

А.Б.КАЖДАН, Н.Н СОЛОВЬЕВ

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА

МЕСТОРОЖДЕНИЙ
РЕДКИХ
И РАДИОАКТИВНЫХ
МЕТАЛЛОВ

А. Б. КАЖДАН, Н. Н. СОЛОВЬЕВ

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
геологических специальностей вузов

стр. 211-213
АСО.



МОСКВА «НЕДРА» 1982

Каждан А. Б., Соловьев Н. Н. Поиски и разведка месторождений редких и радиоактивных металлов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Недра, 1982. — 280 с.

Изложены методические основы поисков и разведки месторождений радиоактивных и редких металлов, практические приемы и особенности проведения геологоразведочных работ. Рассмотрены требования промышленности к рудам месторождений редких и радиоактивных металлов, их важнейшие геолого-промышленные типы, благоприятные прогнозные, поисковые и поисково-разведочные критерии и признаки редкометального и уранового оруденения. Особое внимание уделено геохимическому и рядовому опробованию пород и руд в различных природных условиях. Приведена разведочная классификация месторождений, описаны особенности их разведки, оконтуривания и подсчета запасов.

Для студентов геологических специальностей вузов.

Табл. 21, ил. 44, список лит. — 40 назв.

Рецензенты:

кафедра геологии и разведки месторождений радиоактивных и редких металлов Свердловского горного института;
д-р. геол.-минер. наук Р. Ф. Данковцев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Освоению курса поисков и разведки месторождений редких и радиоактивных металлов предшествует изучение ряда смежных дисциплин. Их содержание излагается в соответствующих учебных курсах и методических пособиях [4, 16, 17, 19, 25, 27, 28, 29 и др.].

В данном учебном пособии рассматриваются научные основы и методы проведения поисковых и разведочных работ применительно только к месторождениям редких и радиоактивных металлов. В основу книги положены курс лекций, который читается студентам геологоразведочной специальности МГРИ им. С. Орджоникидзе, специализации РМРЭ (геология, поиски и разведка руд редких и радиоактивных элементов), опыт проведения лабораторных занятий, курсового, дипломного проектирования и результаты научно-исследовательских работ кафедры методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых МГРИ.

Гл. II, V, VI, VII, IX, X, XI, XII написаны А. Б. Кажданом, гл. XIII — Н. Н. Соловьевым, гл. I — А. И. Гинзбургом и Н. Н. Соловьевым, гл. III, IV, VIII — А. Б. Кажданом и Н. Н. Соловьевым. Общая редакция выполнена А. Б. Кажданом.

Авторы благодарят преподавателей и сотрудников кафедры В. А. Арсеньева, В. А. Викентьева, О. И. Гуськова, П. И. Кушнарева, А. Н. Рокова, В. И. Пахомова, М. Д. Полунину, П. П. Ясковского и других за активное участие и помощь в создании и оформлении рукописи, а также Р. Ф. Данковцева и О. Н. Грязнова, ценные замечания которых учтены при ее доработке. Особую благодарность авторы выражают А. И. Гинзбургу, который взял на себя труд тщательно ознакомиться с рукописью, указал на ряд ее недостатков, существенно откорректировал и расширил сведения, касающиеся вопросов геологии, поисков и разведки редких элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Руды редких и радиоактивных металлов — важнейшие минерально-сырьевые ресурсы будущего. Значение полезных ископаемых они приобрели только в первой половине XX века, но уже в настоящее время используются в самых различных отраслях народного хозяйства. Области применения редких и радиоактивных металлов в СССР и в других странах мира расширяются, а потребление их возрастает с каждым годом в связи с развитием атомной, ракетной и других видов новой техники. В настоящее время достигнутый уровень научно-технического прогресса любой страны оценивается не только по производству энергии, стали, цветных металлов, но и по объемам производства и потребления редких и радиоактивных элементов.

В СССР впервые в мире была спроектирована и построена атомная электростанция, запущенная в 1954 г. После опубликования опыта советских ученых строительство атомных электростанций началось в США, Англии, Франции и других странах. К настоящему времени в нашей стране построены и успешно эксплуатируются десятки крупных АЭС. За последние годы в СССР введены в действие новые АЭС с реакторами мощностью 1—1,5 млн. кВт, освоено производство атомных реакторов на быстрых нейтронах, начаты работы по использованию атомной энергии для целей теплофикации в металлургическом, химическом и других производствах. С помощью СССР построены АЭС в ЧССР, ГДР, НРБ и Финляндии.

Создаваемые в реакторах радиоактивные изотопы находят широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и во многих других отраслях науки и техники. Они используются для управления технологическими процессами, контроля за качеством изделий, исследований строения металлов, для ускорения селекции микроорганизмов и растений, диагностики и лечения болезней и др.

В наши дни атомная энергия превращается из энергии будущего в энергию сегодняшнего дня, причем ее роль в общем энергетическом балансе непрерывно возрастает. Уже сейчас на АЭС можно получать энергию по себестоимости дешевле, чем на гидроэлектростанциях и станциях, работающих на органическом топливе. В дальнейшем экономичность АЭС будет возрастать в связи с совершенствованием их конструкций и удорожанием органического топлива. Предполагается, что к 2000 г. более половины электроэнергии будут вырабатывать АЭС, в связи с чем добыча урана в мире в ближайшие 20—25 лет возрастет примерно в 10 раз, а урановые руды приобретут значение важнейших энергетических ресурсов. Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—

1985 годы и на период до 1990 года, определенными XXVI съездом КПСС, намечено обеспечить ускоренное развитие работ по геологическому изучению территории нашей страны. При этом особое внимание обращено на усиление поисков и разведки сырья для атомной энергетики.

За последние 15—20 лет произошли заметные сдвиги и в сырьевой базе редких элементов. Резко увеличились выявленные запасы руд редких металлов, приобрели промышленное значение новые генетические типы редкометальных месторождений с повышенной качественной и количественной характеристиками руд, возросло значение комплексности в использовании редкометального сырья.

Исследования по выявлению условий формирования и закономерностей размещения урановых месторождений, начатые еще по инициативе академика В. И. Вернадского, были продолжены Д. И. Щербаковым, В. И. Смирновым, Д. Я. Суражским, А. И. Тугариновым, А. И. Семеновым, Ф. И. Вольфсоном, Н. П. Лаверовым, А. И. Перельманом и многими другими учеными, а по геологии редких элементов — К. А. Власовым, А. И. Гинзбургом, А. А. Беусом и др. Результаты этих исследований легли в основу современных представлений о природе различных типов редкометальных и урановых месторождений, благоприятных геологических критериях и признаках редкометального и уранового оруденения. Они используются в настоящее время при прогнозе, поисках и разведке месторождений редких и радиоактивных металлов, способствуя повышению эффективности проводимых геологоразведочных работ.

Поиски и разведка месторождений редких и радиоактивных металлов отличаются рядом специфических особенностей, связанных с минералого-геохимическими свойствами этих элементов и проявлениями радиоактивности.

Минералого-геохимические особенности редких и радиоактивных металлов определяются их принадлежностью к литофильным элементам; склонностью к изо- и гетероморфизму в процессах эндогенного минералообразования, переменной валентностью урана и его высокой миграционной способностью. Все это обуславливает широкую гамму природных типов редкометальных и урановых месторождений, специфические условия их проявления, а также большое разнообразие минералов, содержащих в своем составе редкие и радиоактивные металлы.

Проявления радиоактивности свойственны не только урановым и ториевым рудам, но и многим рудам редких земель, ниобия и тантала, в которых радиоактивные металлы находятся в виде постоянных примесей. Этот фактор широко используется для целей прогноза оруденения, поисков, разведки и оценки месторождений, а также для совершенствования технологии разработки и переработки руд, содержащих радиоактивные полезные компоненты.

ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К МЕСТОРОЖДЕНИЯМ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

С учетом потребностей народного хозяйства, состояния минерально-сырьевой базы, технологии добычи и переработки руд промышленность устанавливает комплекс требований к качеству, запасам и технологическим свойствам руд каждого из редких и радиоактивных металлов. Эти требования отражают тенденции, характеризующие экономику данной отрасли горной промышленности в целом, конъюнктуру мирового рынка и перспективы потребления данного металла в обозримом будущем. Поскольку объектами поисков и разведки являются лишь те минеральные скопления, которые отвечают современным требованиям промышленности, необходимо учитывать эти требования при геологическом изучении и оценке недр. Наряду с геологическими данными о составе и строении недр ими определяется пригодность конкретных месторождений к промышленному использованию, а также устанавливается комплекс изучаемых свойств рудных образований, масштабы и детальность их исследований.

К числу редких и рассеянных металлов относятся более тридцати элементов, которые содержатся в земной коре в рассеянном состоянии, входят в состав других рудообразующих и породообразующих минералов или образуют самостоятельные рудные минералы. Подавляющее большинство редких и рассеянных металлов не образует самостоятельных рудных месторождений, а добывается попутно с разработкой полиметаллических, медных, оловянно-вольфрамовых и других руд. К их числу относятся германий, скандий, рубидий, таллий, селен, теллур, ванадий, индий, гафний, рений и некоторые другие металлы. Вопросы их разведки, опробования и подсчета запасов не представляют собой самостоятельной геолого-экономической проблемы, так как они решаются попутно в процессе разведки месторождений других видов минерального сырья, содержащих примеси редких элементов. Однако некоторые редкие металлы образуют самостоятельные рудные месторождения, где один или чаще несколько металлов определяют основную промышленную ценность руд. К их числу относятся литий, цезий, бериллий, редкие земли, тантал, ниобий и цирконий.

В данной книге рассматриваются вопросы поисков и разведки только что перечисленных месторождений редких металлов. Как правило, они представлены комплексными рудами, содержащими по крайней мере несколько редких элементов в составе одного либо нескольких рудообразующих минералов.

В первом случае при переработке руд полезный минерал выделяют в концентрат, а из него уже извлекают редкие металлы (например, лопарит, содержащий ниобий, тантал, редкие земли цериевой группы). С точки зрения полноты использования недр этот тип представляет собой наилучший вид комплексных месторождений.

Во втором случае при технологической переработке руд получают несколько селективных концентратов или коллективные концентраты, требующие дальнейшей переработки для разделения редких металлов (например, карбонатиты с ниобием, танталом и редкими землями). Для разработки таких месторождений весьма существенно выяснить возможности селективной разработки руд отдельных технологических сортов или разработки экономически рациональных схем обогащения коллективных концентратов.

Комплексный состав руд большинства месторождений редких металлов повышает экономическую эффективность их промышленного использования, а минеральный состав руд обеспечивает возможность широкого применения к ним механических способов обогащения, что резко отличает руды редких металлов от многих урановых руд.

§ 1. СВОЙСТВА И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Литий — химический элемент первой группы периодической системы Д. И. Менделеева. Природный литий состоит из двух устойчивых изотопов ${}^6\text{Li}$ (7,42 %) и ${}^7\text{Li}$ (92,58 %). Литий — серебристо-белый металл, быстро покрывающийся темно-серым налетом, состоящим из нитрида и окиси лития. Металлический литий пластичен, вязок, легко протягивается в проволоку, хорошо обрабатывается прессованием и прокаткой. Из всех твердых элементов литий имеет самую малую атомную массу (6,94) и самую малую плотность (0,53). Температура плавления лития 186 °C.

Цезий входит в первую группу периодической системы Д. И. Менделеева под номером 55. Он обладает высокой химической активностью и очень хорошими фотоэлектрическими свойствами (работа выхода электрона 1,9 эВ).

Литий и цезий — типичные литофильные элементы. Они довольно широко распространены в природе, но концентрируются только в самой верхней оболочке земной коры. По А. П. Виноградову, кларки лития и цезия составляют соответственно 65 и 7 г/т.

В земной коре известно около тридцати литиевых минералов, из которых только пять имеют промышленное значение. Наиболее важным промышленным минералом лития является spodумен $\text{Li, Al}[\text{Si}_2\text{O}_6]$, содержащий около 7 % окиси лития с примесью галлия до 0,01 %. Следующими по промышленной

значимости являются лепидолит $(K, Rb, Cs)Li_{1,5}Al_{1,5}[Si_3AlO_{10}](F, OH)_2$ и петалит $LiAl[Si_4O_{10}]$, содержащие соответственно 3,0—3,5 и 3,5—4,5 % окиси лития. Кроме того, в лепидолите содержатся обычно примеси рубидия (до 3,7 % Rb_2O) и цезия (до 1,5 % Cs_2O). Два других промышленных минерала — амблигонит $LiAl[PO_4](F, OH)$ с содержанием окиси лития до 9 % и циннвальдит $(K, Rb, Cs)LiAl(Fe, Mg)[Si_3AlO_{10}](F, OH)_2$ с содержанием окиси лития от 3,0 до 4 % — имеют резко подчиненное значение.

