождения самых различных, в том числе настуран-молибденовой и урано-титановой рудных формаций, которые относятся к первому и третьему промышленным типам.

В региональных структурах многих урановых провинций выделяются крупные тектонические блоки, ограниченные зонами разломов глубокого заложения и длительного развития. Заложение этих разломов относится к начальным периодам развития складчатых поясов. Зонами таких разломов контролируются размещение областей осадконакопления и сноса, площадные распределения фаций и мощностей осадков, размещение интрузивных, субвулканических и эффузивных магматических образований, а также продуктов постмагматической деятельности, в том числе и гидротермальных урановых месторождений. Каждый из крупных тектонических блоков отличается индивидуальными чертами развития, что выражается в специфике строения слагающих его структурных этажей и ярусов.

Структурный этаж объединяет осадочные, магматические и метаморфогенные образования законченного тектоно-магматического цикла. В простейшем случае полный разрез тектонического блока включает четыре структурных этажа: кристаллическое (складчатое) основание, геосинклинальный структурный этаж, полуплатформенный и платформенный структурные этажи.

Образования каждого структурного этажа в свою очередь подразделяются на несколько структурных ярусов. Структурный ярус объединяет все осадочные, магматические и метаморфогенные образования отдельной стадии данного тектоно-магматического цикла. В полном разрезе геосинклинального структурного этажа нижний

структурный ярус соответствует начальной — собственно геосинклинальной стадии, средний ярус — орогенной стадии, а верхний — позднеорогенной стадии геосинклинального развития данного блока. Граница между отдельными структурными ярусами проводится по плоскостям региональных размывов и несогласий с учетом изменений мощностей и фациального состава отложений, степени их метаморфизма, морфологических типов складчатости, петрогенетических особенностей, возрастов и последовательности внедрения магматических пород.

Для блоков с геоантиклинальным режимом развития характерны: а) сокращенные мощности отложений, пестрота их фациального состава и выпадение из разрезов отдельных свит, толщ, а часто и целых структурных ярусов; б) интенсивная и многофазная магматическая деятельность в интрузивной, эффузивной и субвулканической формах с преобладанием магм гранитоидного состава; в) интенсивное развитие трещинной тектоники и процессов постмагматической деятельности. В процессе развития подвижных поясов геоантиклинальные блоки приобретают заметную «жесткость» раньше других блоков и превращаются в зачатки будущей платформы.

Детальные исследования последних лет, в том числе определение абсолютного возраста геологических формаций, убеждают в том, что становление предположительно рудоносных интрузивов и формирование ураноносных рудных залежей разделены во времени промежутком во многие десятки миллионов лет. С другой стороны, в некоторых урановых провинциях обнаруживается поразительное сходство изотопного состава рудного свинца и свинца из горизонтов доинтрузивных осадочных пород с высоким кларком урана. Эти наблюдения позволяют предполагать, что постмагматические погоны способны мобилизовать уран, первично отложенный в продуктивных осадочных толщах, и концентрировать его в рудных залежах при формировании эндогенных урановых месторождений.

Реконструкцией условий рудообразования во многих ураноносных районах установлено, что верхние части рудных залежей формируются на глубинах порядка 300—1000 м от древней дневной поверхности, а общий вертикальный размах оруденения достигает 1500—2000 м. Однако эндогенные урановые месторождения могут располагаться в различных структурных этажах и ярусах в зависимости от особенностей строения рудоносных тектонических блоков и условий их эрозионного среза в период рудообразования. Если к моменту рудоотложения породы верхних структурных ярусов будут уничтожены эрозией (или по другим причинам не сохранятся в геологическом разрезе блока), урановые залежи локализируются в образованиях нижних ярусов или даже в породах кристаллического основания. Если же к этому времени в строении блока сохранятся отложения верхних структурных ярусов, то урановые залежи сформируются в образованиях тех ярусов и этажей, которые будут расположены на глубинах порядка 1—2 км от древней дневной поверхности, существовавшей в период рудообразования.

### § 3. Связь экзогенного уранового оруденения с региональными геологическими структурами

Экзогенное урановое оруденение имеется во всех ураноносных провинциях. Как правило, районы с ведущим значением экзогенного уранового оруденения расположены в пределах полуплатформенных областей и молодых платформ. Об этом можно судить по условиям залегания пластовых рудных залежей согласно с отложениями полуплатформенного и платформенного структурных этажей. Долгое время считалось, что большинство экзогенных урановых месторождений сформировалось осадочным способом, одновременно с накоплением вмещающих оруденение пород. В настоящее время осадочное происхождение признается только для пластовых залежей ураноносных глин с костными остатками ископаемых рыб. Первично осадочное происхождение допускается также для метаморфогенных месторождений пятого и шестого промышленных типов (залежи урановых руд в углисто-глинистых и кремнистых сланцах и в метаморфизованных конгломератах). Формирование месторождений этих типов происходило в морских бассейнах, расположенных на континентальном основании, в пологих депрессиях морского дна в пределах прибрежных участков и отшнурованных заливов. Для образования всех экзогенных урановых месторождений большое значение имели состав пород в области сноса, содержание в них урана, характер органической жизни в период рудоотложения и ландшафтно-географические условия континента, определявшие геохимическую обстановку поверхностной зоны земной коры, в которой развивались процессы разрушения ураноносных пород, а также процессы перемещения и концентрации урана.

Для экзогенных месторождений восьмого и девятого промышленных типов работами советских ученых создана теория их эпигенетического образования, которая рассматривает рудный процесс как процесс, наложенный на уже сформировавшиеся осадочные породы. В основу этой теории положены представления о рудных залежах как о продуктах деятельности подземных вод, переносивших уранил-ион в составе карбонатных комплексов и отлагавших уран в участках смены окислительных условий восстановительными. Теория эпигенетического рудообразования получила неоспоримое подтверждение в практике геологоразведочных работ и оказалась настолько плодотворной, что в настоящее время уже не остается сомнений в ее достоверности.

По связи уранового оруденения с региональными геологическими структурами и гидродинамическим условием периода рудообразования эпигенетические месторождения урана разделяются на две группы.

К месторождениям первой группы относятся залежи ураноносных песчаников и углей в континентальных отложениях (восьмой промышленный тип), образованные низкотемпературными нисходящими подземными водами вблизи областей питания артезианских



бассейнов. Большая часть месторождений этого типа сформировалась в связи с последней — палеогеновой эпохой экзогенного рудообразования. Они располагаются в бортах равнинных, предгорноравнинных и крупных межгорных впадин, выполненных слабо дислоцированными отложениями континентального типа. Важнейшими рудоуправляющими факторами являются литологический и гранулометрический состав вмещающих пород, а также положение фронта зоны межпластового окисления.

К месторождениям второй группы относятся залежи ураноносных битумов в песчано-глинистых и карбонатных породах (девятый промышленный тип), образованные восходящими, иногда термальными растворами в зонах разгрузки подземных вод. Эти месторождения располагаются в поясах куполовидной складчатости, осложненной деформациями разрывного типа. Структуры такого рода типичны для внешних участков геосинклинальных зон, для краевых и межгорных прогибов, а также полулатформенных и молодых платформенных областей. В большинстве случаев они обнаруживают отчетливую связь с брахиантиклиналями, нефтегазоносными и соляными куполами, располагаясь в их сводах, на крыльях и в участках периклинальных замыканий.

#### § 4. Место и время уранового оруденения в общем процессе развития земной коры

Выявленные к настоящему времени условия образования и закономерности пространственного размещения урановых месторождений позволяют считать, что для формирования промышленных концентраций урана в пределах каждой урановой провинции наиболее благоприятным является период их геотектонического развития, переходный от геосинклинального к платформенному.

Важнейшие эндогенные месторождения урана формируются в позднеорогенную стадию геосинклинального развития или в начале полуплатформенного периода в пределах внутренних массивов, по окраинам древних кристаллических глыб и щитов или в зонах тектоно-магматической активизации щитов и платформ.

Важнейшие экзогенные месторождения урана образуются в полуплатформенный период или в начале платформенного периода в пределах пологих депрессионных структур, предгорных и межгорных впадин, а также в наиболее подвижных зонах молодых платформ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Д а н ч е в В. И., Л а п и н с к а я Т. А. Месторождения радиоактивного сырья. Изд-во «Недра», 1965.

К а ж д а н А. Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов. Изд-во «Высшая школа», 1966.

С у р а ж с к и й Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. Атомиздат, 1960.

С у р а ж с к и й Д. Я. Развитие геологии урана в СССР. «Атомная энергия», т. 23, вып. 5, 1967.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Геологические основы поисков урановых месторождений включают знание поисковых критериев, поисковых признаков и природных условий ведения поисковых работ.

Поисковыми критериями называется совокупность геологических данных, позволяющих судить о возможности и вероятности обнаружения месторождений полезных ископаемых в данной геологической обстановке. Поисковые критерии урановых месторождений устанавливаются на основе изучения геологии важнейших промышленных типов и закономерностей их пространственного размещения в регионально-геологических и в местных структурах.

Поисковые критерии, позволяющие судить о перспективах ураноносности рудоносных провинций и регионов, называются регионально-геологическими. Поисковые критерии, обеспечивающие оценку ураноносности отдельных участков и площадей в пределах известных рудных районов, называются местными или локальными. Различают магматические, структурные, литолого-фациальные, стратиграфические, минералого-геохимические, геоморфологические и другие виды региональных и местных (локальных) поисковых критериев. Комплекс поисковых критериев является научным обоснованием для выбора перспективных площадей. От степени достоверности зависит успех и эффективность проводимых поисковых работ. Однако использование самых достоверных поисковых критериев еще не гарантирует обязательного выявления урановых месторождений, поскольку они позволяют оценить только вероятность нахождения рудных концентраций в данной геологической обстановке.

Поисковыми признаками урановых месторождений является совокупность данных, непосредственно указывающих на существование в данной геологической обстановке повышенных концентраций урана, как возможных указателей рудных скоплений. К числу поисковых признаков относятся выходы урановых руд и проявления рудной минерализации, ореолы рассеяния урана и его спутников в горных породах, почвах, растениях, водах и в атмосфере, радиометрические аномалии, а также любые другие признаки, которые могут рассматриваться как непосредственные указатели урановых концентраций. Комплекс поисковых признаков используется как научное основание для оценки потенциальной ураноносности

изучаемых территорий, а также для постановки и направления поисково-разведочных работ.

Природные условия ведения поисковых работ определяются геолого-структурным положением района и его ландшафтно-географическими особенностями, определяющими условия проявления поисковых признаков урановых месторождений. Выявление условий ведения поисковых работ на основе ландшафтного районирования изучаемой территории необходимо как научная основа для выбора и обоснования наиболее эффективного комплекса поисковых методов.

## Глава I

### ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ

#### § 1. Региональные поисковые критерии

Региональные поисковые критерии урановых рудных полей и месторождений устанавливаются на основе выявленных закономерностей их размещения в геологических структурах крупных регионов.

Можно выделить следующие регионально-геологические поисковые критерии.

Для всех генетических типов месторождений:

- 1) взаимосвязь урановых месторождений различных генетических типов и возрастов в пределах одной урановой провинции;
- 2) повышенные концентрации радиогенного изотопа свинца ( $Pb^{207}$ ) в нерадиоактивных свинецсодержащих минералах любого происхождения («аномальные» свинцы). Появление «аномальных» свинцов, как правило, указывает на повышенные содержания радиоактивных элементов в магматических расплавах и в материнских породах.

Для эндогенных урановых месторождений:

- 1) приуроченность к породам древнего жесткого фундамента или их близость при расположении ураноносных районов в складчатых областях;
- 2) пространственная связь с районами развития многофазного гранитоидного магматизма при отношении тория к урану в гранитоидах последних магматических фаз не более 2,5—3,5;
- 3) наличие в регионе более древних осадочных толщ с повышенными экзогенными концентрациями урана;
- 4) связь оруденения с рудными поясами, положение которых обычно контролируется зонами долгоживущих разломов.

Для экзогенных месторождений:

- 1) приуроченность к краевым или срединным участкам внутриконтинентальных, предгорных и межгорных впадин или к наиболее подвижным участкам молодых платформ;

2) связь оруденения с образованиями полуплатформенного или платформенного структурных этажей;

3) приуроченность оруденения к литолого-фаціальным комплексам, в строении которых принимают участие породы, обладающие высокой восстановительной емкостью (ископаемые угли, битуминозные осадочные породы, углистые сланцы, графитизированные и пиритизированные породы, отложения со скоплениями органических остатков различного происхождения и др.).

## § 2. Местные (локальные) поисковые критерии

Местные поисковые критерии используются для оценки перспектив ураноносности отдельных площадей и выявления новых урановых месторождений в пределах известных рудных районов. Они устанавливаются в процессе геологического изучения урановых рудных полей и месторождений при проведении поисково-разведочных, разведочных и эксплуатационных работ.

Ведущими поисковыми критериями эндогенных (гидротермальных) урановых месторождений являются:

1) пространственная связь многих месторождений и рудных полей с экзоконтактовыми (реже эндоконтактовыми) зонами послескладчатых интрузивов гранитоидного состава, а также с поясами малых интрузивов и даек, представляющих собой продукты завершающих фаз магматической деятельности;

2) приуроченность оруденения к зонам дробления крупных разломов или к их лежащим бокам, к участкам расщепления или пересечения крупных разломов и к сопряженным с ними нарушениям более мелких порядков;

3) характерные окolorудные изменения боковых пород в виде зон березитизации, аргиллизации, низко- или высокотемпературного натрового метасоматоза, карбонатизации и гематитизации;

4) литологический контроль оруденения породами с повышенной восстановительной емкостью (скарнами, амфиболитами, туффитами, роговиками, биотитовыми пиритизированными или графитизированными сланцами и др.) или оптимальной эффективной пористостью (трещиноватостью);

5) глубина эрозионного среза, при которой вскрываются апикальные части послескладчатых гранитоидных интрузивов и образования верхних структурных ярусов геосинклинального структурного этажа. При отсутствии в разрезах ураноносных районов образований верхних структурных этажей благоприятными будут эрозионные срезы, обнажающие образования нижних этажей или кристаллического основания;

6) широкое развитие среди гидротермальных образований ассоциаций таких минералов-указателей, как темноокрашенный флюорит, гематит, доломит и кальцит, иногда гребенчатый кварц, арсениды или сульфиды тяжелых металлов.

Ведущими поисковыми критериями экзогенных урановых месторождений являются:

1) связь оруденения с определенными, характерными для каждого поискового района стратиграфическими комплексами в пределах образований полуплатформенного и платформенного структурных этажей;

2) приуроченность рудных залежей к породам, обладающим повышенной восстановительной емкостью (не менее 40 мв);

3) наличие в продуктивных толщах таких характерных элементов-спутников урана, как молибден, селен и ванадий.

Кроме перечисленных общих критериев, для каждого промышленного типа урановых месторождений установлены комплексы частных поисковых критериев, описанные во второй главе первого раздела книги.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

Каждан А. Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов. Изд-во «Вышая школа», 1966.

Красников В. И. Геологические предпосылки поисков месторождений урана. Атомиздат, 1964.

Суражский Д. Я. Развитие геологии урана в СССР. «Атомная энергия», т. 23, вып. 5, 1967.

## Г л а в а II

### ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ

#### § 1. Выходы урановых руд и проявления урановой минерализации

Наиболее убедительными поисковыми признаками урановых месторождений являются выходы урановых руд и проявления урановой минерализации в коренных породах или в перекрывающих их рыхлых отложениях.

Выходами урановых руд называются обнажающиеся на дневной поверхности природные скопления урановых минералов, удовлетворяющие по качеству современным требованиям горнодобывающей промышленности к урановым рудам. Для перевода рудного выхода в разряд уранового месторождения необходимо подтвердить наличие минимально необходимых запасов урановых руд, а также возможность и экономическую целесообразность их промышленного использования.

Проявлениями урановой минерализации называются выходящие на поверхность, а также обнаруженные в горных выработках или в скважинах образования первичных или вторичных урановых минералов, которые не удовлетворяют требованиям горнодобывающей промышленности вследствие незначительного среднего содержания урана во вмещающих породах (реже из-за неблагоприятных технологических свойств). Проявления урановой минерализации указывают лишь на повышенную концентрацию этого металла в пределах поискового участка.

Изучение выходов урановых руд и проявлений урановой минерализации осложняется тем, что вследствие способности к окислению и высокой подвижности урана большая часть его минералов оказывается неустойчивой в приповерхностных условиях и разрушается с образованием новых соединений или с выносом урана из зоны выветривания. Интенсивность и направление процессов приповерхностного изменения (выветривания) урановых руд зависит от многих природных факторов. Важнейшими из них являются физико-географические (ландшафтные) факторы, а также состав первичных урановых руд и вмещающих оруденение пород.

Разрушение первичных минералов урана с выносом его за пределы зоны окисления происходит наиболее интенсивно в теплом и влажном климате в условиях пенепленизированного рельефа дневной поверхности. Такая ландшафтная обстановка способствует развитию кислого типа выветривания с полным или почти полным выносом урана из приповерхностных участков. В условиях сухого климата возникает нейтральный карбонатный тип выветривания, способствующий разрушению первичных урановых минералов с образованием вторичных ассоциаций типа гидроокислов и силикатов урана.

Определяющее влияние на ход процессов приповерхностного изменения оказывает состав первичных урановых руд. Наиболее устойчивыми по отношению к выветриванию являются сложные тантало-ниобиевые, циркониевые и редкоземельные окислы урана и урано-титанаты типа браннерита. Легче разлагаются ураниниты, настураны и особенно урановые черни. Решающее значение для поведения урана в зоне окисления имеет содержание в рудах пирита или других высокосернистых сульфидов. Заметные концентрации высокосернистых сульфидов в рудах или во вмещающих породах накладывают специфический отпечаток на весь процесс выветривания урановых руд в связи с тем, что при их окислении образуется свободная серная кислота. Сульфатный тип выветривания способствует не только быстрому окислению и растворению урана, но и появлению в растворе других анионов за счет разложения других рудных и аксессуарных минералов. В этих условиях среди новообразований в зоне окисления появляются различные урановые слюдки (главным образом арсенаты и фосфаты), образующие широкие ореолы вокруг выходов урановых руд. Ширина этих ореолов и интенсивность выноса урана из зоны полного окисления зависят также от состава (химической активности) вмещающих оруденение пород, степени их раздробленности, условий залегания рудных образований и гидродинамических условий рудных выходов.

С учетом всего сказанного участки выходов урановых руд и проявлений урановой минерализации условно разделяются на две группы. К первой группе относятся рудные выходы, в которых уран задерживается в приповерхностных зонах поисковых участков вследствие химической активности вмещающих оруденение пород, благоприятного состава руд, их текстурных особенностей или условий залегания. В их число входят многие рудные выходы месторождений

четвертого, шестого и седьмого промышленных типов, представленные устойчивыми в приповерхностных условиях рудными минералами (уранинитом, браннеритом и ураноносным фторапатитом), или рудные выходы месторождений пятого, восьмого и девятого промышленных типов, в которых роль фиксатора урана играет органическое или битуминозное вещество.

Ко второй группе относятся рудные выходы жильных и прожилковых месторождений ураново-сульфидной (в частности, ураново-молибденовой) формации, для которых характерны разрушения большей части урановых минералов и вынос урана из верхней части зоны окисления. При глубокой проработке такого рода зон в их приповерхностных частях сохраняются только урансодержащие лимониты и люминесцирующие кремнистые образования (гиалиты).

Зоны окисления урановых выходов имеют большое поисковое значение, так как большинство вторичных урановых минералов обращают на себя внимание яркой желтой, зеленой или оранжевой окраской и легко диагностируются в полевых условиях.

По составу вторичных минералов рудных выходов можно составить представление о вероятном генетическом типе рудопроявления и о минеральном составе первичных руд. Месторождения карбонатно-урановой формации без значительных концентраций высокосернистых сульфидов характеризуются преобладанием гидроокислов и силикатов урана или смешанными вторичными образованиями типа глуммитов с подчиненным развитием люминесцирующих урановых слюдок. На выходах урановых руд сульфидной формации широко развиты зональные ореолы урановых слюдок, а при глубокой проработке зон окисления в приповерхностных участках сохраняются только люминесцирующие гиалиты и силикаты типа уранофана. В более глубоких зонах появляются сперва хорошо люминесцирующие кальциевые фосфаты, еще глубже — другие, преимущественно нелюминесцирующие урановые слюдки и остаточные урановые черни. При появлении на рудных выходах уранованадатов типа тюамунита и карнотита вероятнее экзогенное происхождение урановых скоплений.

## **§ 2. Первичные (эндогенные) ореолы рассеяния вокруг урановых месторождений**

В результате многообразных и сложных процессов миграции элементов в верхних частях земной коры вокруг залежей урановых руд образуются ореолы и потоки рассеяния радиоактивных элементов и элементов-спутников. В зависимости от происхождения различают первичные (эндогенные) ореолы рассеяния и вторичные (гипергенные) ореолы, образованные в приповерхностной зоне под воздействием на рудные тела и их первичные ореолы разнообразных агентов выветривания и денудации.

Первичные ореолы возникают одновременно с формированием самого уранового месторождения в результате единого процесса

рудообразования. Они представляют собой внешние зоны повышенных концентраций химических элементов вокруг рудных скоплений в коренных породах. Элементный состав эндогенных ореолов обнаруживает полное сходство с элементным составом самих рудных залежей.

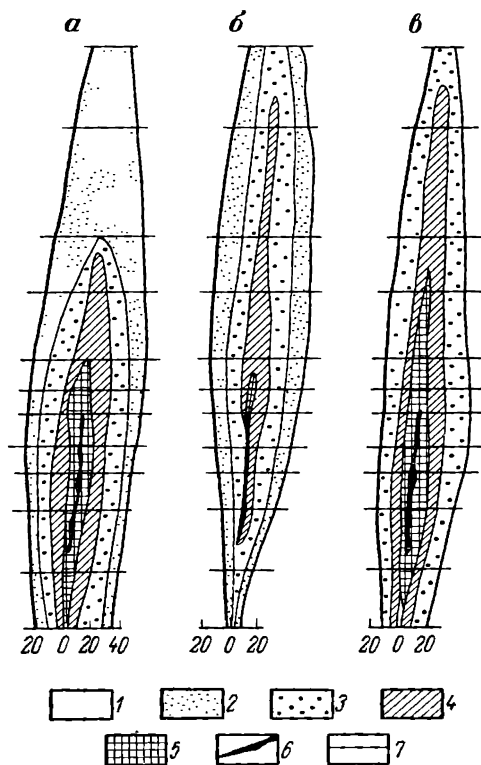


Рис. 17. Ореолы рассеяния элементов вокруг уранового тела в поперечном разрезе (по А. Д. Каблукову и Г. И. Вертепову):

а — уран, б — свинец, в — молибден  
Содержание элементов (в условных единицах): 1 — геохимический фон: 1,5 и менее для U, 2 и менее для Pb, 5 и менее для Mo; 2 — 1,5—5 для U, 2—5 для Pb; 3 — 5—20; 4 — 20—50; 5 — 50 и более. 6 — рудное тело; 7 — горизонты опробования

рудных залежей, не имеющих четких контактов с вмещающими породами, границы между ними и окаймляющими их ореолами проводятся условно, по заданным предельным содержаниям полезных компонентов. Распределение химических элементов в эндогенных ореолах, как правило, весьма неравномерное, так как максимальные их концентрации совпадают с трещинами и зонами повышенной проницаемости пород.

Важнейшие параметры эндогенных ореолов: состав и концентрация химических элементов, формы, размеры и зональность — определяются геохимическими, минеральными, структурными и другими особенностями рудных образований и вмещающих их пород.

Типоморфные химические элементы эндогенных ореолов, концентрация которых затухает по мере удаления от рудных тел, называются элементами — индикаторами оруденения. Различают прямые элементы — индикаторы, образующиеся в ту же стадию эндогенного процесса, что и основные рудообразующие элементы, и косвенные элементы индикаторы, которые выделились в предшествующие или последующие стадии.

Концентрация химических элементов в эндогенных ореолах колеблется в широких пределах. Верхним пределом ее в ореоле является содержание элемента в рудном теле, вокруг которого ореол развит, а нижним пределом — его фоновая концентрация во вмещающих породах. Для



Формы эндогенных ореолов подобны формам рудных тел. Ореолы вокруг крутопадающих рудных тел, как правило, симметричны и напоминают в разрезе пламя свечи (рис. 17). Вокруг пологопадающих залежей форма ореолов асимметричная, с преимущественным их развитием в висячих боках. В плане эндогенные ореолы обычно имеют форму, вытянутую в направлении простирания рудных залежей.

Форма отдельных ореолов существенно зависит от литологического состава и структурных особенностей вмещающих пород. На участках повышенной проницаемости пород, например интенсивной их трещиноватости, форма ореолов усложняется, приобретая неправильные очертания с многочисленными раздувами, пережимами и апофизами.

Размеры эндогенных ореолов различны. Вертикальная их протяженность над крутопадающими рудными телами нередко достигает сотен метров. В плане размеры ореолов тоже значительно превосходят размеры рудных залежей, однако их соотношения зависят от типа месторождения, элемента-индикатора и уровня эрозионного среза. Эти соотношения определяются также и характером горизонтальной и особенно вертикальной зональности эндогенных ореолов, которая проявляется в том, что одни элементы накапливаются преимущественно в надрудных, а другие в подрудных частях ореолов.

Вокруг урановорудных залежей формируются широкие эндогенные ореолы урана, молибдена, свинца, цинка, меди, мышьяка, селенра, ванадия и некоторых других элементов-спутников в зависимости от состава первичных урановых руд. Наиболее протяженными из них являются ореолы урана, молибдена, цинка и свинца. Размеры ореолов остальных элементов-спутников обычно более ограничены. Часто такие элементы, как мышьяк, свинец, сурьма, ртуть и некоторые другие, концентрируются в основном над рудными телами, образуя в вертикальных разрезах своеобразные «шапки» (рис. 18).

При изучении ореолов рассеяния урана обычно определяются концентрации его подвижной формы, т. е. той части урана, которая извлекается из проб путем содового выщелачивания. Это необходимо потому, что содержание урана в эндогенных ореолах складывается из его первичных (кларковых) концентраций в минералах вмещающих пород и из урана, привнесенного рудообразующими растворами. За пределами эндогенных ореолов содержание подвижной формы урана во вмещающих породах невелико и, как правило, не превышает 10% от общего его количества. В пределах же залежей урановых руд и окаймляющих их эндогенных ореолов основная часть урана представлена в подвижной форме в виде собственных его минералов — уранинита, настуранов, черней или разнообразных вторичных урановых минералов, растворимых содовыми растворами. Поэтому процент извлечения подвижного урана из геохимических проб прямо пропорционален концентрации урана в пределах эндогенного ореола. Элементы-спутники находятся в эндогенных ореолах

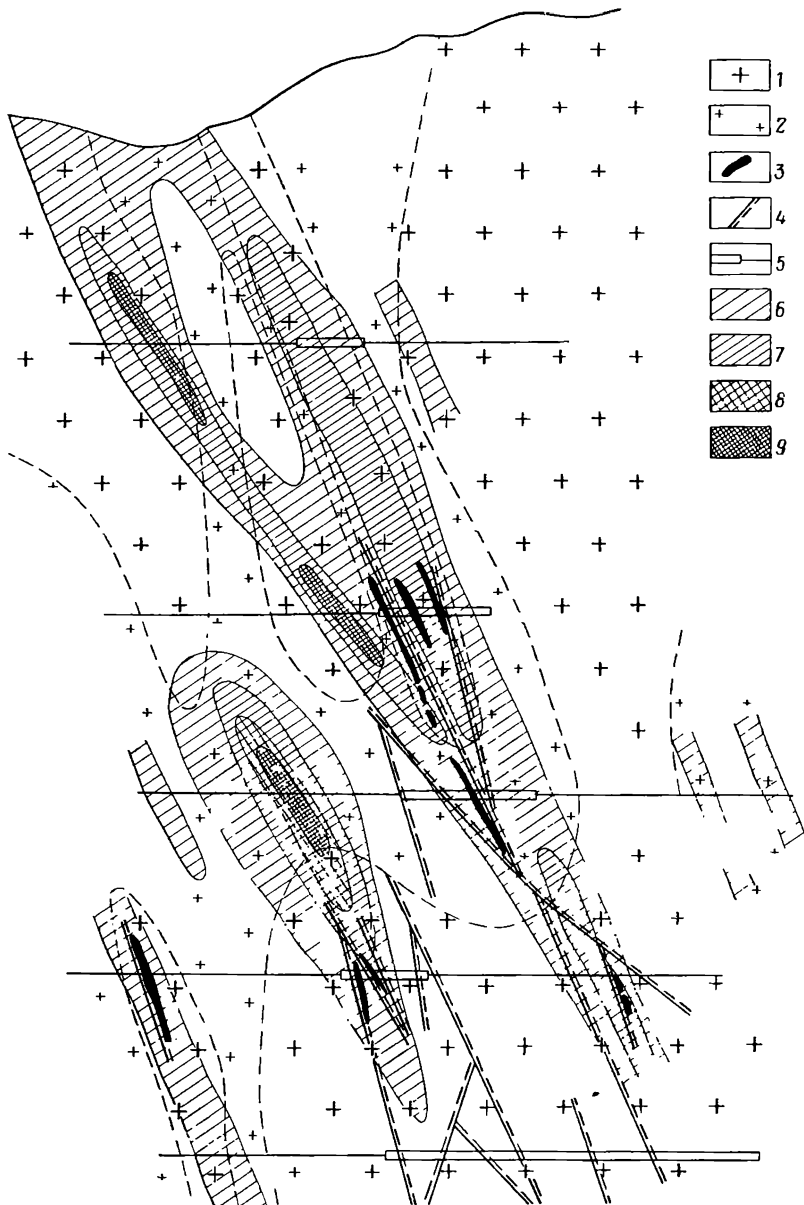


Рис. 18. Эндегенные ореолы свинца, образующие «шапки» вокруг скрытых рудных тел (по С. В. Григоряну и Е. М. Янишевскому)

1 — крупнозернистые граниты; 2 — аллитовидные граниты; 3 — рудные тела; 4 — трещины; 5 — горные выработки и скважины. Содержание свинца (в %): 6 — 0,01—0,03; 7 — 0,03—0,1; 8 — 0,1—0,3; 9 — 0,3—1,0

в тех же минеральных формах, как и в урановых рудах, что позволяет говорить о тесной генетической связи эндогенных ореолов рассеяния урана, молибдена, свинца, цинка, меди и других элементов-спутников с урановорудными телами.

В качестве примера на рис. 19 приведены эндогенные ореолы урана и молибдена вокруг урановорудных залежей штокверкового типа, приуроченных к зоне дробления в хлоритизированных гранитах. В составе урановых руд кроме пастурана и флюорита встречаются молибденит, галенит, сфалерит, пирит и халькопирит. Наиболее широкие и протяженные ореолы образует уран. В пределах

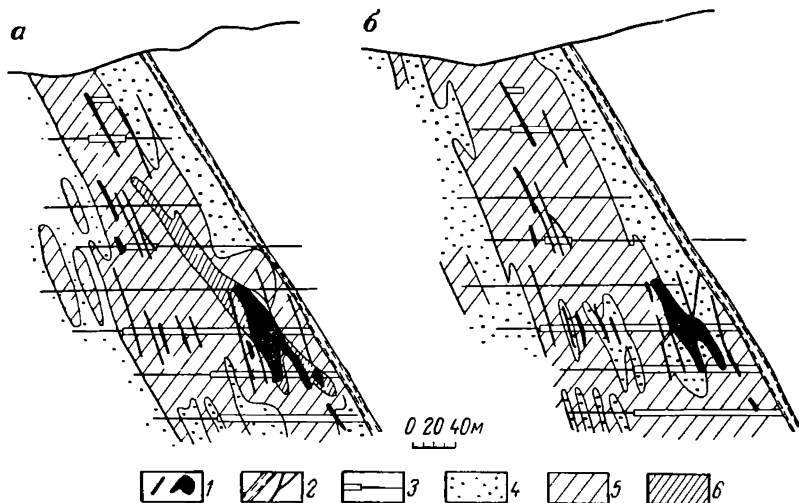


Рис. 19. Эндогенные ореолы урана (а) и молибдена (б) вокруг скрытых рудных тел (по С. В. Григоряну и Е. М. Янишевскому)

1 — рудные тела; 2 — разломы и трещины; 3 — горные выработки и скважины. Содержания элементов (в %): 4 — 0,0003—0,001; 5 — 0,001—0,003; 6 — 0,003—0,01

общего ореола этого элемента каждое из рудных тел окаймляется полем более высоких концентраций урана. Ореол молибдена по размерам несколько меньше уранового и вписывается в него. Свинец образует меньшие по размерам, но интенсивные ореолы, характеризующиеся высокими концентрациями в верхних частях рудных тел или непосредственно над ними. Ореолы цинка имеют незначительные размеры и окаймляют только крупные рудные тела.

На приведенных рисунках показаны сглаженные контуры ореолов различных элементов. При построении первичных графиков распределения урана и его спутников вокруг рудных тел неравномерность их распределения проявляется многочисленными пиками и провалами. Если откладывать содержания элементов по оси ординат в логарифмическом масштабе, то сглаженные графики будут иметь прямолинейный характер. Это означает, что убывание концентраций

элементов по мере удаления от рудных тел происходит по экспоненциальному закону.

На рис. 20 приведен график распределения урана и молибдена вокруг рудного тела. Из графика следует, что ширина ореола прямо пропорциональна логарифму концентрации элемента в рудном теле и находится в обратной зависимости от величины его минимального аномального содержания в ореоле  $a$  и угла, образованного графиком

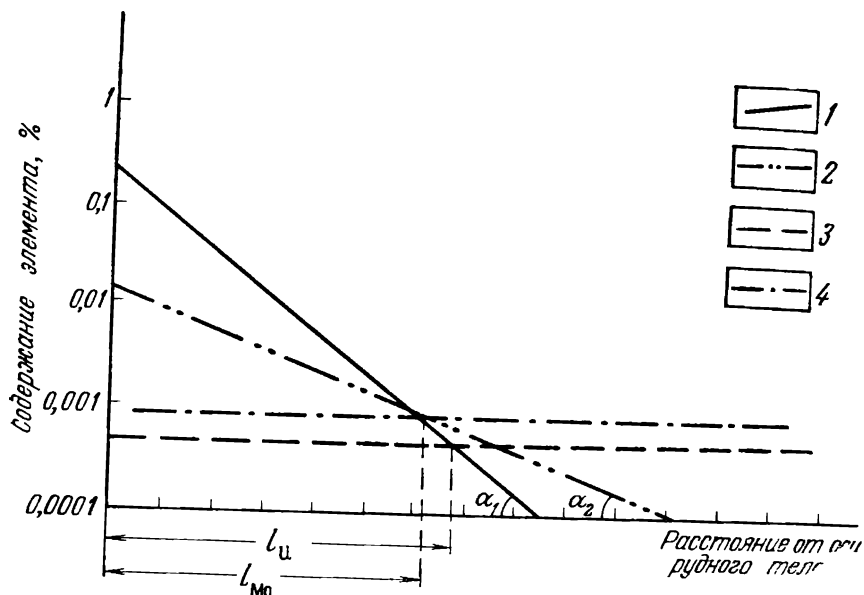


Рис. 20. График распределения урана и молибдена вокруг рудного тела

1 — содержание урана; 2 — содержание молибдена; 3 — минимальное аномальное содержание урана в ореоле; 4 — минимальное аномальное содержание молибдена в ореоле.  $\alpha_1$  — угол, определяющий градиент концентрации урана в ореоле;  $\alpha_2$  — угол, определяющий градиент концентрации молибдена в ореоле;  $l_U$  — половина ширины эндогенного ореола урана;  $l_{Mo}$  — половина ширины эндогенного ореола молибдена

распределения с осью абсцисс ( $\alpha$ ). Значение тангенса угла  $\alpha$  называют градиентом концентрации элемента в поперечном сечении эндогенного ореола.

Градиент концентрации является функцией многих переменных. На его величину влияют химические свойства элементов, физико-механические свойства вмещающих пород и др. Поэтому значение градиента концентрации элемента постоянно даже в пределах одного месторождения. Однако как бы не изменялись абсолютные значения градиентов различных элементов-индикаторов, их соотношения остаются примерно постоянными. Поэтому для характеристики подвижности элементов-индикаторов при формировании эндогенных ореолов используются не абсолютные, а относительные величины градиентов концентраций. С этой целью значение минимального из градиентов условно приравнивается к единице, а значения остальных

градиентов выражаются цифрами относительно принятого минимального градиента. Так, например, для многих гидротермальных урановых месторождений характерен следующий ряд величин относительных градиентов концентрации: молибден (1) — цинк (1,5) — медь (1,8) — свинец (2,1) — уран (3).

Величины относительных градиентов концентраций ( $K_{отн}$ ) зависят в основном от химических свойств самих элементов-индикаторов. Их значения используются для расчета показателей рассеяния элемента-индикатора ( $X$ ) вокруг рудных залежей по формуле:

$$X = \frac{\ln \frac{C_p}{a}}{K_{отн}},$$

где  $C_p$  — концентрация элемента в рудном теле;  $a$  — минимальное его содержание в ореоле.

Из приведенной формулы следует, что кроме подвижности элемента на ширину эндогенного ореола рассеяния влияют также его концентрация в рудном теле и минимальное аномальное содержание.

Вследствие различной подвижности отдельных элементов-индикаторов горизонтальная протяженность их эндогенных ореолов в поперечных сечениях рудных залежей неодинакова, что находит свое выражение в проявлении горизонтальной зональности ореолов.