Важнейшим цезиевым минералом является поллуцит $(Cs, Na) \cdot [AlSi_2O_6] \cdot H_2O$, содержащий 30—34 % окиси цезия и до 3 % окиси рубидия. Собственных минералов рубидия неизвестно.

Бериллий — легкий металл, занимающий в периодической таблице Д. И. Менделеева четвертый порядковый номер и входящий во вторую группу. Атомная масса бериллия 9,02. Он состоит в основном из одного стабильного изотопа с массовым числом 9. Кроме того, известно четыре изотопа бериллия с массовыми числами 6, 7, 8 и 10, которые представляют собой короткоживущие продукты ядерных реакций. Характерной особенностью стабильного изотопа 9Be является то, что под воздействием гамма-излучения он выделяет нейтроны. Плотность бериллия 1,82 г/см³, температура плавления 1284 °С.

Бериллий обладает наиболее высокой из всех металлов теплоемкостью, высокой теплопроводностью, низким электросопротивлением. Эти свойства зависят от качества и структуры металла и заметно меняются с температурой. Бериллий хрупкий металл. Температуры перехода бериллия из хрупкого состояния в пластическое 200—400 °С.

Средний кларк бериллия, по А. П. Виноградову, 6 г/т. Подавляющая часть этого металла в земной коре рассеяна в виде изоморфных примесей в различных породообразующих минералах и только незначительная часть образует собственно бериллиевые минералы. Известно более тридцати самостоятельных бериллиевых минералов, из которых только восемь имеют промышленное значение (табл. 1).

Группа редкоземельных элементов, или лантаноидов, включает 15 элементов периодической системы Д. И. Менделеева, которые занимают места от порядкового номера 57 до 71. Из этих элементов только прометий (Pm) получен искусственно. К этим же элементам весьма близки иттрий (Y) и скандий (Sc), хотя формально они не входят в группу редкоземельных элементов и занимают в периодической системе места с порядковыми номерами соответственно 39 и 21. Редкоземельные элементы обычно разделяют на две группы — цериевую и иттриевую, при этом в последнюю сам иттрий не входит. Д. А. Минеев (1969, 1974 гг.) разделяет редкоземельные элементы на 3 группы: лантановую (La—Nd), иттриевую (Sm—Ho) и скандиевую (Er—Lu) (табл. 2, 3, 4).

Таблица 1

Некоторые свойства важнейших бериллийсодержащих минералов

Название	Химическая формула	Содержание окиси бериллия, %	Попутные компоненты
Берилл	$Al_2Be_3[Si_6O_{18}]$	10—12	Цезий до 3 % и скандий (сотые доли процента)
Гельберtrandит	$Be_4[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$	32—35	
Хризоберилл	Al_2BeO_4	18—20	
Фенакит	Be_2SiO_4	40—44	
Гельвин	$Mn_4[BeSiO_4]_3S$	10—12	
Даналит	$Fe_4[BeSiO_4]_3S$	10—12	
Гентгельвин	$Zn_4[BeSiO_4]_3S$	10—12	
Бертрандит	$Be_4[Si_2O_7](OH)_2$	40—42	

Таблица 2

Редкоземельные элементы лантановой (цериевой) группы

Название	Порядковый номер	Атомная масса	Изотопы	Ионный радиус по Гольдшмиду
Лантан	57	138,91	138, 139	1,06
Церий	58	140,12	136, 138, 140, 142	1,03
Празеодим	59	140,91	141	1,01
Неодим	60	144,24	142, 143, 144, 145	0,995

Таблица 3

Редкоземельные элементы иттриевой группы

Название	Порядковый номер	Атомная масса	Изотопы	Ионный радиус по Гольдшмиду
Самарий	62	150,40	144, 147, 148, 149, 150, 152, 154	0,96
Европий	63	151,96	151, 153	0,95
Гадолиний	64	157,25	152, 154, 155, 156, 157, 158, 160	0,94
Тербий	65	158,93	159	0,92
Диспрозий	66	162,50	156, 158, 160, 161, 162, 163, 164	0,91
Гольмий	67	164,93	165	0,89

Таблица 4

Редкоземельные элементы скандиевой группы

Название	Порядковый номер	Атомная масса	Изотопы	Ионный радиус по Гольдшмиду
Эрбий	68	167,26	162, 164, 166, 167, 168, 170	0,88
Тулий	69	168,93	169	0,87
Иттербий	70	173,04	168, 170, 171, 172, 173, 174, 176	0,86
Лютеций	71	174,97	175, 176	0,85

Некоторые свойства важнейших редкоземельных минералов

Название	Формула	Содержание, %	Элементы-спутники, %	Плотность, г/см ³
I. Минералы, содержащие элементы прериово-цериевой группы:				
Монацит	(Ce, La) [PO ₄]	Ce ₂ O ₃ + La ₂ O ₃ 50—68 Y ₂ O ₃ до 5	P ₂ O ₅ до 31,5; ZrO ₂ до 7; ThO ₂ до 10; UO ₂ до 6,6	4,9—5,5
Бастнезит	TR (CO ₃) F	Y + Er — 65—77	Ce до 54; La до 43; Pr до 5,6	4,9
Паризит	TRCa (CO ₃) ₂ F	Ce + La — 46—61; (Ce, La) ₂ O ₃ до 50; Y до 10 (в иттрипаризите)	—	4,3
II. Минералы, содержащие иттрий и элементы преимущественно иттриевой группы:				
Ксенотим	(Y, TR _Y) PO ₄	Y ₂ O ₃ — 63,1	ThO ₂ , UO ₂ до 5; ZrO ₂ до 3	4,4—4,6
Иттриксинхизит (доверит)	(Y, Ce, Ca) [CO ₃] ₂ F	Σ TR _Y O ₃ — 45	—	3,9
Черчит	(Y, Ce) [PO ₄] · 2H ₂ O	Σ TR _Y O ₃ — 42—59; Ce ₂ O ₃ до 5	—	3,2
III. Минералы, содержащие наряду с редкоземельными элементами другие редкие металлы, промышленное извлечение которых целесообразно:				
Лопарит	(Na, Ce, Ca) (Ti, Nb, Ta) O ₃	Σ TR _Y O ₃ до 34; Ce ₂ O ₃ до 16—19	(Nb, Ta) ₂ O ₅ до 10 SrO до 3,4; Th до 0,77	4,7—4,9
Эксенсит-поликраз	(Y, TR, U, Ca, Th) (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆	(Y, Er) ₂ O ₃ до 28; (La, Ce) ₂ O ₃ до 3,5	Nb до 30; UO ₂ до 8; Ta до 20; Th до 5	4,3—5,9
Самарскит	(Y, U, Fe) ₂ (Nb, Ti, Ta) ₂ O ₆	Y ₂ O ₃ до 14; Ce ₂ O ₃ до 4; Er ₂ O ₃ до 14	Ta ₂ O ₅ до 27; UO ₂ до 16; Nb ₂ O ₅ до 46; FeO до 11	5,3—5,9
Фергусонит	(Y, TR, U, Th) (Nb, Ta, Ti)O ₄	Y ₂ O ₃ до 40; Σ TR _Y до 67,5	UO ₂ до 8	5,6—5,8
Приорит	(Y, TR, Ca, Th) (Ti, Nb) ₂ O ₆	Σ TR _Y до 34,0	UO ₂ до 7,9	4,8—5,0
Пирохлор	(Ca, Na, U, Ce, Y) _{2-m} × × (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆ × × (O, F) _{1-m} · nH ₂ O	(Ce, La) ₂ O ₃ до 13; (Y, Er) ₂ O ₃ до 5	Nb ₂ O ₅ до 63; Ta ₂ O ₅ до 77; UO ₂ до 11; ThO ₂ до 5; UO ₃ до 15	4,2—6,4
Браннерит	(U ⁴⁺ , Ca, Y, Th) × × [(Ti, Fe) ₂ O ₆] · nH ₂ O	Σ TR _Y — 0,55	Ti — 25; Zr — 1,39; Nb — 2,0; W до 3,28; Th до 0,04	4,3—5,4
Гадолинит	Y ₂ Fe Be ₂ [(SiO ₄) O] ₂	Y до 4; Σ TR _Y до 70	Be до 3—4; Ce до 7,5; La до 8,1; Yb до 6,9; Dy до 8	4,0—4,7

Физические и химические свойства отдельных элементов редких земель изучены с различной степенью детальности. Лучше исследованы свойства элементов лантановой (цериевой) группы, а свойства элементов иттриевой группы изучены слабее, что связано с трудностями получения последних в чистом виде и со значительно меньшей их распространенностью в земной коре.

Все редкоземельные элементы являются металлами. Температуры плавления их колеблются от 795°C (церий) до 1652°C (лютеций), а плотности от 5,26 (европий) до 9,84 (лютеций). Из всех редкоземельных элементов гадолиний, самарий и европий отличаются необычайно высокими площадями поперечного сечения захвата ядер нейтронов, которые соответственно составляют 44 000, 6500 и 4500 б.

По данным А. П. Виноградова, кларки редкоземельных элементов изменяются от 40 г/т (лантан и церий) до 1 г/т (тулий и лютеций). Элементы цериевой группы распространены гораздо шире, чем иттриевой. На долю цериевой группы приходится около 80 % всех лантаноидов, а содержание элементов иттриевой группы достигает лишь 20 вес. %. Из общего количества редкоземельных элементов в земной коре 80,5 % приходится на элементы с четными номерами. Суммарное распространение лантаноидов в земной коре составляет по массе 178 г/т.

Известно более 40 минералов редких земель, кроме того лантаноиды входят как изоморфные примеси в кристаллическую решетку других минералов. Во многих минералах они изоморфно замещают кальций, уран, торий и др. Главную промышленную ценность представляют примерно 14 минералов, которые могут быть объединены в три группы (табл. 5).

В современных условиях наибольшую практическую ценность как источники редкоземельного сырья цериевой группы имеют монацит, лопарит и бастнезит, за которыми следует паризит. Основными минералами, из которых добывают редкие земли иттриевой группы, являются иттротрихит (доверит), приорит, ксенотим и минералы группы апатита (фосфатизированные рыбы остатки); потенциальный источник получения этих элементов — чертит.

Значительные количества редких земель добываются из комплексных редкометальных месторождений, где рудные минералы представлены эвксенит-поликразом, фергусонитом, самарскитом, ксенотимом, пирохлором, гадолинитом и лопаритом, или как попутный продукт при переработке браннеритовых, апатитовых, фосфоритовых и других руд, содержащих редкоземельные элементы в сравнительно небольших количествах.

Ниобий и тантал относятся к химическим элементам второй подгруппы пятой группы периодической системы Д. И. Менделеева и обладают близкими химическими и физи-

ческими свойствами. Порядковый номер ниобия 41, тантала 73, а атомная масса их соответственно 92,91 и 180,88.

Близость свойств обоих металлов и совместное нахождение их в земной коре объясняется одинаковыми значениями атомных и ионных радиусов (соответственно $1,46 \cdot 10^{-8}$ и $0,69 \cdot 10^{-8}$ см у обоих элементов) и схожестью их электронного строения. Оба металла отличаются высокими температурами плавления (2415°C у ниобия и 2996°C у тантала) и низкой работой выхода электронов. Ниобий начинает окисляться при температуре выше 200°C, а тантал — при температуре 400°C. Искусственно полученный радиоактивный тантал используют как радиоактивный индикатор.

В земной коре ниобий распространен шире, чем тантал. Кларк ниобия составляет 24, а тантала 2 г/т. Содержание ниобия повышено в щелочных изверженных породах — нефелиновых сиенитах и др. Тантал в большинстве магматических пород рассеян. Наиболее высокие концентрации этих металлов связаны с щелочными магматическими породами, причем соотношение между ниобием и танталом, равное в среднем 11,4, резко меняется в различных по составу породах — от 5 в гранитоидах до 387 в нефелиновых сиенитах. Самые высокие содержания тантала в пегматитах гранитных и щелочных пород. На месторождениях тантала соотношение Ta:Nb доходит до 3:1.

В природе встречается более 130 минералов, содержащих в своем составе ниобий и тантал, но только 80 из них являются собственно ниобиевыми и танталовыми. Практически промышленностью используются только несколько минералов, которые указаны в табл. 6.

Из числа наиболее важных в промышленном отношении тантало-ниобиевых минералов колумбит-танталит, пирохлор-микрولит и эвксенит характеризуются изменчивыми, весьма непостоянными содержаниями обоих металлов, и только состав лопарита отличается относительным постоянством.

Цирконий — элемент четвертой группы периодической системы Д. И. Менделеева. Он занимает в ней сороковое место и представляет собой светлый ковкий металл с плотностью 6,52 и температурой плавления $1830 \pm 40^\circ\text{C}$. Атомная масса циркония 91,22. Он состоит из пяти природных изотопов с массовыми числами: 90—51,5; 91—11,2; 92—17,1; 94—17,4 и 96—2,8 %.

Цирконий существует в двух кристаллических модификациях: α -формы с гексагональной плотноупакованной решеткой и β -формы с кубической объемноцентрированной решеткой. Переход $\alpha \rightarrow \beta$ происходит при 862°C.

В природе вместе с цирконием всегда встречается гафний, обладающий близкими с ним химическими свойствами, сходным строением внешних электронных оболочек и близкими размерами атомных и ионных радиусов (например, ионный радиус циркония — $0,87 \cdot 10^{-8}$ см, а гафния $0,86 \cdot 10^{-8}$ см). Однако

Таблица 6

Некоторые свойства тантало-ниобиевых минералов

Название	Формула	Содержание, %			Плотность, г/см ³
		Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	TR ₂ O ₅	
Колумбит	(Fe, Mn) (Nb, Ta) ₂ O ₆	50—76	1—40	—	5,3—6,6
Танталит	(Mn, Fe) (Ta, Nb) ₂ O ₆	2—40	41—84	—	7,0—8,2
Лопарит	(Na, Ce, Ca) (Ti, Nb, Ta) O ₃	11	0,75	32—35	4,7—4,9
Пирохлор	(Ca, Na, U, Ce, Y) _{2-m} × × (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆ × × (O, F) _{1-m} nH ₂ O	40—70	0,6	0,2—1,3	3,7—5,0
Микролит	(Ca, Na) ₂ (Ta, Nb, Ti) ₂ × × O ₆ (OH, F, O)	0,1—7,7	50—80	0,2—4,3	5,9—6,4
Самарскит	(Y, U, Fe) ₂ (Nb, Ti, Ta) ₂ O ₆	27—46	до 20	0,25—15	5,6—5,8
Эвксенит	(Y, Ce, U, Ca, Th) × × (Ti, Nb, Ta) ₂ O ₆	4—47	0,47	17—41	4,5—5,9
Уоджинит	(Ta, Sn, Mn) ₃ O ₆	—	60—85	—	7,2
Иксиолит	(Nb, Ta, Sn, W, Sc) ₃ O ₆	2—40	41—84	—	7,0—8,2

при большой близости химических свойств цирконий и гафний существенно отличаются друг от друга по некоторым физическим свойствам (атомной массе, плотности, температуре плавления и по площади поперечного сечения захвата нейтронов).

По данным А. П. Виноградова, кларк циркония в земной коре составляет 200 г/т. Наиболее высокие концентрации циркония наблюдаются в щелочных горных породах, где среднее его содержание может достигать 1—3 %, и наименьшие — в ультраосновных породах — от 0,003 до 0,008 %. В связи с малой распространенностью щелочных пород в земной коре источниками для регионального накопления циркониевых минералов в россыпях являются кислые изверженные породы, метаморфические породы (гнейсы и сланцы), а также обломочные осадочные породы (аркозовые и другие песчаники).

Всего известно 27 минералов циркония. Промышленное значение имеют два: циркон и бадделит. Основным источником циркония является циркон в морских прибрежных россыпях (табл. 7).

Таблица 7

Некоторые свойства важнейших цирконийсодержащих минералов

Название	Формула	Содержание, %			Плотность, г/см ³
		циркония	гафния	других элементов	
Циркон	Zr [SiO ₄]	49,5	0,5—7	—	4,0—5,1
Разновидности: альвит, хаг-талит и др.		49,5	NiO ₂ = 16	—	4,7—3,4
Бадделит	ZrO ₂	49,5	—	Ce ₂ O ₃ ≤ 16	Нет данных
		≤ 74	—	—	5,5—6

§ 2. ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К КАЧЕСТВУ РУД

Качество руд редких элементов зависит от содержания полезных компонентов, их вещественного (минерального и химического) состава и текстурно-структурных особенностей. Содержание полезных компонентов выражаются массовыми процентами металлов или окислов в расчете на воздушно-сухую массу руд. Качество литиевых, бериллиевых, тантало-ниобиевых, редкоземельных и циркониевых руд выражается содержанием окислов соответствующих элементов. Качество рудоносных песков в россыпях оценивается в массовых единицах полезных минералов на 1 м³ песков.

С учетом существующих технологических схем по содержанию полезных компонентов выделяются очень богатые, богатые, рядовые и бедные руды (табл. 8).

Предельные содержания редких металлов в рудах, песках и рассолах устанавливаются исходя из современных возможностей технологии их переработки, обеспечивающих рентабельное извлечение полезных компонентов. Для редкоземельных, литиевых и ниобиевых руд они измеряются первыми десятками, а танталовых руд — первыми сотыми долями процента. Минимальные содержания лития и цезия в рассолах и природных водах составляют соответственно 10,3 и 0,5 мг/л.

Качество руд существенно повышается, когда в их составе присутствуют несколько полезных компонентов. Так, например, в литиевых рудах обычно присутствуют бериллий, олово и тантал, в редкоземельных рудах — уран и торий; танталовые руды всегда содержат ниобий и часто олово и, наоборот, ниобиевые — тантал и т. д. Существенное влияние на качество руд оказывают их минеральный состав и текстурно-структурные особенности.

§ 3. ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К ЗАПАСАМ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Запасами редких металлов в недрах называются количества руд и содержащихся в них редких металлов, отвечающие по своему качеству современным требованиям промышленности. Запасы выражаются массой руды и массами редких металлов или их окислов в руде.

Масштабы месторождений редких металлов определяются их запасами. В зависимости от масштабов выделяются уникальные, крупные, средние и мелкие месторождения (табл. 9).

Уникальные месторождения редких металлов единичны во всем мире. Крупные месторождения насчитываются единицами или первыми десятками. Ими определяются минерально-сырьевые базы ведущих горных предприятий. Средние месторождения служат минерально-сырьевой базой рядовых горных пред-

Группировка руд редких элементов по содержанию полезных компонентов в руде (по А. И. Гинзбургу, 1980 г.)

Руды	Ведущие полезные компоненты	Качественная характеристика руд, %				
		концентрат	очень богатые	богатые	радовые	бедные
Литиевые	Li_2O	3,5—8,0	1,5—2,0	1,2—1,5	0,9—1,2	0,5—0,9
Бериллиевые	BeO	5—10	$>1,0$	0,5—1,0	0,2—0,5	0,06—0,2
Редкоземельные	$\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$	60	$>5,0$	1,0—5,0	0,5—1,0	$<0,5$
Танталовые	Ta_2O_5	13—40	$>0,1$	0,025—0,1	0,015—0,025	$<0,015$
Ниобиевые	Nb_2O_5	10—56	$>1,0$	0,4—1,0	0,2—0,4	$<0,2$
Циркониевые (в песках)	ZrO_2	60—66 кг/м ³	—	35 кг/м ³	20—35 кг/м ³	<20 кг/м ³

Таблица 9

Группировка месторождений редких элементов по масштабам (по А. И. Гинзбургу, 1980 г.)

Элементы	Масштабы месторождений, т			
	уникальные	крупные	средние	мелкие
Литий	$>1,5 \cdot 10^6$	$(0,5-1,5) \cdot 10^6$	$(0,3-0,5) \cdot 10^6$	$<0,3 \cdot 10^6$
Бериллий	$20 \cdot 10^4$	$(5-20) \cdot 10^4$	$(1-5) \cdot 10^4$	$<1 \cdot 10^4$
Редкие земли	$>1 \cdot 10^6$	$(0,5-1) \cdot 10^6$	$(1-5) \cdot 10^5$	$<1 \cdot 10^5$
Тантал	$>n \cdot 10^5$	$(0,2-1) \cdot 10^5$	$(0,5-2) \cdot 10^4$	$<5 \cdot 10^3$
Ниобий	$>n \cdot 10^5$	$(0,5-1) \cdot 10^5$	$(1-5) \cdot 10^5$	$<1 \cdot 10^5$
Цирконий (в песках)	$>300 \cdot 10^5 \text{ м}^3$	$(200-300) \cdot 10^5 \text{ м}^3$	$(80-200) \cdot 10^5 \text{ м}^3$	$(30-80) \cdot 10^5 \text{ м}^3$

приятый, а мелкие месторождения — их подсобной базой и практически не имеют самостоятельного значения.

Качественная и количественная характеристики запасов редких металлов тесно взаимосвязаны. Чем меньше установленное предельное содержание металлов, тем больше его запасы и запасы руды. Как правило, наиболее ценными для народного хозяйства оказываются не те месторождения, которые содержат самые богатые руды, а те, которые обеспечивают максимальные масштабы производства и минимальную себестоимость продукции. Чаще всего к ним относятся крупные месторождения рядовых по качеству руд.

§ 4. УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РУД

Для обогащения литиевых руд используются методы флотации, выделения в тяжелых суспензиях, а иногда методы декрепитации, основанные на превращении сподумена в порошок при нагревании, вследствие его перехода в другую полиморфную модификацию. Из-за того что в сподумене и других литиевых минералах отмечаются весьма небольшие количества этого металла, содержания лития в концентратах обычно не превышают 3—4 %.

Бериллиевые руды обогащаются ручной рудоразборкой, механическими способами выбора богатых кусков руды, основанными на сепарации по наведенной активности, а также флотационными методами. Получаемые в результате обогащения берилловые концентраты содержат 5—10 %, а фенакитовые и бертрандитовые концентраты — 8—15 % окиси бериллия.

Редкоземельные руды хорошо поддаются обогащению физическими методами (гравитация, магнитная и электромагнитная сепарация, электросепарация, флотация и др.). Переработка редкоземельных концентратов состоит из двух последовательных стадий: «вскрытия» концентратов, т. е. перевода содержащихся в них редкоземельных металлов в растворимую форму, и разделения редкоземельных элементов для получения чистых химических соединений индивидуальных элементов. Получаемые концентраты содержат от 30 до 60 % суммы окисей редкоземельных элементов.

Танталовые и ниобиевые руды подвергаются обогащению гравитационными, флотационными или комбинированными методами с доводкой танталито-колумбитовых концентратов с помощью магнитной или электромагнитной сепараций. В результате обогащения получают концентраты, состоящие на 80—90 % из рудных минералов. Содержание ниобия в концентратах зависит от состава рудных минералов. Так, например, в пироклоровом концентрате, согласно действующим техническим условиям, должно быть не менее 30 % суммы пяти-

окисей ниобия и тантала. В существенно микролитовых или танталитовых концентратах содержание тантала достигает 40 %.

Обогащение циркониевых руд производится гравитационным методом в сочетании с магнитной или электромагнитной сепарациями. Циркониевые концентраты, предназначенные для химической переработки, должны содержать не менее 60 % двуокиси циркония. В концентратах, предназначенных для производства ферросплавов, вредной примесью является фосфор. Его содержание не должно превышать 0,1 % (в пересчете на пятиокись фосфора). В концентратах, используемых для производства металлического циркония, применяемого в атомной технике, вредными примесями являются гафний и некоторые редкоземельные элементы (из-за большой величины эффективного поперечного сечения атомов этих элементов-примесей). Переработка большинства редкоземельных концентратов производится пиро- и электрометаллургическими, реже химико-металлургическими методами.

Переработка литиевых концентратов и руд возможна методом спекания с известью или вакуум-термическим методом. Извлечение соединений лития из продуктов обогащения чаще осуществляется гидрометаллургическим способом. Металлический литий получается электролитическим или вакуум-термическим способом.

Бериллиевые концентраты сплавляются с известью с последующей сульфатизацией или спекаются с фтористыми соединениями. Металлический бериллий и его соединения получают переработкой бериллия в гидроксид $\text{Be}(\text{OH})_2$ или сульфат BeSO_4 . Металл высокой чистоты получают дистилляцией в вакууме, а в небольших количествах — зонной плавкой или путем электролитического рафинирования.

Редкоземельные концентраты подвергаются сульфатизации или хлорированию с последующей ионнообменной хроматографией или экстракцией для разделения компонентов и получения чистых окисей.

Для разложений монацитовых и бастнезитовых концентратов используют серную кислоту с последующим выщелачиванием водой. Сырье типа лопаритов перерабатывают методом хлорирования, реже сульфатизацией. Основными методами разделения лантаноидов являются экстракционные методы. Для их получения применяют металлотермию или электролиз.

Ниобиевые концентраты перерабатываются для получения феррониобия в дуговых электропечах или внепечным металлотермическим способом, а металлический ниобий извлекают электролизом. Химические соединения тантала получают также химико-металлургической переработкой концентратов, из которых металлотермическими методами или электролизом производится порошок металлического тантала. В даль-

нейшем полученные порошки ниобия и тантала переплавляются методами электросварки—дуговой плавки или плавки электронно-лучевым способом для получения компактных металлов. Для производства металлического тантала применяют восстановление его из Ta_2O_5 сажей в одну или две стадии. Монокристаллы особо чистого тантала получают бестигельной электронно-лучевой зонной плавкой.

Циркониевые концентраты перерабатываются электротермическими методами в дуговых электропечах для получения ферросплавов, а для получения металлического циркония его концентраты перерабатываются методами хлорирования, спекания с известью, разложения щелочами и др. с получением химических соединений, из которых цирконий восстанавливается металлотермическим путем или электролизом. Полученные порошки или губки циркония перерабатываются в компактный металл методом дуговой плавки.