В строении эндогенных ореолов устанавливаются и отчетливые элементы вертикальной зональности. Различают два вида этой зональности: вертикальную зональность, обусловленную различной протяженностью и положением комплекса элементов-индикаторов, и вертикальную зональность в строении ореола отдельного химического элемента.

На рис. 21 приведены графики изменения содержаний урана, молибдена и свинца в эндогенном ореоле урановорудной залежи. В надрудной части развиты интенсивные ореолы всех трех элементов и особенно свинца. Ниже рудного тела заметно проявлен только ореол урана. Вертикальная зональность может быть проиллюстрирована не только графиками изменения средних содержаний элементов с глубиной, а также графиками изменения их соотношений или изменения линейной продуктивности ореолов (произведениями ширины ореола на данном горизонте на среднее содержание элемента в нем). Для количественной характеристики вертикальной зональности может быть использован коэффициент контрастности, представляющий собой отношение содержаний элемента-индикатора или линейных продуктивностей ореола в его надрудной и околорудной частях. Так, например, на одном из гидротермальных урановых месторождений по возрастанию величины коэффициента контрастности установлен следующий ряд элементов индикаторов: уран (0,6) — молибден (1,2) — медь (1,7) — цинк (15) — свинец (46). Это значит, что по отношению к основному элементу — урану — все его спутники проявляют отчетливую тенденцию к накоплению в верхних частях ореолов. Знание вертикальной зональности эндо-

генных ореолов вокруг урановорудных тел имеет большое практическое значение, так как позволяет отличать надрудные части ореолов от подрудных.

Поисковое значение эндогенных ореолов урана и его спутников очень велико. По размерам они значительно превосходят рудные залежи, распространяясь над обособленными крутопадающими рудными телами на 100—150 м, над группами сближенных рудных тел

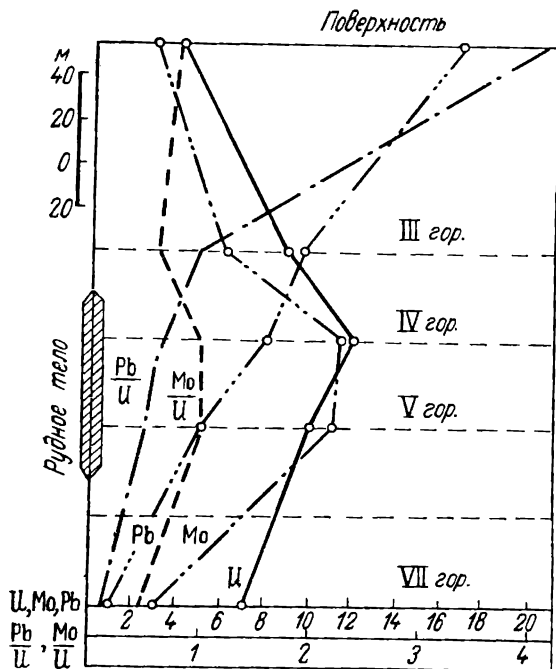


Рис. 21. Графики изменения с глубиной средних содержаний элементов и их отношений в ореолах (по С. В. Григоряну и Е. М. Явнишевскому)

на 250—300 м, а в стороны от них — на несколько десятков метров. Для оценки перспектив ураноносности весьма ценно, что размеры ореолов находятся в прямой зависимости от концентраций элементов в рудных телах и в обратной зависимости от градиентов концентрации и величин геохимического фона элемента во вмещающих породах. Не меньшее значение имеет также выяснение состава элементов горизонтальной и вертикальной зональности ореолов. Поэтому при поисках урановых месторождений необходимо выявлять и изучать не только эндогенные ореолы урана, но и его важнейших спутников — молибдена, свинца, цинка и других элементов-индикаторов. Перечисленные особенности строения и развития эндогенных ореолов используются в геологической практике не только для поисков

новых месторождений и оценки перспектив ураноносности выявленных рудопроявлений, но и для прогнозирования и оценки ураноносности глубоких горизонтов и флангов действующих горнорудных предприятий.

### § 3. Ореолы рассеяния урана и его спутников в рыхлых отложениях

Под воздействием процессов приповерхностного изменения в остаточных корах выветривания и в рыхлых отложениях различного происхождения вокруг урановых залежей и их первичных ореолов образуются вторичные ореолы рассеяния урана и его спутников. Способы образования и типы вторичных ореолов рассеяния зависят от минерального состава руд и петрографического состава вмещающих пород, от химического и газового состава подземных вод и от ландшафтно-географических условий поискового района. Ближе всего к первичным рудам и первичным ореолам располагаются вторичные ореолы в коре выветривания.

Ореолы в коре выветривания имеют в основном остаточный характер, так как они представляют собой видоизмененные остатки первичной рудной минерализации. Обычно они содержат уран как в виде самостоятельных вторичных минералов (внутренняя зона ореола), так и в виде безминеральной примеси в продуктах выветривания (внешняя зона ореола).

Внутренняя зона ореола редко сохраняется непосредственно на дневной поверхности. При вскрытии внутренней зоны в естественных или искусственных обнажениях она квалифицируется как проявление урановой минерализации, а ее форма и размеры определяются морфологическими чертами рудных залежей.

Внешняя зона ореола превышает по площади внутреннюю зону в несколько десятков раз. Ее морфологические особенности зависят от форм и размеров первичных ореолов, которые она наследует. Часто в результате инфильтрационного и диффузионного перемещения и рассеяния рудных элементов вторичные ореолы в пределах коры выветривания становятся несколько более широкими, чем первичные.

В зависимости от ландшафтно-географических условий ореолы урана и его спутников (свинца, молибдена, меди, мышьяка, сурьмы и др.) могут быть открытыми — выходящими на дневную поверхность, ослабленными или закрытыми — не выходящими на дневную поверхность. Открытые ореолы характерны для щебенистых и дресвяных кор выветривания, которые формируются в условиях сухого и жаркого полупустынного и пустынного климата. В степных и лесостепных зонах с умеренно теплым климатом образуются щебенисто-глинистые коры выветривания с резко ослабленными у поверхности ореолами урана и менее ослабленными ореолами его спутников. Для районов субтропической и тропической зон с теплым дождливым климатом характерно образование глинистых кор выветривания с закрытыми ореолами.

Поисковое значение вторичных ореолов в корах выветривания велико для щелеватых, щелевато-древяных и щелевато-глинистых кор выветривания, где они выходят на дневную поверхность, а их размеры сопоставимы или даже несколько больше размеров первичных ореолов.

Вторичные ореолы возникают не только непосредственно под рудными выходами, но и в удалении от них в различных рыхлых отложениях. В зависимости от типа рыхлых отложений различают вторичные ореолы в элювиально-делювиальных, в делювиальных, пролювиальных и аллювиальных отложениях.

Типы вторичных ореолов в рыхлых отложениях зависят от состава первичных руд и вмещающих пород, от происхождения рыхлых отложений и от ландшафтно-географических условий поискового района. В зависимости от способа формирования вторичных ореолов различают механические и солевые ореолы рассеяния.

**Механическое рассеяние урана и его спутников** возможно только в форме устойчивых против выветривания урансодержащих минералов, скоплений или рудных обломков. Количество урановых минералов, устойчивых в зоне выветривания, невелико. К их числу относятся монациты, урансодержащие титанаты, тантало-ниобаты, редкоземельные сложные окислы и некоторые другие урансодержащие минералы, не входящие, как правило, в состав руд промышленных урановых месторождений. Механическое рассеяние уранинитов, настуранов и других важнейших урановых минералов возможно только в особых географических условиях, например в полярных или высокогорных районах, где физическое разрушение пород и руд отчетливо преобладает над их химическим выветриванием. Однако образование ореолов механического рассеяния урана возможно и за счет устойчивых вторичных скоплений типа урансодержащих гидроокислов железа и марганца, глинистых минералов или органических скоплений. Эти продукты выветривания рассеиваются по склонам и выносятся в пониженные участки рельефа, распределяясь по удельному весу, механической стойкости и гранулометрическому составу. Формированию механических ореолов рассеяния ураноносных глинистых минералов способствует жаркий и сухой климат, а ореолов рассеяния ураноносных органических остатков — влажный, умеренно теплый климат.

Грубообломочные механические ореолы урана могут образовываться и за счет рассеяния рудных обломков любого минерального состава. Образования такого рода особенно широко распространены в тундровых и в горно-таежных районах, среди каменных осыпей, покрывающих широким шлейфом пологие водоразделы и склоны гор.

**Солевые ореолы рассеяния** образуются за счет растворения, переноса и отложения урана и его спутников минерализованными водами при их инфильтрации, диффузии, капиллярном подъеме или испарении. Возникновение солевых ореолов определяется режимом приповерхностных почвенно-грунтовых вод, климатическими



условиями района и типом рыхлых отложений. Различают непромывной, выпотной и промывной режимы почвенно-грунтовых вод.

**Непромывной режим** типичен для равнинных и склоновых участков пустынных и полупустынных областей, где атмосферные осадки просачиваются на небольшую глубину и, не доходя до уровня грунтовых вод, вновь поднимаются к поверхности и испаряются (рис. 22, а). При мощности рыхлых отложений не более нескольких метров на участках, расположенных над рудными выходами, происходит обогащение приповерхностного слоя растворимыми солями различных элементов и образуется открытый ореол урана и его спутников. Признаком непромывного режима вод является общая засоленность грунтов, повышенная их карбонатность, наличие гипсов и хлоридов при отсутствии гидроокислов железа и марганца.

**Выпотной режим** наблюдается в пониженных участках рельефа пустынной и полупустынной зон с неглубоким залеганием

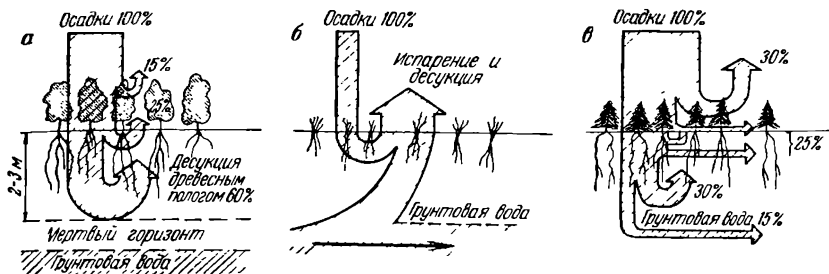


Рис. 22. Режимы почвенно-грунтовых вод (по А. А. Родэ):

а — непромывной; б — выпотной; в — промывной

грунтовых вод. Благодаря капиллярному поднятию и испарению не только выпадающих осадков, но и части подземных вод происходит их интенсивное обогащение растворимыми солями хлоридно-сульфатного состава (рис. 22, б) с образованием солончаков. Часто верхние горизонты солончаков содержат повышенные концентрации урана и его спутников, обычно не связанные с коренными месторождениями.

**Промывной режим** господствует в районах с умеренно влажным климатом и характеризуется смыканием зоны промачивания с поверхностью грунтовых вод. При этом часть атмосферных осадков удаляется из района их выпадения в виде подземного стока, унося с собой растворенные соли различных металлов (рис. 22, в). В условиях промывного режима в рыхлых отложениях формируются ослабленные или вообще не выходящие на поверхность ореолы урана и его спутников. Максимальная концентрация этих элементов наблюдается на некоторой глубине от дневной поверхности в так называемом представительном горизонте. Характерным признаком промывного режима вод является отсутствие в верхних горизонтах грунтов карбонатных, сульфатных и хлорсодержащих новообразований и широкое развитие в них скопленных гидроокислов железа и марганца.

В рыхлых образованиях того или иного типа чаще всего наблюдаются смешанные вторичные ореолы урана и его спутников, образованные как путем механического рассеяния, так и путем переотложения с участием почвенно-грунтовых вод.

При переносе продуктов разрушения рудной залежи поверхностными водотоками далеко за пределы их площадного рассеяния образуются так называемые потоки рассеяния. От ореолов они отличаются резко выраженной вытянутостью, приуроченностью к пониженным формам рельефа и большей удаленностью от коренного выхода первичных руд.

По времени образования вторичные ореолы и потоки рассеяния обычно разделяются на сингенетические, т. е. образованные одновременно с вмещающими рыхлыми отложениями, и на палеогенные, т. е. эпигенетические, образованные позже, чем вмещающие их рыхлые отложения.

Наибольшее поисковое значение для обнаружения новых урановых месторождений имеют вторичные ореолы в элювиально-делювиальных и делювиальных отложениях. Обычно они имеют смешанное происхождение с преобладанием процессов механического рассеяния в тундровых, горно-таежных и высокогорных зонах и с ведущей ролью процессов диффузии и инфильтрации в зонах пустынного и полупустынного климата.

Ореолы (потоки) рассеяния в пролювиальных отложениях имеют весьма ограниченное поисковое значение, так как в этих условиях образование отчетливых урановых ореолов возможно только механическим путем и в специфической природной обстановке.

Потоки рассеяния урана и его спутников в аллювиальных отложениях распространены широко. Их возникновение происходит как механическим путем (россыпи минералов, устойчивых по отношению к факторам выветривания, концентрации урансодержащих глинистых минералов или органических остатков), так и за счет непосредственного осаждения урана и его спутников из поверхностных вод в илистые донные осадки. Поисковое значение потоков рассеяния урана невелико. Оно ограничивается сложностью оценки обнаруженных аномалий и трудностями поисков месторождений в связи с значительным удалением потоков рассеяния от участков первичных концентраций.

Несмотря на большое разнообразие ореолов рассеяния урановых месторождений в рыхлых отложениях, они могут быть разделены по своему поисковому значению на шесть важнейших типов (рис. 23).

I. Открытые остаточные вторичные ореолы в элювиально-делювиальных отложениях. Формируются в географических зонах со слабым развитием процессов физического выветривания. Наиболее благоприятны для их образования крупные крутопадающие залежи (Iб), а в условиях расчлененного рельефа и горизонтально залегающие рудные тела (Iа). Ореолы этого типа могут служить указателями слепых рудных тел (Iв). Форма ореолов в разрезе обычно веерообразная, расширяющаяся к поверхности. В плане они в 10—20 раз

превышают площади рудных выходов с видимой урановой минерализацией, чем и определяется их важное поисковое значение.

II. Открытые наложенные несмещенные ореолы в дальнеприносных делювиальных отложениях мощностью в несколько метров. Формируются в условиях сухого теплого климата путем диффузии в условиях непромывного режима. Ореолы могут проследиваться от рудного тела до поверхности (IIa). Иногда в результате испарительной концентрации элементов около поверхности или вследствие их биогенной аккумуляции образуются надрудные ореолы, не прослеживающиеся по вертикали (IIб).

III. Открытые наложенные оторванные (смещенные) ореолы в делювиальных отложениях. Формирование обусловлено процессами солевого накопления за счет вторичной аккумуляции. Обычно смещены от рудных выходов. Представляют собой ложные ореолы неправильных очертаний, вытянутые в направлении современного стока почвенно-грунтовых вод. Характерны для зон с промывным режимом подземных вод. Смещенные ореолы осложняют проведение и оценку результатов поисковых работ.

IV. Закрытые или ослабленные остаточные ореолы в элювиально-делювиальных отложениях. Типичны для районов с отчетливым промывным режимом почвенно-грунтовых вод. Мощность выщелоченных или резко ослабленных с поверхности горизонтов, как правило, не превышает 1—1,5 м. В вертикальном разрезе имеют грибообразную форму, расширяясь на уровне представительного горизонта. Приобретают

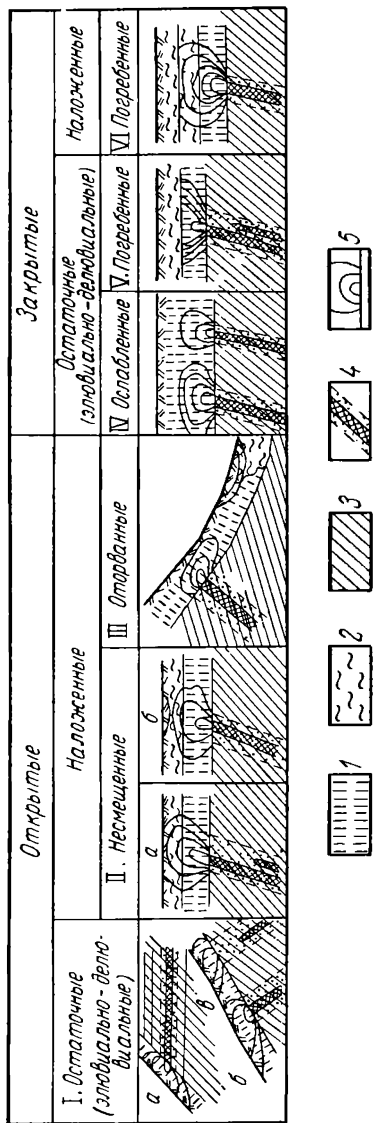


Рис. 23. Основные типы вторичных ореолов рассеяния

1 — элювиально-делювиальные образования или кора выветривания; 2 — перекарывающие дальнеприносные отложения; 3 — рудоовмещающие породы; 4 — рудные тела и их первичные ореолы; 5 — вторичные ореолы рассеяния

важнейшее поисковое значение при проведении работ в лесной, горно-таежной и лесостепной зонах.

V. Закрытые остаточные погребенные ореолы. Характерны для районов с двухярусным строением покрова рыхлых отложений: нижний ярус представлен элювиально-делювиальными образованиями, а верхний — более поздними дальнеприносными отложениями различного происхождения. Погребенные ореолы имеют важное поисковое значение, но требуют применения специальных технических средств для отбора глубинных проб.

VI. Закрытые наложенные погребенные ореолы. Изучены слабо. Условия образования те же, что и для V типа, однако для их формирования необходима еще благоприятная ландшафтно-географическая обстановка в период до отложения верхнего (перекрывающего) яруса рыхлых отложений. Эти ореолы имеют ограниченное поисковое значение.

#### § 4. Ореолы рассеяния урана в подземных и поверхностных водах

В водах урановых месторождений всегда устанавливаются повышенные концентрации радиоактивных элементов — урана, радия и радона, а также их элементов-спутников — молибдена, свинца, меди, мышьяка, цинка и др. Просачиваясь во вмещающие породы, эти воды создают широкие поверхностные и подземные ореолы рассеяния растворенных в них элементов, которые прослеживаются на расстоянии в сотни метров от месторождений. Возможность обогащения природных вод радиоактивными элементами и размеры ореолов их рассеяния зависят от многих причин, среди которых ведущее значение имеют следующие три:

1) геохимические свойства элементов, форма их нахождения в рудах, вмещающих породах и в природных водах;

2) состав, термический режим и гидродинамические условия циркуляции вод;

3) состав вмещающих пород и геолого-структурные особенности района месторождения.

Геохимические свойства урана и других радиоактивных элементов рассмотрены выше. Для формирования водных ореолов урана, радия и радона наиболее важными из них являются высокая растворимость шестивалентных соединений урана в окислительной обстановке и нерастворимость его четырехвалентных соединений в восстановительной среде. Радий и радон, наоборот, свободно мигрируют в восстановительной среде, что способствует образованию их ореолов на глубоких горизонтах месторождений.

Установлено, что в природных водах уран может переноситься в виде сульфата, уранил-карбонатных комплексов, в виде легкорастворимых комплексных щелочно-гуматных соединений. Сульфатная форма переноса урана характерна для сильнокислых рудничных вод месторождений сульфидного типа. Миграция урана в виде легко-

растворимых карбонатных комплексов типична для щелочных вод пустынных и жарких областей. В районах с влажным климатом и обильной растительностью преобладает форма переноса урана в слабокислых водах в виде легкорастворимых гуматных соединений, а при нейтральной реакции вод распространена коллоидная форма его переноса в виде золя гидроокиси урана.

Важнейшими осадителями урана являются органические вещества, сульфиды, соединения железа и марганца, фосфаты и глинистые минералы. Основную роль при этом играют процессы адсорбции, полного обмена и восстановления.

Оптимальные условия для развития водных ореолов урана создаются в приповерхностных горизонтах земной коры, где подземные воды обладают высокой окислительно-восстановительной способностью со значениями окислительно-восстановительного потенциала вод ( $E_h$ ) более 0,40 мв. На глубине последних десятков — первых сотен метров от дневной поверхности подземные воды характеризуются низкими, часто отрицательными значениями  $E_h$ , что свидетельствует о восстановительных условиях среды, не благоприятных для миграции урана.

Не меньшее значение для развития водных урановых ореолов имеют кислотно-щелочные свойства. Наиболее благоприятной для растворения урана в катионной форме является сильноокислая среда с  $pH < 3-4$ , а для образования подвижного карбонатного комплекса — щелочная среда с  $pH > 7,5-8$ . Слабокислая и нейтральная среды благоприятны для растворения и миграции урана соответственно в форме комплексных урано-гуматных и коллоидных соединений.

Солевой и газовый состав подземных вод также оказывает заметное влияние на формирование урановых ореолов. Наиболее благоприятна в этом отношении повышенная концентрация анионов ( $HCO_3^-$ ). Повышенные содержания анионов ( $SO_4^{2-}$ ) способствуют растворению урана только в кислой среде. Растворимость урана в воде повышается и с увеличением ее общей минерализации. Поэтому для оценки радиогидрогеологических аномалий используются не абсолютные содержания урана в водах, а их отношения к весу сухого остатка, выраженного в граммах на литр. Растворенные в водах кислород и углекислый газ способствуют интенсивному растворению урана, а сероводород (при недостатке свободного кислорода) уменьшает его растворимость, восстанавливая уран до четырехвалентного.

Образование водных ореолов зависит также и от минерального состава руд. Наиболее легко уран переходит в раствор из черневых руд, труднее из настуран-черневых, еще труднее из плотных настурановых, многих окисленных и уранинитовых руд. Наиболее трудно растворимы урано-фосфорные и браннеритовые руды.

Большое влияние на формирование водных ореолов оказывают ландшафтно-географические условия района. Влияние климата сказывается на геохимических особенностях подземных вод и на общей водообильности участков месторождений. Рельефом местности опре-

деляется мощность зоны свободного водообмена. Для равнинных районов характерно неглубокое залегание уровня грунтовых вод и распространение кислородных вод до глубины первых десятков метров. В горных областях зона свободного водообмена резко увеличивается до многих сотен метров.

В целом можно считать, что для интенсивного развития водных ореолов урана особенно благоприятны следующие условия:

1) наличие окислительной водной среды при сильно кислой или щелочной реакции вод;

2) невысокое содержание в водах анионов слабых кислот (фосфорной, ванадиевой, кремневой и др.) — минералообразователей;

3) высокая водопроницаемость вмещающих пород и отсутствие в них активных осадителей урана (глинистых минералов, гидроокиси железа и марганца, органических веществ и других восстановителей);

4) крупный масштаб оруденения, представленного хорошо растворимыми урановыми минералами, и большая мощность зоны свободного водообмена (горный рельеф и жаркий сухой климат).

При благоприятных условиях водные ореолы урана и его спутников могут достигать сотен метров по мощности и многих сотен метров по протяженности (главным образом по направлению стока подземных вод). Размеры водных ореолов радия и радона часто значительно меньше.

Водные ореолы урана и его спутников могут быть закрытыми, т. е. невыходящими на дневную поверхность, и открытыми. Для образования открытых ореолов необходимы условия, благоприятствующие не только беспрепятственной миграции элемента в водах, но и выходу подземного потока на дневную поверхность.

Наибольшее поисковое значение имеют открытые радиогидрохимические ореолы, которые легко обнаруживаются путем опробования вод источников или колодцев. Закрытые водные ореолы имеют меньшее поисковое значение, что связано с трудностями их обнаружения буровыми скважинами или горными выработками и большей глубиной залегания от дневной поверхности.

Поисковое значение водных ореолов урана ограничивается трудностями их интерпретации, так как аномальное содержание урана и его спутников в подземных водах может быть не связано с наличием их повышенных первичных концентраций, а обусловлено другими причинами. Так, например, обогащение вод рудными элементами возможно за счет испарительной концентрации в условиях дефицита влаги или за счет выщелачивания кларковых концентраций урана и радия при длительном соприкосновении подземных вод с вмещающими породами повышенной радиоактивности.

## § 5. Ореолы рассеяния урана и его спутников в почвах и растениях

Наряду с другими рудными элементами уран и радий входят в состав травянистой, кустарниковой и древесной растительности пропорционально их содержанию в материнских породах и рыхлах

отложениях. Поэтому на участках развития первичного уранового оруденения и сопровождающих его ореолов происходит аномальное обогащение растений и почв радиоактивными элементами. Однако поглощение различных металлов, пропорциональное их содержанию в почвах, происходит только до определенного предела. Сверх этого «биологического порога» концентрации данного элемента в растениях уже не происходит. Так, например, в умеренных широтах «биологический порог» поглощения урана древесной растительностью значительно ниже, чем для радия. Поэтому поиски урановых месторождений в таежных условиях эффективнее проводить по определению ореолов радия, а не урана.

Поглощение рудных элементов осуществляется корневой системой растений не только из почвенно-грунтовых вод, но и непосредственно из пород и почв, что объясняется особенностями кислородного дыхания корневых клеток. Поскольку корневая система большинства растений развита главным образом в пределах почвенного слоя и резко сокращается с глубиной, между элементным составом почв и растений наблюдается обычно полное соответствие. Однако содержание рудных элементов, в частности урана, в почвах, как правило, в несколько раз выше по сравнению с их содержанием в растениях. На концентрацию урана в растениях влияет содержание в почвах коллоидов, рН почв, глубина проникновения корневой системы, зольность, освещенность и видовая принадлежность растений. Чем меньше в почвах коллоидов, тем меньше их поглонительная способность, что облегчает переход урана в растения.

В кислых почвах растения лучше усваивают катионы, а в щелочных почвах — анионы солей. Поэтому в богатых коллоидами кислых почвах лесной и горно-таежной зоны поступление урана из почв в растения затруднено по сравнению с условиями пустынных и полупустынных областей, где почвы имеют щелочную реакцию и обеднены органическими и минеральными коллоидами. В растениях с хорошо развитой и глубоко проникающей корневой системой содержания урана, как правило, больше, чем в растениях того же вида, но с менее развитой корневой системой.

С повышением зольности растений содержание урана в них закономерно уменьшается. В частности, оно всегда значительно выше в старых ветвях и в корневых частях деревьев по сравнению с более зольными кронами, молодыми ветвями и листьями.

Поглощение урана возрастает также при повышении освещенности, температуры и в период цветения растений. Предполагают, что возможно существование определенных видов растений (например, рябинолистник). способных выборочно концентрировать уран в отчетливо повышенных количествах.

Поисковое значение ореолов рассеяния урана в почвах и в растениях неодинаково. Повышенные концентрации урана в почвенном слое используются как важнейший поисковый признак урановых месторождений в различной ландшафтно-географической обстановке. В пустынных, полупустынных и степных районах они образуют

открытые ореолы, чему способствуют щелочная реакция почв и широкое развитие в них глинистой фракции.

В лесных и горно-таежных областях в почвах формируются ослабленные или закрытые вторичные ореолы с горизонтами обогащения на глубинах порядка 1—2 м. Урановые ореолы в почвах могут рассматриваться по существу как вторичные ореолы в рыхлых отложениях, формирование которых осложнено влиянием органической составляющей почв.

Поисковое значение ореолов рассеяния урана в растениях можно определить только предположительно вследствие их еще весьма слабой изученности. При наличии отчетливых ореолов в корах выветривания, рыхлых отложениях и почвах использование ореолов рассеяния урана в растениях как поисковых признаков не обеспечивает каких-либо заметных преимуществ. Однако отмечено, что их размеры и контуры не всегда совпадают с таковыми для перечисленных выше ореолов. Часто они резко смещены по склону и превосходят другие ореолы по площади в несколько раз. Поэтому можно предполагать, что их использование окажется эффективным при поисках на площадях с ослабленными, закрытыми и неглубоко погребенными вторичными ореолами при мощностях рыхлых отложений до 5—7 м, особенно в северных районах, доступность которых резко повышается в зимний период.

## § 6. Газовые ореолы

При распаде содержащихся в урановых рудах радиоактивных элементов возникают не только твердые, но и газообразные продукты распада: радон, торон, актинон и гелий. Три первых радиоактивных газа (эманации) входят в состав последовательно превращающихся элементов урано-радиевого, ториевого и актиноуранового рядов. Гелий образуется за счет  $\alpha$ -частиц, испускаемых элементами всех трех рядов; и является нерадиоактивным газом.

Торон и актинон как весьма короткоживущие газы, с периодами полураспада соответственно 54,5 и 3,92 сек, могут находиться только в непосредственной близости к эманлирующему источнику. Радон, период полураспада которого 3,82 суток, распространяется в окружающую среду на большие расстояния от эманлирующего источника, образуя вокруг него газовый ореол рассеяния. Гелий как нерадиоактивный элемент может распространяться на очень большие расстояния, поскольку в процессе движения от радиоактивных объектов он не распадается.

Перемещение газов от рудных скоплений к дневной поверхности происходит главным образом путем их диффузии в трещинах горных пород или в порах перекрывающих их рыхлых отложений. Вследствие коротких периодов полураспада и малых скоростей диффузионных процессов перемещения торона и актинона от эманлирующих источников не превышают 10—20 см, а перемещения радона могут достигать 4—5 м. Дальность перемещения гелия зависит главным образом от его концентрации в материнском источнике и степени



проницаемости вмещающих пород. При благоприятных условиях распространение гелия возможно на сотни и более метров от мест его повышенных концентраций.

Радиоактивные эманации относятся к группе тяжелых инертных газов. Возникая как продукты распада природных радиоактивных образований, они поступают во внешнюю среду, выделяясь из них путем эманирования. Под эманированием пород и руд подразумевается их способность выделять во внешнее пространство газообразные эманации.

Формы и размеры природных эманационных ореолов отличаются значительно большей сложностью в связи с неоднородностью строения вмещающих пород и рыхлых отложений, а также потому, что источниками эманации при их формировании являются не только скопления руд радиоактивных элементов, но в равной степени первичные и вторичные ореолы рассеяния урана в коренных породах, корях выветривания, в водах и в рыхлых отложениях. Неоднородность строения вмещающих пород и перекрывающих их рыхлых отложений оказывает влияние на форму и размеры ореолов в связи с резкими изменениями интенсивности диффузионного процесса в зависимости от пористости и проницаемости пород, ее влажности, структуры и температурных условий.

В породах с низкой пористостью диффузия происходит медленнее, а плотные породы являются газоупорными. Кроме того, газопроницаемость пород и рыхлых отложений зависит от структуры пор и их размера. Так, например, в глинах с пористостью 40—50% диффузия радиоактивных газов проявляется слабее по сравнению с песками, которые обладают более низкой пористостью.

Увеличение влажности также вызывает резкое ослабление диффузионных процессов. При увеличении пористости с 3 до 15% интенсивность диффузионного процесса снижается почти в 10 раз, что объясняется закупоркой пор водой. Поэтому в разрезах неоднородных рыхлых отложений формы газовых ореолов отличаются большим разнообразием, а при наличии газоупорных горизонтов возможно формирование закрытых (погребенных) газовых ореолов.

Заметное увеличение эманационных полей с усложнением форм и строения газовых ореолов происходит при наличии первичных и вторичных урановых ореолов рассеяния вокруг ураноносных рудных залежей. Газовые ореолы такого рода представляют собой наиболее ценные поисковые признаки, поскольку в этих условиях их размеры не ограничиваются предельными расстояниями миграции. Большое количество частных эманационных центров способствует формированию сложных ореолов, охватывающих толщи пород и рыхлых отложений значительной мощности.

Процесс формирования эманационных ореолов осложняется одновременным образованием радоновой, тороновой и актиноновой составляющих вследствие радиоактивного распада различных торий- и урансодержащих минералов. Для правильной интерпретации обнаруженных ореолов необходимо разделение и самостоятельная оценка

каждой из них. Аномальные концентрации радиоактивных газов в подпочвенном воздухе проявляются на фоне их низких концентраций, обусловленных региональной зараженностью горных пород и рыхлых отложений радиоактивными элементами. В каждом конкретном случае величина фона зависит от содержания этих элементов в породах и рыхлых отложениях, от их плотности, эманулирующей способности, пористости и влажности, а также от глубины отбора проб подпочвенного воздуха.

Повышенные концентрации радона могут также создаваться при переносе и отложении радия подземными водами. Однако следует иметь в виду, что такие «радиевые шлейфы» часто образуются радиевыми водами глубинного происхождения вне всякой связи с урановыми месторождениями.

Очагами для образования гелиевых ореолов могут быть скопления урановых или ториевых руд. В последнем случае степень насыщения воды гелием зависит не столько от содержания радиоактивных элементов в породах или рудах, сколько от времени соприкосновения воды с ними. Кроме того, при формировании гелиевых ореолов в связи со скоплениями урановых или ториевых минералов между содержаниями радиоактивных элементов в рудах и содержаниями гелия в подпочвенном воздухе не наблюдается отчетливых корреляционных связей. Все это затрудняет использование гелиевых ореолов для оценки урановосности изучаемых площадей.

Наиболее уверенным поисковым признаком на уран являются актиноновые ореолы, поскольку они вызываются ореолами рассеяния протактиния, которые в свою очередь образуются только в пределах ореолов рассеяния актиноурана. Поисковое значение протактиния особенно велико в связи с тем, что в отличие от урана и радия он является малоподвижным элементом в зоне окисления и поэтому почти не перемещается в сторону от урановорудных скоплений. Однако несмотря на это радоновые ореолы имеют более широкое применение как поисковый признак для обнаружения урановых месторождений. Являясь продуктами распада уранового ряда, они легче, чем актиноновые ореолы, обнаруживаются современной радиометрической аппаратурой и отличаются от них большей протяженностью. Поисковое значение гелиевых ореолов, несмотря на их большую протяженность, пока что весьма сомнительно вследствие сложности расшифровки аномалий.

## § 7. Радиационные ореолы

Вследствие радиоактивных свойств урановых руд вокруг урановых месторождений появляются ореолы рассеяния еще одного вида, которые обычно называются радиационными. Радиационные ореолы возникают в результате естественного самопроизвольного распада ядер атомов радиоактивных элементов, который сопровождается испусканием заряженных альфа- и бета-частиц и выделением коротковолнового излучения электромагнитной природы (гамма-излучение).

В качестве поисковых признаков используются радиационные ореолы, обусловленные главным образом испусканием гамма-квантов и бета-частиц, что связано с их более высокой проникающей способностью. В природных условиях радиационные ореолы возникают не только вокруг скоплений радиоактивных руд, но и вокруг сопровождающих их первичных ореолов, а также вокруг вторичных ореолов солевого, механического, водного и газового происхождения. Поэтому размеры природных радиационных ореолов, как правило, превышают размеры частных ореолов, что повышает возможность их обнаружения радиометрическими методами по сравнению с другими методами поисков урановых месторождений.

Увеличенные размеры и повышенная глубинность радиационных ореолов по сравнению с другими первичными и вторичными ореолами рассеяния урана обеспечивает их ведущее поисковое значение как важнейших поисковых признаков радиоактивных руд.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

Григорян С. В., Янишевский Е. М. Эндогенные геохимические ореолы рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1968.

Красников В. И. Геологические предпосылки поисков месторождений урана. Атомиздат, 1964.

Методы поисков урановых месторождений. Изд-во «Недра», 1969.

Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. Атомиздат, 1960.

## Г л а в а III

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ВЕДЕНИЯ ПОИСКОВЫХ РАБОТ

Природные условия ведения поисковых работ определяются совокупным влиянием геологических, геоморфологических, биоклиматических и многих других природных особенностей поискового района, от которых зависят условия нахождения, формы проявления, возможности и наиболее эффективные пути обнаружения урановых месторождений. Среди большого разнообразия природных условий решающее влияние на выбор поисковых методов и на их эффективность оказывают геолого-структурное положение поискового района и его ландшафтно-географические особенности.

Геолого-структурным положением района определяется ожидаемый комплекс месторождений полезных ископаемых, наиболее вероятные промышленные типы урановых месторождений, условия их нахождения и связи уранового оруденения с геологическими структурами данного участка земной коры. В частности, от регионального геолого-структурного положения района зависит пространственная ориентировка важнейших рудоконтролирующих структур и рудных залежей.

Ландшафтно-географическими особенностями района определяются строение его поверхности, характер и типы покрова рыхлых отложений, растительного и почвенного покрова, т. е. та природная обстановка, в которой развиваются ореолы рассеяния урана и его спутников.

При оценке совокупного влияния природных условий ведения поисковых работ необходимо учитывать, что влияние геолого-структурных факторов на ход и направленность приповерхностных процессов миграции элементов возрастает с глубиной. Они почти не оказывают влияния на миграцию элементов в растительном покрове и мало влияют на процессы миграции элементов в почвах, за исключением случаев резкого изменения литологического состава материнских пород (например, смена силикатных пород карбонатными). Значительно большее влияние оказывают геолого-структурные факторы на ход процессов гипергенеза в рыхлых отложениях и особенно в корах выветривания. В пределах водоносных горизонтов влияние геолого-структурных факторов часто является определяющим.

### § 1. Геолого-структурные условия поисков

В региональном масштабе В. И. Красниковым выделяется три основных типа геологических структур с двумя подтипами в каждом с принципиально различными условиями поисковых работ (табл. 4).

Регионально-геологические структуры I типа характеризуются интенсивными проявлениями магматизма и метаморфизма, вертикальной или близкой к ней ориентировкой рудовмещающих структур, разнообразием рудных комплексов и наиболее благоприятными условиями для вывода месторождений на современную дневную поверхность. Для них типично разнообразие промышленных типов и поисковых признаков урановых месторождений.