Глава II

ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К МЕСТОРОЖДЕНИЯМ УРАНА

К числу радиоактивных металлов, образующих промышленноценные скопления в земной коре, относятся уран и торий. В недалеком прошлом промышленные типы урановых месторождений ограничивались гидротермальными жильными месторождениями, месторождениями «карнотитовых» песчаников и месторождениями ураноносных гранитных пегматитов, а месторождения тория — морскими россыпями, расположенными вдоль побережий современных морей тропического пояса.

Резкое расширение минерально-сырьевой базы радиоактивных металлов и увеличение количества промышленных типов урановых месторождений началось в конце сороковых годов в связи с возможностью использования внутриядерной атомной энергии в практических целях. В эти годы во всех частях земного шара были обнаружены и освоены урановые месторождения разнообразнейших генетических типов, а выявленные мировые запасы урана возросли во много раз.

Минерально-сырьевые ресурсы тория также выросли за последние годы, однако количество промышленных типов ториевых месторождений существенно не изменилось. Кроме современных прибрежно-морских россыпей были выявлены древние погребенные россыпи того же происхождения. В настоящее время практически весь торий добывается как сопутствующий продукт из монацитовых россыпных месторождений, в связи с чем требования промышленности к месторождениям тория не рассматриваются.

§ 1. СВОЙСТВА И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

В периодической системе Д. И. Менделеева уран принадлежит к семейству актиноидов, значится под 92-ым порядковым номером и занимает последнее место в шестой группе. Из всех элементов, распространенных в земной коре, он обладает наибольшей атомной массой, равной 238,07. Природный уран состоит из трех изотопов с массовыми числами: 238—99,28 %, 235—0,71 % и 234—0,005 %. Нейтральный атом урана имеет семь электронных оболочек, из которых четыре внутренних заполнены целиком, а три внешних — частично. Шесть наружных электронов являются валентными.

Одним из наиболее характерных свойств урана является его радиоактивность. Уран непрерывно самопроизвольно рас-

падает, образуя последовательный ряд новых радиоактивных элементов, который заканчивается радиогенным свинцом. При распаде изотопа с массовым номером 238 устойчивым изотопом свинца является свинец 206, а при распаде изотопа с массовым номером 235 — изотоп свинца 207.

При радиоактивном распаде радиоактивное вещество непрерывно теряет часть своей энергии в виде альфа-, бета- и гамма-излучений. Интенсивность распада у различных элементов радиоактивного ряда различная. Уран относится к долгоживущим элементам с периодом полураспада 4,5 млрд. лет. Период полураспада радия составляет 1590 лет, а период полураспада радона — только 3,8 дня. По истечении некоторого времени (около одного миллиона лет) в ряду распадающихся радиоактивных элементов наступает динамическое равновесие, когда в единицу времени образуется столько каждого радиогенного элемента, сколько его распадается за то же время. В равновесных рудах количество долгоживущих элементов всегда превышает количество короткоживущих, а отношения количеств этих элементов постоянны. Так, например, отношение радия к урану в равновесных рудах составляет $3,4 \cdot 10^{-7}$, т. е. на 1 т урана в руде приходится только 0,34 г радия.

Таблица 10

Важнейшие урановые минералы

Название	Химический состав	Содержание урана, %	Сопутствующие полезные компоненты, %
Настуран (урановая смолка)	$k\text{UO}_2 \cdot l\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$	52—76	
Уранинит	$k(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2 \cdot l\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$	62—78	Th от долей процента до 11
Урановые черни	Многокомпонентные дисперсные системы	11—53	
Браннерит	$(\text{U}, \text{Ca}, \text{P}, \text{Y}, \text{Th})_3\text{Ti}_5\text{O}_{16}$	39	Th до 4
Давидит	$(\text{Fe}, \text{Ce}, \text{U})(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})_3 \times (\text{O}, \text{OH})_7$	1—7	TR до 4,6
Коффинит	$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	61	
Карнотит	$\text{K}_2(\text{UO}_2\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	52—56	
Торбернит	$\text{Cu}(\text{UO}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	48	
Отенит	$\text{Ca}(\text{UO}_2\text{PO}_4)_2 \cdot (8-10)\text{H}_2\text{O}$	48—54	
Уранофан	$\text{CaH}_2(\text{UO}_2)\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	55—58	
Гуммит	Смесь гидроокислов и силикатов U		
Тухолит	Соединения углерода с U, Th, Pb и TR		

В природе уран встречается в четырехвалентной и шестивалентной формах. Ионный радиус четырехвалентного урана равен $1,05 \cdot 10^{-8}$ см. Большой размер иона четырехвалентного урана, близкий к ионным радиусам тория, иттрия, кальция и редких земель, приводит к частому изоморфизму этих элементов в земной коре.

Размер ионного радиуса шестивалентного урана $0,8 \cdot 10^{-8}$ см. Обычно он встречается в виде иона уранила UO_2^{2+} , соединения которого легко растворяются в природных водах, что обеспечивает широкую миграцию урана в приповерхностных условиях.

В земной коре средний кларк урана, по А. П. Виноградову, составляет 2,6 г/т. В настоящее время известно около 200 различных минералов, в состав которых входит уран. Из этого большого количества практическое значение имеют примерно 25—30, а в состав большинства промышленных руд — входит только 12 урановых минералов (табл. 10).

Наибольшую промышленную ценность из них представляют: в гидротермальных месторождениях — настуран, коффинит, уранинит и урановые черни, реже браннерит и давидит; в экзогенных месторождениях — урановые черни, карнотит, отенит и торбернит; в метаморфогенных месторождениях — браннерит и уранинит.

В отличие от руд редких элементов урановые руды почти не поддаются механическим способам обогащения, из-за чего в основе их переработки лежат процессы гидрометаллургии. Из механических способов обогащения применяются ручная рудоразборка богатых руд, радиометрическая сортировка и радиометрическое обогащение. В качестве вспомогательных способов в некоторых случаях применяются гравитационное обогащение, магнитная сепарация и флотация.

— Переработка урановых руд заключается в дроблении и измельчении руды, переводе урана в раствор, отделении жидкой фазы от твердой, очистке раствора от вредных примесей и в осаждении урана из раствора в товарный концентрат. Перевод урана в раствор осуществляется двумя главными способами: кислотным (с помощью серной кислоты) и карбонатным (с помощью соды).

§ 2. ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К КАЧЕСТВУ РУД

Качество руд радиоактивных металлов определяется содержанием в них урана и тория, их структурно-текстурными особенностями, минеральным и химическим составом. В нашей стране качество урановых руд оценивается содержанием урана, а в капиталистических странах — содержанием окиси урана (U_3O_8). По классификации, предложенной П. В. Прибытковым,

урановые руды разделяются по содержанию урана на пять классов:

Очень богатые с содержанием урана более 1 %

Богатые с содержанием от 0,5 до 1 %

Средние с содержанием от 0,25 до 0,5 %

Рядовые с содержанием от 0,1 до 0,25 %

Бедные с содержанием ниже 0,1 %.

В мировой практике экономически целесообразной считается отработка собственно урановых месторождений при содержаниях урана в рудах не менее 0,05 % и значительных запасах руд. В комплексных урансодержащих месторождениях предель-

Таблица 11

Классификация комплексных урановых руд (по П. В. Прибыткову)

Форма нахождения урана и других компонентов	Типы руд	Урановые и урансодержащие минералы
В урановых минералах	Уран-ванадиевые Уран-редкоземельно-титановые	Карнатит, тоямунит Браннерит
В урансодержащих минералах	Уран-редкоземельно-ториевые Уран-ториевые Уран-циркониевые Уран-титановые Уран-редкоземельно-титано-ниобиевые	Монацит Торит, ураноторит Циртолит, малакон Давидит Фергусонит, бетафит, поликраз, эвксенит
В породообразующих минералах	Уран-фосфорные Уран-угольные	Фторапатит, курсит Настуран, урановые черни, угли, металлоорганические соединения
В разных минералах	Золото-урановые Уран-железные Уран-медные Уран-молибденовые Уран-полиметаллические Уран-висмутовые Уран-медно-кобальтовые Уран-никель-кобальт-серебро-висмутовые Уран-никель-кобальтовые.	Уранинит, настуран, золото Уранинит, настуран, гематит, магнетит Настуран, урановые черни, халькопирит, борнит, халькозин Настуран, урановые черни, молибденит, иордизит Настуран, урановые черни, галенит, сфалерит Настуран, урановые черни, висмутин Настуран, уранинит, халькопирит, борнит, халькозин, кобальтин Настуран, урановые черни, днарсениды и сульфосениды никеля, кобальта, серебра, висмутин, самородные висмут и серебро Настуран, миллерит, кобальтин

ное содержание урана снижается до 0,01—0,03 %. Классификация комплексных урановых руд приведена в табл. 11.

Убогие руды без сопутствующих компонентов, содержащие 0,01—0,02 % урана, обрабатываются лишь в исключительно благоприятных горно-геологических условиях (например, способом подземного выщелачивания из скважин).

§ 3. ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К ЗАПАСАМ УРАНОВЫХ РУД

Запасы урановых руд в недрах выражаются их массой, а также массой урана в руде. Масштабы урановых месторождений определяются их запасами. По данным В. И. Красникова [23], к уникальным относятся месторождения урана с запасами в первые сотни тысяч тонн, к крупным — месторождения с запасами в десятки тысяч тонн, а к средним — с запасами в тысячи тонн. Месторождения с запасами урана менее тысячи тонн относятся к мелким и, как правило, не имеют самостоятельного значения. Как указывает Н. С. Зонтов [9], масштабы урановых месторождений в сотни тысяч тонн урана являются, очевидно, предельными и находят обоснование в закономерной зависимости от кларка урана в земной коре.

Так же, как и для других полезных ископаемых, качественная и количественная характеристики запасов урановых руд тесно взаимосвязаны. Чем ниже принимаемое предельное содержание урана в руде, тем больше его запасы, а также запасы руды в недрах. Однако согласно статистическим данным корреляция между масштабами месторождений и средними содержаниями урана в рудах, за некоторыми исключениями, практически отсутствует. Степень концентрации урана в месторождениях зависит от состава минерала-носителя и от механизма рудоотложения. Она значительно легче поддается прогнозной оценке, чем масштабы месторождений, так как диапазон колебаний масштабов месторождений значительно шире, чем диапазон колебаний средних содержаний. По данным [9], коэффициенты вариации масштабов и средних содержаний составляют соответственно 160—170 % и 50—60 %.

§ 4. УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РУД

Высокая ценность урановых руд и сложные условия их разработки допускают применение трудоемких схем подготовки и систем разработки, обеспечивающих минимальные и потери, и разубоживание руды. Эксплуатация урановых месторождений производится как открытыми, так и подземными способами, в зависимости от их масштабов, условий залегания, качества и технологических свойств руд. Последние годы в практике

разработки урановых месторождений все шире применяются новые прогрессивные способы добычи: подземная разработка с применением гидротранспортировки отбитой руды от очистных забоев до приемных хранилищ или обогатительных фабрик, механизированные способы выемки рудных пластов мощностью более 1—1,5 м с помощью горных комбайнов, конвейеров и механизированных комплексов, буро-шнековые способы выемки маломощных пластов (менее 0,5—0,6 м) и особенно широко — подземное выщелачивание урановых руд.

Применение напорного гидротранспорта целесообразно при подземной разработке урановых месторождений с рудами небольшой удельной массы, не обладающих абразивными свойствами. К таким месторождениям относятся многие ураноносные песчаники, глины, угли и фосфориты. Механизированные способы выемки с помощью горных комбайнов и других механизированных комплексов и буро-шнековые способы выемки наиболее эффективны при разработке урано-угольных месторождений и ураноносных глин.

Подземное выщелачивание урановых руд применяется в шахтном и бесшахтном вариантах. Наиболее широкое распространение в последние годы получили способы бесшахтного подземного выщелачивания из скважин, пробуренных с поверхности до рудных залежей. Способы бесшахтного подземного выщелачивания весьма экономичны и позволяют вовлекать в промышленное использование месторождения с убогими и весьма убогими урановыми рудами. Однако для применения этого способа необходимо, чтобы уран легко выщелачивался из руд под действием реагентов (сода или разбавленных кислот), рудные залежи обладали хорошими фильтрационными свойствами и ограничивались сверху и снизу водоупорными слоями. Подземное выщелачивание урана из проведенных горных выработок требует предварительного дробления массива крепких руд с помощью буро-взрывных работ.

Эксплуатация урановых месторождений требует проведения больших объемов радиометрических работ и сопряжена с комплексом специальных мероприятий по борьбе с радоном и радиоактивной пылью, что нередко приводит к заметному удорожанию себестоимости добычи урановых руд.

Наиболее эффективными способами переработки урановых руд являются их радиометрическая сортировка и обогащение с последующим выщелачиванием урана из обогащенной рудной массы. Радиометрическая сортировка руд производится на всем пути следования рудной массы от забоя до фабрики. В забоях руду и породу разделяют с помощью рудничных радиометров, далее она подвергается сортировке в транспортных сосудах (вагонетках, автомашинах) на радиометрических контрольных станциях (РКС), а бедные руды сортируются или обогащаются на специальных установках (РАС) или радиометрических обо-

гатительных фабриках. Применение способов радиометрической сортировки и обогащения урановых руд обеспечивает ощутимый экономический эффект, значимость которого возрастает с увеличением степени радиометрической контрастности руд.

Гидрометаллургическая переработка обогащенных урановых руд заключается в их дроблении и измельчении, переводе урана в раствор, отделении жидкой фазы от твердой, очистке раствора от вредных примесей и в осаждении урана из раствора в товарный концентрат.

Таблица 12

Технологическая классификация урановых руд по химическому составу (по П. В. Прибыткову)

Типы руд	Разновидности	Содержание основных компонентов, %	Методы гидрометаллургической переработки
Силикатные и алюмосиликатные	—	<95 силикатов и алюмосиликатов	Выщелачивание разбавленными кислотами
Карбонатные	С малым содержанием карбонатов	6—12 карбонатов	Карбонатное выщелачивание или выщелачивание кислотами с предварительной флотацией карбонатов
	Со средним содержанием карбонатов	12—25 карбонатов	То же
	С большим содержанием карбонатов	<25 карбонатов	„
Сульфидные	С малым содержанием сульфидов	3—10 сульфидов	Выщелачивание разбавленными кислотами
	Со средним содержанием сульфидов	10—25	То же
	С большим содержанием сульфидов	<25	„
Железокси́дные	—	>50 окислов железа	„
Фосфатные	С малым содержанием фосфатов	3—10 P_2O_5	„
	Со средним содержанием фосфатов	10—20 P_2O_5	„
	С большим содержанием фосфатов	<20 P_2O_5	„
Каустобиолитовые	Ураноносные угли и твердые битумы	—	Карбонатное выщелачивание или выщелачивание слабыми кислотами
	Углистые и битуминозные сланцы	—	То же

Технологические свойства урановых руд существенно зависят от их минерального и химического состава. Классификация урановых руд, отражающая методы и эффективность гидрометаллургической переработки в зависимости от этих параметров, приведена в табл. 12.

Перевод урана в раствор осуществляется двумя главными способами: кислотным и карбонатным.

Наиболее широко применяется выщелачивание урана из руд разбавленной серной кислотой с переводом в раствор до 90—98 % урана. В разбавленной кислоте хорошо разлагаются все вторичные минералы, а при наличии окислителей (пиролюзита) — и окисные минералы урана.

Недостатком кислотного метода является легкое взаимодействие кислот с другими компонентами перерабатываемой руды, что вызывает большой перерасход реагентов.

Содовый метод применяется для переработки руд, содержащих большое количество карбонатов. Достоинством содового метода является меньшая по сравнению с кислотным коррозия аппаратуры. Однако его использование влечет за собой большие потери металла и требует очень тонкого измельчения руд, что затрудняет последующее фильтрование пульпы.

Отделение жидкой фазы от твердой достигается фильтрацией урансодержащих растворов и их очисткой. Обычно уран сорбируется из пульпы на катионитах или анионитах и экстрагируется перемывкой элюатов с получением чистых соединений.

Важным технологическим свойством урановых руд является их радиометрическая контрастность, характеризующая степень неравномерности распределения урановых минералов в руде, установленную по определенным объемам.

§ 5. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ЗАПАСАМИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ

В связи с перспективами дальнейшего развития атомной энергетики потребности в урановых рудах возрастают с каждым годом. Достоверные разведанные запасы урана в капиталистических и развивающихся странах, рентабельные для отработки при цене 22 доллара за 1 кг U_3O_8 , превышают в настоящее время 1 млн. т. По расчетам зарубежных специалистов примерно столько же составляют запасы урана, рентабельные для отработки при цене 33 доллара за 1 кг U_3O_8 . Вместе с вероятными запасами их суммарное количество превышает в настоящее время 3 млн. т. Однако с учетом вероятного спроса на уран, даже этого количества не хватит на период, оставшийся до 2000 г. В два ближайших десятилетия ожидаются небывало высокие темпы роста производства урановых концентратов, а также рост цен более чем в два раза.

В связи с проектируемым вводом в производство реакторов с газовым, а не водяным охлаждением, использующих при работе урано-ториевую смесь, к концу столетия появится спрос не только на уран, но и на торий, учтенные мировые запасы которого (без социалистических стран) превышают 2 млн. т. Таким образом, руды радиоактивных элементов представляют собой энергетическое сырье будущего.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Природные типы рудных месторождений весьма многочисленны и разнообразны, но далеко не все из них играют заметную роль в балансе запасов и добыче урановых и редкометалльных руд, хотя отдельные месторождения многих генетических типов успешно используются промышленностью. В связи с этим в практике геологоразведочных работ особо выделяются так называемые «промышленные типы» месторождений, которые являются основными поставщиками урана и редких металлов и занимают ведущее место в балансе мировых запасов и добыче.

Для целей группировки промышленных типов месторождений используется совокупность геологических, технологических, горно-технических и экономических признаков, определяющих запасы, качество и технологические свойства руд, горно-геологические условия разработки месторождений и экономическую эффективность их использования в народном хозяйстве. В свою очередь все перечисленные свойства рудных месторождений зависят от геологических условий их формирования, минерального и химического состава руд, т. е. от совокупности признаков, которые служат основой для выделения рудных формаций. Таким образом, понятия о промышленных типах рудных месторождений объективно связаны с понятиями об их рудных формациях, а использование этих связей может способствовать повышению эффективности поисковых и разведочных работ.

Поскольку представления о промышленных типах складываются из мирового опыта разведки и эксплуатации сходных месторождений, а знание их особенно важно на ранних стадиях геологоразведочных работ, критерии подобия сравниваемых месторождений должны быть достаточно широкими. Для использования принципа аналогии на ранних стадиях важно установить принципиально сходные черты, объединяющие месторождения данного типа, отвлекаясь от второстепенных, хотя и отчетливо выраженных различий в составе руд и в локальных геологических условиях формирования месторождений. Следует стремиться к тому, чтобы каждая рудная формация могла быть сопоставлена с формациями магматических, осадочных или метаморфических пород и занимала бы вполне определенное положение в региональной геологической структуре. С укрупнением масштаба исследований в пределах отдельных рудных формаций могут выделяться субформации или фациальные типы, а внутри них — минеральные типы.

При оценке формационной принадлежности промышленных типов редкометалльных и урановых месторождений учитываются:

- геотектоническая позиция месторождений,
 - устойчивые связи месторождений с формациями магматических, осадочных или метаморфических пород,
 - типы рудно-метасоматических формаций;
- а при выделении субформаций или фациальных типов:
- устойчивые связи месторождений с фациями и составом магматических, осадочных или метаморфических пород,
 - фациальные особенности рудно-метасоматических формаций,
 - особенности региональных рудоносных структур.

Выделение минеральных типов может проводиться на основе парагенетических ассоциаций рудных и жильных минералов с учетом структурно-текстурных особенностей руд.

§ 1. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

По формационному признаку выделяется 8 важнейших редкометалльных формаций, каждая из которых соответствует самостоятельному промышленному типу редкометалльных месторождений.

Месторождения I типа располагаются в пределах геосинклинальных трогов древних платформ и фанерозойских областей складчатости; II типа — в зонах активизации областей завершенной складчатости; III, IV и V типов — в пределах складчатых и активизированных областей; VI и VII типов — на активизированных платформах, а месторождения VIII типа — на молодых и современных платформах.

I. Редкометалльные пегматиты. Месторождения редкометалльных пегматитов встречаются как в пределах геосинклинальных трогов древних платформ, так и в более молодых складчатых областях в связи с интрузивами гранитного состава. Они формируются в интервалах глубин от 3 до 8 км, пространственно связаны с комплексами метаморфических пород верхов амфиболитовой фации и представлены андалузитовыми, антофиллитовыми, кордиеритовыми, биотитовыми и амфиболитовыми сланцами или более глубоко метаморфизованными породами со следами диафтореза [10, 30, 36, 6]. Пегматиты всегда вытягиваются в крупные поля и представлены жильными телами с раздувами, утолщениями и линзами, часто характеризуются концентрической зональностью. В отдельных случаях редкометалльная минерализация локализуется в центральных частях тел. Пегматиты, расположенные в пределах линейно вытянутых геосинклинальных трогов древних платформ, прослеживаются на многие километры. Во многих случаях им свойственно относительно равномерное размещение редкоме-

тального оруденения. Выделяются три минеральных типа редкометальных гранитных пегматитов:

- микроклин-сподумен-альбитовый (сподуменовый);
- микроклин-альбитовые с танталовым и иногда цезиевым оруденением;
- альбит-микроклиновые с бериллиевым оруденением.

Микроклин-сподумен-альбитовый минеральный тип редкометальных пегматитов является главным эндогенным сырьевым источником лития. Месторождения сподуменовых пегматитов связаны с массивами биотитовых и двуслюдистых гранитов. Они представлены линейно вытянутыми полями протяженностью в несколько километров, а иногда и до 15—20 км. В пределах таких полей выделяются отдельные жилые зоны в виде серий сближенных плитообразных жил или четковидных линзовидных тел. Мощности таких зон достигают десятков метров, а отдельных тел 5—10 м.

При разработке сподуменовых пегматитов обычно попутно извлекаются танталовые, оловянные и бериллиевые концентраты.

Литиевые руды хорошо поддаются процессам обогащения (сподуменовые концентраты получаются при флотации руд или в тяжелых суспензиях).

Тела сподумен-альбитовых руд отличаются выдержанностью по падению и простиранию. Разработка месторождений этого типа чаще всего производится открытым способом.

Сподуменовые пегматиты иногда по простиранию или по восстанию переходят в микроклин-альбит-танталитовые, в них уменьшается количество сподумена, увеличивается содержание танталита, иногда появляются в существенных концентрациях лепидолит, розовый мусковит, поллуцит. Однако чаще этот минеральный тип представлен самостоятельными месторождениями.

Микроклин-альбитовые редкометальные пегматиты с танталовым оруденением во многих районах мира приурочены к метаморфизованным породам основного состава (амфиболитам). Главными рудными минералами являются: колумбит, колумбит-танталит, мангано-танталит, микролит, уоджинит. Основная часть танталового оруденения связана с процессами альбитизации и грейзенизации. Средние отношения тантала к ниобию варьируют от 1:1 до 3:1 и более. Танталовое оруденение локализуется в апикальных участках крутопадающих пегматитовых тел, в висячих боках наклонных жил, в субгоризонтальных залежах. Попутными компонентами являются литий (сподумен, петалит, амблигонит, лепидолит), олово (касситерит), цезий (поллуцит, лепидолит), бериллий (берилл).

Пегматитовые поля протягиваются на десятки километров при ширине 1—3 км. Отдельные пегматитовые тела имеют мощ-

ность от 5—10 до 50 м и протяженность 0,8—1,0 км, при расстояниях между соседними телами от 5 до 40 м и более.

Альбит-микроклиновые пегматиты с бериллом являются источником рудоразборных берилловых концентратов, формируются в связи с интрузивами биотитовых микроклин-плагиоклазовых гранитов на глубинах 5—8 км.

Внутренняя структура пегматитов обычно характеризуется отчетливой зональностью и блоковым строением. Промышленные концентрации крупнокристаллического рудоразборного берилла приурочены к зонам крупноблокового пегматита в центральных частях жил, ядра которых сложены кварцем. Основная масса кристаллов, достигающих часто гигантских размеров, располагается вдоль границы блокового кварца и окружающей его зоны блокового микроклина.

Руды в месторождениях блоковых пегматитов отличаются высоким качеством. В слабо альбитизированных пегматитах кристаллы берилла нередко имеют крупные размеры (от долей сантиметра до нескольких десятков сантиметров), в связи с чем основным способом переработки руд является ручная или механическая рудоразборка.

В интенсивно альбитизированных пегматитах, наряду с крупными кристаллами, заметная часть берилла может находиться в виде мелких вкрапленников. Такие руды после ручной сортировки поступают на фабрики для обогащения их механическими способами (чаще всего флотацией). При этом из руд извлекаются и остальные полезные компоненты — колумбит, колумбит-танталит, касситерит.

Морфологические особенности пегматитов характеризуются большим разнообразием. Контакты жил с вмещающими породами четкие и легко устанавливаются по данным геологической документации. Размеры отдельных жил весьма различны, однако промышленное значение имеют, как правило, только тела средних и крупных размеров (площадью от нескольких гектаров до одного и более квадратных километров). Формы пегматитовых тел также разнообразны, но преобладают жилоподобные и штокообразные залежи.