В пределах древних, часто активизированных щитов (подтип I-A) могут быть обнаружены минерализованные зоны дробления и сложные тела прожилково-вкрапленных руд с существенно урановым оруденением, залежи урановых руд в метасоматически измененных метаморфических породах и залежи урановых руд в древних конгломератах. Для поднятых складчатых областей подтипа I-B характерны жилы и жильные зоны с существенно урановым оруденением, сложные прожилково-вкрапленные урановорудные залежи в эффузивных и субвулканических породах, сложные пластоподобные залежи и штокверки урановых руд в глинисто-углистых осадочно-метаморфических толщах.

Регионально-геологические структуры II типа характеризуются двухэтажным строением. Верхний платформенный этаж отличается близгоризонтальной ориентировкой рудовмещающих структур и рудных залежей. При отсутствии магматических проявлений (подтип II-A) в краевых зонах платформ могут встретиться осадочные месторождения урана в фосфоритах или в битуминозных сланцах, пластовые залежи ураноносных глин с костными остатками ископаемых рыб,

**Основные типы регионов (регионально-геологических структур)  
(по В. И. Краснкову)**

Тип	Подтип	Распространенность на территории СССР, %	Примеры
I. Поднятые и в разной мере эродированные древние щиты и складчатые области	I-А. Глубокоэродированные щиты и поднятые байкальцы	8	Балтийский щит, Алданский щит, Байкальская складчатая зона
	I-Б. Области поднятой палеозойской, мезозойской и кайнозойской складчатости	30	Урал, Казахстан, Тянь-Шань, Забайкалье, Сихотэ-Алинь
II. Открытые районы платформ с двухэтажным строением	II-А. Без позднейшего магматизма	16	Русская платформа, Туранская плита
	II-Б. С широким проявлением позднейшего магматизма	11	Сибирская платформа
III. Закрытые районы с региональным развитием мощного рыхлого кайнозойского покрова	III-А. Закрытые пониженные участки платформ и плит	30	Западно-Сибирская депрессия
	III-Б. Закрытые районы щитов и складчатых сооружений		Район Кызылкумов и Каракумов

ураноносные песчаники и битумы. В структурах второго подтипа (II-Б) возможно также и образование гидротермальных урановых месторождений в связи с проявлениями щелочного магматизма платформенного типа.

Нижний структурный этаж представляет собой кристаллическое основание, аналогичное по строению древним щитам. Урановые месторождения нижнего этажа могут представлять практический, а следовательно, и поисковый интерес только в тех частях платформ, где мощность верхнего этажа не превышает 500—1000 м.

В отличие от структур I типа в открытых районах платформ многие урановые месторождения не имеют выхода на дневную поверхность вследствие слабой расчлененности рельефа (в пределах первых сотен метров) и почти горизонтального залегания большинства продуктивных толщ.

К III типу относятся закрытые регионы, погребенные под мощным покровом рыхлых отложений главным образом четвертичного и в меньшей степени более древнего возраста. В пределах СССР основная часть этих районов связана с пониженными участками платформы и плит (подтип III-A), а меньшая их часть располагается в пределах древних щитов и складчатых сооружений (подтип III-B).

В закрытых районах практически отсутствуют выходы коренных пород, в связи с чем поиски урановых месторождений возможны только с применением опорных, картировочных и поисковых скважин. Выявление урановых месторождений ведущих промышленных типов в молодом рыхлом покрове маловероятно. В связи с этими отложениями могут быть обнаружены только мелкие месторождения урана в торфяниках, бурых углях или в песчано-глинистых отложениях, обогащенных обуглившимися растительными остатками и другими восстановителями.

Выделение перечисленных трех типов регионально-геологических структур на мелкомасштабной карте СССР обеспечивает только принципиальную схему дифференцированного подхода к оценке поисковых возможностей крупных регионов. В пределах каждого региона различия геолого-структурных условий поисков находят свое отражение на геологических и тектонических картах самых различных масштабов, которые служат основой для составления специализированных металлогенических и прогнозных карт.

Принципы и методика составления прогнозно-металлогенических карт весьма сложны и разнообразны. Они зависят от геолого-структурных особенностей района и от генетических типов урановых месторождений. При составлении таких карт учитываются особенности геологического строения района, а также совокупность всех благоприятных поисковых критериев, теоретические представления о генезисе месторождений и о наиболее вероятных источниках урана. Обязательным элементом прогнозно-металлогенических карт являются контуры площадей, перспективных для поисков урановых месторождений. В контурах перспективных площадей обычно выделяются первоочередные (явно промышленные), второстепенные (с благоприятными геологическими предпосылками) и третьестепенные площади (с неясными перспективами ураноносности). Прогнозно-металлогенические карты представляют собой научную основу для планирования поисковых работ.

## § 2. Геоморфологические условия поисков

Геоморфологические условия района в значительной мере определяют степень его обнаженности, а также характер и распределение большинства элементов географической среды — покрова рыхлых отложений, почвенного и растительного покрова, гидросети и в некоторой степени горизонтов подземных вод, т. е. совокупность важнейших природных факторов, оказывающих влияние на выбор поисковых работ. С другой стороны, современный рельеф дневной

поверхности отражает и некоторые особенности геологического строения района.

В основе генетической классификации рельефа лежит его разделение на положительные и отрицательные формы. Первые образуются путем денудации на фоне общего поднятия отдельных участков или зон земной коры, вторые — за счет накопления рыхлых осадков на фоне общего понижения данного участка земной поверхности.

В районах древних щитов и складчатых областей среди положительных форм рельефа наиболее развит горный рельеф, который условно разделяется на четыре подтипа: высокогорный, нагорья, среднегорный и низкогорный. Для высокогорного рельефа характерны высокие абсолютные отметки хребтов (2500—4000 м) и горных вершин (4000—7000 м), глубокая его расчлененность с относительными превышениями хребтов над тальвегами долин до 2000—4000 м, хорошая обнаженность коренных пород и наличие глубоко промываемых структур. В высокогорных районах физическое разрушение пород и руд опережает процессы их химического выветривания. Поэтому урановые минералы не успевают окисляться и переходить в растворимую форму, а образуют отчетливо выраженные механические ореолы и потоки рассеяния.

Нагорья представляют собой слаборасчлененные горные массивы во внутренних частях горных сооружений. В отличие от высокогорных районов значительные площади нагорий перекрыты рыхлыми отложениями элювиального и в меньшей степени делювиального происхождения, в которых развиваются открытые, иногда ослабленные ореолы рассеяния урана.

Среднегорный рельеф с максимальными отметками горных вершин 2500—3500 м, средними высотами от 500 до 1000 м и глубиной расчленения рельефа от 400 до 2000 м характеризуется различной степенью обнаженности коренных пород — от хорошей до незначительной и широким развитием элювиально-делювиального покрова рыхлых отложений. В рыхлых отложениях, а также в почвах, растительном покрове и в подземных водах формируются хорошо выраженные ореолы рассеяния урана.

Низкогорный рельеф с отметками от 200 до 1000 м, слабой расчлененностью порядка 100—300 м и ограниченной обнаженностью коренных пород также характеризуется широким развитием покрова рыхлых отложений, в котором развиваются самые различные вторичные ореолы рассеяния урана. Однако вследствие большой мощности этих образований, а также из-за того, что значительная часть из них является дальнеприносной, многие ореолы являются ослабленными или вообще не выходят на дневную поверхность.

В районах платформ среди положительных форм рельефа выделяют плоскогорья и плато, которые представляют собой разновидности структурного рельефа, отличаются слабой степенью расчлененности, почти полным отсутствием обнажений (только по долинам рек) и широким развитием рыхлых отложений, растительного и почвенного покрова. Вследствие горизонтальной ориентировки слоистых

платформенных структур условия для вывода урановых месторождений на поверхность, а следовательно, и для развития вторичных ореолов в рыхлых отложениях, растительном и почвенном покрове на плоскогорьях и плато неблагоприятны.

Отрицательные — аккумулятивные формы рельефа типа аллювиальных равнин, предгорных наклонных равнин и межгорных впадин еще менее благоприятны для развития ореолов рассеяния урана. Они полностью лишены естественных выходов коренных пород, а выполняющие их мощные толщи рыхлых отложений лишены prominently ценных скоплений урана.

### § 3. Строение и роль покрова рыхлых отложений

Подавляющая часть земной поверхности, даже в хорошо обнаженных районах, покрыта более или менее мощным чехлом рыхлых отложений, представляющих собой продукты разрушения коренных пород. По происхождению рыхлые отложения весьма разнообразны (элювий, делювий, аллювий, комплексы ледниковых и водно-ледниковых отложений).

Для оценки поискового значения различных генетических типов рыхлых образований их разделяют на две группы. В первую группу входят элювиальные, элювиально-делювиальные и грубообломочные делювиальные отложения, образованные на месте залегания или в непосредственной близости от выходов материнских пород. Во вторую группу отнесены дальнеприносные аллювиальные, ледниковые, лёссовидные, а также тонкозернистые делювиальные отложения типа покровных суглинков.

Поисковое значение покрова рыхлых отложений оценивается всегда с двух взаимоположенных точек зрения. С одной стороны, в нем формируются вторичные ореолы рассеяния урана, облегчающие обнаружение первичных урановых концентраций, с другой стороны, рыхлые отложения скрывают не только рудные выходы, но и другие поисковые признаки урановых месторождений, что сильно затрудняет их поиски. Отрицательная роль покрова рыхлых отложений возрастает с увеличением его мощности и особенно с увеличением доли дальнеприносного материала в их составе. С увеличением мощности рыхлых отложений, образованных на месте залегания материнских пород, происходит ослабление вторичных ореолов рассеяния урана и его спутников по мере приближения к дневной поверхности. Начиная с некоторой критической мощности, ореолы рассеяния испытывают такое заметное разубоживание, что содержания элементов-индикаторов в приповерхностных горизонтах уменьшаются сперва до минимальных аномальных, а затем до фоновых значений. В каждом конкретном случае величина критической мощности определяется местными условиями формирования вторичных ореолов. В зависимости от совокупного влияния местных условий величина критической мощности рыхлых отложений, образованных на месте залегания материнских пород, может изменяться от 1—2 до 8—10 м и более.<sup>3</sup>



Появление в разрезах рыхлых отложений дальнеприносных образований резко снижает величину их критической мощности вследствие захоронения и экранирования развитых под ними вторичных ореолов. Для поисков вторичных ореолов рассеяния урана и его спутников критическая мощность большинства дальнеприносных отложений не превышает долей метра.

Понятие критической мощности должно рассматриваться в тесной связи с понятием представительного горизонта опоскования. Представительным горизонтом называется горизонт максимального площадного и устойчивого развития вторичных ореолов, наиболее близко расположенный к дневной поверхности. При хорошем развитии открытых вторичных ореолов представительный горизонт располагается вблизи дневной поверхности, непосредственно под дерновым слоем. Для выщелоченных вторичных ореолов урана, типичных для разрезов лесной и горно-таежной зон, представительный горизонт опускается до глубин порядка 0,5—1,5 м, совпадая с горизонтом «вмывания» подзолистых почв. В районах развития современных или древних кор выветривания представительный горизонт опускается ниже подошвы рыхлых отложений и совпадает с наименее выщелоченными пестроцветноглинистыми или глинисто-щебенистыми их зонами.

Если общая мощность рыхлых отложений меньше критической, то ореолы рассеяния могут быть выявлены вблизи поверхности. Если же их общая мощность больше критической, то при проведении поисковых работ необходимо углубляться в рыхлый покров до представительного горизонта опоскования.

В зависимости от положения вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов, генетического типа и мощности рыхлых отложений поисковые площади обычно разделяются на несколько (чаще четыре) категорий по трудности их опоскования.

I категория — площади, обнаженные или покрытые рыхлыми отложениями элювиально-делювиального типа. Для них характерно развитие открытых ореолов нормальной интенсивности.

II категория — площади, перекрытые элювиально-делювиальными отложениями с развитием в верхних слоях дальнеприносных отложений типа делювиальных покровных суглинков при общей мощности покрова рыхлых отложений около 5—7 м. Для них типично развитие вторичных ореолов, резко ослабленных у поверхности.

III категория — площади, перекрытые рыхлыми отложениями смешанного типа мощностью до 20—30 м с преобладанием дальнеприносного материала. На них развиваются неглубоко погребенные вторичные ореолы.

IV категория — площади, перекрытые мощным плащом дальнеприносных рыхлых отложений (многие десятки метров) с глубоко погребенными ореолами рассеяния.

Для обеспечения достоверных результатов опоскования в пределах каждой из выделенных категорий необходимо знать строение

представительного горизонта, глубину его залегания, строение и состав рыхлых отложений, коры выветривания, а также особенности почвенно-растительного покрова и режима грунтовых вод.

#### § 4. Биоклиматическая зональность

Климат района во многом определяет характер его почвенного и растительного покровов, гидрографическую сеть, режим подземных вод, а следовательно, и особенности миграции урана и его спутников в приповерхностных условиях. Чем влажнее и теплее климат, тем больше образуется живого вещества и тем интенсивнее протекают процессы его разложения, что в свою очередь активизирует миграцию химических элементов.

В географическом размещении почв, современных кор выветривания, рыхлых континентальных отложений, поверхностных и подземных вод проявляется отчетливая зональность, которая в общем соответствует климатической зональности. В пределах равнинной части Советского Союза выделяется несколько климатических (ландшафтно-географических) зон, последовательно сменяющих друг друга в направлении с севера на юг: полярная (ледяная и зона арктических пустынь), тундровая, лесная, лесостепная, степная и пустынная. Сходная вертикальная климатическая зональность наблюдается в горных районах, где типы и количество вертикальных поясных зон зависят от географического положения горного района и его абсолютных отметок. Вертикальная поясность горных районов не является полным аналогом горизонтальной зональности. Отдельные ландшафтные пояса часто выпадают из общей схемы, но в то же время в горах встречаются отсутствующие на равнинах горно-луговые и другие своеобразные пояса.

Практически наиболее важно различать два типа климатических и ландшафтно-географических областей — аридную и гумидную, в которых создаются принципиально различные условия приповерхностной миграции химических элементов.

А р и д н ы е о б л а с т и включают в себя степную и пустынную ландшафтно-географические зоны, которые отличаются сухим климатом с преобладанием испарения над количеством выпадающих осадков. Для аридных областей характерны отсутствие лесного покрова, а нередко и слабое развитие травянистой растительности, быстрое разложение и минерализация органических веществ, высокое содержание углекислого кальция в почвах, непромывной режим, гидрокарбонатно-кальциевый состав и слабощелочная реакция почвенно-грунтовых вод. В таких условиях уран и его спутники обладают слабой химической подвижностью и образуют открытые несмещенные или слабосмещенные радиоактивные ореолы, которые легко обнаруживаются поверхностными поисковыми методами.

Г у м и д н ы е о б л а с т и отличаются влажным климатом, в результате чего количество выпадающих осадков преобладает над их испарением. Гумидные области с жарким и влажным климатом

включают в себя тропическую и субтропическую ландшафтные зоны. В умеренных широтах в состав гумидных областей входят лесостепная, лесная, тундровая и полярная зоны, а также горно-таежная зона и многие ландшафтно-географические пояса горных областей. В отличие от аридных областей геофизические процессы в гумидных областях ограничиваются не дефицитом влаги, а дефицитом тепла. Поэтому в полярной, тундровой и горно-таежной зонах гумидной области доминируют процессы физической дезинтеграции и морозного выветривания, а химическая миграция урана и его элементов-спутников проявляется слабо. Даже в условиях положительных температур в короткий летний период процессы химической миграции в этих зонах ограничиваются деятельным слоем мощностью не более 1—2 м вследствие широкого развития вечной мерзлоты<sup>1</sup>.

В умеренно теплых лесных и лесостепных зонах гумидной области, а также в горно-лесных и горно-луговых поясах избыток влаги приводит к господству промывного режима почвенно-грунтовых вод, к развитию богатого растительного покрова и почв дерново-подзолистого типа. Для этих зон характерно накопление большого количества органических остатков в понижениях рельефа с образованием торфяных болот и слабокислая реакция подземных вод. Многие элементы, в том числе уран и его спутники, обладают в гумидной зоне высокой миграционной способностью и поэтому образуют ореолы большой протяженности, далеко оторванные от месторождений. Благодаря сорбции урана органическими веществами и сорбции радия глинистыми минералами вторичные урановые ореолы часто образуются вдоль кромок торфяных болот, а ореолы радия (радиевые штейфы) — в рыхлых отложениях глинистого состава.

Промывной режим вод способствует выщелачиванию урана и радия из почв и из верхних горизонтов рыхлых отложений. Часто заметное накопление радия и урана происходит в нижнем (иллювиальном) горизонте подзолистых почв. Как правило, в условиях гумидных областей в рыхлых отложениях над выходами урановых месторождений образуются резко ослабленные или полностью выщелоченные с поверхности ореолы, обнаружение которых возможно только с применением шпуровых или глубинных вариантов поисковых методов в зависимости от глубин залегания представительных горизонтов. Оценка аномалий и обнаружение коренных выходов урановых месторождений затрудняются также из-за оторванности и крупных горизонтальных смещений ореолов. В жарких субтропических и тропических зонах гумидных областей процессы практически полного выщелачивания урана и его спутников охватывают не только всю мощность рыхлых отложений, но и значительные мощности коренных пород с образованием мощных кор выветривания латеритного типа. Поэтому поиски урановых месторождений в зонах жаркого и влаж-

---

<sup>1</sup> Это не исключает, однако, возможности обнаружения в рыхлых отложениях этих зон солевых ореолов урана и его спутников, образованных еще в доледниковый период в условиях более теплого палеоклимата.

ного климата возможны только с применением глубоких методов.

Таким образом, каждая ландшафтная зона является одновременно и особой геохимической зоной со специфическим типом биологического круговорота атомов и своеобразными условиями водной миграции урана и его элементов-спутников.

### § 5. Принципы ландшафтного районирования

В основу ландшафтного районирования территорий по условиям ведения поисковых работ положен комплекс признаков, характеризующий особенности географического ландшафта. Основными составляющими (компонентами) географического ландшафта являются рельеф, почвенно-растительный слой, покров рыхлых отложений, коры выветривания (современная и древняя), выходы коренных пород и почвенно-грунтовые водоносные горизонты. Все эти компоненты тесно взаимосвязаны и зависят в основном от геологического строения, проявлений неотектоники и климатических особенностей района.

Смысл районирования поисковой территории по ландшафтным условиям заключается в выявлении связей и зависимости между отдельными компонентами географического ландшафта. Понимание этих взаимосвязей необходимо для оценки реальных условий формирования и вероятного проявления ореолов рассеяния урана и его спутников как основных поисковых признаков месторождений.

Наименьшим участком, в пределах которого сочетаются предельно однородные части ландшафта, является элементарный ландшафт. По Б. Б. Полюнову, это определенный элемент рельефа, сложенный одной породой, одним типом рыхлых отложений, в пределах которого развит почвенно-растительный покров определенного типа. С учетом геоморфологических признаков и расположения относительно уровня грунтовых вод можно выделить четыре главных типа элементарных ландшафтов: водоразделов, склонов, подножий склонов, местных водоемов.

Элементарные ландшафты водоразделов приурочены к повышенным частям рельефа, охватывают водораздельные плато и пологие верхние части склонов. По терминологии Б. Б. Полюнова они являются автономными, так как покрыты рыхлыми элювиальными и элювиально-делювиальными отложениями, образованными за счет разрушения подстилающих коренных пород. В пределах этих ландшафтов образуются несмещенные остаточные или почти несмещенные вторичные ореолы рассеяния урана и его спутников.

Элементарные ландшафты склонов располагаются в их средних частях, покрытых рыхлыми отложениями делювиального типа. Как и два последующих ландшафта, они являются подчиненными, так как состав рыхлых отложений и ореолов рассеяния в них зависят от состава коренных пород в пределах автономного элементарного ландшафта. Для ландшафтов склонов характерны в различной степени смешанные остаточные и вторичные ореолы или потоки рассеяния.

Элементарные ландшафты подножий склонов располагаются в их нижних выположенных частях, в местных понижениях рельефа, или в пределах надпойменных террас речных долин. Они отличаются неглубоким залеганием уровня грунтовых вод и увеличенными мощностями рыхлых отложений делювиального, часто коллювиального или пролювиального, а также аллювиального происхождения. При благоприятных условиях в пределах этих ландшафтов могут сохраняться смещенные остаточные ореолы рассеяния урана и его спутников, а за счет повышенных концентраций элементов в грунтовых водах нередко образуются вторичные их скопления в виде новообразованных солевых ореолов.

К элементарным ландшафтам местных водоемов относятся участки болот, русел рек, водоемы прудов и озер, в которых могут развиваться водные и солевые ореолы (потоки) рассеяния.

Естественная совокупность элементарных ландшафтов образует геохимический ландшафт. По А. И. Перельману, геохимический ландшафт представляет собой парагенетическую ассоциацию сопряженных элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов. Например, горно-таежный геохимический ландшафт может состоять из следующих элементарных ландшафтов: верхняя (водораздельная) часть склона, средняя часть склона с еловой тайгой, нижняя часть склона с заболоченной тайгой и лесное заболоченное озеро. Чем энергичнее протекает в ландшафте биологический круговорот атомов, тем теснее связь между различными элементарными ландшафтами. Наиболее совершенная геохимическая связь между элементарными ландшафтами проявляется в геохимических ландшафтах жарких гумидных областей, а несовершенная — в условиях аридных областей и в холодных гумидных зонах. Понятие «геохимический ландшафт» отвечает требованиям районирования поисковых территорий по условиям проведения геохимических методов поисков. Однако это понятие не является универсальным, если учесть, что наряду с химическим выветриванием всегда в большей или меньшей степени проявляются и процессы физического выветривания, которые в случаях несовершенных геохимических связей приобретают доминирующее значение. Поэтому для целей ландшафтного районирования предпочтительнее более широкое понятие о географическом ландшафте, которое учитывает влияние обоих ведущих процессов выветривания.

В настоящее время еще не существует единой и общепризнанной методики составления карт ландшафтных условий поисков. Как свидетельствуют работы В. И. Красникова, А. И. Перельмана, Ю. В. Шаркова, О. А. Глико, она может заметно различаться в зависимости от масштабов карт. Для направления рекогносцировочных работ необходимы мелкомасштабные обзорные ландшафтные карты (1 : 200 000—1 : 100 000), а для проведения детальных поисков — карты масштаба 1 : 50 000—1 : 10 000.

Наиболее распространенная методика составления ландшафтных карт заключается в изучении особенностей и закономерностей про-

странственного размещения каждого из компонентов географического ландшафта с последующим составлением геоморфологической и почвенно-растительной карт, карт рыхлых отложений, кор выветривания, степени обнаженности района и гидрогеологических почвенно-грунтовых (или мерзлотных) карт. В дальнейшем на основе глубокого изучения количественных и качественных показателей отдельных компонентов составляются сводные ландшафтные карты и карты районирования по категориям трудности опоскования.

С учетом тесной связи между отдельными компонентами географической среды и их взаимозависимости от особенностей геологического строения, неотектоники и климата района ландшафтные карты могут быть составлены и прямым методом — непосредственно по данным дешифрирования контактных аэрофотоснимков. При такой методике по аэрофотоматериалам выделяются все доступные дешифрованные элементарные ландшафты, которые рассматриваются как однородные таксономические единицы, обладающие устойчивыми средними количественными и качественными показателями всех компонентов ландшафта. В дальнейшем значения этих показателей (морфологические данные, строение почвенного покрова, состав и мощности рыхлых отложений, кор выветривания, состав и особенности горизонтов почвенно-грунтовых вод и др.) устанавливаются при проведении полевых маршрутов на наиболее типичных «ключевых» участках и после соответствующей проверки распространяются на все элементарные ландшафты данного типа.

Ландшафтные карты служат основой для районирования поисковых территорий по трудности опоскования отдельных площадей, по эффективности применения тех или иных технических средств или комплексов поисковых методов.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Г л и к о О. А. Ландшафтные условия и применение поисковых методов. В сб. «Теоретические основы поисков и разведки твердых полезных ископаемых». Изд-во «Недра», 1968.

К р а с н и к о в В. И. Геологические предпосылки поисков месторождений урана. Атомиздат, 1964.

П е р е л ь м а н А. И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). Изд-во «Недра», 1968.

## МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## Глава I

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПОИСКОВ

## § 1. Стадийность поисковых работ

Поиски месторождений полезных ископаемых представляют собой самостоятельный этап последовательного изучения и освоения недр, который осуществляется на основе региональных геологических съемок мелких, средних и крупных масштабов. Эти геологические съемки проводятся комплексно по планшетам бланковой карты Союза ССР и сопровождаются некоторыми поисковыми операциями на выявление всех видов полезных ископаемых, в том числе и радиометрическими поисками урановых месторождений. По результатам региональных съемок и сопровождающих их предварительных поисков выясняется геологическое строение изучаемых территорий, условия нахождения полезных ископаемых, устанавливаются поисковые критерии и признаки обнаруженных месторождений, выделяются перспективные площади и дается оценка их рудоносности и ураноносности.

Поиски урановых месторождений осуществляются в две последовательные стадии. В первую стадию проводятся детальные поисковые работы в масштабах 1 : 50 000—1 : 10 000, целью которых является обнаружение урановых рудопроявлений или поисковых признаков, указывающих на возможность их нахождения на глубине. Детальные поиски сопровождаются проходкой поверхностных горных выработок — расчисток, канав или шурфов и мелких буровых скважин для расшифровки геологической природы радиометрических аномалий или ореолов рассеяния радиоактивных элементов и обнаружения первичной рудной минерализации. Первая стадия поисковых работ завершается прогнозной оценкой перспектив ураноносности опосредованных площадей и отдельных объектов, которая выражается в цифрах прогнозных запасов.

Вторая стадия — поисково-разведочные работы проводятся только в пределах уже выявленных перспективных площадей, аномальных зон или рудопроявлений. В зависимости от сложности геологического строения, доступности и размеров изучаемого объекта

масштабы поисково-разведочных работ могут изменяться от 1 : 25 000 до 1 : 1000. Целью поисково-разведочных работ является отбраковка аномальных зон и рудопоявлений, не имеющих промышленной ценности, и выбор объектов, заслуживающих постановки предварительных разведочных работ. На основании тщательного геологического изучения и опробования поверхностных выработок для таких объектов определяются контуры рудных залежей в плане, а по данным единичных скважин обосновывается прогноз оруденения на глубину.

Поисково-разведочные работы завершаются определением промышленного типа месторождения и оценкой перспектив ураноносности в пределах приповерхностного геологически обоснованного контура оруденения по категории  $C_2$ , а для глубоких и фланговых частей объекта — в цифрах прогнозных запасов.

## § 2. Геологические и геофизические съемки как основа ведения поисковых работ

Геологические наблюдения, их анализ и синтез, отраженные на геологических картах, представляют собой научную основу ведения поисков. Однако это совсем не означает, что поиски и геологическая съемка всегда представляют собой единую и неразрывную операцию. При составлении регионально-геологических карт на первом этапе изучения недр съемка представляет собой главный целевой вид работ. Она проводится для выяснения геологического строения территории, всех важнейших вопросов стратиграфии, тектоники, магматизма, четвертичной геологии и геоморфологии. В числе этих вопросов выясняются и вопросы, связанные с условиями нахождения различных полезных ископаемых, устанавливаются их поисковые критерии и признаки. Однако поисковые вопросы решаются на этом этапе попутно, наряду с другими не менее важными геологическими вопросами. Поэтому регионально-геологические карты могут служить полноценной научной основой только для проектирования поисковых работ. Для научного направления и максимальной эффективности целеустремленных поисков эти карты должны уточняться в направлении детализации тех особенностей геологического строения, которыми определяются ведущие поисковые критерии месторождений ожидаемых промышленных типов. Уточнение регионально-геологических карт и составление специализированных крупномасштабных геологических карт как научной основы поисков производится в процессе их проведения, но с некоторым опережением основных видов поисковых работ.

На стадии детальных поисков большое значение имеют специализированные геологические маршруты, обеспечивающие сбор дополнительных данных для уточнения регионально-геологических карт масштабов 1 : 50 000—1 : 25 000. На стадии поисково-разведочных работ или при проведении детальных поисков урановых месторождений в масштабе 1 : 10 000 обычно проводятся специализированные



крупномасштабные геологические съемки с применением необходимого объема картировочных горно-буровых работ. При составлении этих карт в первую очередь изучаются и детализируются те элементы геологического строения, которыми определяются ведущие поисковые критерии урановых месторождений ожидаемого промышленного типа. Так, например, при поисках инфильтрационных урановых месторождений в песчано-глинистых отложениях с особой детальностью изучаются фациально-литологические особенности разреза осадочных пород в пределах продуктивной толщи отложений, их гидрогеологические условия и характер эпигенетических изменений. При поисках же месторождений гидротермального типа в эффузивно-пирокластических породах главное внимание обращается на детализацию состава и возрастных соотношений эффузивных, пирокластических, субвулканических и интрузивных образований, расщепровку рудоконтролирующих вулкано-тектонических структур, на изучение трещинной тектоники и зональности околорудных гидротермальных изменений.

При составлении специализированных крупномасштабных карт необходимо использовать материалы аэрофотосъемки, что способствует несравненно более глубокому пониманию структуры поискового участка и обеспечивает правильную увязку основных элементов геологического строения между точками и линиями наблюдений по естественным и искусственным обнажениям.

При плохой обнаженности поискового района специализированные крупномасштабные геологические карты должны составляться на основе предшествующих им геофизических съемок. Правильный выбор геофизических методов для решения поставленной задачи возможен только при детальном знании физических свойств горных пород и руд, в первую очередь их плотности, магнитной восприимчивости, электрических, упругих и радиоактивных свойств. При крупномасштабном картировании перспективных ураноносных площадей наиболее широкое применение получили магнитометрические, электрометрические и гравиметрические методы. Роль геофизических методов для крупномасштабного геологического картирования увеличивается по мере уменьшения естественной обнаженности поискового района.

### § 3. Основные методы поисков урановых месторождений

В основе важнейших методов поисков урановых месторождений лежат технические приемы обнаружения различных поисковых признаков урана в виде коренных выходов руд и ореолов рассеяния вокруг урановорудных залежей. Наиболее широко распространены радиометрические методы поисков, основанные на выявлении радиационных ореолов урановых месторождений. Поиски урановых месторождений по ореолам радиоактивных и нерадиоактивных газов производятся соответственно методами эманационных и гелиевых съемок. Для обнаружения первичных и вторичных ореолов рассеяния урана в коренных породах, корах выветривания и рыхлых отложениях при-

меняются различные геохимические (уранометрические) методы поисков, а для выявления водных ореолов радиоактивных элементов — радиогидрогеологические методы поисков урановых месторождений. Поиски урановых руд по их биохимическим ореолам могут осуществляться методами биогеохимической съемки.

Поскольку большинство урановых минералов неустойчивы в поверхностных условиях, такие широко распространенные методы, как шлиховой, обломочно-речной и валунно-ледниковый, редко применяются при поисках урановых месторождений. Тем не менее ореолы механического рассеяния урановой минерализации являются ведущими поисковыми признаками в условиях арктических, высокогорных и горно-таежных зон, где в результате интенсивного физического выветривания образуются мощные грубообломочные продукты разрушения коренных пород. К их числу относятся мощные покровы щебенисто-глыбового элювия на пологих водоразделах и каменные россыпи (курумы) на склонах гор, содержащие рудные свалы и многочисленные обломки горных пород с признаками урановой минерализации. Выявление таких грубообломочных механических ореолов производится воздушными и наземными радиометрическими методами.

**Радиометрические методы поисков.** Сущность всех разновидностей радиометрических методов сводится к измерению интенсивности гамма-полей (или гамма + бета-полей) пород и руд в приземном слое атмосферы, на поверхности земли или в подпочвенном слое и выделению участков с повышенной радиоактивностью.

Измерения интенсивности гамма-полей в приземном слое атмосферы выполняются с помощью аэрогамма-съемок в комплексе с аэромагнитными съемками и сопровождаются непрерывной записью высоты полета. Для целей аэропоисков последнее время применяются высокочувствительные многоканальные радиометры со сцинтилляционными приемниками, которые обеспечивают возможность изучения спектрального состава гамма-излучения с выделением дифференциальных спектров уранового, ториевого и калиевого гамма-излучения. Результаты аэрогамма-спектральных съемок позволяют определять содержание урана (радия), тория и калия в горных породах, расшифровывать природу радиоактивности локальных аномалий и устанавливать их перспективность как поисковых признаков урановых месторождений.

Аэрогамма-съемка является скоростным методом поисков урановых месторождений. К настоящему времени ею покрыты большие территории, однако значение аэрометодов в общем комплексе поисковых работ остается по-прежнему большим в связи с совершенствованием применяемой радиометрической аппаратуры и расширяющимися возможностями аэрогамма-спектрометрии.

В условиях слаборасчлененного рельефа и широкого развития открытых ореолов рассеяния урана аэрометоды обеспечивают такие же возможности обнаружения урановых месторождений, как и различные виды наземных гамма-поисков. Однако в неблагоприятных

условиях, при отсутствии открытых ореолов урана, заболоченности, илч залесенности, а также в районах с сильно пересеченным рельефом, аэропоисковые работы по эффективности значительно уступают наземным методам.

Автомобильная гамма-съемка развилась на основе аэрогамма-съемки, заимствовав у нее самопишущую аппаратуру и важнейшие теоретические положения метода. Как и аэросъемка, она обеспечивает высокую эффективность поисков только в районах с широким развитием открытых ореолов рассеяния урана, доступных для прохождения автотранспорта.

Преимущества автомобильной гамма-съемки перед аэрогамма-съемкой заключаются в большей чувствительности метода, так как измерения гамма-активности производятся на высоте около 2 м над поверхностью земли, а также в том, что обнаруженная аномалия может быть сразу же подвергнута детализации и проверке. Очевидным недостатком автомобильных съемок является ограниченная проходимость автотранспорта даже при условии использования вездеходов.

Пешеходные гамма-съемки широко используются на всех стадиях поисков урановых месторождений и являются основным методом попутных (массовых) поисков урановых руд. Часто различают поверхностную гамма-съемку, шпуровую гамма-съемку, гамма-профилирование горных выработок и поверхностную гамма-спектрометрию.

**Газовые методы поисков.** К числу газовых методов поисков месторождений радиоактивных руд относятся различные виды эманационных съемок и гелиевая съемка.

Эманационные методы поисков включают в себя радоновую, тороновую и актиноновую съемки, из которых первая представляет собой наиболее распространенный метод поисков урановых месторождений по радиоактивным газам.

Преимущество эманационных съемок перед гамма-съемками заключается в их несколько большей глубинности, а недостатками являются меньшая производительность и низкая поисковая эффективность в районах развития сильно увлажненных, плотных (глинистых), а также крупнопористых рыхлых отложений. Последнее время в связи с широким развитием шпуровых и глубинных вариантов гамма-съемок эманационные съемки стали применяться реже, главным образом при детализационных исследованиях на стадии поисково-разведочных работ.

В современной практике газовых съемок производятся массовые определения концентраций радона и торона в почвенном воздухе. Измерения концентраций актинона проводятся, как правило, только выборочно, для выявления природы аномальных участков или зон.

Гелиевые съемки как метод поисков урановых месторождений не получили широкого распространения в связи с трудностями расшифровки гелиевых аномалий из-за отсутствия корреляции между содержанием урана в рудных залежах и содержаниями гелия в газовых ореолах, а также вследствие большого количества «ложных» гелиевых

аномалий, не связанных с повышенными концентрациями урана.

**Геохимические методы поисков.** В последние годы геохимические методы поисков урановых месторождений по ореолам рассеяния урана в коренных породах, рыхлых отложениях, водах и растениях получают все более широкое развитие.

Геохимические поиски по первичным (эндогенным) ореолам основаны на обнаружении повышенных концентраций урана и его спутников в коренных породах методами радиометрического, люминесцентного и спектрального анализа проб с последующим выявлением закономерностей пространственного размещения этих элементов. Геохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния урана и его спутников в корах выветривания и особенно в рыхлых отложениях различного происхождения широко используются при региональных и детальных поисках как один из главных методов обнаружения урановых рудопроявлений и месторождений.

Среди различных методов поисков по вторичным геохимическим ореолам наиболее распространены следующие:

а) различные модификации уранометрических съемок по ореолам рассеяния урана в элювиально-делювиальных отложениях с применением радиометрических или люминесцентных методов определения подвижного урана и полуколичественных спектральных анализов для определения других элементов-индикаторов в пробах;

б) уранометрические съемки «донных осадков», т. е. потоков рассеяния урана и его спутников в илесто-глинистых аллювиальных и пролювиальных отложениях;

в) радиогидрогеохимические съемки, выявляющие ореолы рассеяния урана, радия и радона в природных подземных водах;

г) флуорометрические (биогеохимические) съемки по ореолам рассеяния урана и его спутников в травянистом покрове, кустарниковой и древесной растительности с определением содержания радиоактивных элементов в золе люминесцентно-перловым или альфа-спектральным методами.

Из перечисленных методов в поисковом отношении наиболее эффективны уранометрические съемки по солевым ореолам в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях и в меньшей степени радиогидрогеологические съемки. Поисковая эффективность двух других модификаций обычно не высока вследствие значительных смещений ореолов и сложностей их расшифровки.