Разработка блоковых пегматитов производится как открытым, так и подземным способами. В предыдущие годы этот промышленный тип давал основное количество мировой добычи бериллия, хотя почти все месторождения отличались мелкими масштабами.

II. Колумбитоносные граниты представляют собой один из важнейших промышленных типов тантало-ниобиевых месторождений. Они приурочены к апикальным частям гранитов, где образуют крупные по размерам и простые по форме залежи вкрапленных руд [6, 30, 36].

Рудная формация редкометалльных гранитов разделяется на два минеральных типа: танталитсодержащие граниты и щелочные пирохлор-колумбитовые граниты.

Танталитсодержащие граниты залегают на участках сопряжения консолидированных глыб и фанерозойских складчатых зон. Они контролируются послескладчатыми тектоническими нарушениями и узлами их пересечения. Вмещающими породами являются метаморфизованные песчано-сланцевые толщи и известняки, прорванные куполовидными интрузивными телами размером до нескольких квадратных километров на выходах.

Главными рудными минералами являются колумбит-танталит и пирохлор-микролит, попутными компонентами — касситерит и циннвальдит. Содержание Ta_2O_5 в апикальных частях гранитов достигает 0,011—0,03 %. В месторождениях танталоносных гранитов наблюдается отчетливая геохимическая зональность: в гранитах концентрируется тантал, литий, в их экзоконтактах — вольфрам, бериллий, олово. Оруденение локализуется в зонах неоднородного строения, в местах пологих контактов висячих боков массивов на участках перегибов их кровли, в гребневидных выступах и апофизах. Конфигурация рудных тел иногда совпадает с контурами максимального развития топаза.

Выделение и оконтуривание рудных тел возможно на основании сплошного опробования по заданному бортовому содержанию. Морфология рудных тел и размеры их в значительной мере зависят от принятого бортового содержания.

Щелочные пирохлор-колумбитсодержащие граниты располагаются в областях автономной активизации консолидированных складчатых структур. Субщелочные и щелочные гранитоиды с редкометальной минерализацией представлены трещинными интрузивами размерами от долей до 20 км², внедрение которых контролируется узлами пересечения региональных тектонических нарушений.

Основной порообразующий минерал — микроклин, в той или иной мере замещенный альбитом. При интенсивном развитии этого процесса порода приближается к альбититу. Темноцветные минералы представлены биотитом, рибекитом и эгирином.

Главные рудные минералы: пирохлор, колумбит, второстепенные — фергюсонит, приорит. Вкрапленные тантало-ниобиевые руды характеризуются равномерным распределением. Оруденение прослеживается на глубины до нескольких сотен метров. Помимо пирохлора и колумбита в рудах присутствуют циркон (малакон, циртолит), ильменит, сфен, ксенотим, бастнезит, гадолинит, криолит, ферриторит и ураноторианит. Кроме вкрапленного оруденения встречаются кварц-полевошпатовые прожилки, содержащие тантало-ниобиевую и редкоземельную

минерализацию. Попутными компонентами являются цирконий, редкие земли, криолит.

На месторождениях часто наблюдается геохимическая зональность. При переходе от центра массива к периферии усиливается альбитизация гранитов, происходит замена рибекита на эгирин, увеличивается содержание фтора, редких земель, пентокси тантала и изменяется отношение $Ta:Nb$ от 1:12—1:10 на глубине массива до 1:5—1:8 в приконтактных участках.

Выделение и оконтуривание рудных тел проводится по бортовому содержанию. В зависимости от применяемых кондиций среднее содержание Ta_2O_5 в рудах могут меняться от 0,018 до 0,04 %.

Промышленное значение месторождений этого типа весьма велико, отдельные месторождения характеризуются крупными масштабами оруденения. Танталовые и тантало-ниобиевые руды обогащаются гравитационным методом, а при весьма тонкой вкрапленности применяется флотация.

Разработка этого типа обычно проводится открытым способом.

III. Редкометалльные альбититы располагаются в областях завершенной складчатости в связи с интрузивными породами послескладчатого возраста или периода тектоно-магматической активизации. Месторождения этого типа представлены альбититами, которые возникли в результате постмагматического метасоматоза щелочных гранитов, граносиенитов, сиенитов и нефелиновых сиенитов агпаитового ряда [6, 8, 30, 36].

Рудные залежи окружены ореолами щелочных натровых метасоматитов, развитие которых контролируется контактами интрузивных пород и системами тектоническими нарушениями. Руды отличаются тонковкрапленным строением, сравнительно сложным составом редкометалльных рудообразующих минералов (приорит, фергюсонит, пирохлор, ксенотим, монацит, гадолинит, бастнезит, малакон, торит, ильменорутит, сфен, ильменит, циркон и др.).

В зависимости от состава материнских и вмещающих пород, характера метасоматоза и состава выделяются:

- фергюсонит-приорит-малаконовые альбититы,
- пирохлор-цирконовые альбититы.

Месторождения фергюсонит-приорит-малаконовых альбититов встречаются в связи с малыми интрузивами щелочных гранитов, граносиенитов, сиенитов и иногда отличаются высокими содержаниями редких земель иттриевой группы. Рудные тела обладают крупными размерами, прослеживаются на глубины до сотен метров.

Месторождения являются комплексными редкоземельно-тантало-ниобиевыми и весьма близки по составу к щелочным пирохлор-колумбитсодержащим гранитам.

Редкие земли в этих альбититах концентрируются главным образом в фергюсоните (60 %), приорите и пирохлоре (20 %), малаконе (20 %). Они характеризуются высокими содержаниями диспрозия, европия, тулия. Подавляющая масса руд представлена мелкозернистыми альбититами, альбитизированными сиенитами, окварцованными альбититами или щелочными породами переменного альбит-малакон-рибекитового, кварц-малакон-рибекитового или флюорит-карбонатного состава. На некоторых месторождениях главными минералами являются пирохлор-гачетолит, плюмбопирохлор, фергюсонит и самарскит. Основную ценность в них представляет тантал, попутно извлекаются редкие земли, торий, ниобий, цирконий и уран. Месторождения значительны по масштабам, что часто позволяет вести их разработку открытым способом.

Пирохлор-цирконовые альбититы встречаются в связи с нефелиновыми сиенитами, массивы которых интенсивно альбитизированы. Оруденение в промышленных масштабах развивается в нефелиновых сиенитах мнаскитового ряда. Наиболее интенсивно альбитизация обычно протекает в апикальных и периферических частях массивов. Часто в пределах рудных зон наблюдается пространственное совмещение дорудных фенитов, рудоносных альбититов и проявлений более поздней карбонатизации. С альбитизацией связано в основном циркониевое и ниобиевое оруденение, а с карбонатизацией — ниобиевое, реже редкоземельное. Пирохлор-цирконовые альбититы характеризуются концентрациями ниобия, циркония, в меньшей степени редких земель цериевой группы и небольшими количествами тория. Главный рудный минерал — пирохлор — встречается в виде вкрапленности размером 0,1—2 мм. Отношение тантала к ниобию в пирохлоре варьирует в пределах от 1:30 до 1:100. Пирохлор распределен равномерно. На поздних стадиях гидротермального процесса он иногда замещается колумбитом. Месторождения этого типа значительны по масштабам, но бедны по содержанию ниобия. В пределах отдельных месторождений выделяются пологие и крутопадающие рудные зоны протяженностью в первые километры и шириной в десятки метров.

Выделение и оконтуривание рудных залежей возможно на основании сплошного опробования по заданному бортовому содержанию.

Разработка редкометаллических альбититов проводится открытым способом.

IV. Бериллиеносные метасоматиты. Этот тип бериллиевых месторождений приобрел значение промышленного типа лишь в последние годы в связи с высоким качеством руд по содержанию бериллия [5, 24]. Месторождения располагаются чаще всего в областях тектоно-магматической активизации или на сопряжениях древних консолидированных и молодых складчатых областей. Бериллиеносные метасоматиты связаны с после-

складчатыми гранитоидными интрузивами повышенной щелочности вплоть до граносиенитов и представлены зонами приразломных или экзаконтактовых щелочных метасоматитов с вкрапленностью бериллиевых, редкоземельных и других редкометаллических минералов.

Состав рудоносных метасоматических залежей весьма разнообразен и зависит в первую очередь от состава материнских интрузивов и вмещающих пород. В зависимости от типа метасоматических изменений пород выделяются две минеральные разновидности бериллиеносных метасоматитов:

— кварц-альбит-микроклиновые,

— флюоритовые.

Кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты с гентгельвином и фенакитом размещаются в древних гранитах и гнейсах, в то время как в граносиенитах и щелочных гранитах рудная минерализация представлена фенакитом и берtrandитом в ассоциации с минералами ниобия, циркония, тория и редких земель. Содержание окиси бериллия в рудах достигает 0,55 %.

Флюоритовые метасоматиты с фенакитом и берtrandитом характерны для толщ карбонатного состава. Содержание окиси бериллия в рудах этого типа достигает 1,5 %, а в качестве сопутствующих компонентов может использоваться флюорит.

По морфологическим особенностям залежи бериллиеносных метасоматитов приближаются к крупным пласто- и жиллоподобным телам с неравномерно-вкрапленным, реже прожилково-вкрапленным и гнездовым распределением полезных минералов. Разработка подобных месторождений возможна с применением высокопроизводительных горных систем. Достоинством месторождений данного промышленного типа являются благоприятные технологические свойства руд, дающие высокое сквозное извлечение.

V. Флюорит-берtrandитовые аргиллизиты также представляют новый промышленный тип богатых бериллиевых руд. Рудоносные площади располагаются в областях мезо-кайнозойской тектоно-магматической активизации по периферии вулканотектонических депрессионных структур центрального типа [5, 24]. Месторождения тяготеют к проявлениям магматизма липаритовой вулканогенной формации, а рудные залежи приурочены к слонстым толщам эффузивно-пирокластических пород. Берtrandит-флюоритовое оруденение связано с зонами развития метасоматически измененных пород-аргиллизитов, положение которых контролируется сквозными крутопадающими нарушениями. Рудные залежи отличаются разнообразием морфологических типов и сложным строением. Среди них наиболее существенное значение имеют штокверки изометрической формы, разнообразные жилы и жильные зоны. В пределах штокверков

выделяются зоны протяженностью в сотни метров при мощности в первые десятки метров. Вдоль рудоконтролирующих и рудовмещающих разрывов прослеживаются мощные ореолы предрудной аргиллизации вмещающих пород с существенно гидрослюдистыми внутренними зонами и широким проявлением процессов окварцевания, карбонатизации, серицитизации, флюоритизации и хлоритизации.

Главными рудными минералами являются берtrandит и гельберtrandит в ассоциации с флюоритом, кварцем и адуляром. Берtrandит представлен мелкими кристаллами таблитчатой формы размером 0,01—0,2 мм, реже прожилками длиной 1,5—20 мм. Бериллий распределен в рудах неравномерно. Содержание окиси бериллия в рудах изменяется от сотых до десятых долей процента. Содержание флюорита в рудах достигает 3—5 %, причем содержания бериллия и флюорита в рудах часто коррелируются. На месторождениях выделяются два типа руд: берtrandит-адуляр-флюорит-кварцевый и флюорит-кварцевый с берtrandитом.

Кроме этих минералов в рудах присутствуют кварц, адуляр, кальцит, серицит, хлорит, циркон и гематит.

Руды обладают сложными технологическими свойствами. Месторождения этого типа разрабатываются открытым и подземным способами.

VI. Редкометалльные карбонаты. Формирование месторождений этого типа тесно, но далеко не всегда связано со структурами континентальных рифтов. Месторождения карбонатов располагаются в краевых участках платформ, в областях контактов древних разновозрастных толщ в пределах щитов и приурочены к зонам глубинных разломов [6, 7, 30]. Обычно они связаны с массивами ультраосновных-щелочных пород. Последние относятся к интрузивам центрального типа и имеют в плане изометрическую или овальную формы, часто обладают концентрическим строением и вертикальной зональностью (которое проявляется только с глубиной в 5—10 км), отражающей многофазность их образования. Строение массивов характеризуется большой сложностью. На нижних горизонтах преобладают перидотиты, пироксениты, ийолиты и уртиты, а в верхах — нефелиновые и щелочные сиениты, которые формируются обычно в перечисленной последовательности, т. е. от ультраосновных разностей к щелочным. Карбонаты являются наиболее поздними производными этих комплексов.

Размеры массивов изменяются в очень широких пределах, от первых квадратных километров до десятков и первых сотен квадратных километров. Наиболее крупные карбонатитовые залежи располагаются во внутренних частях интрузивов и могут достигать размеров нескольких километров в поперечном сечении.