В последнее время для выделения перспективных ураноносных площадей начинает применяться поисковый метод, основанный на изучении изотопного состава свинцов из нерадиоактивных минералов. Появление «аномальных» свинцов, содержащих радиогенные изотопы в избытке по сравнению с нормальной пропорцией, указывает на повышенное содержание урана в магматическом расплаве или в материнской породе, что может рассматриваться как индикатор близкого расположения радиоактивных руд. Определение изотопного состава свинцов производится спектральным методом с помощью

прибора УСИ. Для суждения о степени аномальности свинцов используются отношения их радиогенных изотопов ( $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$ ,  $Pb^{208}$ ) к нерадиогенному ( $Pb^{204}$ ). Для положительной оценки результатов изотопических съемок особенно благоприятны случаи аномальных содержаний изотопов  $Pb^{206}$  и  $Pb^{207}$ , которые представляют собой конечные продукты распада соответственно уранового и актиноуранового рядов.

#### § 4. Принципы комплексирования поисковых методов

Вследствие большого разнообразия поисковых методов урановых месторождений при организации поисковых работ неизбежно возникает проблема выбора такого их комплекса, который обеспечит наибольшую поисковую эффективность в данных геологических условиях. Проблема рационального комплексирования поисковых методов должна рассматриваться по этапам и видам поисковых работ, применительно к геологическим условиям проявления урановых месторождений различных промышленных типов и в зависимости от природных условий ведения поисковых работ.

На этапе региональных геологических съемок проводятся так называемые массовые поиски урановых месторождений, которые не представляют собой целевого задания геологосъемочной партии, а рассматриваются как одна из попутных задач съемки. В этих условиях доминирующим методом оказываются пешеходные гамма-поиски, и только при обнаружении заслуживающих внимания аномалий или рудопроявлений для их оценки используются другие поисковые методы.

На собственно поисковом этапе, особенно если целевое задание работ включает в себя поиски урановых месторождений, комплекс поисковых методов значительно расширяется. При ведущем значении различных модификаций радиометрических методов он включает в себя проведение металлометрических (уранометрических) съемок по потокам и ореолам рассеяния, радиогидрогеологических съемок и реже биогеохимических или газовых съемок. На этой стадии поисковых работ широко используются общие аэрогеофизические и специальные аэrorадиометрические методы.

На поисково-разведочной стадии, а также при изучении и детализации аномальных зон и рудопроявлений в комплекс поисковых работ включаются крупномасштабные геофизические съемки, шпуровые и глубинные варианты радиометрических, геохимических и газовых методов с широким применением поверхностных горных работ, картировочного бурения и специальных установок для отбора комплексных глубинных проб.

При комплексировании поисковых методов применительно к геологическим условиям проявления урановых месторождений различных промышленных типов учитываются морфологические особенности и условия залегания рудных тел, физическая и химическая устойчивость руд (определяющая их способность образовывать механические, водные, солевые или газовые ореолы рассеяния), различия физиче-

ских свойств руд и вмещающих пород (их магнитной восприимчивости, плотности, радиоактивности и др.), отчего зависит эффективность использования тех или иных геофизических методов. Выбор рациональных методических комплексов определяется в значительной мере типом и характером поисковых признаков урановых месторождений того или иного промышленного типа.

На комплексирование поисковых работ оказывает влияние не только тип региональной геологической структуры, но и ландшафтно-географический облик района поисков, определяющий условия формирования и проявления всех ореолов рассеяния урана и его спутников.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

Методы поисков урановых месторождений. Изд-во «Недра», 1969.

Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. Атомиздат, 1960.

## Г л а в а II

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ И СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиометрические методы поисков месторождений радиоактивных элементов являются составной частью разведочной геофизики, изучающей физическими методами геологическое строение верхней части земной коры с целью поисков и разведки полезных ископаемых.

Любой геологический объект (тектоническая зона, контакт разнородных пород, рудная залежь и т. п.) является или источником физического поля (магнитного, гравитационного) непосредственно или становится источником полей (например, электрических, электромагнитных) в результате искусственного воздействия на него. Каждое физическое поле характеризует геологический объект в отношении тех его свойств, которые делают его источником этого поля. Одни и те же физические поля, исследуемые общими методами разведочной геофизики, могут вызываться различными горными породами и геологическими объектами и объект может быть оценен только по совокупности нескольких различных полей. Радиационные поля, выявляемые радиометрическими методами, являются прямыми указателями на наличие радиоактивных элементов. Характер проявления этих полей определяется свойствами радиоактивного распада различных радиоактивных семейств урана, актиноурана, тория, свойств и взаимодействия различных излучений со средой, в которой эти излучения распространяются.

### § 1. Явление радиоактивности

Радиоактивность — это свойство ядер некоторых элементов самопроизвольно распадаться с испусканием или захватом заряженных частиц и излучением квантов электромагнитной энергии.

Радиоактивными элементами называют такие, ядра атомов которых с течением времени претерпевают самопроизвольный распад и превращаются в атомы других элементов. Всего в природе в настоящее время известно более 60 радиоактивных изотопов, из которых 43 являются членами радиоактивных семейств урана, актиноурана и тория. С помощью ядерных реакций можно получить искусственно радиоактивные изотопы почти всех элементов.

Для естественных радиоактивных элементов известны следующие виды радиоактивного распада.

**А л ь ф а р а с п а д** сопровождается испусканием из ядра атома  $\alpha$ -частицы, которая представляет собой атом гелия без внешних электронов, т. е. ядро атома гелия с массой четыре и порядковым номером два. В результате испускания  $\alpha$ -частицы образуется новое ядро атома дочернего элемента (см. рис. 24). Ядро дочернего элемента имеет порядковый номер на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у материнского элемента.

**Б е т а - р а с п а д** представляет вид радиоактивного превращения, сопровождающийся испусканием ядром атома  $\beta$ -частицы (электрона). При этом заряд ядра увеличивается на единицу (один нейтрон переходит в протон) и, следовательно, порядковый номер вновь образованного изотопа также увеличивается на единицу. Атомный вес остается без изменения.

**С п о н т а н н о е д е л е н и е я д р а** — это вид радиоактивного превращения, сопровождающийся расщеплением ядра на два осколка примерно одинакового атомного веса и испусканием 2—3 нейтронов. На принципе деления ядра основано использование актиноурана в качестве материала для атомных бомб и энергетического топлива в некоторых типах атомных электростанций.

**Э л е к т р о н н ы й К - з а х в а т** — вид радиоактивного превращения, сущность которого состоит в том, что ядром атома захватывается электрон с ближайшей к ядру электронной К-оболочки. При К-захвате излучается нейтрино, гамма-квант и квант мягкого рентгеновского излучения, образующийся в результате заполнения на К-оболочке вакантного места захваченного ядром К-электрона электроном с внешней оболочки. Из естественных радиоактивных элементов путем К-захвата распадается радиоактивный изотоп калия  $K^{40}$ . При этом атом  $K^{40}$  переходит в  $Ar^{40}$ .

**Г а м м а ( э л е к т р о м а г н и т н о е ) - и з л у ч е н и е**, сопутствующее радиоактивному распаду ядер атомов, не является самостоятельным видом излучения, приводящего к превращению ядра, а сопровождает излучение тех или иных заряженных частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$ , К-захват). Возникновение  $\gamma$ -квантов при  $\alpha$ -,  $\beta$ -распаде обусловлено тем, что некоторые из дочерних (образовавшихся вследствие выброса  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы) ядер оказываются в возбужденном состоянии и при переходе в нормальное состояние избыток энергии излучают в виде кванта электромагнитной энергии. При этом переход из возбужденного состояния может осуществляться через промежуточные уровни. Тогда такой переход после испускания частицы будет

сопровождаться испусканием нескольких — двух и более квантов разных энергий. Энергия  $\gamma$ -кванта <sup>1</sup>

$$E_{\gamma} = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота колебания.

Энергия  $h\nu$ -квантов для ядер атомов каждого элемента, соответствующая разным уровням перехода ядра, строго постоянна. Поэтому  $\gamma$ -излучение ядер разных элементов отличается по энергиям. Излучение элементов группы урана мягкое (длинноволновое) —  $0,04 < E_{\gamma} < 0,8$  (Мэв), излучение элементов группы радия более жесткое (коротковолновое) — до  $2,6$  Мэв,  $E_{\gamma}$  элементов семейства тория до  $3,2$  Мэв.

## § 2. Закон радиоактивного распада. Константы распада

Закон радиоактивного распада установлен в 1902 г. Резерфордом и Содди на основе опытных данных из наблюдения распада радона. Этим законом устанавливается закономерность распада атомов во времени: число распадающихся за малый промежуток времени атомов радиоактивного элемента ( $dN$ ) пропорционально наличному числу атомов ( $N$ ), постоянной распада ( $\lambda$ ) и промежутку времени ( $dt$ ). Количественно закон радиоактивного распада записывается в виде

$$-dN = \lambda N dt. \quad (1)$$

Для конечного промежутка времени  $t$  закон (1) выражается формулой

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

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;  $\lambda$  — постоянная распада, выражающая долю наличного количества атомов, распадающихся в единицу времени. Ее размерность  $t^{-1}$ .

Скорость радиоактивного распада характеризуют еще периодом полураспада ( $T$ ), т. е. временем, в течение которого распадается половина атомов, имевшихся в момент времени  $t = 0$ . Значение  $T$  в зависимости от постоянной распада  $\lambda$  выражается формулой

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (3)$$

Практически полный распад (с точностью до 0,1% от начального количества атомов) наступает за время десяти периодов полураспада ( $10 T$ ).

<sup>1</sup> Энергия ядерных излучений ( $\alpha$ -,  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов) измеряется в электронвольтах (эв), килоэлектронвольтах (кэв) и мегаэлектронвольтах (Мэв). Электронвольт — это энергия, которую приобретает электрон в электрическом поле при прохождении разности потенциалов в 1 вольт.



$\lambda$  и  $T$  называют константами распада. Некоторые радиоактивные элементы из семейств урана и тория характеризуются следующими величинами констант распада:

Элемент	$T$	$\lambda$ , сек <sup>-1</sup>
U <sup>238</sup>	4,51 · 10 <sup>9</sup> лет	4,889 · 10 <sup>-18</sup>
Ra <sup>226</sup>	1617 лет	1,3814 · 10 <sup>-11</sup>
Rn <sup>222</sup>	3,823 дня	2,0974 · 10 <sup>-6</sup>
RaB <sup>218</sup>	26,8 мин	4,310 · 10 <sup>-4</sup>
RaC' <sup>214</sup>	1,6 · 10 <sup>-4</sup> сек	4,2343 · 10 <sup>3</sup>
ThX <sup>224</sup>	3,64 дня	2,204 · 10 <sup>-6</sup>
Tn <sup>220</sup>	54,5 сек	1,2718 · 10 <sup>-2</sup>

### § 3. Закон накопления радиоактивных элементов

При распаде элементов из числа членов семейств естественных радиоактивных элементов образуются атомы других элементов, которые в свою очередь являются радиоактивными и подвергаются распаду.

Возьмем например Ra<sup>226</sup>. В результате  $\alpha$ -распада из Ra<sup>226</sup> образуется Rn<sup>222</sup>, который в свою очередь распадается, образуя RaA.

Если взять чистый Ra (раствор соли радия), то количество распадающихся в единицу времени атомов Ra, согласно закону (1), будет

$$-dN_{Ra} = \lambda_{Ra} N_{Ra} dt, \quad (4)$$

но  $dN_{Ra}$  — это и количество образовавшихся атомов радона —  $N_{Rn}$ . За это же время число распавшихся атомов радона можно выразить как

$$-dN_{Rn} = \lambda_{Rn} N_{Rn} dt. \quad (5)$$

Тогда количество накопившихся атомов радона будет равно числу распавшихся атомов радия за вычетом числа распавшихся атомов радона за это время, т. е.

$$\frac{dN_{Rn}}{dt} = \lambda_{Ra} N_{Ra} - \lambda_{Rn} N_{Rn} \quad (6)$$

Очевидно, что нарастание числа атомов радона будет происходить до тех пор, пока число распадающихся атомов радия не сравняется с числом распадающихся атомов радона за единицу времени, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{Rn} N_{Rn} &= \lambda_{Ra} N_{Ra} \\ \frac{N_{Ra}}{N_{Rn}} &= \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Ra}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение уравнения (6) с учетом соотношений (7) дает

$$N_{tRn} = N_{pRn} (1 - e^{-\lambda_{Rn} t}), \quad (8)$$

где  $N_{tRn}$  — число атомов радона, накопившихся за время  $t$ ;  $N_{pRn}$  — число атомов радона в состоянии равновесия с радием.

Состояние количественных отношений атомов первичного (магнетитового) и образовавшихся при распаде атомов (дочернего) элемента, выраженное формулой (7), носит название радиоактивного равновесия.

Для состояния радиоактивного равновесия в урановых рудах отношение между количествами радия и урана определяется постоянной величиной:

$$\frac{q_{\text{Ra}}}{q_{\text{U}}} = 3,4 \cdot 10^{-7}.$$

В неизменных первичных урановых рудах обычно наблюдается радиоактивное равновесие между всеми членами семейства урана. В рудах, представленных вторичными минералами, а также в рудах многих осадочных месторождений радиоактивное равновесие между ураном и радием и между радием и радоном часто нарушено. В ториевых рудах в природных условиях смещения равновесия между членами ряда не наблюдается. Количественно смещение радиоактивного равновесия между ураном и радием в рудах характеризуется коэффициентом радиоактивного равновесия  $K_{\text{pp}}$ :

$$K_{\text{pp}} = \frac{q_{\text{Ra}}}{q_{\text{U}} \cdot 3,7 \cdot 10^{-7}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $q_{\text{Ra}}$  — количество радия в граммах на грамм руды;  $q_{\text{U}}$  — количество урана в граммах на грамм той же руды.

Смещение радиоактивного равновесия между радием и радоном (вследствие выделения радона из руды в окружающую среду) характеризуется коэффициентом эманирования. Численно этот коэффициент выражается в процентах и определяется как отношение количества выделившегося радона в окружающую среду ко всему количеству радона, накопившегося в руде за тот же промежуток времени.

#### § 4. Характеристика ядерных излучений и их взаимодействие с веществом

А л ь ф а - ч а с т и ц ы с массой, равной четырем атомным единицам ( $6,598 \cdot 10^{-24}$  г), примерно в 7000 раз больше массы электрона. Как заряженная частица она отклоняется в магнитном поле. Скорость  $\alpha$ -частицы при вылете из ядра достигает 1/20 скорости света. Энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых атомами естественных радиоактивных элементов, составляет 2—8 Мэв. Траектория  $\alpha$ -частиц прямолинейна. Путь, который проходит  $\alpha$ -частица в веществе до полной потери своей энергии, называется пробегом  $\alpha$ -частицы, а длина этого пути — длиной пробега. Длина пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе в зависимости от энергии колеблется от 2 до 8 см, отдельные частицы (одна на миллион), так называемые длиннопробежные, имеют длину пробега до 11 см. Альфа-частицы, проходя в веществе среды (воздух, газ, твердое или жидкое тело), расходуют свою энергию при взаимодействии с атомами вещества на:

а) ионизацию — отрыв электрона с внешней оболочки атома. Для воздуха на один акт ионизации затрачивается около 32 эв. На 1 см пути пробега в воздухе при нормальном давлении и температуре  $\alpha$ -частица образует в среднем около 100 000 пар ионов, т. е. она является сильным ионизатором. Количество пар ионов, образуемых частицей на 1 см пути пробега, называется удельной ионизирующей способностью;

б) возбуждение атомов. Если  $\alpha$ -частица достигает внутренних электронных орбит и выбивает электрон с внутренней оболочки, то такой атом оказывается в возбужденном, энергетически не устойчивом состоянии. Переход в устойчивое состояние происходит путем заполнения освободившегося места электроном с внешней оболочки. При этом разность в энергетических уровнях до заполнения вакансии и после заполнения излучается в виде кванта, так называемого характеристического электромагнитного излучения;

в) фотохимическое взаимодействие. При попадании  $\alpha$ -частицы на фотопластинку происходит разложение бромистого серебра. Аналогичное химическое действие вызывается и при взаимодействии с некоторыми другими химическими соединениями.

Бета-частицы представляют собой отрицательно заряженные элементарные частицы — электроны с массой, равной  $9,107 \cdot 10^{-28}$  г, и зарядом  $4,802 \cdot 10^{-10}$  CGS; имеют энергию от 0,15 до 3,11 Мэв и скорость от 0,24 до 0,96 скорости света.

Бета-частицы, испускаемые атомами одного и того же элемента, отличаются по энергиям и имеют непрерывный энергетический спектр. При прохождении через вещество энергия  $\beta$ -частицы расходуется на ионизацию и возбуждение. Удельная ионизирующая способность  $\beta$ -частиц в воздухе в 1000 раз меньше, чем  $\alpha$ -частиц, и составляет 100 пар ионов на 1 см пути пробега. Траектория  $\beta$ -частицы не прямолинейна; поскольку она взаимодействует в основном с электронами атома, имеющими ту же массу, то при столкновении с электроном  $\beta$ -частица отклоняется от прямолинейного пути. За длину пробега ее принимают расстояние от точки вылета до конечной точки — полной потери энергии. В воздухе длина пробега составляет десятки сантиметров. Длину пробега  $\beta$ -частиц принято выражать в плотности вещества на 1 см<sup>2</sup>, т. е. в г см<sup>2</sup>. Максимальная длина пробега (проникающая способность)  $\beta$ -частиц, испускаемых естественными радиоактивными веществами, не превышает 1,6 г см<sup>2</sup>.

Гамма-кванты — это порции электромагнитной энергии, распространяющиеся со скоростью света. Энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых естественными радиоактивными элементами, находится в пределах 0,04—3,2 Мэв. При прохождении  $\gamma$ -квантов различных энергий в поглощающей среде они вступают во взаимодействие с электронами атомных оболочек атомов среды. Кванты с энергией больше 0,5 Мэв преимущественно рассеиваются на электронах — часть энергии передают электрону, выбивая его из электронной оболочки, а остаток кванта с энергией меньше первичной рассеивается под некоторым

углом к начальной траектории кванта. Этот вид взаимодействия носит название комптоновского рассеяния.

Как видно из характера взаимодействия, каждый квант, претерпевший комптоновское рассеяние, выходит из параллельного пучка  $\gamma$ -квантов, поэтому интенсивность первичного пучка при прохождении его в материальной среде (породе) ослабляется. Интенсивность процесса ослабления, очевидно, зависит от количества электронов в единице объема среды (электронной плотности), на которых  $\gamma$ -кванты рассеиваются. Следовательно, чем больше плотность среды, тем сильнее будет ослабляться поток  $\gamma$ -квантов.

Если энергия  $\gamma$ -кванта меньше  $0,5 Mэв$ , то взаимодействие его с электроном выражается в поглощении всей энергии кванта (фотоэлектрическое поглощение), преимущественно электроном внутренних электронных оболочек. В результате фотоэлектрического поглощения интенсивность потока первичных квантов уменьшается.

Таким образом, взаимодействие  $\gamma$ -излучения с веществом при прохождении через поглощающую среду ведет к его ослаблению. Ослабление потока на 1 см пути, выраженное в долях интенсивности первичного излучения, называют коэффициентом линейного ослабления ( $\mu$ ). Для сред разной плотности коэффициенты линейного ослабления различны. Массовый коэффициент ослабления — отношение линейного коэффициента  $\mu$  к плотности  $\rho$  ( $\mu/\rho$ ) — для большинства типов урановых руд и пород величина постоянная.

Кроме ослабления первичного потока в результате взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом изменяется спектральный состав  $\gamma$ -излучения.

В спектре  $\gamma$ -излучения, прошедшего через среду, за счет многократного рассеяния появляется мягкое рассеянное излучение и спектр становится непрерывным; характерные линии первичного спектра в нем выделяются отдельными фотопиками.

Ослабление параллельного пучка  $\gamma$ -квантов выражается экспоненциальным законом:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (10)$$

где  $I_0$  — интенсивность гамма-излучения в отсутствии поглощающего слоя ( $x = 0$ );  $I_x$  — интенсивность после прохождения слоя  $x$  с коэффициентом ослабления  $\mu$ .

Излучение точечного источника в свободном пространстве. К точечным источникам излучения относят любые источники, геометрические размеры которых много меньше размеров счетчика. В геологической практике такими источниками являются радиевые эталоны, используемые для градуировки радиометров.

Интенсивность  $\gamma$ -излучения ( $I_R$ ) на расстоянии  $R$  от точечного источника меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, т. е.

$$I_R = \frac{I_1}{R^2}$$

$$I_R = \frac{q \cdot 840}{R^2}, \quad (11)$$

где  $I_1 = q \cdot 840$  мкр'ч — интенсивность, создаваемая эталоном на расстоянии 1 м;  $q$  — количество радия в эталоне, мг; 840 — мощность дозы (интенсивность)  $\gamma$ -излучения, создаваемая 1 мг Ra на расстоянии 1 м. в мкр/ч.

Для  $\gamma$ -излучения радия поглощающими свойствами слоя воздуха до 10—15 м можно пренебречь, так как на таком расстоянии поглощение  $\gamma$ -излучения не превышает 1%. Поэтому при градуировке приборов на открытом воздухе для определения интенсивности  $\gamma$ -излучения при разных расстояниях источника до прибора пользуются зависимостью (11).

## § 5. Семейства радиоактивных элементов

В природе известно три родоначальных элемента — уран-238, актиноуран-235 и торий-232, из которых в результате последовательных превращений образуются семейства радиоактивных элементов. Последовательность и виды радиоактивных превращений показаны на рис. 24. В ряду урана имеется восемь  $\alpha$ -излучателей: U1, U11, Io, Ra, Rn, RaA, RaC', RaF. Бета-излучателями являются: UX<sub>1</sub>, UX<sub>2</sub>, RaB, RaC, RaD, RaE. RaD и UX<sub>1</sub> дают мягкое излучение, которое счетчиками, применяемыми в радиометрии, не регистрируется. Основными  $\gamma$ -излучателями равновесной урановой руды являются RaB и RaC. Около 2% приходится на  $\gamma$ -излучение UX<sub>1</sub> и UX<sub>2</sub>.

Если взять группу элементов от U1 до Io и от Ra до RaG, то распределение долей регистрируемого  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения с достаточной для практики точностью можно принять:

	При регистрации газонаполненными счетчиками		При регистрации сцинтилляционными счетчиками
	$\beta$	$\gamma$	$\gamma$
Група урана	50%	2%	6%
Група радия	50%	98%	94%

В ряду тория семь  $\alpha$ -излучателей: Th, RaTh, ThX, Tn, ThA, ThC и ThC'; основными  $\beta$ -излучателями являются MsTh<sub>1</sub>, MsTh<sub>2</sub>, ThB и ThC, а гамма-излучателями MsThII, ThB и ThC.

Семейство актиноурана — это ряд AcU<sup>235</sup>. В природных радиоактивных образованиях актиноуран и уран всегда находятся в соотношении 1 : 139, т. е. содержание актиноурана составляет 0,7% от содержания урана. Доля  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений актиноурана в общем излучении равновесной урановой руды не превышает первых процентов. Поэтому при измерениях радиоактивности урановых руд влиянием излучения актиноурана можно пренебречь.

В семействах U, AcU и Th имеются газообразные изотопы — радон, актинон и торон соответственно, которые образуют в результате



последовательных превращений целый ряд короткоживущих изотопов, являющихся твердыми продуктами. Газообразные радон, торон и актинон, образующиеся в рудах, в зависимости от физико-химического состояния последних могут выноситься в окружающую среду, следствием чего будет нарушение радиоактивного равновесия между Ra и Rn, между ThX и Tn, между AcX и An.

Энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых элементами семейства урана, колеблется от 0,04 до 1,76 Мэв, элементами семейства Th — от 0,04 до 2,32 Мэв. В общем  $\gamma$ -излучение тория более жесткое, чем излучение урана. Энергия  $\alpha$ -излучения элементов U—Ra составляет 4,132—4,777 Мэв, тория — 4,007 до 6,09 Мэв, т. е.  $\alpha$ -излучение тория также более жесткое, чем  $\alpha$ -излучение урана. На различии энергии  $\alpha$ - и  $\gamma$ -излучения урана и тория основано их раздельное определение в сложных урано-ториевых рудах. Бета-излучения урана и тория, имеющие непрерывный спектр энергий в обоих семействах, по энергиям не различаются.

## § 6. Регистрация ядерных излучений

В различных приборах, предназначенных для измерения радиоактивности, ядерные излучения регистрируются при помощи ионизационных камер и различного вида счетчиков — газонаполненных и сцинтилляционных. Регистрация частиц и квантов в этих приборах основывается на использовании явлений ионизации и сцинтилляции, вызываемых частицами и квантами при взаимодействии их с веществом.

**Ионизационные камеры.** Ионизационный метод измерения радиоактивности заключается в измерении тока в камере, вызываемого ионизацией газа ядерными излучениями. Применяется главным образом для измерения радиоактивности жидких и газообразных проб по  $\alpha$ -излучению.

Прибор для измерения радиоактивности ионизационным методом состоит из камеры, в которой производится ионизация газа излучениями, и электрометра — устройства для измерения ионизационного тока.

Работу ионизационной камеры как детектора радиоактивных излучений можно представить следующим образом. В отсутствии напряжения на камере и рассеивающем электроде образующиеся под действием ионизирующих излучений ионы и электроны вследствие тепловых хаотических движений рекомбинируются — образуют нейтральные атомы или молекулы, тока между стенкой камеры и электродом нет. Если на камеру подать напряжение, то под действием электрического поля электроны и ионы придут в упорядоченное движение. Ионы как положительно заряженные будут двигаться к отрицательно заряженной стенке камеры, а электроны — к положительно заряженному рассеивающему электроду. Чем больше величина электрического поля, тем быстрее будут двигаться заряженные частицы и тем больше их достигнет соответствующих электродов,

не подвергаясь рекомбинации. По мере увеличения напряжения при постоянной интенсивности ионизирующего излучения будет расти ионизационный ток между электродом и стенкой камеры. Этот рост будет происходить до тех пор, пока все носители зарядов не будут использованы. Дальнейшее увеличение напряжения в некотором интервале не будет вызывать изменения ионизационного тока, в камере достигается так называемый ток насыщения.

Дальнейшее увеличение напряжения на камере может привести к тому, что ионы в электрическом поле приобретут кинетическую энергию, достаточную для ионизации соударением. В этом случае величина регистрируемого тока не будет пропорциональной первоначальной ионизации. При таких напряжениях на камере измерения ионизационного тока производить нельзя.

Относительным методом сравнения ионизационных токов от эталона и от изучаемой пробы можно определить содержание радиоактивного вещества в пробе в эквивалентных единицах содержания в эталоне из соотношения

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{эт}} \cdot \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{эт}}},$$

где  $I_{\text{эт}}$  и  $I_{\text{пр}}$  — ионизационный ток соответственно от эталона и исследуемой пробы, *сел/мин*;  $q_{\text{эт}}$ ,  $q_{\text{пр}}$  — содержание радиоактивного вещества в эталоне и пробе, %.

Величина ионизационного тока в камере при измерении естественных радиоактивных образований составляет  $10^{-16}$  —  $10^{-18}$  *а*. Измерить такой ток обычными электроизмерительными приборами не представляется возможным, так как наибольшая чувствительность гальванометров не превышает  $10^{-8}$  *а*. Поэтому ионизационные токи измеряют косвенным способом с помощью электроскопов и электрометров.

Ионизационный метод измерения радиоактивности применяется в основном для определения радиоактивной эманации в почвенном и рудничном воздухе, в жидкостях, а также при радиохимических анализах для определения радия в пробах по эманации — радону.

**Газонаполненные счетчики.** Ионизационный метод регистрации ядерных излучений имеет ряд существенных недостатков: ионизационные приборы не транспортабельны и, следовательно, мало пригодны для полевых условий; на их работу оказывают влияние изменение температуры и влажность окружающего воздуха. Они устойчиво работают только в лабораторных условиях.

В поисково-разведочной практике применяются счетчики ядерных излучений. Впервые счетчик был создан в 1912 г. Гейгером как прибор для счета  $\alpha$ -частиц. Современные счетчики основаны на том же принципе, но конструктивно получили иное оформление.

Счетчик представляет собой цилиндрический конденсатор (рис. 25). Внутренним электродом (анодом) его является металлическая нить, натянутая по оси цилиндра. Цилиндр — это или стеклянный баллон, покрытый изнутри металлизированным слоем, или металлический



цилиндрический баллон (катод). Нить и цилиндр изолированы друг от друга. Цилиндр герметичный, заполнен определенным газом при низком давлении. Обычно на нить подается плюс питающего напряжения, а корпус заземляется.

Проникающие в рабочий объем счетчика  $\alpha$ -,  $\beta$ -частицы или  $\gamma$ -кванты вызывают ионизацию газа-наполнителя и как следствие — разряд — прохождение тока между анодом и катодом счетчика. Разряд может вызываться как непосредственно ионизацией самого газа, так и электронами, образующимися при комптоновском или фотоэлектрическом взаимодействии кванта с материалом катода.

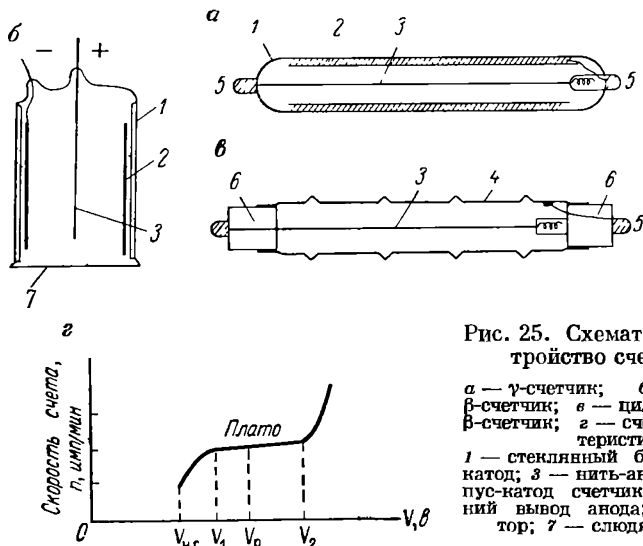


Рис. 25. Схематическое устройство счетчиков

*a* —  $\gamma$ -счетчик; *б* — торцовый  $\beta$ -счетчик; *в* — цилиндрический  $\beta$ -счетчик; *г* — счетная характеристика  
 1 — стеклянный баллон; 2 — катод; 3 — нить-анод; 4 — корпус-катод счетчика; 5 — внешний вывод анода; 6 — изолятор; 7 — слюдяное окно

В результате ионизации между анодом и катодом счетчика проходит импульс тока, который вызывает изменение потенциала системы и тем самым создает импульс напряжения на сопротивлении нагрузки. Этот импульс снимается с сопротивления нагрузки и подается в усилительно-измерительную схему.

Счетная характеристика счетчика приведена на рис. 25, г. Счетчики частиц характеризуются величиной рабочего напряжения, величиной напряжения начала счета ( $V_{н.с}$ ), шириной плато, эффективностью и разрешающей способностью.

При напряжении на счетчике от 0 до  $V_{н.с}$  счетчик не регистрирует частицы и кванты. На участке  $V_{н.с} - V_1$  число регистрируемых частиц возрастает с ростом напряжения. На участке  $V_1 - V_2$  число регистрируемых частиц (при постоянной интенсивности облучения) практически (с точностью до 3—5%) не меняется. Этот участок носит название рабочего плато счетчика. Затем с увеличением напряжения наступает резкое увеличение разрядов в счетчике за счет случайных срывов тепловых электронов.

Для работы прибора рабочее напряжение ( $V_p$ ) выбирается равным  $V_1 + \frac{V_2 - V_1}{3}$ . При этом изменения питающего напряжения на  $\pm 20\%$  практически не сказываются на работе счетчика.

**Э ф ф е к т и в н о с т ь с ч е т ч и к а.** Для регистрации частицы счетчиком необходимо, чтобы она вызвала ионизацию в рабочем объеме счетчика. Однако не каждая частица или квант вызывает такую ионизацию и, следовательно, не каждая частица, прошедшая через счетчик, регистрируется. Эффективностью счетчика называют отношение числа зарегистрированных счетчиком частиц к числу частиц, прошедших через рабочий объем счетчика. Эффективность газонаполненных счетчиков составляет  $1,5-2\%$  и для каждого типа счетчиков является величиной постоянной.

**Р а з р е ш а ю щ а я с п о с о б н о с т ь с ч е т ч и к а.** Разряд в счетчике, вызванный ионизирующей частицей, протекает не мгновенно, а длится некоторое время. Если следующая частица поступит в счетчик в момент времени, когда еще не закончился разряд, вызванный первой частицей, то разряд, вызванный второй частицей, « сольется » с первым и обе частицы будут зарегистрированы одним импульсом, как одна частица. Способность счетчика отдельно регистрировать быстро следующие одна за другой частицы определяется длительностью разряда и временем восстановления рабочего напряжения на счетчике. Под разрешающей способностью счетчика подразумевают минимальное время между последовательным прохождением двух частиц, которые регистрируются счетчиком отдельно. Разрешающее время современных газонаполненных счетчиков составляет  $10^{-4}-10^{-5}$  сек.

Счетчики  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц принципиально не отличаются от счетчиков  $\gamma$ -квантов. Отличие их только конструктивное. Для впуска  $\alpha$ -частицы в рабочий объем в счетчике делается окно (обычно слюдяное) толщиной  $3-9$  мг/см<sup>2</sup>, для того чтобы  $\alpha$ -частица, не поглощаясь в стенке счетчика, смогла проникнуть в счетчик.

Бета-счетчики для регистрации мягкого  $\beta$ -излучения изготавливаются тонкостенными. Обычные  $\gamma$ -счетчики также пригодны для регистрации жесткого  $\beta$ -излучения естественных радиоактивных элементов.

Нейтронные счетчики в отличие от  $\gamma$ -счетчиков в наполнителе содержат фтористый бор. При взаимодействии нейтрона с атомом В<sup>10</sup> происходит расщепление ядра ( $B^{10} + \eta \rightarrow Li^7 + \alpha$ ) с образованием атома лития и  $\alpha$ -частицы, которые и производят ионизацию газонаполнителя счетчика. Дальнейший процесс регистрации нейтрона аналогичен процессам в гамма-счетчике. Эффективность нейтронных счетчиков достигает  $10-15\%$ .

**Сцинтилляционные счетчики.** Первый сцинтилляционный счетчик — трубка Крукса появился в 1903 г. и был использован для регистрации  $\alpha$ -частиц. Современный сцинтилляционный счетчик (рис. 26) представляет собой прибор, состоящий из люминофора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В качестве люминофора в радиометри-

ческих приборах используются кристаллы иодистого натрия с добавками (активатора) таллия NaI (Тl).

Схематически принцип действия сцинтилляционного счетчика можно представить следующим образом. Гамма-квант (или ядерные частицы  $\alpha$  или  $\beta$ ), попадая в люминофор, взаимодействуют с атомами вещества люминофора, производя их ионизацию и возбуждение. Количество возбужденных атомов пропорционально энергии возбуждающей частицы. Переход возбужденных атомов в устойчивое состояние сопровождается испусканием фотонов. Так как возбужденными оказываются не один, а несколько атомов, то их переход в устойчивое состояние сопровождается испусканием многих фотонов — световой вспышкой. Интенсивность световой вспышки тем больше, чем больше энергия регистрируемой частицы. Фотоны, попадая на фотокатод, вследствие фотоэлектрического поглощения их атомами материала

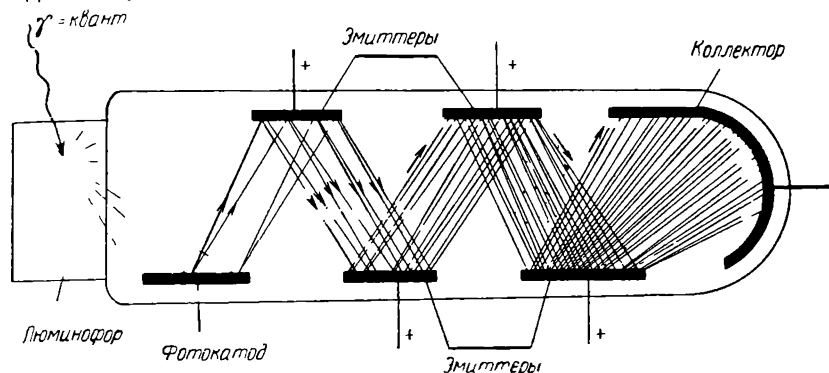


Рис. 26. Сцинтилляционный счетчик

фотокатода выбивают из него фотоэлектроны. Следовательно, чем интенсивнее вспышка, тем большее количество фотоэлектронов будет выбито из фотокатода. Фотоэлектроны, попадая в ФЭУ, умножаются последним в  $10^6$ — $10^7$  раз, и на коллектор (анод) ФЭУ приходит лавина электронов. Заряд, перенесенный электронами на анод, создает на выходе ФЭУ импульс электрического напряжения. Величина этого импульса пропорциональна количеству фотоэлектронов, выбитых из фотокатода, следовательно пропорциональна энергии частицы, попавшей в объем люминофора.

Сцинтилляционный счетчик обладает рядом свойств, отличающих его от газонаполненного счетчика:

1) эффективность сцинтилляционного счетчика при размере люминофора  $20 \times 30$  мм при регистрации  $\gamma$ -квантов составляет 50—60%, а при больших размерах ( $100 \times 100 \times 100$  мм) близка к 100%;

2) эффективность регистрации мягкого  $\gamma$ -излучения ( $E_\gamma < 0,5$  Мэв) выше, чем жесткого ( $E_\gamma > 0,5$  Мэв);

3) величина импульса на выходе ФЭУ пропорциональна энергии частицы, что позволяет различать частицы по энергиям. На этом

свойстве сцинтилляционного счетчика основаны методы отдельного определения урана радия и тория в сложных урано-ториевых рудах;

4) разрешающая способность сцинтилляционного счетчика  $10^{-6}$ — $10^{-9}$  сек.