В большинстве карбонатитовых массивов выделяется несколько минеральных типов карбонатитов, сформированных в различные стадии карбонатитового процесса. Промышленными ниобиевыми рудами являются чаще всего кальцитовые карбонаты, содержащие вкрапленность пирохлора в ассоциации с гатчетолитом, баделленом, циркелитом, апатитом, магнетитом и пирротинном, а из нерудных минералов — с флогопитом. В анкеритовых или сидеритовых карбонатитах более поздних стадий часто содержатся промышленные концентрации редкоземельных минералов — паризита и бастнезита, которые сопровождаются в больших или меньших количествах монацитом, флюоритом, пиритом, сфалеритом, галенитом, альбитом и гематитом.

Карбонатитовые тела имеют чаще всего трубообразную или воронкообразную форму от десятков до сотен метров и более в поперечном сечении. Они отличаются сложным внутренним строением и хорошей выдержанностью на глубину (до нескольких километров). Внутреннее строение карбонатитовых массивов сложное и представляет сочетание разновозрастных карбонатитовых тел кольцевой, серповидной и дайкоподобной форм.

Распределение рудных минералов внутри карбонатитовых тел неравномерное, часто полосчатое, пятнистое или брекчиевидное на фоне общей тонкозернистой и равномерной вкрапленности. По данным изучения минерального состава выделяются различные технологические сорта ниобиевых и редкоземельных руд, которые подсчитываются в самостоятельных промышленных контурах.

Содержание пятиокиси ниобия в богатых сортах руд достигает 0,4—0,7 %, а в рядовых рудах колеблется в пределах от 0,1 до 0,4 %. Средние содержания редкоземельных элементов цериевой группы могут достигать целых процентов.

В коре выветривания содержание пятиокиси ниобия резко возрастает и достигает 2 % и более, а пятиокиси фосфора 11—12 %.

В контурах промышленного оруденения встречаются пустые участки и блоки, представляющие собой ксенолиты интрузивных пород и безрудные участки карбонатитов, а также участки некондиционных руд. Выделение и оконтуривание рудных тел возможно только на основании сплошного опробования по заданному минимальному среднему промышленному содержанию.

При разработке редкоземельных карбонатитовых тел в полях развития пирохлоровых карбонатитов могут быть получены значительные запасы редких земель цериевой группы, содержащихся главным образом в бастнезите и паризите. Запасы пирохлора в карбонатитовых месторождениях измеряются многими сотнями тысяч тонн пятиокиси ниобия, что позволяет оценивать их как весьма крупные.

Кроме того следует отметить, что в корях выветривания, развивающихся по карбонатитам, содержание всех полезных компонентов резко увеличивается и, помимо ниобия, важным компонентом руд в них является фосфор. Все карбонатитовые месторождения фосфорно-ниобиевые.

В последние годы в пределах зон глубинных разломов на древних щитах выявлены линейные тела карбонатитов, непосредственно не связанные с ультраосновными-щелочными породами и располагающиеся среди мощных зон фенатизации гнейсов.

VII. Редкометалльные агпайтовые нефелиновые сиениты [6, 30, 36]. Эти магматические месторождения характеризуются появлением комплексного редкометалльного сырья. В рудах концентрируются редкие земли, ниобий, тантал, цирконий, гафний, стронций, галлий и радиоактивные металлы. Месторождения располагаются среди палеозойских сильно дифференцированных стратифицированных интрузивов щелочных и ультращелочных пород центрального типа, прорывающих древние докембрийские образования. В составе месторождений этого типа выделяется (Гинзбург А. И., 1980 г.) формация лопаритоносных стратифицированных агпайтовых нефелиновых сиенитов (фойяитов, луавритов).

Месторождения лопаритоносных луавритов, уртитов, фойяитов и малинитов залегают согласно с вмещающими породами, имеют пластообразную форму и полого падают под углами в несколько градусов к центру интрузивного массива. Своеобразной особенностью этих магматических пород является их исключительно отчетливая расслоенность. Отдельные горизонты отличаются друг от друга петрографическим составом и представлены щелочными породами ийолит-уртит-луаврит-малинитового ряда. Отдельные петрографические разновидности расслоенных пород прослеживаются на расстояниях, измеряемых километрами, и обнаруживают исключительную выдержанность по простиранию.

Полезным минералом в месторождениях лопаритоносных луавритов, уртитов, фойяитов и малинитов является лопарит, входящий в качестве акцессорного минерала во все петрографические разновидности пород, но образующий промышленные концентрации только в породах фойяитового и особенно малинитового состава. В пределах некоторых горизонтов этих пород лопарит по существу является породообразующим минералом.

Лопарит образует в рудных телах очень мелкую, но весьма равномерную вкрапленность. Средние содержания лопарита в рудах колеблются от 6 до 20 % при явно более богатых его содержаниях в нижних частях залежей. Наиболее богатые горизонты отличаются небольшими мощностями и легко выделяются при геологическом картировании. Кристаллы лопарита

имеют размер 0,2—0,6 мм, реже 1—2 мм. В лопарите содержится от 30 до 33 % суммы окислов цериевых земель и до 0,7 % пентаоксида ниобия. Среди других минералов, содержащих редкие земли, лопарит отличается наиболее цериевым составом лантанондов и постоянством их отношения.

Выделение и оконтуривание рудных залежей возможно на основании детального картирования разрезов и выделения рудоносных горизонтов.

Добыча руд в лопаритоносных ультраосновных щелочных породах ведется высокопроизводительными системами подземной разработки. Обогащение лопаритовых руд производится гравитационными методами с последующей доводкой концентратов, из которых попутно с ниобием могут извлекаться редкие земли, тантал и титан.

VIII. Прибрежно-морские, дельтовые и аллювиальные цирконные, монацитовые, реже ксенотимовые и фергусонит-эвксенитовые россыпи. До недавнего прошлого этот промышленный тип месторождений практически был единственным источником получения циркония и редких земель. Среди них главная роль принадлежит прибрежно-морским монацит-циркон-ильменитовым и древнеаллювиальным монацитовым россыпям [6, 18]. Россыпи других редкоземельных минералов (ксенотима, фергусонита и эвксенита) резко уступают монацитовым как по распространенности, так и по масштабам запасов полезных минералов.

Источниками образования циркона и монацита и сопровождающих их рудных минералов в областях размыва и сноса являются кислые изверженные или метаморфические породы, чаще всего граниты с повышенной щелочностью, мигматиты или гнейсы. Образованию богатых россыпей способствует влажный тропический и субтропический климат.

По условиям образования и по минеральному составу эти россыпи отличаются от россыпей золота и образуют особую группу монацитовых, цирконовых и ильменитовых россыпей. В рудоносных песках этой группы содержится характерная ассоциация промышленно ценных минералов с плотностью порядка 3,5—5: циркон, ильменит, монацит и рутил, реже лейкоксен и ксенотим. В зависимости от состава материнских пород и условий образования россыпей в составе шлихов преобладают те или иные минеральные комплексы.

Содержание монацита в шлихах существенно редкоземельно-ториевых месторождений достигает 50—60 % при содержании циркона от 5 до 20 % и ильменита от 10 до 30 %. При разработках таких россыпей главным продуктом является монацит, а циркон и ильменит добываются как сопутствующие компоненты.

При денудации циркононосных массивов гранитов, песчаников, сланцев или древних осадочных пород в составе шлихов рос-

сыпных месторождений преобладает циркон, содержание которого может достигать 40—50 %. Такие россыпи представляют собой основной промышленный тип месторождений циркониевых руд, при разработке которых попутно извлекаются монацит и ильменит.

Морские и древнеаллювиальные россыпи, содержащие в шлихах до 60—80 % ильменита и рутила, являются основными источниками получения титана, попутно с которым извлекаются некоторые количества монацита и циркона.

Таким образом, россыпные месторождения монацита, циркона и ильменита отличаются друг от друга в основном количественным соотношением полезных минералов в шлихе.

Большинство морских и древнеаллювиальных россыпей разрабатывается открытыми способами с раздельной или сплошной выемкой рудоносных песков. При раздельной разработке, в зависимости от геологических и горнотехнических условий эксплуатации, применяются бульдозерный, скреперный, экскаваторный или комбинированные способы. При сплошной выемке основными способами разработки являются: дражный, гидравлический, гидромеханический и экскаваторный. Древние погребенные россыпи, а также аллювиальные россыпи с большой мощностью торфов (более 10—12 м) иногда разрабатываются подземным способом.

Добытые рудоносные пески подвергаются предварительному механическому обогащению с целью получения монацитовых и других концентратов. Монацитовые концентраты содержат до 90 % и более монацита.

Среди россыпных месторождений редкоземельного сырья главная роль в мировой промышленности принадлежит современным прибрежно-морским и дельтовым россыпям.

Для морских россыпей весьма типичны тонкозернистость и высокая степень отсортированности рудных песков с преобладанием фракции менее 0,15 мм. Мощности рудных песков обычно небольшие, в среднем 0,4—0,6 м, однако после штормовых сезонов на отработанных участках наблюдается образование новых богатых россыпей, причем для такого обогащения достаточно нескольких лет.

Полезные минералы распределяются в толще рудоносного слоя неравномерно, образуя обедненные участки и невыдержанные по простиранию обогащенные струи. Залежи рудных песков отличаются более или менее выдержанной шириной и неровной слабоволнистой поверхностью ложного плотика.

Наиболее богатые монацитовые участки россыпей располагаются вблизи речных дельт и характеризуются содержаниями монацита в десятки, а иногда и в сотни килограммов на 1 м³ песков. Запасы монацита в россыпных месторождениях прибрежно-морского типа достигают сотен тысяч и миллионов тонн.

Значительная часть современных запасов монацита (и циркона) сосредоточена в древних прибрежно-морских россыпях, которые по своему геологическому строению существенно не отличаются от современных. В них рудные минералы также приурочены к бывшей прибрежной полосе и образуют обогащенные прослои и линзы, сливающиеся в рудные валы в полосах древних волноприбойных зон. Рудовмещающими породами обычно являются мелкозернистые, хорошо отсортированные кварцевые пески с горизонтальной или слабой косой слоистостью. Зерна рудных минералов, как правило, мельче, чем зерна кварца, и измеряются сотыми долями миллиметра в поперечнике. В древних россыпях морского происхождения верхние границы рудных пластов часто не совпадают с литологическими границами перекрывающих их торфов и определяются исключительно по данным опробования.

Большинство современных и древних морских россыпей обладают сложным строением вследствие струйчатого расположения и невыдержанного содержания полезных минералов и изменчивой мощности отдельных рудных залежей.

Аллювиальные и древнеаллювиальные россыпи отличаются значительно меньшими запасами, но среди них встречаются месторождения редких земель не только цериевой, но и иттриевой групп. По сравнению с большинством прибрежно-морских россыпей они содержат меньше монацита и других полезных минералов — только сотни граммов или первые килограммы на 1 м³.

Кроме перечисленных промышленных типов редкометалльных месторождений значительная часть редких земель добывается из урановых месторождений, а руды других редких металлов как побочный продукт из месторождений олова, вольфрама, молибдена и других металлов.

§ 2. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Применительно к урановым месторождениям группировки их промышленных типов были предложены Д. Я. Суражским и А. Б. Кажданом [18, 39].

По формационному признаку выделяется 11 ураново-рудных формаций, каждая из которых соответствует промышленному типу урановых месторождений.

Месторождения I, II и III промтипов располагаются в фундаментах древних платформ, месторождения IV, V и VI промтипов — в структурах складчатых областей, месторождения VII, VIII, IX и X промтипов — в структурах фанерозойских активизированных областей, а месторождения XI промтипа — в пределах молодых платформ.

I. Крупные месторождения древних ураноносных конгломератов известны только в двух районах мира. Продуктивные толщи залегают в базальных горизонтах метаморфизованных нижнепротерозойских кластогенных отложений и характеризуются ритмичным многоярусным строением. Пласты рудоносных конгломератов с пирит-серицитовым цементом и галькой преимущественно кварцевого состава чередуются в разрезах с песчаниками (кварцитами), граувакками и сланцами [27]. Большинство исследователей рассматривает ураноносные конгломераты как метаморфизованные древние россыпи, сформированные в условиях бескислородной атмосферы в период времени от 2,7 до 2,2 млрд. лет назад. Выделяется два фациальных типа ураноносных конгломератов:

— золото-урановые мелкогалечные кварцевые конгломераты в краевых прогибах протогеосинклиналей;

— браннеритсодержащие конгломераты и аркозы в краевых субплатформенных прогибах типа авлакогенов.

Рудоносные пласты и горизонты выдерживаются по падению и по простиранию на большие расстояния и характеризуются постоянством минерального состава руд. Ни в одном из месторождений этого типа не установлено связей оруденения с тектоническими разломами и магматизмом.

Главным рудным минералом является пирит, количество которого доходит до 20 % от всей массы цемента. В заметных количествах в цементе присутствуют типичные для россыпных месторождений хромит, монацит, ильменит, циркон, рутил, эвксенит, ксенотим и реже касситерит. В конгломератах первого типа в промышленных количествах содержится золото. Урановые минералы представлены уранинитом, тухолитом или браннеритом.