## § 7. Единицы измерения радиоактивности

При поисковых и разведочных работах на радиоактивные элементы возникает необходимость определения количества и концентрации радиоактивных элементов, дозы и мощности дозы гамма-излучения.

Количество радиоактивного элемента (радиоизотопа) в системе СИ выражается в кг и производных от него г и мг. Внесистемными единицами являются кюри и миллиграмм-эквивалент радия (*мг-эке* Ra).

*Кюри* — количество любого радиоактивного вещества, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  актов распада в секунду. Так как *кюри* большая единица, на практике применяются производные от *кюри* единицы — *милликюри* ( $10^{-3}$  *кюри*), *микрокюри* ( $10^{-6}$  *кюри*). Первоначально *кюри* использовалась для оценки количества радона. Единица *кюри* соответствует количеству радона, находящегося в равновесии с 1 г радия элемента.

Единица *мг-эке* Ra применяется для выражения количества гамма-излучающих препаратов. Миллиграмм-эквивалент радия — это такое количество радиоактивного вещества, которое создает  $\gamma$ -излучение, эквивалентное  $\gamma$ -излучению 1 мг Ra в одинаковых условиях измерения.

Единицами концентрации радиоактивных веществ, применяемых в геологической практике, являются весовые проценты, реже используются единицы объемной концентрации г/см<sup>3</sup> или г/л (при определениях в жидкостях).

За единицу концентрации газообразных радиоактивных веществ (Rn, Tn, An) принята внесистемная единица *кюри/л*. На практике применяется единица в  $10^{10}$  раз меньше *кюри* — *эман* (1 *кюри/л* =  $10^{10}$  *эман*). Концентрации торона и актинона выражают в эквивалентных эманах.

Количество энергии, переносимой гамма- или рентгеновским излучением и измеряемой по ионизации воздуха, определяется экспозиционной дозой. За единицу дозы принят *рентген*. Рентген — это доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой сопряженное с ним вторичное корпускулярное излучение в 0,00129 г воздуха (1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при 0° С и 760 мм рт. ст.) образует ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. В системе СИ единицами дозы являются *кулон на килограмм* (к/кг) и *ампер на килограмм сухого воздуха* (а/кг).

Доза излучения, отнесенная к единице времени, называется мощностью дозы. За единицу мощности дозы принят *рентген в час* (р/ч). В геологической практике пользуются в основном производной

от рентген в час единицей — микрорентген в час ( $1 \text{ р.ч} = 10^6 \text{ мкрп/ч}$ ), реже миллирентген в час ( $1 \text{ р/ч} = 10^3 \text{ мрп/ч}$ ). Название «мощность дозы» для краткости часто заменяют термином «интенсивность».

Эталоны в радиометрических измерениях. Все количественные измерения в радиометрии производятся относительным методом, т. е. методом сравнения интенсивности излучения исследуемого препарата (объекта) с интенсивностью эталонного препарата с точно известным содержанием (количеством) радиоактивного элемента.

Широко применяемыми эталонами при определении содержания урана и тория в пробах руд, пород являются эталоны концентрации. Они представляют так называемые порошковые эталоны из равновесной неизменяющейся урановой или ториевой руды, в которых содержание урана и тория определяется химическими и радиохимическими методами с высокой точностью. Содержание урана, коэффициенты равновесия и эманирование указываются в паспорте эталона.

В качестве эталонов  $\gamma$ -излучения обычно используются соли радия, помещаемые в стеклянную ампулу и специальный металлический контейнер. Промышленностью для геологических целей выпускаются эталоны нескольких серий, например серия № 1 с содержанием радия-элемента 0,1 мг, серия № 2 — 0,2 мг и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

- Баранов В. И. Радиометрия. Изд-во АН СССР, 1956.  
Биркс Дж. Сцинтилляционные счетчики. Изд-во иностр. лит., 1955.  
Корф С. Счетчик частиц ядерных излучений. Гостехиздат, 1947.  
Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Изд-во «Недра», 1965.  
Руководство по радиометрическим методам поисков и разведки месторождений урана. Под ред. В. В. Алексеева. Госгеолтехиздат, 1957.

## Глава III

### НАЗЕМНЫЕ ГАММА-ПОИСКИ

В зависимости от условий и задач проведения поисковых работ различают гамма-поиски и гамма-съемку. Под гамма-поисками понимают измерения радиоактивности коренных пород и рыхлых отложений, выполняемые по поисковым маршрутам, прокладываемым на местности с учетом обнаженности площади и направлений наиболее благоприятного распространения ореолов и потоков рассеяния.

Под гамма-съемкой подразумевают те же исследования, выполняемые по регулярной геометрически правильной сети наблюдений. Обычно гамма-съемка проводится в крупных (1 : 10 000 и крупнее) масштабах с целью выявления и оконтуривания отдельных рудных тел или их ореолов рассеяния в пределах уже выявленных  $\gamma$ -аномалий, рудопроявлений или месторождений, а также при первичном

изучении площадей в условиях равнинных районов. Гамма-съёмка, как правило, проводится по заранее подготовленной топографической сети на основе полуйнструментальной (с помощью буссоли) привязки профилей наблюдения.

Если при гамма-съёмке поисковый масштаб определяется расстоянием между профилями наблюдений (например, м-б 1 : 10 000 соответствует расстоянию между профилями 100 м, м-б 1 : 5000 — 50 м), то при гамма-поисках масштаб определяется суммарной длиной маршрута на единицу площади: для м-ба 1 : 10 000 — 10 км маршрута на 1 км<sup>2</sup> площади, для м-ба 1 : 25 000 — 4 км.

Существует несколько разновидностей гамма-поисков и гамма-съёмок: пешеходные, выполняемые с помощью портативных переносных радиометров; шпуровые — по измерению интенсивности  $\gamma$ -излучения в шпурах, проходимых в рыхлых отложениях; автомобильные — с помощью высокочувствительного радиометра, устанавливаемого на автомашине; плужные (модификация автомобильных); гамма-спектрометрические — для определения природы радиоактивности.

Применение той или иной разновидности гамма-метода определяется физико-географическими условиями района поисков и конкретными поисковыми задачами.

## § 1. Проведение гамма-поисков

Проведению гамма-поисков предшествует подготовка топографической и геологической основ и приборов. Геологическая карта, на которую наносятся результаты радиометрических измерений по маршрутам, служит основой геолого-геофизической интерпретации радиометрических данных. Подготовка радиометра к работе в маршруте состоит в градуировании прибора, построении эталонировочного графика и определении чувствительности радиометра по стандартному препарату, с помощью которого в процессе работы проверяется сохранность чувствительности радиометра.

**Градуировка радиометра.** Сущность градуировки заключается в установлении зависимости показания прибора от величины мощности дозы (интенсивности) гамма-излучения. Эта зависимость выражается в виде графика градуировки (рис. 27).

Радиометры градуируют для того, чтобы измерения различных приборов или измерения одного и того же прибора, выполненные в разное время, или измерения приборов разных типов выразить в одинаковых единицах и получить истинное значение зарегистрированной интенсивности в *мкр/ч*. Разница в показаниях вызывается тем, что нет абсолютно одинаковых счетчиков, ламп, транзисторов и любых других радиотехнических деталей, из которых собрана схема приборов. Кроме того, эти детали имеют свойство с течением времени «стареть» и их параметры меняются.

При отсутствии специального источника излучения (руда или эталон) радиометр регистрирует некоторую общую интенсивность  $I_{\text{общ}}$

Эта интенсивность складывается из интенсивности  $\gamma$ -излучения окружающих пород  $I_{o.п.}$ , излучения радиоактивного загрязнения прибора (материала счетчика, гильзы и т. д.)  $I_{п.}$  и космического излучения  $I_{к.}$ :

$$I_{\text{общ}} = I_{o.п.} + I_{п.} + I_{к.}$$

$I_{п.}$  — величина практически постоянная, равная  $\sim 1$  мкр/ч, и носит название фона прибора.  $I_{к.}$  над уровнем моря составляет 4—5 мкр/ч и до высоты 5 км увеличивается на 1,5 мкр/ч на 1 км высоты. Поэтому для площадей поисков, где относительные превышения отдельных участков менее 1000 м, космическую составляющую можно считать величиной тоже постоянной. Сумму собственного фона прибора и космической составляющей называют натуральным фоном. Величина интенсивности окружающих пород  $I_{o.п.}$  зависит от радиоактивности пород в пункте измерения. Интенсивность  $\gamma$ -излучения над породами с нормальным содержанием радиоактивных элементов называют фоном пород. Величину натурального фона можно измерить над водной поверхностью озера, реки, где глубина воды более 2 м на удалении 20—30 м от берега. В этом случае  $\gamma$ -излучение пород дна водоема поглощается слоем воды и излучением пород берегов из-за их удаленности можно пренебречь.

Градуирование радиометров производится с помощью радиевых эталонов серии № 1 или № 2 на специальных стендах, располагаемых на открытых площадках, удаленных от стен зданий не менее чем на 5 м. Эталон и гильза радиометра располагаются на высоте 1,5 м от поверхности земли. Эти условия эталонирования необходимы для уменьшения влияния рассеянного излучения.

При градуировании сцинтилляционного радиометра, чувствительного к мягкому рассеянному излучению, для защиты счетчика от рассеянного от земной поверхности излучения применяют экранирование счетчика листом свинца со стороны рассеивающей поверхности.

Укрепив на стенде гильзу радиометра, измеряют фон в точке эталонирования  $I_{\text{общ}}$ . Затем эталон с содержанием  $q$  мг Ra помещают на расстоянии  $R_1, R_2, \dots, R_n$  от гильзы. При каждом  $R_i$  снимается отсчет по шкале прибора. Так как схемы приборов обладают инерционностью, отсчет снимается на приборах с газонаполненными счетчиками через 30—40 сек после перемещения эталона, на сцинтилляционных через 5—6 сек. Для исключения случайных ошибок при снятии показаний прибора через интервалы 5—10 сек снимается несколько отсчетов и вычисляется среднее значение показания. Интенсивность для каждого расстояния  $R_i$  эталона от гильзы рассчитывается по формуле

$$I_{R_i} = \frac{q \cdot 840}{R_i^2} \text{ мкр/ч.}$$

Затем строится градуировочный график.

Для графических вычислений интенсивности график градуировки (см. рис. 27) несколько видоизменяется. Левая часть кривой экстра-

полируется до пересечения с осью  $I_{\gamma}$  в точку А. Ноль шкалы «интенсивность» сдвигается влево в точку А. При переводе показания прибора в деления шкалы в *мкр/ч* по такому графику мы будем получать абсолютное значение интенсивности в точке измерения.

**Работа в маршруте при пешеходных гамма-поисках.** Состоит в непрерывном и тщательном прослушивании активности пород на телефон радиометра и измерениях ее в фиксированных точках наблюдений. Густота фиксированных точек наблюдений по маршруту зависит от сложности геологического строения изучаемой площади. При частой смене пород фиксированные точки берутся через 5—10 м, при однообразном составе пород шаг наблюдений может быть разрежен до 40 м. Увеличение расстояния между фиксированными

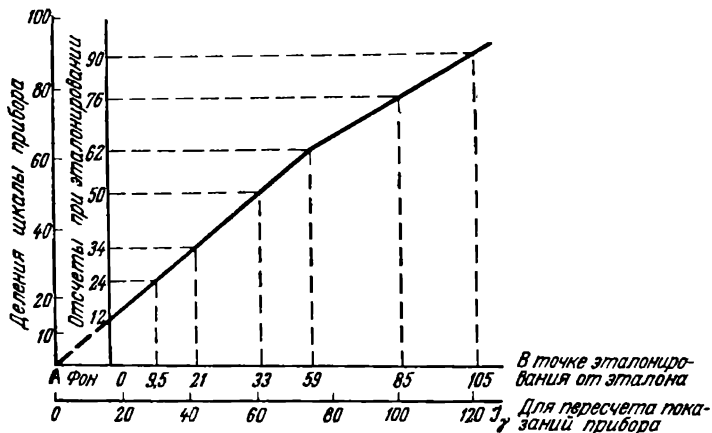


Рис. 27. График эталонирования радиометра

точками наблюдений в условиях частой смены пород с различной радиоактивностью может привести к пропуску слабых с поверхности ореолов рассеяния.

Зоны тектонических нарушений, перспективные горизонты, зоны контактов разнородных пород должны обследоваться в более крупных масштабах, чем основной масштаб поисков, и с большей густотой фиксированных точек по профилю.

При прослушивании радиоактивности пород в маршруте оператор перемещается со скоростью 1—2 км/ч. Кроме измерений в фиксированных точках наблюдений оператор отклоняется от основного направления маршрута в полосе шириной до 100 м для обследования всех обнажений пород, свалов, осыпей и т. п. Снятие показаний прибора на фиксированных точках производится с выдержкой 6—9 сек со сцинтилляционным и 30—45 сек с газонаполненным счетчиком.

Результаты измерения активности в фиксированных точках, а также аномальные значения активности в стороне от маршрута



на обнажениях, свалах и других пунктах заносятся в полевой журнал радиометрических наблюдений. Привязка маршрута на карту производится визуально по местным ориентирам. При съемках по заранее подготовленной сети привязка производится по пунктам этой сети.

В случае обнаружения в маршруте повышенной активности производится обследование площади, прилегающей к этой точке в радиусе 10—20 м путем сплошного прослушивания. В точках с максимальной активностью почвенный слой расчищается с помощью геологического молотка для измерения активности на глубине с целью возможного обнаружения рудного образца. Такая аномальная точка закрепляется на местности временным репером (кол, тур из камней).

После обнаружения аномалии и обследования прилегающей к ней площади производится предварительное определение площадных

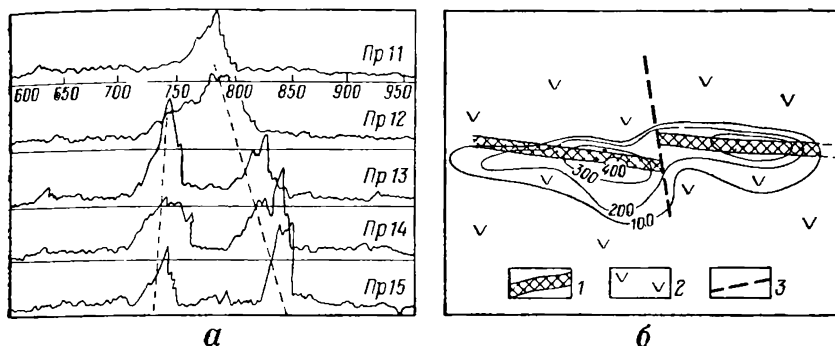


Рис. 28. Изображение результатов пешеходных гамма-поисков:

а — карта корреляционных графиков; б — карточка  $\gamma$ -аномалии в изоляциях интенсивности  
1 — рудная зона; 2 — вмещающие породы; 3 — линия смещения

размеров аномалии. Для этого проходятся промежуточные профили прослушивания параллельно основному профилю с выходом их в нормальное поле.

Если размер аномалии по площади не превышает первых десятков квадратных метров, то такая аномалия тут же детализируется путем сплошного исследования всей площади аномалии с целью выявления наиболее высокоактивных точек. Высокоактивные точки вскрываются мелкими закопашками. Находки в закопашках рудных образцов позволяют оценить аномалию как рудную. Аномальные участки больших размеров оставляют для последующих детальнейших съемок, а оператор продолжает маршрут.

Результаты измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения в фиксированных точках по маршруту изображаются в виде карты корреляционных графиков (профилей сопоставления) (рис. 28).

Детальное обследование аномалий и их предварительная оценка (определение ее происхождения и установление связи с коренным рудным телом) является

одним из самых ответственных этапов поисковых работ. Задача сводится к оконтуриванию аномалии по площади, определению ее формы и выявлению характера распределения активности внутри аномальной площади с помощью детальной радиометрической съемки м-ба 1 : 1000—1 : 2000. После оконтуривания аномалии вскрывают горными или буровыми работами.

Размер аномалии по площади характеризует размер ореола рассеяния, который в ряде случаев определяется размерами и уровнем эрозийного вскрытия рудного тела. Очевидно, что большой по площади ореол рассеяния может быть создан только большим по размерам рудным телом. Однако крупные рудные тела при незначительном эрозийном вскрытии могут создавать небольшие по размерам ореолы. Простираение оси максимумов  $\gamma$ -активности аномалии позволяет определить направление простираения рудного тела в коренном залегании.

Характер распределения активности по площади аномалии позволяет судить о форме рассеяния (солевое, механическое). При механическом рассеянии, когда рудная компонента в рыхлых отложениях представлена в виде отдельных рудных штуфов, создается резко переменное гамма-поле. Равномерное гамма-поле — часто показатель солевого рассеяния, а при низких (первые десятки микрорентген в час) значениях — признак вторичных концентраций урана в рыхлых отложениях. Максимальные активности в отдельных точках аномалии дают представление о возможных концентрациях урана в рудном теле.

Результаты детальных съемок аномалии изображаются в виде карточек аномалии в изолиниях  $\gamma$ -активности на схематической геологической основе (см. рис. 28, б). Такая карточка аномалии является основанием для выбора места заложения первой горной выработки с целью вскрытия рудного тела в коренном залегании.

## § 2. Особенности проведения гамма-поисков и съемок в различных природных условиях

С помощью измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения урановое рудное тело или ореол его рассеяния под покровом дальнепринесенных рыхлых отложений можно обнаружить, если мощность этого покрова не превышает 0,6—0,7 м. Однако при наличии рыхлого покрова элювиально-делювиального происхождения, в котором развиваются солевые и механические ореолы рассеяния, гамма-поиски и съемки эффективны при мощности рыхлых отложений до 2 м и более. При большой их мощности применяются другие разновидности этого метода.

Шпуровая гамма-съемка проводится путем измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения в шпуре (скважине), специально проходимом в рыхлых отложениях с помощью ручного бура или механизированной установки (вибрустанковки, гидрозадавливателя). Интенсивность измеряется радиометром с телескопическим зондом

(УР-4, РПР или СРП-2 со шпуровой гильзой). Такие условия измерения позволяют приблизить счетчик радиометра к рудному телу, ореолу рассеяния и обнаружить его под слоем неактивных пород.

Обычно шпуровая гамма-съемка проводится на участках, расположенных в пониженных частях рельефа, где мощность рыхлого покрова заведомо более 1,5—2 м, а также при детальнх гамма-съемках на аномалиях для прослеживания ореола рассеяния (рудного тела) по простиранию на участках, перекрытых наносами. Гамма-съемки обычно выполняются в крупном масштабе (от 1 : 200—1 : 500 до 1 : 2 000—1 : 5 000). Измерения активности в шпурах производят от их устьев к забоям через интервалы 10—20 см.

На участках основных маршрутов при измерениях  $\gamma$ -активности в шпурах отмечается максимальная активность и глубина точки этой активности. При детальнх съемках с целью оконтуривания ореола рассеяния и определения его пространственного положения записываются активности во всех точках. Результаты шпуровой съемки изображаются в виде карточек аномалий в изогониях активности или в виде разрезов по профилям через аномальные участки.

Плужная гамма-съемка проводится на площадях, закрытых эоловыми лёссовидными отложениями мощностью от 0,5 до 1—1,20 м, на геологически перспективных участках. Сущность плужной гамма-съемки заключается в том, что плужным канавокопателем проходит канава глубиной 40—75 см, т. е. снимается экранирующий слой покровных отложений. Одновременно с проходкой канавы прибором с детектором, установленным под отвальным лемехом плуга, измеряется интенсивность  $\gamma$ -излучения обнажаемых пород. Для этих целей используется автомобильный гамма-радиометр СГ-64, РА-69, с непрерывной автоматической записью интенсивности  $\gamma$ -излучения на ленту самозаписывающего гальванометра. Пульт управления радиометра с самописцем размещается в кабине трактора.

Автомобильные гамма-съемки ведутся с помощью радиометра, установленного на автомашине высокой проходимости. Измерение интенсивности  $\gamma$ -излучения производится в движении с записью на ленту самопишущего гальванометра. Автомобильные гамма-съемки могут применяться в равнинных, степных и полупустынных районах, где возможно свободное передвижение автомашины без дорог. Наиболее важным применением автогамма-метода является детальная (м-ба 1 : 2 000—1 : 5 000) гамма-съемка площадей в районе выявленных перспективных рудопроявлений и месторождений, так как она позволяет в короткое время детально опосковать большие площади.

Перед проведением съемочных маршрутов автогамма-радиометр (РА-69, АГС-3) эталонируется. На ленту самописца производится запись показаний прибора при различной интенсивности  $\gamma$ -облучения датчика (кассеты счетчиков). После эталонирования лента самописца градуируется в *имп/сек* с помощью генератора периодических импульсов, имеющегося в схеме самого прибора. По результатам

эталонирования и градуировки строится график чувствительности радиометра.

Автомобильная гамма-съемка обычно проводится на подготовленной топографической сети. На местности разбивается магистраль, а маршруты от магистрали выполняются по автокомпасу или с применением передвижных ориентиров. Съемка ведется при скорости движения автомашины 12—15 км/ч. Выявленная на маршруте аномалия оконтуривается промежуточными профилями. Изучение автогамма-аномалии производится так же, как и аномалий, выявленных при пешеходных гамма-съемках.

*Обработка лент записи* состоит в осреднении записи прибора с целью исключения колебания пера самописца (флюктуации), выделении аномальных значений интенсивности и переводе записи на ленте в мкр/ч. Одиночные пики записи, в 2—3 раза превышающие флюктуации, не осредняются. Такие повышания являются аномальными. Перевод записи на ленте в мкр/ч выполняется при помощи специальной палетки.

Профили заездов автомашины с топографической картой переносятся на геологическую основу. На них с лент наносят кривые измеренной интенсивности  $\gamma$ -излучения и таким образом получают карту графиков.

Глубинные гамма-поиски и съемки проводятся на площадях с рыхлым покровом мощностью более 8—10 м. В таких условиях обычные гамма- и эманационные поиски и съемки не могут дать положительных результатов. Объектом их является погребенный ореол рассеяния, который развивается под рыхлым покровом в коре выветривания. Кора выветривания содержит три горизонта (снизу вверх): щебенистый, пестроцветно-глинистый и каолиновый. Наиболее высокие концентрации урана встречаются в щебенистом и пестроцветно-глинистом горизонтах. Ближайший к дневной поверхности горизонт максимального площадного развития ореола с достаточно высоким содержанием урана носит название *представительного горизонта*.

При глубинных поисках производится проходка скважин до глубины представительного горизонта и его опробование. Проходка скважин осуществляется с помощью установки СУП-10, представляющей собой самоходное гусеничное шасси, на котором смонтировано гидравлическое устройство возвратно-поступательного типа. С помощью этого устройства осуществляется задавливание бурового снаряда на глубину до 25 м и подъем буровых штанг.

Опробование скважины ведется путем каротажа и отбора проб рыхлого материала с забоя скважины специальными пробоотборниками. На установке СУП-10 каротажная гильза размещается в буровом снаряде и каротаж осуществляется непосредственно в процессе проходки скважины. Для каротажа используется установка КУ-59 с автоматической записью интенсивности  $\gamma$ -излучения на ленте самописца. Движение бурового снаряда на глубину и работа лентопротяжного механизма синхронизированы.

Для проходки скважин могут использоваться также виброустановки типа СВА-2, смонтированные на автомашине. В этом случае каротаж скважин производится любой каротажной установкой, например КРЛ-М или радиометром СРП-2К (каротажный вариант СРП-2). Результаты глубинных поисков оформляются в виде графиков интенсивности  $\gamma$ -излучения по основным поисковым профилям (так же как шпуровая гамма-съемка) или в виде карточек изолиний при детальных поисках с целью оконтуривания ореола рассеяния.

## ЛИТЕРАТУРА

Мелков В. Г., Пухальский Л. Ч. Поиски урановых месторождений. Госгеолтехиздат, 1957.

## Глава IV

### ЭМАНАЦИОННЫЕ ПОИСКИ

Эманационный метод поисков основан на способности урановых рудных тел создавать газовые радоновые ореолы в перекрывающих их рыхлых отложениях. Сущность эманационных поисков заключается в отборе проб почвенного воздуха из рыхлых отложений и измерении концентрации в них радона.

#### § 1. Условия и область применения эманационных поисков

Применение эманационного метода для поисков месторождений урана эффективно в условиях наличия газопроницаемых рыхлых покровных отложений мощностью не менее 0,5 м и до 6—8 м. При мощности рыхлых отложений менее 0,5 м условия формирования газового ореола малоблагоприятны из-за интенсивного газообмена между атмосферным и почвенным воздухом; газовый ореол не получает достаточного объемного развития. Над одиночным жильным рудным телом ширина радонового ореола вкрест простирания жилы практически не превышает двойной мощности рыхлого покрова, следовательно, при мощности 0,5 м ширина радонового ореола будет около 1 м. За счет механического и солевого ореолов рассеяния, которые, как правило, в плоскости дневной поверхности имеют большие размеры, чем размеры выхода коренного рудного тела, радоновый ореол может иметь несколько большие размеры. При мощности рыхлых отложений 4—5 м и наличии механического и солевого рассеяния ширина радонового ореола достигает 10—15 и даже до 20—25 м.

Благоприятным фактором является наличие небольшой зоны окисления; разрушение первичных руд и образование вторичных минералов приводит к резкому увеличению коэффициента эманирования и, следовательно, к созданию более интенсивных радоновых ореолов

при одинаковых размерах рудных тел и равных содержаниях в них урана, чем над рудными телами с первичными неизмененными рудами.

Неблагоприятными для применения эманационного метода являются участки с мощностью рыхлого покрова более 8—10 м, наличие в толще рыхлых отложений валунов и крупного щебеночного материала, газонепроницаемых прослоев в виде плотных глин, обводненность рыхлых отложений, отсутствие зоны окисления.

При мощности рыхлого покрова более 8—10 м радоновый ореол из-за распада эманации не достигает поверхности и, следовательно, не может быть обнаружен в приповерхностном почвенном слое. Глинистые газонепроницаемые слои в рыхлых отложениях служат экраном и ограничивают распространение ореола выше этого слоя. Чтобы обнаружить радоновый ореол под экранирующим слоем, отбор проб воздуха надо производить с глубины ниже экранирующего горизонта. Обводненность рыхлого покрова затрудняет, а часто и полностью делает невозможным отбор проб почвенного воздуха. Наличие крупноглыбового щебеночного материала в составе рыхлых отложений затрудняет пробоотбор из-за трудности проходки шнуров, кроме того, большая разрыхленность покрова создает плохие условия для формирования газового ореола — рыхлые отложения как бы вентилируются и заметного накопления радона не происходит.

Метод в основном применяется для поисков на площадях с установленной перспективностью, в пределах известных рудных полей и других геологически перспективных площадей. В этом случае задачей эманационных поисков является обнаружение и оконтуривание ореолов рассеяния отдельных рудных тел, не имеющих непосредственных выходов на дневную поверхность. В комплексе с гамма-поисками и гамма-съемкой эманационный метод часто используется для прослеживания рудных тел под наносами на участках выявленных  $\gamma$ -аномалий. Он также успешно может применяться и для решения ряда геолого-картировочных задач (см. гл. VI).

М а с ш т а б ы э м а н а ц и о н н ы х п о и с к о в. Для предварительного опознания геологически перспективных площадей с целью выявления месторождений осадочного типа применяют масштаб 1 : 50 000—1 : 25 000; для выявления месторождений жильного типа — 1 : 25 000—1 : 10 000. Наиболее надежный масштаб 1 : 10 000. В основном эманационные съемки проводятся в масштабах 1 : 10 000 и крупнее. Для выявления, оконтуривания и прослеживания отдельных рудных тел по простиранию в пределах известного рудного поля эманационные съемки ведут в масштабах 1 : 5 000—1 : 1 000 и крупнее.

## § 2. Аппаратура и оборудование для эманационных поисков

Для эманационных поисков в настоящее время используются в основном два типа полевых эманометров: полевой эманометр СГ-11 с ионизационной камерой и электрометром и ЭМ-6 — с сцинтилляционной камерой и усилительно-измерительным устройством.

Рабочая установка для обоих типов эманометров включает в себя зонд для отбора пробы почвенного воздуха в камеру, резиновый шланг, соединяющий зонд с камерой, осушитель и пылеуловитель, камеру, измерительное устройство (электрометр СГ-1М в эманометре СГ-11 и усилительно-измерительное устройство в ЭМ-6). Схемы рабочих установок с эманометрами СГ-11 и ЭМ-6 приведены на рис. 29. Принцип работы электрометра, ионизационной и сцинтилляционной камер изложены в гл. II.

**Эталонирование эманометров.** Для эталонирования эманометров в камеру вводят определенное количество радона

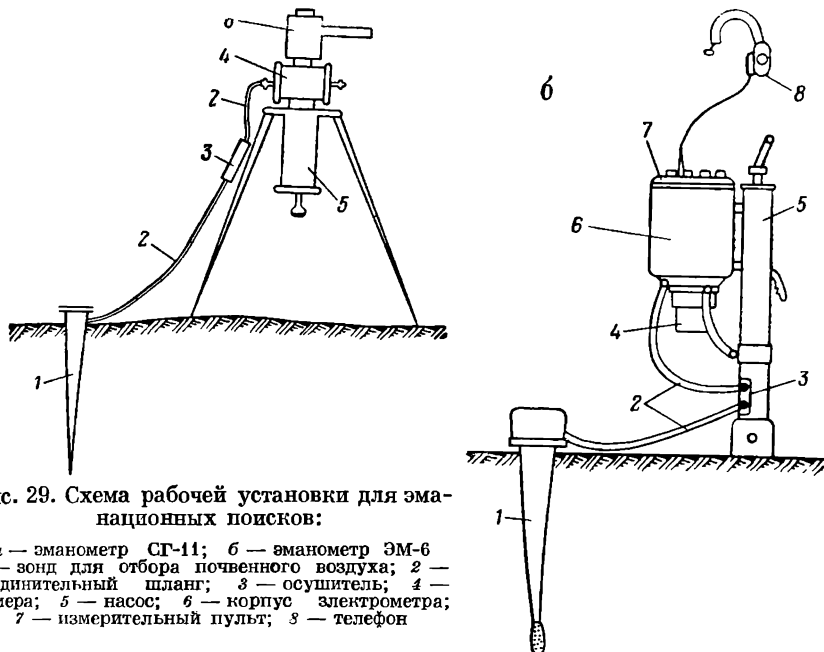


Рис. 29. Схема рабочей установки для эманометрических поисков:

*a* — эманометр СГ-11; *б* — эманометр ЭМ-6  
 1 — зонд для отбора почвенного воздуха; 2 — соединительный шланг; 3 — осушитель; 4 — камера; 5 — насос; 6 — корпус электрометра; 7 — измерительный пульт; 8 — телефон

из эталонного раствора радия и измеряют вызываемый им ионизационный ток (в СГ-11) или интенсивность сцинтилляций (в ЭМ-6). В качестве эталона наиболее удобны жидкие растворы с содержанием радия  $n \cdot 10^{-8}$  —  $n \cdot 10^{-9}$  г.

Введение радона в камеру для эталонирования может быть осуществлено вакуумным или циркуляционным способами (рис. 30). При вакуумном способе эталонирования после измерения фона камеры (ионизационного тока, создаваемого за счет космического излучения и радиоактивного загрязнения камеры) или фона сцинтилляционной камеры, создаваемого  $\alpha$ -излучением радиоактивных веществ, содержащихся в материале камеры, последнюю откачивают до давления 25—50 мм рт. ст. и соединяют с барботером, содержащим эталонный раствор радия. Струей воздуха практически весь

радон извлекается из раствора и поступает в камеру. Количество радона (в кюри), накопившееся в эталоне за время  $t$  и переведенное в камеру, будет равно количеству радия в эталоне в граммах, помноженному на поправку  $(1 - e^{-\lambda t})$ , учитывающую накопление радона из радия за время  $t$ , т. е.

$$q_{\text{Rn}} = q_{\text{Ra}} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Измерив ионизационный ток  $i$  в дел/мин шкалы прибора, можем найти цену деления шкалы прибора  $j$ , или чувствительность:

$$j = \frac{q_{\text{Ra}} (1 - e^{-\lambda t})}{i} \frac{\text{кюри}}{\text{дел/мин}}; \quad (1)$$

$$i = i_{\text{эт}} - i_{\text{ф}},$$

где  $i_{\text{эт}}$  — измеренный ионизационный ток от эталона;  $i_{\text{ф}}$  — фон камеры.

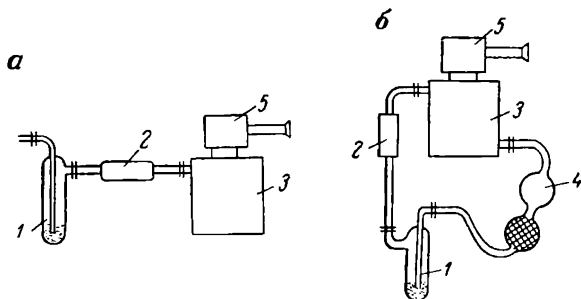


Рис. 30. Схема установки эталонирования эманометров вакуумным (а) и циркуляционным (б) способами

1 — барботер с эталонным раствором Ra; 2 — осушитель; 3 — камера; 4 — резиновая груша; 5 — электрометр

*Пример расчета чувствительности прибора по данным эталонирования циркуляционным способом.* Радиевый эталон содержит  $1 \cdot 10^{-9}$  г Ra. Время накопления радона в эталоне 9 дней. Объем камеры 500 мл.

Измеренный ионизационный ток  $i = i_{\text{эт}} - i_{\text{ф}} = 50,1 - 0,1 = 50$  дел/мин. По таблице накопления для  $t = 9$  дней находим  $(1 - e^{-\lambda t}) = 0,804$ , тогда

$$j = \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,804}{50} = 1,60 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кюри}}{\text{дел/мин}}.$$

Для выражения  $j$  в единицах концентрации нужно количество радона отнести к объему камеры  $V_{\text{к}}$  в литрах:

$$j = 1,60 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1}{0,5} = 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кюри/л}}{\text{дел/мин}}.$$



Накопление радона из радия ( $1 - e^{-\lambda t}$ )

Дни Часы	1 - e <sup>-λt</sup>																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14								
0	0,000	0,166	0,304	0,420	0,516	0,596	0,663	0,719	0,766	0,804	0,837	0,864	0,886	0,905	0,921								
1	0,008	0,172	0,309	0,424	0,519	0,599	0,666	0,721	0,767	0,806	0,838	0,865	0,887	0,906	0,922								
2	0,015	0,178	0,315	0,428	0,523	0,602	0,668	0,723	0,769	0,807	0,839	0,866	0,888	0,907	0,922								
3	0,022	0,185	0,320	0,433	0,527	0,605	0,671	0,725	0,771	0,809	0,841	0,867	0,889	0,908	0,923								
4	0,030	0,191	0,325	0,437	0,530	0,608	0,673	0,727	0,773	0,810	0,842	0,868	0,890	0,908	0,923								
5	0,037	0,197	0,330	0,444	0,534	0,614	0,676	0,729	0,774	0,812	0,843	0,869	0,891	0,909	0,924								
6	0,044	0,203	0,335	0,445	0,537	0,614	0,678	0,731	0,776	0,813	0,844	0,870	0,892	0,909	0,925								
7	0,052	0,209	0,340	0,449	0,541	0,617	0,680	0,733	0,778	0,815	0,845	0,871	0,892	0,910	0,925								
8	0,059	0,215	0,345	0,454	0,544	0,620	0,683	0,735	0,779	0,816	0,846	0,872	0,893	0,911	0,926								
9	0,066	0,221	0,350	0,458	0,547	0,623	0,685	0,737	0,781	0,817	0,848	0,873	0,894	0,912	0,926								
10	0,073	0,227	0,355	0,462	0,551	0,625	0,688	0,739	0,783	0,819	0,849	0,874	0,895	0,912	0,927								
11	0,080	0,232	0,360	0,466	0,554	0,628	0,690	0,741	0,784	0,820	0,850	0,875	0,896	0,913	0,927								
12	0,087	0,238	0,364	0,470	0,558	0,631	0,692	0,743	0,786	0,821	0,851	0,876	0,896	0,914	0,928								
13	0,094	0,244	0,369	0,474	0,561	0,634	0,695	0,745	0,787	0,823	0,852	0,877	0,897	0,914	0,928								
14	0,100	0,250	0,374	0,478	0,564	0,637	0,697	0,747	0,789	0,824	0,853	0,878	0,898	0,915	0,929								
15	0,107	0,255	0,379	0,482	0,568	0,639	0,699	0,749	0,791	0,825	0,854	0,879	0,899	0,916	0,930								
16	0,114	0,261	0,383	0,486	0,571	0,642	0,701	0,751	0,792	0,827	0,855	0,880	0,900	0,917	0,931								
17	0,121	0,266	0,388	0,489	0,575	0,645	0,704	0,753	0,794	0,828	0,857	0,881	0,900	0,917	0,931								
18	0,127	0,272	0,392	0,493	0,577	0,647	0,706	0,755	0,795	0,829	0,858	0,881	0,900	0,917	0,931								
19	0,134	0,277	0,397	0,497	0,581	0,650	0,708	0,757	0,797	0,831	0,859	0,882	0,902	0,918	0,932								
20	0,140	0,283	0,402	0,501	0,584	0,653	0,710	0,758	0,798	0,832	0,860	0,883	0,902	0,919	0,932								
21	0,146	0,288	0,406	0,505	0,587	0,655	0,712	0,760	0,800	0,833	0,861	0,884	0,903	0,919	0,933								
22	0,153	0,294	0,411	0,508	0,590	0,658	0,715	0,762	0,801	0,834	0,862	0,885	0,904	0,920	0,933								
23	0,160	0,299	0,415	0,512	0,593	0,661	0,717	0,764	0,803	0,835	0,863	0,886	0,905	0,920	0,934								

Примечание. Для времени накопления  $t$  от 15 до 38 суток (10 полупериодов распада радона) поправка  $(1 - e^{-\lambda t})$  возрастает от 0,934 до 0,999.

Цену деления в эманах получим, умножив  $j$  на  $10^{10}$ , тогда

$$j = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{10} = 0,32 \text{ эман/дел/мин.}$$

При циркуляционном способе введения радона в камеру (см. рис. 30, б) после открывания камеры и барботера с помощью резиновой груши производят прокачку воздуха через раствор в течение 10—15 мин. Извлеченный из раствора радон распределяется в объеме барботера, соединительных шлангов, осушителя, груши и камеры.

Если объем камеры  $V_k$ , а объем соединительных емкостей  $V_1$ , то доля радона в камере будет  $\frac{V_k}{V_k + V_1}$  и цена деления прибора в единицах концентрации в этом случае равна

$$j = \frac{q_{Ra} (1 - e^{-\lambda t}) V_k}{(V_k + V_1) i} \cdot \frac{1}{V_k} \frac{\text{кюри/л}}{\text{дел/мин}}. \quad (2)$$

*Пример расчета цены деления прибора при эталонировании циркуляционным способом.* Эталон содержит  $q_{Ra} = 1 \cdot 10^{-8}$  г Ra. Время накопления радона 7 суток. Объем камеры  $V_k = 1000$  мл. Объем соединительных емкостей  $V_1 = 500$  мл. Измеренный ток равен 200 дел/мин. По таблице накопления находим  $(1 - e^{-\lambda t}) = 0,719$ . По формуле (2)

$$j = \frac{1 \cdot 10^{-8} \cdot 0,719 \cdot 1}{(1 + 0,5) 200} = 0,24 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кюри/л}}{\text{дел/мин}}$$

или

$$j = 0,24 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{10} \simeq 0,24 \text{ эман/дел/мин.}$$

Концентрация радона в пробе  $C_{Rn}$ , создающая ионизационный ток  $n$  дел/мин, при чувствительности прибора  $j$  эман/дел/мин будет равна

$$C_{Rn} = n \cdot j \text{ эман.}$$

Измерение ионизационного тока (или интенсивности сцинтилляции в сцинтилляционном эманометре) при эталонировании производится в течение первых 10—15 мин после введения радона в камеру и определяется среднее значение тока за этот промежуток времени. Измерения тока при эманационных поисках производят в течение 1—3 мин после отбора пробы. При эталонировании эманометров со сцинтилляционной камерой и счете сцинтилляций по электро-механическому счетчику ионизационный эффект от радона выражают в *имп/мин*. Поэтому в вышеприведенных формулах для расчета чувствительности прибора и содержания радона в пробе измеренный ионизационный ток  $i$  в *дел/мин* нужно заменить на *имп/мин*.

### § 3. Техника проведения эманационных поисков

Площадные эманационные поиски проводятся по заранее подготовленной топографической сети. Шаг отбора проб по профилю не должен превышать удвоенной мощности рыхлых отложений.

Это положение особенно важно учитывать при детальном съемках на аномальных участках с мощностью рыхлого покрова менее 1,5—2 м, проводимых с целью прослеживания и оконтуривания ореола рассеяния. В таких условиях шаг по профилю может быть принят 1—2,5 м. При площадных поисках, как правило, шаг по профилю берется равным 5 м. В случае среднепересеченного рельефа и значительной (до 5—6 м) мощности рыхлого покрова шаг по профилю можно увеличивать до 10 м.

Отбор проб почвенного воздуха. Обычно отбор проб производится из шпура, подготовляемого вручную с помощью лома из буровой стали диаметром 18—20 мм или механическим способом с помощью вибробура или гидрозадавливателя. Шпур проходится при обычной (приповерхностной) съемке на глубину 0,8—1,2 м. В него вставляется зонд. Во избежание подсоса атмосферного воздуха в камеру почва вокруг зонда утрамбовывается — шпур герметизируется. Герметизация шпура при применении конического зонда достигается уплотнением почвы при вдавливании зонда в шпур. Зонд резиновым плангом через осушитель соединяется с камерой. Для замены атмосферного воздуха в камере почвенным воздухом при работе с приборами СГ-11 и ЭМ-6 необходимо пять-шесть качаний насоса. После этого краны камеры перекрываются. Проба отобрана.

Измерение концентрации эманации в пробе. После отбора пробы почвенного воздуха практически через 15—20 сек — время, необходимое для подготовительных операций к измерению, — производится измерение ионизационного тока (интенсивности сцинтилляций при работе с прибором ЭМ-6) в течение 1—2 мин. Перед отбором каждой пробы определяется фон камеры. Обычно над осадочными породами с нормальным содержанием радиоактивных элементов натуральный фон не превышает 1—2 эман. В процессе работы, особенно после измерения проб с высоким содержанием эманаций, вследствие загрязнения камеры продуктами распада фон камер может повышаться. Поэтому измерение фона обязательно перед каждым отбором пробы. Если фон камеры в несколько раз превышает натуральное рассеяние в нормальных условиях и снизить его прокачиванием камеры атмосферным воздухом с помощью насоса не удастся, камеру необходимо заменить другой, чистой.

Если фон камеры определен равным  $i_{\phi}$ , а ионизационный ток при измерении пробы  $i$ , то чистый ионизационный эффект от эманаций, содержащихся в пробе,  $i_{\text{пр}}$  будет равным

$$i_{\text{пр}} = i - i_{\phi}.$$

Концентрация эманации в пробе при чувствительности прибора  $\Gamma$  определяется из выражения

$$C_{\text{Rn}} = \Gamma i_{\text{пр}}.$$

Если в пробе имеются и радон и торон, то  $C_{Rn}$  выражается в эквивалентных эмахах; это означает, что в пробе содержатся такие концентрации радона и торона, которые вызывают такой же ионизационный эффект, как концентрация радона, равная  $C_{Rn}$ .

**О п р е д е л е н и е п р и р о д ы р а д и о а к т и в н о с т и.** При проведении эманационных поисков могут встретиться как радоновые, так и тороновые аномалии, а также и смешанные радоно-тороновые. С точностью, достаточной для полевых измерений, определение природы радиоактивности может быть произведено на основе различия в периодах полураспада радона (3,82 дня) и торона (54,5 сек).

Величина ионизационного тока, измеренная за первую минуту, будет характеризовать суммарный от радона и торона ионизационный эффект. Через 5 мин после отбора пробы торон практически полностью распадается и в камере остаются только радон с продуктами его распада. Значит ионизационный ток через 5 мин будет характеризовать концентрацию только радона. Следовательно, если первое измерение показало ионизационный ток  $i_1$ , а через 5 мин  $i_5$ , то очевидно, что ионизационный ток от торона  $i_{Tn}$  будет равным

$$i_{Tn} = i_1 - i_5,$$

а ионизационный ток от радона  $i_{Rn} = i_5$ .

Если аномалия чисто радоновая, то одно- и пятиминутные токи практически будут одинаковы:  $i_1 \approx i_5$ . Если аномалия чисто тороновая, то величина ионизационного тока с момента введения эманации в камеру будет уменьшаться и через 5—6 мин упадет практически до уровня фона камеры.

Определение природы радиоактивности производится в аномальных участках профиля в одной (с максимальным значением концентрации) точке. Если в этой точке устанавливается смешанная природа радиоактивности, то во всех аномальных точках производится определение содержания радона и торона по двум измерениям с экспозицией в 5 мин. Если аномалия в точке максимума чисто радоновая, то в остальных точках производятся обычные измерения по минутному току; для чисто тороновых аномалий применим этот же прием.

Результаты измерения концентрации эманации в точках по профилю наносятся в виде графика по линиям профилей на топографическую, а при наличии крупномасштабной (1 : 10 000—1 : 25 000) геологической основы на геологическую карту. Карта графиков концентрации эманации в таком виде носит название карты корреляционных графиков и имеет вид аналогичный изображенной на рис. 28, а.

Детальная (м-ба 1 2000—1 200) эманационная съемка проводится с целью обнаружения отдельных рудных тел в пределах рудного поля и оконтуривания ореолов рассеяния, а также в комплексе с гамма-поисками для прослеживания рудных тел или их ореолов рассеяния, выявленных при гамма-поисках, на участках

перекрытых рыхлыми отложениями. Съемка ведется по профилям вкрест предполагаемого простирания рудного тела.

Шаг по профилю в пределах аномалии при резко переменном эманационном поле может меняться в сторону уменьшения до 1—2 м, для того чтобы получить более детальную картину площадного пространства радонового ореола. Это важно для вскрытия аномалии горными или буровыми выработками. Результаты детальных эманационных съемок изображаются в виде карточек аномалий (см. рис. 28, б) на схематической геологической основе.

#### § 4. Геологическая интерпретация результатов

Наряду с аномалиями рудными, обусловленными ореолами рассеяния и выходами рудных тел, перекрытых рыхлыми отложениями, при эманационных поисках регистрируются аномалии, не связанные с рудными объектами. Причинами аномальных концентраций радона в почвенном воздухе могут быть:

1) механические и солевые ореолы рассеяния в рыхлых отложениях и выходы рудных тел под наносами, создающие рудные аномалии;

2) высокая эманацирующая способность дробленых пород обводненных тектонических зон, вследствие чего образуются так называемые аномалии эманирования;

3) нарушение нормального газообмена между рыхлыми отложениями из-за наличия экранирующих прослоев (плотных глин, уплотнения) в рыхлых отложениях. Ниже экранирующих горизонтов отмечается повышение концентрации радона до уровня 5—7 значений фона. Аномалии такого происхождения носят название аномалий экранирования.

Аномалии каждого типа обладают некоторыми определенными признаками или совокупностью признаков, по которым возможно достаточно уверенно установить причину аномалии.

Важнейшим признаком рудной аномалии является резкое увеличение концентрации радона с глубиной отбора проб на одной и той же аномальной точке. Для установления этого признака в точке с максимальной концентрацией производят отбор проб с разных глубин. Для отбора последующей пробы шпур углубляется. Характер изменения концентрации радона с глубиной над рудным телом показан на рис. 31.

Увеличение концентрации с глубиной над механическим ореолом рассеяния происходит до глубины развития ореола; в пробах, отобранных с уровня ниже развития ореола, наблюдается резкое падение концентрации (кривая III). Распределение концентрации по площади аномалии резко переменное — от первых десятков до многих сотен эман. В пределах общего контура аномалии, как правило, выделяются отдельные локальные очаги с относительно высокой концентрацией. Для рудных эманационных аномалий также характерно заметное повышение  $\gamma$ -активности с глубиной.

Форма рудных аномалий в плоскости дневной поверхности может быть самой разнообразной. Только для рудных тел с выдержанным оруденением линейно вытянутая форма аномалии отображает рудное тело по простиранию.

Аномалии эманирования, как правило, имеют линейно вытянутую форму, соответствующую форме вызвавшего ее объекта — тектонической зоны трещиноватости и дробления. Максимальная концентрация радона не превышает первых десятков эман, редко до 100 эман. Изменения концентрации от точки к точке

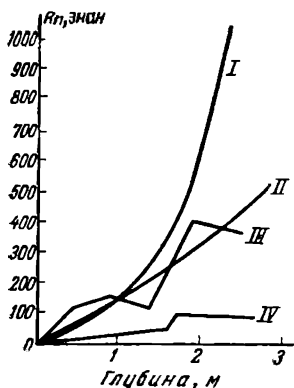


Рис. 31. Характер изменения концентрации радона с глубиной

I — над рудным телом, залегающим на небольшой (до 3 — 4 м) глубине; II — над глубоко залегающим рудным телом; III — над механическим ореолом рассеяния; IV — на аномалии экранирования

в пределах площади аномалии весьма незначительны, и с глубиной практически не наблюдаются.

Аналогично аномалиям эманирования проявляются аномалии над тектоническими зонами, секущими рудные зоны и являющимися водосборными каналами, в которые поступают трещинные воды, обогащенные радием и радоном. Такие аномалии могут служить очень важным поисковым критерием. На них следует обращать серьезное внимание. Характерными отличиями такой аномалии от обычной аномалии эманирования являются значительная, до нескольких сот эман, концентрация радона и постепенное увеличение концентрации радона в направлении к месту поступления в зону обогащенных радоно-радиевых вод.

Аномалии экранирования по форме отображают контур экранирующего горизонта. На практике часто встречаются аномалии над распаханными проселочными дорогами, старыми загонами для скота, где сохранились уплотненные породы, ниже пахотного слоя. Они служат экраном. Признаком такой аномалии является ее форма, низкая концентрация радона (единицы — первые десятки эман). Увеличение концентрации радона на глубинах ниже экранирующего слоя практически не наблюдается.

Проходку горных выработок для оценки эманационных аномалий рекомендуется начинать только после проведения радиометрических работ по определению характера происхождения аномалии, так как аномалий не рудного происхождения при поисках выявляется значительно больше, чем рудных. Поэтому на аномалии целесообразно провести дополнительные геофизические работы по выяснению ее происхождения и отбраковать нерудные аномалии и после этого вскрывать их горными работами.

При мощности рыхлых отложений менее 3 м аномалия вскрывается канавой. Первая канава закладывается через точку максимальной концентрации вкрест оси максимумов. В процессе проходки канавы

ведется контроль дна и стенок ее с помощью радиометра. Участки дна канавы с повышенной активностью углубляются на 10—15 см в коренные породы с целью более надежного определения элементов залегания рудного тела. При мощности рыхлых отложений более 3 м вскрытие аномалий осуществляется шурфами.

## ЛИТЕРАТУРА

Баранов В. И. Радиометрия. Изд-во АН СССР, 1956.  
Руководство по радиометрическим методам поисков и разведки месторождений урана. Под ред. В. В. Алексева. Госгеолтехиздат, 1957.

## Глава V

### РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ

#### § 1. Радиометрическая документация горных выработок

Вся геологическая документация горных выработок, вскрывающих урановое оруденение, сопровождается радиометрическими измерениями, характеризующими гамма-активность руд и вмещающих пород. Радиометрическая документация помогает установить связь невидимого макроскопически уранового оруденения с определенными геологическими структурами. Радиометрические измерения производятся с помощью полевых или рудничных радиометров, часто с применением свинцовых экранов. По мере проходки все разведочные выработки прослушиваются на телефон радиометра. В канавах прослушиваются обе стенки и почва, в шурфах — все четыре стенки, в подземных выработках — обе стенки, кровля, а в штреках и забой.

При обследовании горных выработок, где вероятность встречи уранового оруденения сравнительно невелика (при ревизионном обследовании выработок, на месторождениях нерадиоактивных полезных ископаемых), проводится спирально-осевое профилирование. Интенсивность  $\gamma$ -излучения измеряется по оси выработки через интервалы 1—3 м, а в промежутке непрерывно прослушиваются все стенки выработки и берутся замеры в точках повышенной активности. Результаты измерений в виде графиков интенсивности  $\gamma$ -излучения наносятся на маркшейдерский план с результатами геологической документации (рис. 32).

На участках с повышенной  $\gamma$ -активностью производится гамма-профилирование раздельно по обеим стенкам, почве или кровле горной выработки. Гильза прибора прикладывается непосредственно к стенке выработки на высоте 1—1,5 м от ее почвы, или к кровле (почве) по ее осевой плоскости. Обычно шаг гамма-профилирования, т. е. расстояние между фиксированными соседними точками наблюдений по профилю, составляет 1 м. На участках повышенной активности точки замеров сгущают до 10—25 см. Ре-

зультаты измерений наносят на геологическую документацию в виде трех профилей интенсивности  $\gamma$ -излучения по стенкам и кровле (почве) выработки.

В местах пересечения горными выработками рудных тел, особенно при неравномерном распределении оруденения, производится

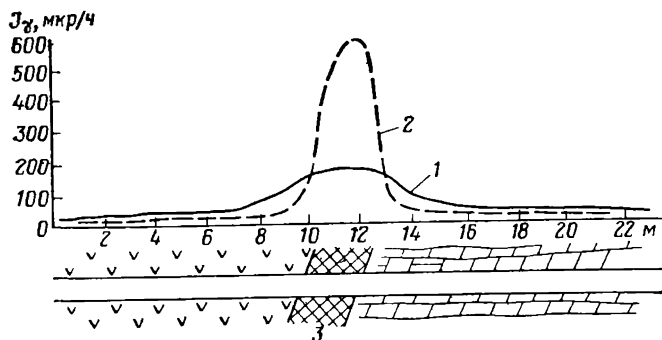


Рис. 32. Пример радиометрической документации канавы  
1 — профиль интенсивности  $\gamma$ -излучения по оси выработки, 2 — профиль по максимумам; 3 — рудная зона

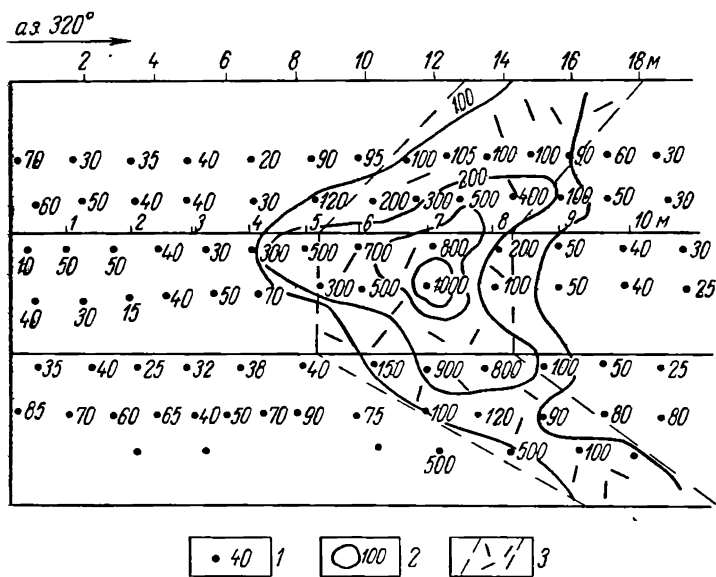


Рис. 33. Гамма-профилевание подземной горной выработки  
1 — замеры интенсивности в точках наблюдения; 2 — изолинии интенсивности; 3 — рудное тело

гамма-съёмка документируемых объектов с использованием свинцового экрана. Точки наблюдения располагаются обычно по сетке размером в среднем  $20 \times 20$  см. Результаты измерений оформляются



в виде плана изолиний ( $\text{мкР/ч}$ ), который вычерчивается на кальке в масштабе геологической документации (рис. 33).

Геолого-геофизическая документация способствует выяснению геологических закономерностей размещения урановой минерализации и позволяет правильно выбрать участки, подлежащие опробованию.

## § 2. Радиометрическое $\gamma$ -опробование руд на месте залегания

Задача опробования рудных тел состоит в определении мощности рудного тела и содержания полезного компонента по рудному пересечению. На месторождениях радиоактивных руд геологические способы опробования бороздвое и задирковое к настоящему времени практически вытеснены более производительным, оперативным и представительным радиометрическим  $\gamma$ -опробованием, посредством измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения на месте залегания руд, без отбора каменного материала. Радиометрическое опробование основано на строгой зависимости интенсивности  $\gamma$ -излучения от содержания радиоактивных элементов. Для равновесных, неземанирующихся урановых руд интенсивность  $\gamma$ -излучения строго пропорциональна содержанию в руде урана.

Отличие измерений интенсивности  $\gamma$ -излучения при радиометрическом опробовании от обычных измерений при гамма-съемке и документации выработок состоит в том, что при опробовании определяется интенсивность, создаваемая определенным участком (интервалом) рудного тела, а не всеми окружающими счетчик излучающими породами и рудами. Выделение излучения отдельного участка достигается применением экранирования счетчика.

Представим себе, что над поверхностью опробуемого рудного тела произвели два измерения интенсивности: первое ( $I_1$ ), когда между счетчиком и опробуемой поверхностью свинцовый экран, второе ( $I_2$ ), когда счетчик в том же положении относительно поверхности, что и в первом случае, но без экрана.

Зарегистрированная интенсивность  $I_2$  будет суммой излучений

$$I_2 = I_p + I_{\text{с.п}} + I_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где  $I_p$  — интенсивность, создаваемая опробуемым участком (рудой);  $I_{\text{с.п}}$  — интенсивность излучения окружающих пород;  $I_{\text{ф}}$  — нормальный фон.

Для первого измерения

$$I_1 = I_p \cdot \alpha + I_{\text{с.п}} + I_{\text{ф}} \quad (2)$$

интенсивность  $\gamma$ -излучения от опробуемого участка за счет ослабления в свинцовом экране уменьшается. Величина этого ослабления  $\alpha$  определяется толщиной экрана.

Разность интенсивностей, замеренных с экраном и без экрана, будет равна

$$\Delta I = I_2 - I_1 = I_p (1 - \alpha). \quad (3)$$

Как видно из этой формулы, разность интенсивностей  $\Delta I$  не зависит от фона и излучения окружающих пород, а определяется только интенсивностью излучения опробуемого участка и коэффициентом ослабления излучения свинцовым экраном.

Пропорциональность между разностью интенсивностей излучения  $\Delta I$  и содержанием урана  $q$  определяется формулой:

$$\Delta I = qB. \quad (4)$$

Отсюда

$$q = \frac{\Delta I}{B},$$

где  $B$  — коэффициент пропорциональности (коэффициент экрана), имеет размерность  $\text{мкр/ч/\%}$ , т. е. определяется интенсивностью в  $\text{мкр/ч}$ , создаваемой концентрацией урана в 1%. Если экспериментально определить значение величины экрана, то по измеренной разности  $\Delta I = I_2 - I_1$  можно рассчитать содержание урана на опробуемом участке по формуле (4).

Для каждого комплекта прибора (радиометр, экран) коэффициент экрана определяется экспериментально на насыщенной модели рудного пласта.

Руда засыпается в железный ящик размером  $50 \times 50 \times 50$  см. Если она не эманлирующая или слабоэманлирующая ( $K_{\text{эм}} < 5^{\circ}$ ), модель может быть открытой. Если руда эманлирующая, то ящик с рудой лучше герметизировать, для того чтобы установилось равновесие между радием и радонем. Затем на середине модели производят  $n$  (10—15 пар) измерений с экраном и без экрана. По результатам измерений находят среднее значение  $\Delta I_{\text{ср}}$ :

$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{2i} - I_{1i})}{n}.$$

Зная содержание урана  $q$  в руде модели, находим коэффициент экрана по формуле

$$B = \frac{\Delta I_{\text{ср}}}{q}. \quad (5)$$

Для стандартных цилиндрических экранов  $B$  колеблется в пределах 24—34  $\text{мкр/ч}$  на 0,01% урана.

**Приборы для радиометрического опробования.** Для радиометрического опробования обычно используются радиометры двух типов:

1) радиометры РПР, УР-4М с цилиндрическим экраном со щелевым вкладышем или сцинтилляционный радиометр СРП-2 с цилиндрическим экраном с торцевым вкладышем;

2) специальные радиометры типа РГН, РНД направленного приема, позволяющие измерять интенсивность  $\gamma$ -излучения определенного участка излучающих пород при компенсации окружающего фона. Компенсация фона достигается с помощью дифференциальной

ячейки, в которую с фонового и основного счетчиков поступают импульсы разной полярности.

Градуирование радиометров для опробования производится на такой же установке, как и поисковых радиометров, радиевыми эталонами с содержанием 0,1; 0,2 мг радия. При градуировке гильзы радиометра находится в свинцовом экране, повернутом щелью в сторону эталона. Во избежание ошибок за счет различного количества радия в эталонах одной и той же серии градуирование прибора перед определением коэффициента экрана и последующие градуирования должны выполняться одним и тем же эталоном. Перед градуированием радиометров направленного приема (РГН, РНД) производят настройку прибора в соответствии с заводской инструкцией, прилагаемой к комплекту каждого прибора.

**Проведение опробования.** Радиометрическое опробование, как правило, проводится по профилям вквост простирания рудного тела. Местоположения профилей определяются теми же самыми факторами, что и местоположение бороздовых проб.

Процесс опробования состоит в последовательном измерении интенсивности  $\gamma$ -излучения на точке профиля с вкладышем и без вкладыша. После пары измерений счетчик с экраном перемещается по профилю на длину экрана. Снятие показаний прибора при этих измерениях должно производиться через 40—60 сек после установки газонаполненного счетчика на точке измерений и через 6—10 сек для сцинтилляционных счетчиков.

Для исключения случайных ошибок в замерах на 15—20% профилей производятся повторные контрольные измерения, при этом расхождения по отдельным пересечениям не должны превышать 10%.

**Обработка результатов наблюдений.** Результаты измерений по шкале прибора с экраном  $I_1$  и без экрана  $I_2$  по эталонировочным графикам переводят в значение интенсивности в  $\text{мкр/ч}$ . По полученным значениям  $I_1$  и  $I_2$  для каждой пары измерений находят  $\Delta I$ .

Для радиометров направленного приема снятые на точках показания прибора по градуировочному графику непосредственно переводятся в значения интенсивности  $I_p$ .

**Определение параметров рудного тела по данным радиометрического опробования.** Границы рудного тела (соответственно и мощность) находятся по кривой графика интенсивности. При пологих крыльях кривой (постепенное уменьшение содержания в рудном теле) граница рудного тела определяется по заданному содержанию. Например, необходимо определить границу рудного тела с содержанием выше 0,03%. При коэффициенте экрана, равном 25  $\text{мкр/ч}$  на 0,01% урана, этому содержанию будет соответствовать интенсивность (разность интенсивностей)  $3 \times 25 = 75 \text{ мкр/ч}$ . Точки пересечения линии, проведенной параллельно оси глубин из ординаты 75  $\text{мкр/ч}$ , с кривой интенсивности дадут положение границ рудного тела, а расстояние между ними — мощность  $h_1$  (рис. 34).

Среднее содержание урана на рудное пересечение в этом случае может быть рассчитано по формуле

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n q_i}{n} = \left( \frac{\Delta I_1}{B} + \frac{\Delta I_2}{B} + \dots + \frac{\Delta I_n}{B} \right) \cdot \frac{1}{n} = \frac{\Delta I_{\text{ср}}}{B}, \quad (6)$$

т. е. среднее содержание равно среднему значению интенсивности в границах рудного тела, деленному на коэффициент экрана.

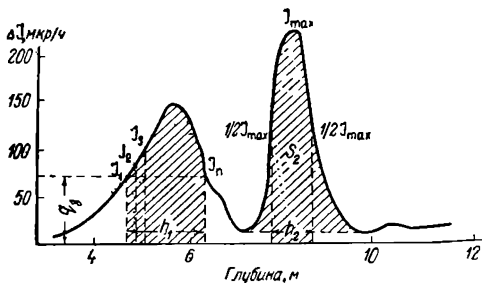
Если рудное тело достаточной мощности с четкими контактами, то границе рудного тела на кривой интенсивности соответствует точка с ординатой, равной половине максимальной интенсивности. В этом случае содержание на рудное пересечение определяется так же, как в каротаже (см. далее), из соотношения

$$q = \frac{S}{hB}, \quad (7)$$

где  $S$  — площадь, ограниченная кривой интенсивности и осью глубин (на рис. 34 это  $S_2$ );  $h$  — мощность рудного тела (на рис. 34 это  $h_2$ ).

По формуле (7) можно вычислить содержание и при определении границ рудного тела по способу заданной интенсивности, когда  $S = S_1$ .

Рис. 34. Интерпретация данных гамма-опробования



Практически с достаточной точностью для различных по мощности рудных тел и характеру распределения оруденения содержания можно определять по среднему значению интенсивности ( $\Delta I_{\text{ср}}$ ), а мощность по заданному содержанию.

Приведенные способы определения мощности и среднего содержания будут справедливы для руд чисто урановых, равновесных и неземанирующих или слабо земанирующих. Если в руде присутствует торий с меняющимся от точки к точке рудного тела содержанием, то радиометрическое опробование с целью определения содержания урана невозможно. В этом случае надо переходить на бороздовое опробование или использовать для опробования  $\gamma$ -спектральную аппаратуру.

Нарушение радиоактивного равновесия между ураном и радием ведет к нарушению пропорциональности между содержанием урана и интенсивностью  $\gamma$ -излучения. Если коэффициент радиоактивного равновесия  $K_{\text{рр}}$  меньше 100%, то содержание урана без учета сдвига равновесия будет занижено, если  $K_{\text{рр}} > 100\%$ , содержание урана завышено. Поэтому для получения истинного значения содержания в расчетные формулы (4) и (5) необходимо ввести поправку на радиоактивное равновесие.

Влияние земанирования аналогично сдвигу равновесия в сторону недостатка радия. Без учета земанирования результаты определе-

ния содержания урана в эманлирующих рудах оказываются заниженными. Поправка на эманирование вводится так же, как и поправка на равновесие. С поправками на эманирование и равновесие формулы (4) и (5) имеют следующий вид:

$$q_{\text{ист}} = \frac{\Delta I_{\text{ср}}}{B} \cdot \frac{1}{K_{\text{pp}}} \cdot \frac{1}{(1 - K_{\text{эм}})},$$

$$q_{\text{ист}} = \frac{S}{hBK_{\text{pp}}(1 - K_{\text{эм}})}. \quad (8)$$

Здесь  $K_{\text{эм}}$  выражено в долях единицы (т. е.  $K_{\text{эм}} = 10\%$ , в долях единицы  $K_{\text{эм}} = 0,1$ ); при  $K_{\text{pp}} = 100 \pm 5\%$  и  $K_{\text{эм}} < 5\%$  поправки на равновесие и эманирование не вводятся.

Достоверность результатов радиометрического опробования контролируется борзодовым опробованием. Для контроля отбираются борзодовые пробы с последующим определением содержания урана химическими анализами в количестве 5—8% от общего числа проб, но не менее 30 проб по каждому классу содержаний. Длина борзоды должна соответствовать мощности рудного тела, определенной по  $\gamma$ -опробованию. Результаты радиометрических или химических анализов проб сопоставляются с результатами  $\gamma$ -опробования. Сопоставления ведутся по средним содержаниям урана в борзодовых пробах  $q^b$  и по радиометрическому опробованию  $q^p$ . Если систематическая ошибка значима, то после проведения достаточного количества арбитражных анализов вычисляется ее величина  $f$ :

$$f = \frac{q^p}{q^b} \approx 1 \pm 0,05,$$

и в результаты радиометрического определения вводится поправка в виде

$$q_{\text{ист}}^p = \frac{q^p}{f}.$$

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Петров Г. И. и др. Геолого-геофизическое обслуживание урановых рудников. Атомиздат, 1964.

Граммаков А. Г., Пашкин В. Л., Ширяева М. Б. Руководство по гамма-опробованию руд в естественном залегании. Атомиздат, 1959.

### Г л а в а VI

#### ПРИМЕНЕНИЕ ГАММА- И ЭМАНАЦИОННОГО МЕТОДОВ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ, ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ НЕРАДИОАКТИВНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Гамма- и эманационный методы исследования могут применяться не только для поисков радиоактивных элементов, но и для решения целого ряда геологических задач при геологическом картировании, а также для поисков и количественной оценки некоторых нерадиоактивных полезных ископаемых.

Применение радиоактивных методов в указанных целях основано на следующих основных предпосылках:

1) изверженные породы часто обладают большей радиоактивностью, чем осадочные. Кислые изверженные породы характеризуются наибольшей радиоактивностью, основные наименьшей;

2) радиоактивность разновозрастных изверженных пород увеличивается с уменьшением их возраста;

3) радиоактивность почв и рыхлых отложений определяется радиоактивностью почвообразующих пород;

4) породы одного и того же петрографического состава в зависимости от физического состояния обладают различной эманулирующей способностью. Повышенное эманулирование дробленых пород тектонических зон является причиной возникновения аномалии эманулирования.

### § 1. Картирование пород

При геологическом картировании (особенно крупномасштабном) площадей, закрытых рыхлыми отложениями мощностью более 0,5—1 м, для возможно более точного выяснения развития и взаимоотношения пород, слагающих картируемую площадь, требуется проходка большого количества трудоемких горных выработок (канав,

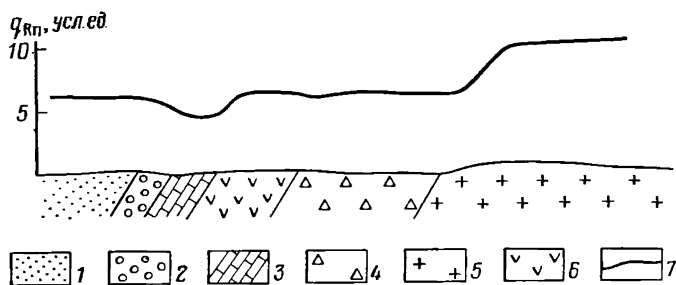


Рис. 35. График концентрации радона по картировочному профилю

1 — песчаник; 2 — конгломерат; 3 — известняк; 4 — гранит-порфир; 5 — гранит; 6 — порфирит; 7 — кривая концентрации радона в почвенном воздухе

шурфов, скважин). При более редкой сети горных выработок интерполяция контактов на значительные расстояния между точками наблюдений может привести к ошибочным построениям и, следовательно, неправильной геологической оценке. В ряде случаев радиоактивные методы могут оказаться весьма эффективным средством в помощь геологическому картированию, заменить значительную часть картировочных выработок.

Различное содержание радиоактивных элементов в изверженных и осадочных породах позволяет по их радиоактивности с помощью современной радиометрической аппаратуры надежно выделять породы нормального гранитного состава, основные и ультраосновные, а также осадочные породы с низким содержанием радиоактивных

элементов (известняки, аргиллиты и т. п.). Для проведения контактов между названными типами пород надежные данные может дать эманационная съемка по профилям вкрест предполагаемого контакта. Характер эманационного поля по картировочному профилю приведен на рис. 35.

Для картирования гранитных интрузий могут быть использованы результаты аэрогамма- и автогамма-поисков по регулярной сети. Содержание урана в гранитах разного состава как минимум в 1,5—2 раза выше, чем в породах осадочного комплекса. Гранитные интрузии совершенно четко выделяются повышенным гамма-полем (рис. 36).

Обычные пешеходные гамма-съемки со сцинтилляционным радиометром дают такой же четкий результат и могут применяться для картирования пород с повышенным содержанием урана и тория. При картировании осадочных пород пониженным гамма-полем отчетливо выделяются известняки. Применение радиоактивных методов для геологического картирования возможно при автохтонном происхождении рыхлого покрова.

При наличии дальнепринесенного рыхлого покрова, чуждого перекрываемым породам, применение радиоактивных методов для картирования невозможно, так как содержание радиоактивных элементов в этих отложениях не отражает их содержания в картируемых коренных породах.

## § 2. Картирование зон тектонических нарушений

Картирование зон тектонических нарушений, тектонических контактов, зон дробления и перетираания пород радиометрическими методами основано на повышенной эманационной способности дробленых пород, подвергающихся химическому воздействию трещинных вод.

При наличии рыхлого газопроницаемого покрова мощностью более 0,5—1 м (но менее 8—10 м) над зоной дробления в рыхлом покрове наблюдается аномалия эманирования. Аномалия линейно вытянутой формы отображает простираение тектонической зоны. Концентрация радона в почвенном воздухе над зоной обычно в несколько раз выше фоновой, т. е. над вмещающими породами. В зависимости от размеров зоны (по мощности), степени дробления пород, обводненности и химической активности циркулирующих трещинных вод концентрация радона над зоной может меняться от 3—5 до 50—100 *эман* при величине фона 1—2 *эман*.

Сухие минерализованные тектонические трещины (жилы) при отсутствии или слабом развитии зон окисления, как правило, эманационным методом выделяются плохо или совсем не выделяются.

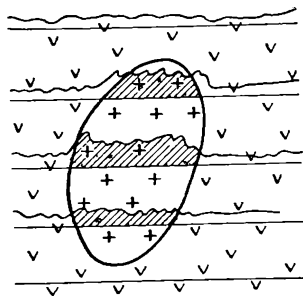


Рис. 36. Гамма-поле над гранитной интрузией

### § 3. Поиски нерадиоактивных полезных ископаемых

Применение радиоактивных методов основывается на парагенетических связях месторождений нерадиоактивных полезных ископаемых с ураном и торием. Радиоактивные элементы в виде минералов или изоморфных примесей присутствуют во всех разновидностях пегматитов от высокотемпературных до низкотемпературных. Для пегматитовых редкоземельных месторождений парагенетическая связь с ураном и торием является постоянной. Поэтому поиски пегматитовых месторождений с успехом могут вестись с помощью гамма- и эманационного методов.

Радиометрические методы могут способствовать выявлению осадочных месторождений ванадия, молибдена, фосфоритов, углей и некоторых других, в которых часто присутствует и уран. Применение радиоактивных методов на таких месторождениях целесообразно в тех случаях, когда для месторождения или рудопроявления уже установлена парагенетическая связь главных компонентов с радиоактивными элементами. В этих случаях проведение радиометрических работ с целью прослеживания выхода рудоносного пласта, поисков новых пластов в районе методически и экономически вполне обосновано. Проходка эманационного профиля в десятки раз дешевле стоимости проходки поисковой магистральной канавы, а результат, получаемый по радиометрическому профилю, часто оказывается большим, чем при проходке канавы.

Радиоактивные методы успешно используются и для поисков титановых россыпных месторождений, в которых всегда встречается большее или меньшее количество монацита, содержащего примеси урана и тория. Такие россыпи могут быть обнаружены при гамма-поисках (пешеходных, автомобильных) по измерению общего  $\gamma$ -излучения радиометром по поисковым профилям на площади россыпи. В зависимости от содержания урана и тория и условий залегания россыпи интенсивность  $\gamma$ -излучения может колебаться от первых десятков до нескольких сот *мкр/ч*. Россыпи, перекрытые чуждыми покровными отложениями мощностью в первые метры, могут быть обнаружены с помощью эманационной съемки, если рыхлый покров не обводнен, или с помощью шпуровой гамма-съемки, если проведение эманационных поисков почему-либо невозможно.

### § 4. Применение радиометрических методов при разведке нерадиоактивных полезных ископаемых

При разведке месторождений, в которых содержание радиоактивных элементов коррелируется с содержанием нерадиоактивных полезных компонентов, радиометрические методы могут быть использованы для определения содержания основного компонента и мощности рудного тела.

При отсутствии корреляции они могут быть использованы для определения глубины залегания пластов и их мощности, а в подземных выработках для оконтуривания границ оруденения.



Месторождения калийных солей. Природный калий содержит три изотопа:  $K^{39}$ ,  $K^{40}$ ,  $K^{41}$ . Изотоп  $K^{40}$  радиоактивен. Радиоактивное превращение калия происходит двойным путем:  $K$ -захвата (захват ядром электрона с  $K$ -оболочки) с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 1,47 Мэв и  $\beta$ -распада с испусканием  $\beta$ -частиц. В результате  $K$ -захвата образуется атом  $Ar^{40}$ ,  $\beta$ -распада —  $Ca^{40}$ . Содержащие радиоактивного изотопа  $K^{40}$  в природной смеси изотопов 0,012%, а содержание суммы изотопов калия в калийсодержащих породах составляет десятки процентов. Поэтому даже при незначительной доле радиоактивного изотопа радиоактивность калийных солей значительна.

При разведке калийных месторождений буровыми скважинами для определения мощности пласта и содержания в нем калия применяется гамма-каротаж с помощью обычных каротажных радиометров (КРЛ, КРТ и др.).

На каротажной диаграмме калийный пласт выделяется  $\gamma$ -аномалией, так же как урановое рудное тело с небольшим содержанием урана. Полученная каротажная кривая может быть проинтерпретирована количественно, т. е. определены мощность и содержание.

В связи с тем, что промышленные залежи калийных солей имеют значительные мощности и четкие контакты с вмещающими породами, определение мощности и содержания калия можно вести более простым способом. Границы пласта определяются по  $1/2 I_{\max}$ . Площадь аномалии  $S$  определяется в границах пласта как сумма произведений интенсивности в фиксированных точках  $I_i$  на интервалы между ними  $\Delta h$ , т. е.  $S = \sum I_i \Delta h_i$ . Содержание калия можно определить по формуле

$$q_K = \frac{\sum I_i \Delta h_i}{K_K h}$$

где  $K_K$  — коэффициент пропорциональности, соответствующий интенсивности  $\gamma$ -излучения, создаваемой насыщенным пластом с содержанием калия в 1%;  $h$  — мощность пласта, м.

Коэффициент  $K_K$  определяется экспериментально на искусственной модели пласта. В отличие от такого же определения для урана модель не нуждается в герметизации. Поправка на поглощение  $\gamma$ -излучения в буровом растворе вводится так же, как и при расчете урана.

Для определения содержания в отбитой руде для оперативного учета добычи и контроля за содержанием калия в добываемой руде может быть использован экспресс-анализ добытой руды в транспортных емкостях (вагонетках, автомашинах, вагонах). Эти определения, так же как и радиометрические анализы радиоактивных руд, основаны на строгой пропорциональности интенсивности излучения и содержания калия в пробе. Экспресс-анализ производится с помощью специальных радиометров типа РКС (радиометрических контрольных станций). Определение содержания ведется относительно

ным методом, т. е. сравнением интенсивности пробы (емкости) с интенсивностью эталона (эталонная емкость) с известным содержанием:

$$q_K^{\text{пр}} = \frac{I_{\text{пр}} q_K^{\text{эт}}}{I_{\text{эт}}},$$

где  $q_K^{\text{пр}}$ ,  $q_K^{\text{эт}}$ ,  $I_{\text{пр}}$ ,  $I_{\text{эт}}$  — содержание калия и интенсивность излучения соответственно в анализируемой пробе (емкости) и эталоне.

**Фосфоритовые месторождения.** В известных фосфоритовых месторождениях, парагенетически связанных с ураном, строгой корреляционной связи содержания фосфора и урана не наблюдается (коэффициент корреляции  $< 0,7$ ). Поэтому оценка содержания фосфора по радиоактивности затруднена. В этих случаях на стадии разведки может оказаться весьма полезным применение гамма-каротажа для определения границ и соответственно мощности фосфоритоносного горизонта независимо от выхода керна. Границы и мощности пластов находят по методике интерпретации гамма-каротажных диаграмм (см. гл. VII).

**Радиометрическое определение монацита в шлихах при разведке россыпных месторождений.** В россыпных месторождениях титана, тантало-ниобатов и др. в качестве сопутствующих минералов присутствуют монацит  $(\text{Ce})\text{PO}_4$  и циркон  $\text{ZrSiO}_4$ . В обоих минералах в качестве изоморфных примесей наблюдаются уран и торий: в монаците до 17,0% окиси тория и до 0,1% окиси урана, в цирконе до 12% окиси тория и до 1,5% окиси урана.

Радиометрический метод для определения содержания монацита в пробах применяется при попутной оценке запасов его в титановых россыпях. Сущность метода состоит в измерении интенсивности  $\gamma$ -излучения исследуемого шлиха и сравнении ее с интенсивностью излучения эталонного шлиха, содержание монацита в котором точно определено минералогическим анализом.

Выбор эталонного шлиха является важным моментом в методике радиометрического определения. В шлихах кроме монацита могут быть примеси других радиоактивных минералов, количество которых в разных частях россыпи не постоянно. Поэтому, прежде чем выбрать эталонный шлих, нужно убедиться, что он по содержанию монацита и радиоактивности близок (с точностью до  $\pm 10\%$ ) к шлихам из различных участков россыпи. В противном случае эталонные шлихи нужно подбирать для отдельных частей (участков) россыпи.

Содержание монацита по результатам измерения радиоактивности шлихов определяется по формуле

$$q_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{эт}} P_{\text{эт}} I_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}} I_{\text{эт}}},$$

а его содержание в граммах на кубический метр россыпи будет

$$q_x = c \frac{I_{\text{пр}} P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}} V_{\text{п}}},$$

где  $I_{\text{пр}}$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения от анализируемого шлиха;  $P_{\text{пр}}$  — вес испытуемого (исходного) шлиха в г;  $p_{\text{пр}}$  — навеска (в г) шлиха в кювете для измерения интенсивности;  $V_{\text{п}}$  — объем промытой породы в  $\text{м}^3$ , из которой намыт шлик;  $c$  — постоянный коэффициент прибора, равный  $\frac{q_{\text{эт}} P_{\text{эт}}}{I_{\text{эт}}}$ .

Использование радиометрического анализа позволяет сократить число минералогических анализов до 10% от общего количества проб.

## ЛИТЕРАТУРА

Методические указания по применению радиометрических методов для поисков и разведки руд нерадиоактивных элементов и геологического картирования. Под ред. А. Г. Колчина и Е. П. Устинова. Госгеолтехиздат, 1963.

## Глава VII

### ГАММА-КАРОТАЖ СКВАЖИН

Гамма-каротаж является одним из основных методов изучения геологического разреза по скважинам. Выполняется он с целью:

а) обнаружения радиоактивных рудных тел в породах, вскрываемых скважиной, и определения глубины их залегания;

б) определения мощности рудных тел и содержания в них урана;

в) литологического расчленения пород, вскрываемых скважиной, по их естественной радиоактивности.

Возможность определения с помощью  $\gamma$ -каротажа мощности рудного тела и содержания в нем урана без отбора проб делает этот метод незаменимым в условиях разведки месторождения буровыми скважинами при неудовлетворительном выходе керна. Данные каротажа являются более представительными, чем результаты опробования керна, так как они характеризуются значительно большим объемом руды, чем объем керна. В настоящее время  $\gamma$ -каротаж является основным промышленным методом опробования руд на месте залегания в скважинах.

#### § 1. Основные количественные зависимости из теории гамма-каротажа

Результатом  $\gamma$ -каротажа является кривая интенсивности  $\gamma$ -излучения по скважине. Характер кривой определяется мощностью рудного тела и содержанием урана (рис. 37).

Количественная интерпретация результатов  $\gamma$ -каротажа основывается на следующих положениях:

1) при мощности рудного пласта более 35—40 см максимальная интенсивность не зависит от мощности, а определяется только содержанием;

2) границе рудного пласта с четкими контактами соответствует точка перегиба кривой, в которой интенсивность равна половине максимальной;

3) величина интенсивности в любой точке вне пределов рудного пласта ( $I$ ) является функцией содержания ( $q$ ) и расстояния точки измерения до границы пласта ( $z$ ), т. е.

$$I = \psi(q, z). \quad (4)$$

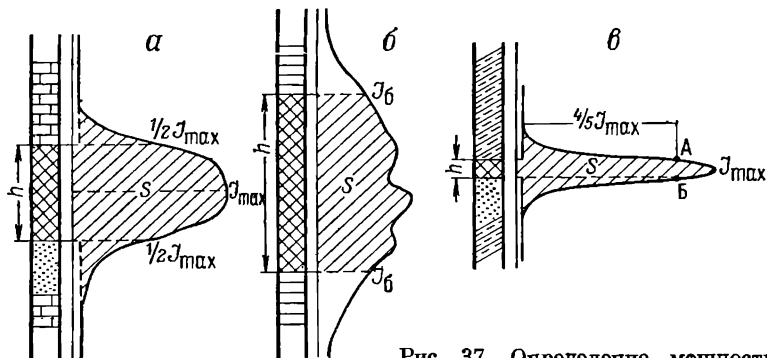
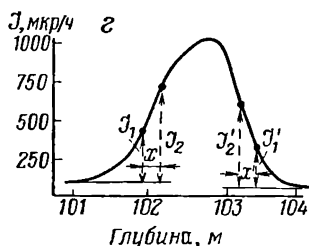


Рис. 37. Определение мощности рудного тела и содержания урана по гамма-картажу

*a* — насыщенный по мощности пласт с четкими контактами рудного тела с вмещающими породами; *б* — рудное тело с постепенно убывающим в сторону вмещающих пород содержанием; *в* — маломощное (до 30 см) рудное тело; *г* — схема определения градиента интенсивности  $\gamma$ -излучения для выбора способа определения границ рудного тела



Следовательно, площадь ( $S$ ), ограниченная кривой интенсивности  $\gamma$ -излучения и осью глубин, является функцией содержания ( $q$ ) и мощности ( $h$ ):

$$S = \psi(q, h). \quad (2)$$

Экспериментально доказано, что эта зависимость имеет вид

$$S = K_0 q h, \quad (3)$$

где  $K_0$  — коэффициент пропорциональности, равный интенсивности  $\gamma$ -излучения насыщенного по мощности ( $h > 35-40$  см) пласта при содержании в нем равновесного урана 0,01 %.

Из приведенных количественных зависимостей следует, что по точке перегиба или по точке кривой с ординатой, равной половине максимальной интенсивности, мы можем определить границы пласта,

а следовательно, и его мощность  $h$ . По формуле (3), если запишем ее в виде

$$q = \frac{S \text{ мкр/ч} \cdot \text{см}}{K_0 h}, \quad (4)$$

можем рассчитать содержание.

Пересчетный коэффициент  $K_0$  зависит от типа счетчика, от величины экранирующих счетчик оболочек (гильзы снаряда), от вещественного состава руд и вмещающих пород. Первые два фактора (тип счетчика и толщина экрана) определяются конструкцией каротажного прибора и в промышленных типах каротажных установок они постоянны. Переменным фактором является вещественный состав руд и вмещающих пород, которым определяется эффективный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения при прохождении его в рудах и вмещающих породах. Ослабляющее (поглощающее) свойство пород зависит от так называемого  $Z$  эффективного среды, который определяется атомным весом составляющих элементов. Определяют  $Z_{\text{эф}}$  по данным полного химического анализа руды (породы): численно он равен

$$Z_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{q_1 Z_1^3 + q_2 Z_2^3 + \dots + q_n Z_n^3}{q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + \dots + q_n Z_n}}, \quad (5)$$

где  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n, q_1, q_2, \dots, q_n$  — атомные номера элементов, входящих в состав руды, и их содержания в %.

Экспериментальными работами на искусственных моделях скважин из руд различного состава установлены следующие значения пересчетного коэффициента (в мкр/ч на 0,01%):

$$\begin{aligned} \text{для руд с } 9 < Z_{\text{эф}} < 18 \quad K_0 &= 115 \\ Z_{\text{эф}} < 9 \quad K_0 &> 115 \\ Z_{\text{эф}} > 18 \quad K_0 &< 115. \end{aligned}$$

В настоящее время при производстве каротажа серийными промышленными каротажными приборами КРТ, КРЛ, РКР, КРС, ПРКС на месторождениях руд силикатного состава пересчетный коэффициент  $K_0$  принимается равным 115 мкр/ч на 0,01% содержания урана без определения его на моделях.

В случаях «легких» (урано-угольных) или «тяжелых» (железо-урановых) руд пересчетный коэффициент определяется на модели скважины. Описание устройства модельных скважин и способ определения пересчетного коэффициента  $K_0$  приводится в инструкции по гамма-каротажу.

## § 2. Определение мощности рудного тела по каротажной диаграмме

Для рудных тел мощностью более 35—40 см с относительно равномерным оруденением и четкими контактами с вмещающими породами, как указывалось выше, граница соответствует положению точки на кривой с ординатой  $1/2 I_{\text{max}}$  (см. рис. 37, а). Следовательно, для

определения мощности можно пользоваться способом  $1/2 I_{\max}$ . Но для того чтобы воспользоваться этим способом, нужно установить, имеем ли мы дело с насыщенным по мощности рудным телом, с четкими контактами с вмещающими породами, или четкие контакты отсутствуют, а наблюдается постепенное (монотонное) убывание содержания урана в сторону вмещающих пород, когда граница рудного тела может быть только условной.

Для грубой оценки мощности рудного тела достаточно найти расстояние между точками кривой с ординатами  $1/2 I_{\max}$ . Если это расстояние окажется больше 35—40 см, то рудное тело по мощности насыщенное. Для установления характера границы (четкий контакт или постепенное убывание содержания) нужно определить относительный градиент  $g$ . Экспериментально установлено, что вблизи точки перегиба кривой интенсивности на относительно прямолинейном ее участке (см. рис. 37, а)

$$g = \frac{I_2 - I_1}{I_2 x \sin \alpha} \quad (6)$$

где  $\alpha$  — угол встречи пласта со скважиной.

При диаметре скважины 40—70 мм  $g = 0,05—0,07 \text{ см}^{-1}$ , а при диаметре 70—130 мм  $g = 0,04—0,06 \text{ см}^{-1}$ . Для оруденения с постепенно убывающим содержанием градиент соответственно меньше 0,05 и меньше 0,04  $\text{см}^{-1}$ .

Если значение градиента для соответствующего диаметра скважины больше приведенных минимальных, это значит, что мы имеем дело с рудным телом с четкими контактами и можем определить границы его по точкам  $1/2 I_{\max}$ .

В случае постепенного убывания содержания урана в рудном теле, когда четкой границы между рудным телом и вмещающими породами нет, граница рудного тела устанавливается по заданному бортовому содержанию  $q_6$ . Интенсивность  $\gamma$ -излучения  $I_6$ , соответствующая заданному содержанию  $q_6$ , будет  $I_6 = q_6 K_0$ . Например,  $q_6 = 0,03\%$ ,  $K_0 = 115 \text{ мкр/ч}$  на  $0,01\%$ ,  $I_6 = 3 \cdot 115 = = 345 \text{ мкр/ч}$ .

Для определения маломощных пропластков пользуются искусственным приемом, так называемым способом  $4/5 I_{\max}$ .

Если кривая интенсивности  $\gamma$ -излучения от пачки пластов (пропластков в рудном теле) представляет сложную кривую, не разделенную понижениями до нормального фона, кривую интерпретируют как один пласт суммарной мощности. Границы такого пласта определяются в зависимости от характера крыльев кривой по  $1/2 I_{\max}$  по заданной интенсивности или по  $4/5 I_{\max}$ .

При наклонном пересечении рудного тела скважиной под углом  $\alpha$  по диаграмме получаем видимую мощность  $h_{\text{вид}}$ . Истинная мощность  $h_{\text{ист}}$ , очевидно, будет равна  $h_{\text{ист}} = h_{\text{вид}} \cdot \sin \alpha$ .

### § 3. Определение содержания урана по данным гамма-каротажа

Определив по каротажной кривой мощность рудного тела и зная пересчетный коэффициент  $K_0$ , содержание (в сотых долях процента) определяется по формуле

$$q = \frac{S}{K_0 h}, \text{ или в } \% q = \frac{S}{K_0 h \cdot 100}.$$

Площадь  $S$  определяется из выражения  $S = S_d m n$ , где  $S_d$  — площадь аномалии в  $см^2$  по каротажной диаграмме;  $m$  — масштаб записи диаграммы по оси глубин;  $n$  — масштаб записи интенсивности.

Например,  $S_d = 7 см^2$ , масштаб записи по оси глубин 1 : 25, масштаб записи интенсивности 1 : 100. В этом случае площадь аномалии будет  $S = 7 \cdot 25 \cdot 100 = 17500 мкр/ч \cdot см$ .

Учет влияния бурого раствора и обсадных труб. Приведенные расчеты будут справедливы для сухой не обсаженной скважины и равновесных не эманулирующих урановых руд. Для реальных скважин в большинстве случаев условия каротажа несколько отличны. Во-первых, скважина, как правило, заполнена водой или буровым раствором. Чем больше диаметр скважины, при одном и том же диаметре каротажного снаряда, тем больше поглощающий  $\gamma$ -излучение слой воды или раствора между стенками скважины и каротажного снаряда. Регистрируемая прибором интенсивность  $\gamma$ -излучения будет меньше истинной за счет ослабления  $\gamma$ -излучения в буровом растворе. Чтобы получить истинное значение интенсивности, в зарегистрированную интенсивность необходимо внести поправку на поглощение  $\gamma$ -излучения в буровом растворе  $П_{б.р.}$ . Эта поправка представляет собой долю поглощенного излучения в процентах и определяется по графику, полученному экспериментально. Графики поправок на поглощение в буровом растворе приводятся в инструкции по гамма-каротажу.

Аналогично поправке на поглощение в буровом растворе вводится поправка на поглощение в обсадных трубах  $П_{т.}$ . Величина этой поправки определяется толщиной стенки обсадной трубы.

С учетом этих двух поправок формула для расчета содержания принимает вид

$$q = \frac{S}{K_0 h \cdot 100} \cdot \frac{100}{(100 - П_{б.р.})} \cdot \frac{100}{(100 - П_{т.})} = \frac{S \cdot 100}{K_0 (100 - П_{б.р.}) (100 - П_{т.}) h} \% \quad (7)$$

Введение поправки на состояние радиоактивного равновесия. В зависимости от характера смещения равновесия между ураном и радием (избыток или недостаток радия в сравнении с равновесным его содержанием) регистрируемая при каротаже интенсивность будет соответственно выше или ниже интенсивности равновесной руды с тем же содержанием урана. Поэтому для того чтобы получить значение интенсивности, соответ-

ствующее содержанию урана в равновесии с радием, зарегистрированную при каротаже интенсивность нужно привести к значению равновесного излучателя.

Учитывая, что при каротаже 100% регистрируемого  $\gamma$ -излучения  $I_p$  принадлежит группе радия, интенсивность равновесного излучателя  $I_0$  при коэффициенте радиоактивного равновесия  $K_{pp}$  будет равна

$$I_0 = I_p \frac{100}{K_{pp}}.$$

Площадь аномалии, обусловленная равновесным с ураном излучением радия, равна

$$S_{\text{испр}} = S \cdot \frac{100}{K_{pp}},$$

а формула для расчета содержания примет вид

$$q = \frac{S}{K_0 h K_{pp}} \% \quad (8)$$

С учетом поправок на буровой раствор, обсадные трубы и состояние радиоактивного равновесия расчетная формула (4) приобретет вид:

$$q = \frac{S \cdot 100^2}{K_0 K_{pp} (100 - \Pi_{б.р}) (100 - \Pi_{т}) h} \% \quad (9)$$

Поправки на присутствие тория в руде. Если руда содержит торий (урано-ториевое месторождение), то по формуле (9) получается суммарное содержание урана и тория в эквивалентных единицах равновесного урана. Чтобы получить содержание только урана, нужно знать содержание тория. Оно определяется химическим путем по пробам керна. Зная урановый эквивалент тория по  $\gamma$ -излучению (0,45), формулу (9) для урано-ториевой руды можно записать в виде

$$q_U = \frac{S \cdot 100^2}{K_0 K_{pp} (100 - \Pi_{б.р}) (100 - \Pi_{т}) h} - 0,45 q_{Th}, \quad (10)$$

где  $q_{Th}$  — содержание тория в %.

#### § 4. Проведение каротажа скважин

Перед проведением каротажа скважин каротажный радиометр градуируется, так же как и поисковый радиометр. Но для этого применяется радиевый эталон серии № 10 с содержанием 1 мг Ra (840  $\mu\text{кр/ч}$  на расстояние 1 м). Перед спуском каротажного снаряда в скважину устанавливается режим питания цепей схемы прибора в соответствии с инструкцией по эксплуатации радиометра.

До начала каротажа для удаления или уменьшения помех, вызываемых действием радона, выделяющегося при вскрытии рудного тела, радоновых вод, которые могут поступать по трещинам в скважину, и рудного шлама, скважина в течение 1—1,5 ч промывается



буровым раствором. После окончания промывки каротажный снаряд опускается до забоя скважины. Во время опускания оператор прослушивает на телефон интенсивность  $\gamma$ -излучения и по меткам глубины на кабеле отмечает аномальные участки. Во избежание прихвата каротажного снаряда по достижении им забоя он поднимается на 0,5—1 м. Измерение интенсивности по скважине производится при подъеме снаряда. Скорость подъема не должна превышать 30—40 м/ч.

При регистрации интенсивности по стрелочному индикатору прибора фиксированные точки измерения берутся через 1 м на неактивных участках и через 10 см на аномальных. Время измерения на фиксированных точках с приборами на газонаполненных счетчиках составляет 30—40 сек, для сцинтилляционных 6—8 сек. Рудные (активные) интервалы для получения более точных результатов каротируются дважды. Сравнение результатов производится по площадям аномалий  $S_1$  и  $S_2$ . При

$$\Delta S = \frac{2(S_1 - S_2)}{S_1 + S_2} < 10\% \quad (11)$$

данные каротажа считаются доброкачественными и могут быть использованы для определения параметров рудного тела. Если между первым и вторым измерениями расхождение более 10%, рудный интервал каротируется третий раз.

**Оформление результатов каротажа.** Результаты каротажа (измерения интенсивности по скважине) в виде графика интенсивности  $\gamma$ -излучения наносятся в масштабе геологической документации на колонку скважины. Графики рудных интервалов в зависимости от мощности рудного тела строятся отдельно в масштабе 1 : 50 — 1 : 10 с таким расчетом, чтобы площадь аномалии была не меньше 5—7 см<sup>2</sup>. На листе графика рудного интервала записывается адрес и параметры скважины и расчет параметров рудного тела.

Результаты количественной интерпретации данных гамма-каротажа нуждаются в проверке их достоверности. Достоверность этих данных может быть проверена путем сопоставления параметров рудных тел, определенных по каротажу и керну одних и тех же скважин. Необходимо заметить, что сопоставление результатов по одной скважине не является достаточным по причине несколько различной представительности  $\gamma$ -каротажа и данных опробования керна. Для сопоставления при небольшом количестве скважин на участке работ выбирают как минимум 5—6 скважин с выходом керна не ниже 80—90%. По данным каротажа и результатам опробования керна определяют средние содержания урана, средние мощности рудного тела и средние линейные запасы. Отношение сопоставляемых параметров является мерой надежности результатов каротажа. Если отклонения среднего содержания, среднего линейного запаса по каротажу по отношению к среднему содержанию и среднему линейному запасу, определенных по керну, отличаются не более чем на 5%, то данные каротажа могут приниматься как достоверные. В противном случае необходимо искать причину расхождения.

## § 5. Каротажные приборы

Для радиоактивного каротажа скважин с целью количественной оценки оруденения применяются несколько типов приборов, обладающих разными техническими характеристиками (см. таблицу).

**Типы каротажных радиометров и их основные характеристики**

Тип или марка прибора	Счетчик излучения	Диапазон измерения, тыс. мкр/ч	Способ регистрации	Диаметр каротажного снаряда, мм	Источник питания	Максимальная глубина каротажа скважины, м
КРТ (каротажный радиометр тяжелый)	МС-13 МС-4	5—20	Самозаписец Н-360	51,37	Батарей	1200
КРЛ (каротажный радиометр легкий)	МС-13 МС-4	5—10	ЭМС	37	»	120
РКР (рудничный каротажный радиометр)	СТС-6 СТС-6	До 100	ЭМС	33	»	150
КРС (каротажный радиометр сцинтилляционный тяжелый)	Сцинтилляционный с ФЭУ-25	20	ЭМС Н-360 (СК-100)	34	Переменный ток	1000
ПРКС (переносной радиометр каротажный сцинтилляционный)	Сцинтилляционный с ФЭУ-31	10	ЭМС	32	Батарей	150

Радиометры КРТ и КРС тяжелые, их общий вес в рабочем комплекте до 250 кг, поэтому они устанавливаются на автомашинах и предназначаются для каротажа скважин глубиной до 1000—1200 м. Радиометры КРЛ, РКР и ПРКС — переносные установки для каротажа скважин глубиной до 120—150 м. Вес самого тяжелого узла — лебедки с кабелем не превышает 20 кг. Радиометры КРС и ПРКС со сцинтилляционными счетчиками могут быть использованы для раздельного определения урана и тория.

Конструктивно любой тип каротажного прибора состоит из каротажного снаряда, в котором размещен приемник излучения (счетчик), лебедки с кабелем, соединяющим каротажный снаряд с пультом управления, самозаписывающего гальванометра.

Принцип работы прибора с газонаполненным счетчиком в общих чертах можно представить следующим образом. Электрический разряд в счетчике, возникающий в результате прохождения гаммакванта через счетчик, вызывает падение напряжения (импульс

напряжения) на сопротивление нагрузки питания счетчика. Этот импульс подается на управляющую сетку усилительной лампы и уже усиленный — на вход формирующего каскада, где импульсы разной амплитуды и длительности формируются в импульсы одинаковой амплитуды и длительности.

С выхода формирующего каскада импульсы могут подаваться в канал счета импульсов в блок электромеханического счетчика (ЭМС), состоящего из пересчетной ячейки и лампы, управляющей работой ЭМС, и в канал записи — в интегрирующий блок (контур). Часть напряжения с интегрирующих емкостей подается на управляющую сетку усилителя постоянного тока. В цепь лампового вольтметра последовательно со стрелочным индикатором включена рамка записывающего гальванометра (самописец).

Величина напряжения на емкостях интегрирующего контура (а значит и часть его) пропорциональна числу импульсов, поступающих в единицу времени на емкость, а величина тока в аноде усилительной лампы пропорциональна величине напряжения на управляющей сетке усилителя. Следовательно, величина тока, измеряемого гальванометром, пропорциональна числу импульсов или интенсивности регистрируемого излучения.

Питание прибора поступает от гальванических батарей или аккумулятора. Питание высоким (800 в) напряжением счетчиков осуществляется от источников питания анодных цепей через генератор звуковых частот, размещаемый в гильзе каротажного снаряда.

В функциональной схеме прибора со сцинтилляционным счетчиком, с помощью которого можно оценить природу радиоактивности (торий, уран), принципиально новым узлом является наличие амплитудного дискриминатора для подавления шумов ФЭУ и блока дискриминатора с регулируемым порогом срабатывания для выделения жесткого (ториевого) излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

Овчинников А. К., Иващенко Т. Ф. Инструкция по γ-каротажу. Госгеолтехиздат, 1963.

Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Изд-во «Недра», 1965.

## Глава VIII

### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Геохимические методы поисков урановых месторождений широко используются в плохообнаженных и залесенных районах. Они приобретают ведущее значение в районах развития ослабленных и закрытых ореолов рассеяния урана и его спутников, а также при необходимости выявления не выходящих на поверхность (слепых) урановорудных залежей и месторождений.

В зависимости от типов выявляемых ореолов рассеяния, характера опробуемого материала и конкретных задач уранометрических поисковых работ различают следующие виды поисков урановых месторождений:

1) по первичным ореолам урана и его спутников в коренных породах;

2) по вторичным ореолам и потокам рассеяния урана и его спутников в рыхлых отложениях различного генезиса;

3) по ореолам рассеяния радиоактивных элементов в природных водах;

4) по ореолам рассеяния радиоактивных элементов и элементов-спутников урана в растениях, произрастающих на площади поисковых работ.

Виды и масштабы проведения уранометрических поисков, а также особенности их сочетания с другими видами поисковых работ определяются типом регионального геологического строения поискового района, его ландшафтно-географическими условиями, геологическими особенностями урановых месторождений ожидаемого промышленного типа и конкретными задачами проектируемых поисковых работ.

Максимальная эффективность поисковых работ достигается при использовании металлотрических исследований по первичным ореолам рассеяния урана и его спутников, поскольку они представляют собой внешние зоны урановорудных залежей, пространственно совмещены с ними и обеспечивают возможность количественного прогнозирования уранового оруденения. Однако вследствие ограниченных размеров первичных ореолов эта модификация уранометрических поисков не пользуется широким распространением на ранних стадиях поисковых работ.

Поиски урановорудных скоплений по вторичным ореолам и потокам рассеяния имеют то преимущество, что их размеры значительно больше размеров первичных ореолов, однако многие из них пространственно разобщены с участками развития коренной урановой минерализации. Особенно велика разобщенность вторичных потоков рассеяния урана и участков первичных урановорудных скоплений. Этот же недостаток свойствен и ореолам рассеяния радиоактивных элементов в водах, почвах и растениях. Поэтому несмотря на высокую вероятность обнаружения вторичных концентраций урана и его спутников в перечисленных природных образованиях поисковый эффект этих методов резко снижается из-за сложности отыскания первичных концентраций по обнаруженным вторичным ореолам.

## § 1. Поиски урановых месторождений по первичным ореолам рассеяния

Метод поисков заключается в обнаружении повышенных концентраций урана и его спутников и в изучении закономерностей их пространственного размещения в коренных рудовмещающих породах по данным систематического их опробования. Изучение первич-

ных ореолов может проводиться в процессе предварительных и детальных поисков, а также на стадиях поисково-разведочных, разведочных и разведочно-эксплуатационных работ. На ранних стадиях поисковых работ опробованию подвергаются участки гидротермально измененных пород, зоны дробления и другие геологические образования, перспективные на обнаружение эндогенных урановых месторождений. В процессе разведочных и разведочно-эксплуатационных работ опробованию подвергаются горные выработки и скважины, пройденные в пределах перспективных участков.

При проведении работ в новых районах или на новых объектах массовому применению металлометрических поисков предшествуют опытные работы для выявления комплекса элементов-индикаторов уранового оруденения, определения величин геохимического фона каждого из них, выяснения форм, размеров и элементов зональности первичных ореолов. Опытные работы проводятся на типичных, хорошо разведанных месторождениях.]

Отбор проб в горных выработках, скважинах или в коренных обнажениях производится методом пунктирной борозды, путем отбойки мелких кусочков размером 3—4 см на расстояниях от 0,5 до 2 м друг от друга. Отобранные кусочки по каждому интервалу опробования объединяются в одну пробу весом 150—200 г. Длина интервала одной пробы может изменяться от 2 до 10 м в зависимости от размеров изучаемых ореолов, целей и задач металлометрических поисков. Так, например, при проведении опытных работ длина интервала не должна превышать 2—3 м. При плохом выходе керна опробование скважин может производиться по шламу и мути.

Отобранные пробы подвергаются измельчению и анализу на содержание подвижного урана и элементов-индикаторов уранового оруденения. Определение подвижного урана в пробе производится методами количественного перлово-люминесцентного анализа с использованием люминесцентных фотометров типа ЛЮФ-55 или приборов типа ФАС-1. Определения содержания элементов-индикаторов уранового оруденения (молибдена, свинца, цинка, меди, ванадия, никеля, кобальта, мышьяка и др.) выполняются методами приближенно-количественного спектрального анализа по способу просыпки.

В основе расшифровки данных металлометрического опробования, оценки и прогнозирования перспектив уранового оруденения лежат следующие закономерности, типичные для большинства эндогенных ореолов:

а) состав эндогенных ореолов аналогичен составу рудных залежей;

б) размеры ореолов зависят от концентрации соответствующих элементов в рудных залежах, от условий их залегания и от физико-химических особенностей вмещающих пород;

в) в строении ореолов устанавливаются элементы вертикальной и горизонтальной зональности. Часть элементов концентрируется преимущественно в подрудной части, другая часть характерна для всех горизонтов рудных тел. В порядке убывания концентраций

сверху вниз для многих гидротермальных урановых месторождений характерен следующий ряд элементов: свинец — цинк — молибден — уран.

Данные о зональности ореолов, накапливаемые при изучении уранового месторождения, могут быть использованы для оценки нижних горизонтов и направления дальнейших разведочных работ.

## § 2. Поиски урановых месторождений по вторичным ореолам и потокам рассеяния

Методика поисков урановых месторождений по вторичным ореолам и потокам рассеяния заключается в обнаружении повышенных концентраций урана и его спутников и выяснении закономерностей их пространственного размещения в разрезе рыхлых отложений элювиального, делювиального, пролювиального или аллювиального происхождения путем их систематического опробования. В практике поисков урановых руд эта методика применяется в двух разновидностях: по потокам рассеяния и по ореолам рассеяния.

Метод поисков по потокам рассеяния (съемка донных осадков) применяется в таежных, заболоченных и плохоблаженных районах с хорошо развитой гидросетью для общей оценки ураноносности поискового района и выделения перспективных площадей под специализированные детальные поиски урановых месторождений. Поэтому уранометрические съемки в масштабах крупнее 1 : 25 000 не производятся.

Полевые работы заключаются в отборе проб русловых отложений современной гидросети. Наиболее благоприятны для обнаружения потоков рассеяния урана илистые и песчано-глинистые фракции аллювиальных и пролювиальных отложений, обогащенные органическим веществом. При отсутствии подобного материала в русловых отложениях опробуются пойменные образования и верхние кромки в нижних частях заболоченных речных долин, рыхлые илисто-глинистые отложения временных водотоков, а при слабо развитой гидросети — сходные по составу рыхлые отложения нерасчлененных склонов.

Пробы весом 50—100 г отбираются непосредственно с поверхности или с глубины 15—20 см. Густота маршрутов и длина шага опробования зависят от масштаба поисков и разветвленности гидросети. При мелкомасштабных съемках длина шага опробования составляет 400—500 м, при более крупных масштабах она уменьшается до 100—200 м.

Анализы проб на содержание подвижного урана производятся количественным перлово-люминесцентным, а на остальные элементы — полуколичественным спектральным методом.

Обработка материалов съемки донных осадков заключается в составлении сводной карты, оценке величины нормального геохимического фона и выделении аномалий. Для оценки перспективности аномалий изучается геологическое строение аномального участка, производится его детализация путем сгущения шага опробования

до 50 м и проведения гамма-бета-съемки коренных пород и русловых отложений.

Аномальные потоки рассеяния урана в аллювиальных и пролювиальных отложениях могут быть как механического, так и солевого происхождения. В большинстве случаев встречаются потоки смешанного типа, в которых сочетаются механическая, солевая и коллоидная фазы. Оценка поискового значения аномальных потоков осложняется отсутствием четких критериев для разделения их на рудные (т.е. образованные за счет рассеяния урановорудных концентраций) и на безрудные.

Для рудных потоков механического происхождения характерно присутствие в пробах зерен или обломков урансодержащих минералов и близкие к равновесным соотношения радия и урана. Для рудных потоков солевого происхождения типичны аномальные концентрации урана в природных водах. Для всех типов аномальных потоков рассеяния благоприятным оценочным признаком является повышенное содержание таких элементов-спутников урана, как молибден, свинец, мышьяк, серебро, цинк, ванадий и др. в пробах и в природных водах.

Использование метода поисков урана по потокам его рассеяния эффективно только для оценки эндогенного уранового оруденения в условиях лесной и горно-таежной зон. В условиях арктических и высокогорных зон возможны поиски урановых месторождений с применением обычных шлиховых съемок.

Метод поисков по ореолам рассеяния урана в элювиально-делювиальных отложениях и в почвах используется: 1) для оценки перспектив ураноносности при геологических съемках масштабов 1 : 50 000 и мельче, 2) для детальных поисков урановых рудопоявлений и месторождений в пределах перспективных территорий и для поисков новых рудных участков и залежей в пределах известных рудных полей в процессе поисково-разведочных работ.

Опробованию подвергается мелкая песчано-глинистая фракция элювиально-делювиальных отложений или почвенного слоя. Эффективность метода в значительной степени зависит от правильности выбора представительного горизонта отбора проб и от их фракционного состава. Поэтому широкому применению метода в каждом конкретном районе должны предшествовать работы по выявлению специфических особенностей ореолов рассеяния урана и его спутников: а) характера развития вторичных ореолов по вертикальному разрезу с выявлением оптимальных глубин представительных горизонтов; б) распределения элементов-спутников уранового оруденения по фракциям ситового анализа проб; в) значения местных фоновых концентраций и аномальных концентраций подвижного урана и элементов-спутников; г) морфологических особенностей и элементов зональности вторичных ореолов.

Вес отбираемых проб в зависимости от фракционного состава рыхлых отложений может изменяться от 50 до 200 г. В общем случае

он увеличивается с возрастанием доли крупной фракции, особенно если с ней связаны повышенные концентрации урана и его спутников.

Глубина отбора проб зависит от ландшафтно-географических условий поискового района. В пустынных, полупустынных и степных зонах с сухим климатом и щелочной реакцией почв оптимальная глубина отбора проб составляет 0,1—0,2 м. В лесных, заболоченных и горно-таежных районах с влажным климатом и кислыми подзолистыми почвами представительные горизонты для отбора проб располагаются на глубинах от 0,5 до 1,5 м от дневной поверхности.

При поисках погребенных и закрытых ореолов пробы отбираются с забоев шпуров или мелких скважин специальными пробоотборниками. Для проходки таких скважин в практике поисковых работ используются виброагрегаты типа СВА-2 и универсальные гидропогружатели типа СУГП-10. Для изучения вертикального разреза ореола пробы отбираются с разных глубин по мере углубления скважины или шпура.

Детальные металлометрические съемки выполняются по системе профилей, ориентированных вкрест простирания рудоносных структур. При мелкомасштабных поисках расстояния между профилями основной сети принимают равными не более 0,9 предполагаемой средней длины ореола, а расстояния между точками отбора проб на профиле — не более половины его ширины. При крупномасштабных поисках рекомендуются следующие размеры сети опробования:

для масштаба 1:10 000	100×(20—40) м
» » 1:5000	50×(20—40) м
» » 1:2000	20×(10—5) м

При проведении глубинных металлометрических поисков в связи с резким возрастанием стоимости пробоотбора густоту сети опробования рассчитывают методами теории вероятностей с учетом геолого-экономической эффективности различных вариантов.

Первичная обработка проб заключается в их регистрации, сушке и ситовом анализе для выделения фракции (или нескольких фракций), подлежащей анализу. Выделенные для анализа фракции растраиваются до состояния пудры (150—200 меш) и подвергаются количественному перлово-люминесцентному анализу для определения концентраций подвижного урана и полуколичественному спектральному анализу способом просыпки для установления концентраций элементов-спутников. Иногда, при очень больших объемах лабораторных работ, перлово-люминесцентные методы анализа заменяются менее чувствительными, но более дешевыми радиометрическими анализами порошковых проб (бета-гамма-, гамма-спектральный и альфа-спектральный методы). Однако эти методы не обеспечивают возможности определения концентрации только подвижного урана, затрудняя тем самым установление его фоновых и аномальных концентраций.

Одной из разновидностей уранометрических съемок по вторичным ореолам рассеяния урана являются бета- и бета-гамма-измерения рыхлых отложений вместо отбора металлометрических проб.



Однако эти измерения позволяют судить только о содержании урана в опробуемых пунктах, в то время как для оценки перспективности аномалий необходимо иметь сведения и о концентрациях элементов-спутников урана.

### § 3. Поиски урановых месторождений по ореолам рассеяния радиоактивных элементов в природных водах

Радиогидрогеологический метод является одним из наиболее глубоких методов поисков урановых месторождений. В условиях расчлененного рельефа по выходам радиоактивных источников можно обнаружить урановорудные залежи на глубинах до 300—400 м, а в предгорных районах до 50—70 м от дневной поверхности. Радиогидрогеологические исследования могут проводиться как самостоятельный вид поисковых работ, однако чаще они выполняются попутно, в комплексе с геологическими и радиометрическими съемками.

Сущность радиогидрогеологического метода состоит в отборе проб поверхностных, грунтовых или подземных вод, анализе этих проб на содержание радиоактивных элементов и в выяснении закономерностей размещения их водных ореолов. Наличие аномальных концентраций урана, радона и радия в природных водах свидетельствует в определенных условиях о возможности первичных концентраций радиоактивных руд.

Пробы воды отбираются более или менее равномерно со всей территории поискового района. Количество точек отбора проб на 1 км<sup>2</sup> зависит от масштаба гидрохимических съемок и сложности геологического строения района. При съемках масштаба 1 : 500 000—1 : 200 000 одна проба должна отбираться с площади 3,5—35,0 км<sup>2</sup>; при съемках в масштабе 1 : 100 000—1 : 50 000 — с площади 0,5—2,5 км<sup>2</sup>; при съемках в масштабе 1 : 25 000—1 : 5000 — с площади 0,05—0,35 км<sup>2</sup>.

Отбор проб производится из родников, ключей, мочажин, колодцев, минеральных источников, поверхностных водотоков, скважин и горных выработок. Наиболее эффективно опробование источников, вытекающих из коренных пород, а также напорных и газифицирующих источников среди рыхлых отложений. Малоинтересны выходы талых вод и стречневые участки открытых водотоков. При изобилии источников и мочажин в первую очередь должны опробоваться те из них, вокруг которых наблюдается повышенная гамма-активность отложений или самих вод. Отбор проб воды из открытых водотоков целесообразен только при отсутствии выходов подземных вод и лишь из верховьев ручьев.

При обнаружении водопунктов с повышенными содержаниями урана, радия и радона производятся детализационные радиогидрогеологические наблюдения. Для этого на перспективных участках отбираются пробы воды из всех доступных водопунктов, а при необходимости с этой целью проходятся специальные скважины. Кроме отбора радиогидрогеологических проб в пределах перспективного

участка проводятся уранометрические поиски (в первую очередь по потокам рассеяния) и радиометрические маршруты.

При отборе проб каждый водопункт нумеруется и наносится на карту, а в полевых журналах отмечаются тип водопункта, время отбора проб, описываются условия выхода вод, их дебит, физические свойства и вид отложений на выходе источника (травертины, окры, грязи и др.).

Пробы воды отбираются отдельно на уран, на радий и на радон. Так как радиогидрогеологические данные оцениваются с учетом общей минерализации вод, для каждого водопункта необходимо определять сухой водный остаток. Для проб с повышенными концентрациями радиоактивных элементов производятся сокращенные или полные гидрохимические и газовые анализы.

Для анализа проб на уран и радий время, прошедшее с момента их отбора, не лимитируется; анализ же на радон должен выполняться как можно быстрее и во всяком случае не позже 2—3 дней после отбора пробы. При наличии радиометров со сцинтилляционным счетчиком или эманометра типа ЭМ-6 или СГ-41 содержание радона в водах можно определять непосредственно в маршруте.

Анализы вод на уран производятся люминесцентным или колориметрическими методами. Содержание радия в водах определяется по количеству образующегося радона радиометрическим или радиохимическими методами. Радон определяется путем введения его в ионизационную камеру циркуляционным и вакуумными методами или путем измерения интенсивности гамма-излучения продуктов распада радона.

Кроме солевого и газового состава природных вод во всех аномальных пробах определяются концентрация водородных ионов (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Еh).

Результаты анализов вод наносятся на геологическую карту и на специальную радиогидрогеологическую карту. Оценка радиогидрогеологических данных производится обязательно совместно с данными геологических, общих геофизических, радиометрических, геохимических и других специализированных исследований, так как обособленное рассмотрение радиогидрогеологических данных не позволяет однозначно определить их поисковую ценность.

Основным положительным поисковым признаком является наличие локальных ореолов с отчетливо повышенным содержанием урана, радия и радона в водах, превышающим фоновые концентрации этих элементов по крайней мере в 3—10 раз. Для правильного выявления аномальных значений очень важно установить местный радиогидрогеологический фон, который может испытывать большие колебания в зависимости от сочетания климатических, геологических, геохимических и гидродинамических условий.

К числу положительных оценочных критериев, характеризующих вероятную связь активных вод с первичными концентрациями урановых руд, относятся также следующие:

а) совместное нахождение в водах аномальных количеств всех трех радиоактивных элементов: урана, радия и радона. При этом резко повышенные концентрации радона указывают на непосредственную близость урановорудных концентраций;

б) благоприятный изотопный состав радиоактивных элементов в водах, в частности относительно низкое отношение  $U^{234}$   $U^{238}$  при высоком содержании урана;

в) повышенное содержание в водах элементов-спутников урана: молибдена, свинца, цинка, меди и др.

Сложность расшифровки и оценки радиогидрогеологических аномалий вследствие трудностей учета влияния всех природных факторов на их формирование ограничивает использование этого метода только выявлением перспективных площадей под детальные поиски урановых месторождений. Использование радиогидрогеологического метода для непосредственного обнаружения урановых месторождений препятствует в большинстве случаев явно недостаточная изученность гидрогеологии и динамики подземных вод в пределах перспективных площадей.

#### § 4. Поиски урановых месторождений по ореолам рассеяния радиоактивных элементов в растительном покрове

Поиски урановых месторождений по ореолам рассеяния радиоактивных элементов в растениях можно проводить флорометрическим или геоботаническим методами.

Флорометрический метод заключается в определении содержаний радиоактивных элементов и их спутников в золе растений, произрастающих в пределах поисковых площадей, и в выявлении особенностей пространственного размещения участков с повышенной их концентрацией. В пробу отбирается живая масса всех видов травянистых, кустарниковых и древесных растений, произрастающих на опробуемой площади.

Геоботанический метод предусматривает изучение содержаний радиоактивных элементов в различных видах растений с выделением растений-индикаторов уранового оруденения. Кроме того, геоботанический метод предполагает выявление специфических внешних изменений некоторых видов растений, которые наступают в них при аномальных концентрациях радиоактивных элементов (или элементов-спутников урана).

Наиболее перспективными в настоящее время представляются ф л о р о м е т р и ч е с к и е с ъ е м к и, по данным которых могут быть установлены ослабленные и выщелоченные ореолы рассеяния радиоактивных элементов в растительном и почвенном покрове.

Перспективность этого метода поисков объясняется возможностью круглогодичного проведения полевых работ, в том числе в условиях переувлажненных рыхлых отложений и в пустынях, где развит незакрепленный рыхлый покров.

Наиболее распространенный масштаб флорометрических поисков 1 : 25 000—1 : 50 000 с шагом отбора проб по профилю через 20—

30 м. В одну пробу отбирается живая масса растений с площадью радиусом от 1 до 3 м в степной зоне и до 5 м в таежной зоне. В пробу собираются растения близкого физиологического состояния и возраста. При опробовании деревьев ветви отбираются по направлению профиля (а не круговым опробованием). Исходные веса проб зависят от необходимого для анализа выхода золы. Для перлово-люминесцентного анализа необходимо 0,5 г, а для альфа-спектрального метода 1,5—3 г золы. В связи с этим в зависимости от зольности растений вес проб может изменяться от десятков до нескольких сотен граммов.

Озоление проб производится в фарфоровых тиглях при температуре 450—475° С. Оно является наиболее трудоемкой и ответственной операцией, так как несоблюдение установленного режима сжигания изменяет выход выщелачиваемого урана и снижает достоверность анализов.

Анализы золы на содержание урана производятся перлово-люминесцентным методом, а на содержание радия — альфа-спектральным методом с применением кристаллических альфа-счетчиков. Содержания радиоактивных элементов выражаются в процентах их концентрации в золе. Результаты флуориметрической съемки изображаются в виде графиков распределения радиоактивных элементов по профилям. Опыт использования флуориметрических съемок показывает, что диапазон концентраций радиоактивных элементов в золах различных растений весьма широк. Так, содержание урана в золе растений, произрастающих на безрудных участках, колеблется от  $n \cdot 10^{-6}$  до  $n \cdot 10^{-4}\%$ , а над рудными телами от  $n \cdot 10^{-3}$  до  $n \cdot 10^{-2}\%$  и более. Очень часто в растениях над урановыми месторождениями радиоактивное равновесие смещено в сторону избытка радия в 10 000 раз и более.

Содержания радиоактивных элементов неодинаковы в различных частях растений, изменяются в зависимости от их вида, возраста, стадии роста и многих других причин. Все это крайне осложняет разделение «аномальных» и «фоновых» содержаний и особенно оценку перспективности выявленных флуориметрических ореолов.

Для уменьшения влияния ряда внешних условий на показательность флуориметрических проб целесообразно проводить опробование зимой или в период летне-осеннего условного физиологического покоя (в средних широтах с июля по октябрь), отбирая за один день серии проб по крайней мере с нескольких смежных профилей.

Глубинность флуориметрического метода выше, чем глубинность большинства других поверхностных поисковых методов. Судя по глубине проникновения корневых систем растений, она составляет в среднем 5—8 м, реже 10—15 м. Повышение глубинности этого метода возможно в связи с развитием солевых и водных ореолов рассеяния в глубоких горизонтах рыхлых отложений.

Примеры эффективного применения флуориметрического метода известны в самых различных ландшафтно-географических зонах. С биогеохимических позиций условия для концентрации и формиро-

вания ореолов радиоактивных элементов в растительном покрове лучше в обстановке сухого и теплого климата, однако поисковая эффективность флорометрического метода выше в районах развития закрытых и вторичных ореолов урана и его спутников, где другие поверхностные поисковые методы практически неприменимы. Использование флорометрических методов для поисков урановых месторождений в тундровых, таежных и горно-таежных ландшафтно-географических зонах благоприятствует возможности их применения в условиях развития переувлажненных рыхлых отложений и многолетней вечной мерзлоты.

Геоботанические методы поисков урановых месторождений, использующие для этих целей растения-индикаторы, также имеют к настоящему времени некоторые успехи. Так, например, в штате Колорадо США установлено, что в 810 случаях из тысячи около скважин, вскрывших селено-урановую минерализацию, растут некоторые специфические виды лебеды и астрагалов. Эти растения-индикаторы повышенных концентраций селена — спутника урана в ураноносных песчаниках позволяют оценивать перспективы ураноносности участка до глубины 15—25 м. В литературе описаны случаи уменьшения числа цветов, резкого изменения окраски растений, интенсивности роста и других признаков при повышенных концентрациях радиоактивных элементов в почвах. В пределах урановых месторождений отмечается увеличение своеобразных полиплоидных форм растений (увеличение числа хромосом в ядрах клеток), а также появление растений уродливого и угнетенного облика.

Геоботанические методы поисков урановых месторождений не нашли пока широкого применения в практике геологопоисковых работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

Григорян С. В., Янишевский Е. М. Эндемичные геохимические ореолы рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1968.

Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1965.

Методы поисков урановых месторождений. Изд-во «Недра», 1969.

Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Изд-во «Недра», 1965.

### Глава IX

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УРАНА И ТОРИЯ В ПРОБАХ

Радиометрические методы анализа проб радиоактивных руд по точности и чувствительности не уступают химическим анализам. Стоимость их в 4—5 раз дешевле химических, а производительность в 5—6 раз выше. Радиометрический анализ не требует (кроме измельчения) специальной обработки проб и может выполняться в полевых

условиях, что весьма важно для оперативного получения результатов при ведении поисковых работ. Анализы выполняются на специальных радиометрических установках. Определение содержания радиоактивных элементов при любом способе анализа производится относительным методом сравнения интенсивности излучения анализируемой пробы с интенсивностью излучения эталона с точно известным содержанием определяемой компоненты.

### § 1. Определение радиоактивности проб по $\alpha$ -излучению

Измерения радиоактивности по  $\alpha$ -излучению применяются для определения природы радиоактивности проб, т. е. причины того, чем вызвана радиоактивность — ураном или торием или ураном и торием вместе. Эту задачу при поисковых работах приходится решать часто.

Качественно наличие тория в пробах по  $\alpha$ -излучению устанавливается следующим образом. Порошковую пробу или рудный штуф на тарелочке помещают в ионизационную камеру прибора СГ-2М и в течение 6—7 мин ведут непрерывные измерения ионизационного тока. Если в пробе имеется торий, то ионизационный ток в камере будет непрерывно расти, достигнув максимума через 6—7 мин. Увеличение ионизационного тока объясняется накоплением торона, выделяющегося вследствие замедления из пробы в камеру. За это время торон приходит в равновесие с ThX.

Если в пробе содержится только уран, то при внесении ее в ионизационную камеру резкое нарастание ионизационного тока за счет актинона и его продуктов распада наблюдается в течение первых 30 сек (период полураспада актинона 3,9 сек), затем величина ионизационного тока в течение 6—7 мин практически остается постоянной.

### § 2. Определение содержания урана по $\gamma$ -излучению

Определение содержания урана по  $\gamma$ -излучению в геологической практике применяется главным образом при экспресс-анализе недробленных проб.

Для анализа недробленных проб используется радиометр типа РСР-7 со специальным датчиком. Датчик представляет собой коническую емкость с двойными стенками, между которыми размещены счетчики. Эталон готовится в виде усеченного конуса по форме емкости датчика весом 3—5 кг из спемантированной равновесной урановой руды. Анализируемая проба, желательного одинакового веса с эталоном, засыпается в емкость датчика. Последовательно производятся измерения интенсивностей  $\gamma$ -излучения от эталона  $I_{\text{эт}}$  и пробы  $I_{\text{пр}}$ . Если содержание урана в эталоне  $q_{\text{эт}}$ , то содержание в анализируемой пробе  $q_{\text{пр}}$  будет равно

$$q_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{эт}} I_{\text{пр}}}{I_{\text{эт}}}. \quad (1)$$

При различии весов пробы  $P_{\text{пр}}$  и эталона  $P_{\text{эт}}$  формула примет вид

$$q_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{эт}} I_{\text{пр}}}{I_{\text{эт}}} \cdot \frac{P_{\text{эт}}}{P_{\text{пр}}}. \quad (2)$$

Во избежание ошибки измерения за счет неравномерного распределения богатых рудных штуфов в пробе, проба перемешивается (2—3 раза) и после каждого перемешивания производится измерение интенсивности  $\gamma$ -излучения. За конечный результат принимается среднее значение содержания, полученное при разных измерениях. Такая предосторожность необходима только при крайне неравномерном оруденении, когда активность пробы обусловлена отдельными штуфами с высоким содержанием урана.

### § 3. Определение содержания урана в порошковых пробах

Урановая руда, равновесная и неравновесная, может рассматриваться как смесь урана с продуктами распада до радия и радия с его продуктами распада, находящимися в состоянии равновесия. Бета- и гамма-излучения уранового ряда представляют сумму излучений элементов групп урана и радия.

В равновесной руде  $\beta$ -излучение группы урана составляет  $\sim 50\%$ ,  $\gamma$ -излучение  $\sim 2\%$ ;  $\beta$ -излучение группы радия  $\sim 50\%$ ,  $\gamma$ -излучение  $\sim 98\%$  от суммарного излучения урановой руды. Но в равновесной руде содержание урана равно содержанию радия, выраженному в единицах равновесного урана, т. е.  $q_{\text{U}} = q_{\text{Ra}}$ . Если же в руде имеет место нарушение радиоактивного равновесия, то  $q_{\text{U}} \neq q_{\text{Ra}}$ . Для этого случая суммарная интенсивность излучения неравновесной руды по  $\beta$ - ( $A_{\beta}$ ) и  $\gamma$ -излучению ( $A_{\gamma}$ ) пробы, выраженная в единицах равновесного урана путем сравнения интенсивности излучений пробы с интенсивностью излучения эталона из равновесной руды, может быть записана в виде

$$\left. \begin{aligned} A_{\beta} &= a q_{\text{U}} + b q_{\text{Ra}}, \\ A_{\gamma} &= m q_{\text{U}} + n q_{\text{Ra}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $q_{\text{U}}$ ,  $q_{\text{Ra}}$  — содержания урана и радия в пробе;  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$  — доли  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения в суммарном излучении от урана и радия в пробе соответственно.

Производя измерения интенсивности  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения, мы можем определить значения  $A_{\beta}$  и  $A_{\gamma}$  и, зная коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ , решить уравнения (3) относительно  $q_{\text{U}}$  и  $q_{\text{Ra}}$ , т. е. найти истинное содержание урана и эквивалентное равновесному урану содержание радия в неравновесной пробе:

$$q_{\text{U}} = A \cdot A_{\beta} - (A - 1) A_{\gamma}. \quad (4)$$

Здесь коэффициент  $A$  выражается через коэффициенты  $a, b, m, n$ :

$$A = \frac{n}{an - bm}.$$

Для стандартных условий измерений на промышленных установках с газонаполненными счетчиками с достаточной точностью формулу (4) можно принять в виде  $q_U = 1,98 A_\beta - 0,98 A_\gamma$ .

В радиометрических лабораториях при анализе неравновесных руд коэффициенты  $a, b, m, n$  для каждой конкретной измерительной установки уточняются с помощью измерения закись-окисного эталона  $U_3O_8$ , в котором содержание радия равно нулю.

Обычно по комбинированным  $\beta$ - и  $\gamma$ -измерениям на приборах с газонаполненными счетчиками определяют только содержание урана. Содержание радия определяют более точным радиохимическим методом.

Активности пробы равновесной руды по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучению, выраженные в единицах содержания равновесного урана, будут равны, т. е.  $A_\beta = A_\gamma$ . Если по результатам комбинированных  $\beta$ - и  $\gamma$ -измерений по многим (десяткам) пробам с разведываемого участка или месторождения устанавливается  $A_\beta = A_\gamma$ , то для таких проб можно переходить на измерения по одному виду излучения. По  $\beta$ -излучению анализируются пробы с содержанием менее 0,1% и по  $\gamma$ -излучению пробы с содержанием более 0,1%. В этом случае содержание урана в пробе  $q_{пр}$  определяется относительным методом сравнения интенсивности  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучения пробы  $I_{пр}$  и равновесного эталона  $I_{эт}$  и рассчитывается по формуле (1).

#### § 4. Определение содержания урана и тория в равновесной урано-ториевой руде

Активность урано-ториевой руды, выраженная в единицах равновесного урана, складывается из активности урана и активности тория, т. е.

$$\left. \begin{aligned} A_\beta &= q_U + cq_{Th}; \\ A_\gamma &= q_U + pq_{Th}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $q_U, q_{Th}$  — содержания урана и тория в пробе;  $c$  и  $p$  — урановые эквиваленты тория по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучению.

Зная для конкретной измерительной установки значения  $c$  и  $p$ , из уравнений (5) можем найти  $q_U$  и  $q_{Th}$ :

$$\left. \begin{aligned} q_U &= \frac{p}{p-c} A_\beta - \frac{c}{p-c} A_\gamma; \\ q_{Th} &= \frac{1}{c-p} (A_\beta - A_\gamma). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Коэффициенты  $c$  и  $p$  определяются из сравнения  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения ториевого эталона с активностью равновесного уранового эталона.



Для ториевого эталона уравнения (5) запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} A_{\beta} &= c q_{\text{Th}}; \\ A_{\gamma} &= p q_{\text{Th}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

или

$$c = \frac{A_{\beta}}{q_{\text{Th}}}; \quad p = \frac{A_{\gamma}}{q_{\text{Th}}}. \quad (8)$$

*Пример определения коэффициентов  $c$  и  $p$ .* При измерении ториевого эталона с содержанием ( $q_{\text{Th}}^{\beta\gamma}$ ) 0,1% Th по  $\beta$ -излучению сосчитано ( $N_{\text{эт}}^{\beta}$ ) 410 *имп/мин*, по  $\gamma$ -излучению ( $N_{\text{эт}}^{\gamma}$ ) 50 *имп/мин*; фон ( $N_{\phi}$ ) равен 10 *имп/мин*. Для равновесного уранового эталона с содержанием ( $q_{\text{эт}}^{\beta}$ ) 0,15% U измеренная активность по  $\beta$ -излучению ( $N_{\text{пр}}^{\beta}$ ) 3010 *имп/мин*, по  $\gamma$ -излучению ( $N_{\text{пр}}^{\gamma}$ ) 130 *имп/мин*. Отсюда

$$A_{\beta} = q_{\text{эт}}^{\beta} \frac{N_{\text{пр}}^{\beta} - N_{\phi}}{N_{\text{эт}}^{\beta} - N_{\phi}} = 0,15 \cdot \frac{(410 - 10)}{(3010 - 10)} = 0,02;$$

$$A_{\gamma} = q_{\text{эт}}^{\gamma} \frac{N_{\text{пр}}^{\gamma} - N_{\phi}}{N_{\text{эт}}^{\gamma} - N_{\phi}} = 0,15 \frac{(50 - 10)}{(130 - 10)} = 0,05.$$

По формулам (8) находим

$$c = \frac{A_{\beta}}{q_{\text{Th}}} = \frac{0,02}{0,1} = 0,2;$$

$$p = \frac{A_{\gamma}}{q_{\text{Th}}} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5.$$

Подставив в формулу (6) численные значения  $p$  и  $c$ , получим рабочую формулу для расчета содержания урана и тория в пробе.

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{U}} &= 1,66 A_{\beta} - 0,66 A_{\gamma}; \\ q_{\text{Th}} &= 3,33 (A_{\beta} - A_{\gamma}). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

*Пример определения содержания урана и тория по результатам измерения активности по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучению.* Равновесный эталон с содержанием 0,15% U. Измеренная активность (за вычетом фона):  $N_{\text{эт}}^{\beta} = 3000$  *имп/мин*,  $N_{\text{эт}}^{\gamma} = 160$  *имп/мин*. Измерения урано-ториевой пробы:  $N_{\text{пр}}^{\beta} = 4000$  *имп/мин*,  $N_{\text{пр}}^{\gamma} = 200$  *имп/мин*. Находим

$$A_{\beta} = 0,15 \frac{4000}{3000} = 0,2\%;$$

$$A_{\gamma} = 0,15 \frac{160}{200} = 0,12\%.$$

Тогда по формуле (9)

$$q_{\text{U}} = 1,66 \cdot 0,2 - 0,66 \cdot 0,12 = 0,253\%;$$

$$q_{\text{Th}} = 3,33 (0,2 - 0,12) = 0,266\%.$$

На счетчиковых установках типа ДП-100, ПД-12(14) такие анализы можно осуществлять в условиях полевой лаборатории. Получаемая точность результатов для первичной оценки характера оруденения на первой стадии разведочных работ вполне достаточна.

## § 5. Гамма-спектральный метод определения урана, радия и тория

Этот метод применяется для точных определений урана, тория и радия с целью использования их в оценке запасов. Урано-ториевую руду с нарушенным равновесием между ураном и радием можно рассматривать как трехкомпонентную руду с содержанием урана  $q_U$ , радия  $q_{Ra}$  и тория  $q_{Th}$ . Как известно,  $\gamma$ -излучение урана, радия и тория различается по энергиям:  $\gamma$ -излучение тория более жесткое, чем излучение радия;  $\gamma$ -излучение урана мягкое с энергией от 0,04 до 0,81 Мэв. В разных участках энергетического спектра  $\gamma$ -излучение U, Ra, Th составляет точно определенные доли от общего излучения каждого элемента. Поэтому, если произвести измерение активности урано-ториевой пробы в трех участках спектра  $\gamma$ -излучения, можно получить три уравнения, связывающие содержания U, Th, Ra и активность в эквивалентных единицах равновесного урана в виде

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= a_{11}q_U + a_{12}q_{Ra} + a_{13}q_{Th}; \\ A_2 &= a_{21}q_U + a_{22}q_{Ra} + a_{23}q_{Th}; \\ A_3 &= a_{31}q_U + a_{32}q_{Ra} + a_{33}q_{Th}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  и т. д. — урановые эквиваленты U, Ra и Th в условиях первого, второго и третьего измерений.

В связи с тем, что  $\gamma$ -излучение урана мягкое и не превышает 2% от  $\gamma$ -излучения радия, точность его измерения невелика. Поэтому одно измерение в области мягкого (уранового)  $\gamma$ -излучения заменяют измерением по  $\beta$ -излучению. В области жесткого излучения доля излучения урана (коэффициенты  $a_{21}$ ,  $a_{31}$ ) близки к нулю. В этом случае уравнения (10) примут вид

$$\left. \begin{aligned} A_\beta &= a_{11}q_U + a_{12}q_{Ra} + a_{13}q_{Th}; \\ A_2 &= q_{Ra} + a_{23}q_{Th}; \\ A_3 &= q_{Ra} + a_{33}q_{Th}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $q_U$ ,  $q_{Th}$  — концентрация U и Th в пробе в %;  $q_{Ra}$  — концентрация Ra в пробе в % равновесного урана;  $A_\beta$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  — активность пробы по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучению, выраженная в % равновесного урана.

Решая уравнения (11) относительно  $q_U$ ,  $q_{Ra}$  и  $q_{Th}$ , находим

$$\left. \begin{aligned} q_U &= \frac{1}{a_{11}} A_3 + \frac{a_{12} \cdot a_{33} - a_{13}}{a_{11} (a_{23} - a_{33})} A_3 + \frac{a_{13} - a_{23} \cdot a_{12}}{a_{11} (a_{23} - a_{33})} A_2; \\ q_{Th} &= \frac{1}{a_{33} - a_{23}} (A_3 - A_2); \\ q_{Ra} &= \frac{a_{33}}{a_{33} - a_{23}} A_2 - \frac{a_{25}}{a_{33} - a_{23}} A_3. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Зная коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  и т. д. и измерив интенсивности  $A_3$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , можно по формуле (12) определить в пробе содержания урана, радия и тория.

Коэффициенты определяются так же, как и в методах анализа неравновесных урановых и равновесных урано-ториевых руд: по измерению неравновесного уранового и ториевого эталонов.

Анализ трехкомпонентных руд проводится на сцинтилляционных установках типа ЛАС, ЛСУ-5К, РАП-1.

## § 6. Определение содержания радона и радия в пробах воды

Если объем пробы воды не более 250 мл, то перевод радона из пробы в камеру осуществляется вакуумным способом. В этом случае весь радон извлекается из воды и поступает в камеру. Количество радона  $Q_{Rn}$ , поступившего в камеру, по измерениям ионизационного тока (или скорости счета *имп/мин* с помощью сцинтилляционного эманометра) определяется по формуле

$$Q_{Rn} = jN,$$

где  $j$  — чувствительность эманометра в *кюри/дел/мин*;  $N$  — ионизационный ток пробы (отнесенный ко времени измерения после введения эманации в камеру при эталонировании эманометра).

Количество радона в пробе в момент измерения  $Q_{tRn}$ , очевидно, за счет распада со временем будет меньше, чем в момент отбора пробы  $Q_{0Rn}$

$$Q_{tRn} = Q_{0Rn} e^{-\lambda Rn t},$$

или

$$Q_{0Rn} = \frac{Q_{tRn}}{e^{-\lambda Rn t}},$$

где  $t$  — время с момента отбора до момента измерения;  $\lambda$  — постоянная распада радона.

Для определения концентрации радона в пробе  $q_{Rn}$  количество радона нужно отнести к объему пробы:

$$q_{Rn} = Q_{0Rn} \cdot \frac{1000}{V_B} = \frac{jN}{e^{-\lambda t}} \cdot \frac{1000}{V} \text{ кюри/л},$$

где  $V_B$  — объем пробы воды в мл.

Если объем пробы воды более 250 мл, перевод радона в камеру можно производить циркуляционным способом. При этом содержащийся в воде радон равномерно распределяется в объеме камеры, соединительных емкостях, груше. В камеру попадает только часть общего количества радона, содержащегося в пробе.

При циркуляционном способе введения радона в камеру его концентрацию в пробе воды в момент отбора пробы определяют по формуле

$$q_{\text{Rn}} = \frac{jN}{e^{-\lambda t}} \cdot \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{к}}} \cdot \frac{1000}{V_{\text{в}}},$$

где  $V_{\text{общ}}$  — общий объем камеры, соединительных емкостей и груши в мл;  $V_{\text{к}}$  — объем камеры в мл;  $V_{\text{в}}$  — объем пробы воды в мл;  $t$  — время с момента отбора пробы до момента измерения.

Для определения радия, растворенного в воде, пробу «продувают» атмосферным воздухом путем прокачивания с помощью резиновой груши в течение 5—10 мин. Затем концы трубок сосуда с пробой закрываются зажимами и пробу оставляют на накопление радона в течение 7—10 дней. Количество накопившегося за это время радона в пробе будет

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

где  $Q_{\text{Ra}}$  — количество радия в пробе в г;  $t$  — время накопления радона (от момента закрытия сосуда до момента введения радона в камеру).

По найденному количеству радона находим количество радия: при циркуляционном переводе радона в камеру

$$Q_{\text{Ra}} = \frac{Q_{\text{Rn}}}{(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{jN}{(1 - e^{-\lambda t})} \cdot \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{к}}} \cdot \frac{1000}{V_{\text{в}}} \text{ г/л}, \quad (13)$$

при вакуумном введении радона в камеру

$$Q_{\text{Ra}} = \frac{Q_{\text{Rn}}}{(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{jN}{(1 - e^{-\lambda t})} \cdot \frac{1000}{V_{\text{в}}} \text{ г/л}. \quad (14)$$

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

Железнова Е. И., Юфа Б. М. Лабораторные радиометрические методы анализа радиоактивных руд. Изд-во «Недра», 1968.

## Г л а в а X

### ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ В ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Опасность при работе с радиоактивными веществами представляют различные виды ионизирующих излучений. Наибольшая опасность связана с попаданием внутрь организма излучателя альфа-частиц. Бета-излучения представляют опасность как внутренний и внешний облучатель. Гамма-излучения опасны в основном при внешнем облучении.

При работе с радиоактивными веществами вредное действие на работающих оказывают главным образом радиоактивные вещества, попадающие внутрь организма через органы дыхания, пищевой тракт или кожу. Вредное влияние внешнего облучения сказывается в значительно меньшей степени.

При правильной организации работ и соблюдении основных правил по технике безопасности вредное действие излучения можно свести к минимуму. В «Нормах радиационной безопасности НРБ-69» (1970 г.) предусмотрены предельно допустимые дозы облучения (ПДД) и предельно допустимые поступления (ПДП) для лиц, работающих с радиоактивными веществами.

Предельно допустимая доза облучения — это наибольшая доза, эффективное действие которой на организм не вызывает в нем необратимых физиологических изменений. Эта доза зависит от времени облучения и устанавливается на каждый определенный период (год, месяц, день и т. д.).

Доза гамма-излучения определяется его ионизирующей способностью и измеряется в рентгенах. Поглощенная доза любого вида излучения измеряется в единицах «рад». Смешанная доза разных видов излучений измеряется в единицах «бэр».

Предельно допустимая концентрация — это предельно допустимое количество (активность) радиоактивного изотопа в единице объема, поступление которого в организм с водой, пищей, воздухом не создает в организме доз облучения, превышающих предельные. Активность определяется количеством изотопов и выражается числом распадов ядер атомов в единицу времени — кюри.

Радиоактивные эманации и аэрозоли накапливаются в плохо вентилируемых горных выработках. Работы с естественными радиоактивными веществами должны планироваться так, чтобы суммарная доза всех видов внутреннего и внешнего облучения не превышала допустимого уровня 5 бэр в год.

Для выполнения этого требования необходимо соблюдение следующих требований, предусмотренных инструкцией.

1. Перед началом работ в подземных горных выработках руководитель работ должен ознакомиться в местных организациях с дозиметрическими данными по объекту и получить от этих организаций сведения о специфических условиях проведения работ.

2. Все сотрудники, работающие с радиоактивными веществами, должны иметь индивидуальные дозиметры для контроля ионизирующих излучений.

3. Ответственный за технику безопасности в полевых условиях должен вести журнал дозиметрического контроля, в котором необходимо отмечать уровни облучения сотрудников за неделю, а также концентрации эманаций и аэрозолей в воздухе тех выработок, где проводятся работы.

4. В подземных выработках радиоактивных руд категорически запрещается находиться более 6 часов в день.

5. Работы в горных выработках с плохой вентиляцией, где содержание радиоактивных элементов и аэрозолей в воздухе превышает предельно допустимые нормы, допускается только в случае исключительной необходимости.

6. При работах в подземных выработках радиоактивных месторождений обязательно применение противоаэрозольных респираторов «Лешесток» или изолирующих дыхательных аппаратов.

7. Работу в горных выработках следует проводить только в спецодежде.

8. После работы в горных выработках необходимо тщательно вымыться под душем.

9. В подземных выработках категорически запрещается курить, пить, есть.

Работа с радиоактивными рудами в лабораторных условиях включает камеральную обработку полевого материала (дробление и истирание проб, подготовка проб на анализы, просмотр штуффов и шлифов и др.). Образцы должны храниться и обрабатываться только в специально оборудованных для этой цели помещениях. Для работы в этих помещениях необходима специальная одежда (халаты, шапочки, бахилы).

При работе с радиоактивными веществами следует соблюдать следующие требования, предусмотренные инструкцией:

1. Все работы по дроблению, растиранию, просеиванию и др. необходимо проводить в специально оборудованных помещениях в вытяжных шкафах.

2. Подготовку порошковых проб к радиометрическим анализам (взвешивание, пересыпание) следует проводить в вытяжном шкафу.

3. Работы с радиоактивными порошками руд, растворами необходимо проводить на эмалированных или пластмассовых подставках, которые легко очищать от загрязнения радиоактивными веществами.

4. Количество радиоактивных образцов на рабочем месте должно быть минимальным. Радиоактивные образцы, необходимые для работы в течение дня, но не используемые в непосредственной работе, следует хранить в защитном контейнере.

5. При отборе радиоактивных минералов под бинокуляром и других аналогичных работах необходимо использовать настольные защитные экраны, снижающие мощность дозы гамма-излучения до предельно допустимой величины.

6. Высокоактивные отработанные растворы необходимо сливать в спецконтейнеры и в дальнейшем удалять на пункты захоронения.

7. Все твердые радиоактивные отходы нужно складировать в отдельном помещении в спецконтейнере, а в дальнейшем вывозить на пункты захоронения.

При работе с радиоактивными веществами в специальных помещениях запрещается курить, пить, есть и хранить личные вещи. Следует систематически проводить индивидуальный дозиметрический контроль и контроль загрязненности воздуха в рабочих помещениях.