Внутреннее строение рудных залежей сложно и непостоянно. По существу, они состоят из многочисленных мелких рудоносных линз, которые переслаиваются с безрудными кварцитами и выклиниваются на коротких расстояниях. Выделение и оконтуривание рудных залежей производится по заданному минимальному содержанию с включением в контуры промышленного оруденения маломощных безрудных прослоев. Содержание урана в конгломератах первого фациального типа не превышает сотых долей процента, а в конгломератах второго типа достигают одной десятой процента. Наиболее высокие содержания тяготеют к лежащим бокам пластов. Значительные колебания в содержаниях связаны с чередованием мелких относительно богатых линз и прослоев с убогим оруденением и практически пустыми породами, что обеспечивает заметную радиометрическую контрастность руд.

Мощности залежей измеряются первыми метрами, однако в разрезах продуктивных толщ обычно содержится несколько рудных залежей.

Разработка ураноносных конгломератов проводится как открытым, так и высокопроизводительными подземными способами с радиометрической сортировкой руд в забоях или на поверхности.

Промышленное значение месторождений этого типа весьма велико, так как в них содержится около одной трети мировых запасов урана капиталистических стран. Отдельные месторождения характеризуются крупными масштабами оруденения.

II. Докембрийские среднетемпературные ураноносные альбититы принадлежат к числу самых древних эндогенных урановых месторождений. Их формирование связано с периодом ранней протоактивизации эпиархейских платформ, а абсолютный возраст составляет примерно 1,6 млрд. лет. Месторождения этого типа залегают в глубокометаморфизованных докембрийских породах, часто переработанных процессами ультраметаморфизма [27, 28, 35].

Рудные залежи и месторождения окружены ореолами щелочных среднетемпературных натровых метасоматитов, развитие которых контролируется системами глубинных разломов и сопряженными с ними разрывными нарушениями. Руды отличаются тонковкрапленным строением и сравнительно сложным, часто зональным составом рудообразующих минералов-уранотитанатов, урановых силикатов, уранинита и настурана.

В зависимости от условий залегания, характера метасоматитов, состава вмещающих пород и руд выделяются две субформации:

- железо-урановые натрово-карбонатные метасоматиты;
- собственно урановые натровые метасоматиты.

Месторождения первой субформации представлены довольно крупными рудными телами, залегающими в метаморфических породах. Положение рудных залежей определяется главным образом элементами складчатой тектоники и благоприятным составом вмещающих пород. Тектонические нарушения играют в большинстве случаев роль экранов. По минеральному составу среди месторождений этого типа можно выделить собственно урановые и железо-урановые месторождения.

В собственно урановых месторождениях руды представлены в основном настураном с небольшим количеством магнетита, пирротина, гематита, сульфидов, цинка, свинца и мышьяка.

В составе руд железо-уранового типа преобладают магнетит, гематит, щелочной пироксен и щелочной амфибол, в заметных количествах встречаются кварц, хлорит, карбонаты, в незначительных — сульфиды железа, меди, свинца и других металлов. Урановая минерализация представлена уранинитом и силикатами урана. С глубиной появляются браннерит, малакон и урансодержащий апатит. По морфологическим особенностям различаются: внутриформационные пластообразные тела в участках центриклинального замыкания синклиналей или на флек-

сурообразных перегибах их крыльев и мощные пласто- и штокообразные залежи в пологих изгибах складок. Они достигают крупных размеров по падению и простираются при мощностях до 10 м и более. Контуры рудных тел с вмещающими породами нечеткие и устанавливаются только на основании сплошного опробования.

Месторождения собственно урано-натровой субформации располагаются в широких эндоконтактных зонах порфировидных гранитов; в участках сложного строения ультраметаморфических пород, представленных мигматитами, пегматоидными образованиями и гнейсами. В локализации наиболее крупных рудовмещающих зон натровых метасоматитов решающее значение имеют системы сопряженных долгоживущих разломов, региональные изгибы мощных милонитовых зон, клиновидные блоки и места сочленений более мелких тектонических нарушений. Рудные залежи располагаются во внутренних зонах натровых метасоматитов в участках повышенного постальбитового катаклаза и гетерогенного строения. Они характеризуются умеренной мощностью, сложными ветвящимися уплощенными линзо- или столбообразными формами и ориентированы согласно с элементами слоистости (сланцеватости) вмещающих пород. Руды отличаются сложным комплексом урановых минералов (уранотитанаты, уранинит, настуран, коффинит, малакон), нечеткими контактами с вмещающими породами, рядовым и сравнительно равномерным содержанием урана.

Месторождения ураноносных альбитов разрабатываются высокопроизводительными системами, а их руды обладают хорошими технологическими свойствами.

III. К промышленному типу ураноносных карбонатно-магнетитовых метасоматитов относятся недавно обнаруженные урановые месторождения за рубежом, наиболее полно охарактеризованные в отечественной литературе Н. П. Лавровым и В. Л. Барсуковым (1979 г.). По мнению упомянутых авторов, эти месторождения уникальны по составу руд и окорудных метасоматитов, запасам урана, геологическому положению, структуре, возрастным и пространственным соотношениям с орогенными и платформенными магматическими породами. Они залегают в интенсивно складчатых раннепротерозойских породах древних геосинклинальных формаций непосредственно под покровом платформенных отложений среднего протерозоя. В верхней части разреза рудовмещающей толщи породы метаморфизованы в фации зеленых сланцев. Амфиболитовые, полевошпатовые и слюдяные сланцы перемежаются с горизонтами доломитов и углеродистых (графитовых) сланцев, к которым пространственно тяготеют стратиформные залежи урановых руд. Сложные по форме, часто многоярусные линзо- или пластоподобные рудные залежи окружены ореолами интенсивно доломитизированных и хлоритизированных пород. Ореолы метасо-

матитов контролируются слоистостью и составом вмещающих пород, послынейными межформационными и крутыми поперечными тектоническими нарушениями. Первичные руды представлены настураном или уранинитом, содержат постоянную примесь самородного золота и отличаются благоприятными технологическими свойствами и высокими концентрациями урана.

IV. Низкотемпературные ураноносные натровые метасоматиты развиты в пределах крупных геоантиклинальных блоков, в пространственной связи с проявлениями многофазного посторогенного гранитоидного магматизма и вулканогенно-интрузивных комплексов андезит-диоритовой формации. Рудоносные площади тяготеют к центральным частям геосинклинальных блоков, располагаясь в обрамлении устойчивых поднятий в образованиях нижнего и среднего ярусов геосинклинального структурного этапа или в породах кристаллического фундамента. Их положение контролируется системами глубинных разломов, разделяющих геоблоки с различной направленностью тектонических движений. Рудные поля и крупные месторождения располагаются в узлах пересечения глубинных разломов нарушениями других направлений, на участках повышенной и длительной мобильности в тесной связи с зонами предрудных низкотемпературных натровых метасоматитов, которые по предложению Б. И. Омеляненко (1974 г.), получили название эйситов. В зависимости от состава вмещающих пород выделяются эйситы, формирующиеся в условиях низкой и высокой активности фосфора.

Наиболее широко распространены альбитовая, кварц-альбитовая, карбонатно-альбитовая и хлорит-альбитовая фации низкотемпературных натровых метасоматитов, образующих субформацию ураноносных эйситов в туфогенно-осадочных породах флишовой или аспидной формаций. В породах, резко недосыщенных глиноземом, образуются апатит-альбитовые фации эйситов, а в связи с ними — месторождения апатит-ураноносной субформации в породах вулканогенно-карбонатного состава.

Месторождения ураноносных эйситов характеризуются разнообразной морфологией рудных тел — от согласных пластообразных до линзо- и штокообразных, тонковкрапленным строением и, как правило, малосульфидным, но сложным минеральным составом руд. В рудах первой субформации ведущая роль принадлежит коффиниту, ураниниту и настурану, часто в ассоциации с сульфидами железа и молибдена, иногда с примесью ураноносного апатита. В составе руд апатит-ураноносной субформации преобладают урансодержащий апатит, аршиновит и настуран, иногда с примесью тория и редких земель. Одна часть месторождений этой субформации часто описывается как апатит-урановые месторождения в палеовулканах и карбонатно-терригенных отложениях, а другая — как молибден-ура-

новые месторождения в палеовулканах и экзоконтактах малых интрузий.

Ураноносные эйситы обладают заметной радиометрической контрастностью, а иногда являются высококонтрастными.

Среднее содержание урана в контурах промышленного оруденения измеряется первыми десятками долями процента, пятиокиси фосфора — целыми процентами, содержание молибдена колеблется от сотых до десятых долей процента. Путем радиометрической сортировки руд в забоях или на поверхности часто удается получить обогащенный продукт с содержанием до последних десятых долей процента урана. Руды хорошо поддаются гидрометаллургической переработке кислотным способом.

V. **Ураноносные березиты** приурочены в основном к крупным геосинклинальным блокам многогеосинклинальных складчатых областей с неглубоким гранитным, терригенно-сланцевым и реже терригенно-флишевым основанием. Рудоносные площади тяготеют к наиболее мобильным окраинам геосинклинальных блоков с проявлениями многофазного постороженного магматизма андезит-базальтовой и липаритовой формаций. Основная роль в пространственном размещении многофазных магматических метасоматических и рудных образований принадлежит крутопадающим глубинным разломам и сопряженным с ними региональным тектоническим нарушениям. Рудные залежи, весьма сложные по форме и строению, часто контролируются контактами экструзивных куполов, субвулканических интрузивов и палеовулканических аппаратов в сочетании с системами рудовмещающих трещинных структур. Вдоль этих же структурных элементов вокруг рудных скоплений развиваются ореолы березитизированных метасоматитов.

В зависимости от состава вмещающих пород ураноносные березиты разделяются на два фациальных типа:

— ураноносные березиты в вулканогенных породах липарит-гранитной вулcano-плутонической формации,

— ураноносные березиты в туфогенно-осадочных породах флишеидной формации.

Месторождения первого фациального типа пользуются более широким развитием. Для них характерны кварц-серицитовые и кварц-калишпат-серицитовые фации березитов и большее разнообразие морфологических типов залежей. Среди месторождений второго фациального типа преобладают кварц-серицит-анкеритовые и кварц-серицит-альбитовые фации березитов.

Для ураноносных березитов типичны вкрапленно-прожилковое строение и сульфидно-настурановый состав руд часто с промышленными концентрациями молибдена. Многие из месторождений этой формации описываются как молибден-урановые месторождения в субвулканических интрузивах, дайковых поясах, трубках взрыва и неках [9, 35].

Рудные тела не имеют четких контактов с вмещающими породами и контуры их устанавливаются только по данным сплошного опробования. Размеры рудных тел измеряются последними десятками — первыми сотнями метров по падению и простиранию, при мощностях в метры и первые десятки метров. Их морфологические особенности весьма разнообразны и зависят от тех элементов геологического строения, которыми контролируется локализация промышленного оруденения. Строение рудных тел характеризуется большой сложностью вследствие чередования рудных участков с пустыми участками, что обуславливает высокую радиометрическую контрастность руд, несмотря на рядовые и средние содержания урана в рудах. Разработка месторождений ураноносных березитов возможна открытым и подземным способами, а извлечение урана из руд — способами кислотного выщелачивания.

VI. **Жильные месторождения кварц-карбонатной настурановой формации** располагаются в краевых или центральных частях срединных массивов, как правило, в контактовых зонах послескладчатых гранитоидных интрузивов, положение которых определяется глубинными разломами, поперечными к простиранию складчатых поясов [19].

Месторождения отличаются трещинно-жильным типом рудных тел, своеобразным четковидным обликом жил, зональными текстурами выполнения пустот и почти полным отсутствием макроскопически заметных изменений вмещающих пород, за исключением слабо проявленной березитизации и узких призальбандовых зон гематизации. Жилы состоят из совокупностей плоских рудных линз и обладают сложным прерывистым строением. Наиболее продуктивные участки жил, в пределах которых отдельные линзы группируются в рудные столбы, контролируются структурами экранирования и литологическим составом вмещающих пород. Рудные линзы состоят из колломорфных скоплений настурана, кварца и карбоната в ассоциации с незначительным количеством сульфидов. Руды отличаются высоким качеством. Наряду с высокопроцентными штучными рудами используются рядовые товарные руды, которые хорошо поддаются предварительному гравитационному обогащению.

Переработка руд производится обычно содовым методом с последующим извлечением урана из растворов с помощью ионообменных смол.

Разработка жильных месторождений ведется в подавляющем большинстве случаев подземными способами с селективной выемкой богатых штучных руд.

Несмотря на крайне сложное строение ураноносных жил, низкие коэффициенты продуктивности и малые мощности рудных линз, этот промышленный тип до сих пор является одним из важных поставщиков высококачественных урановых руд.

VII. Ураноносные калиевые метасоматиты располагаются в глубокометаморфизованных породах кристаллических фундаментов областей автономной тектономагматической активизации, в районах развития магматогенных пород платформенной формации — сиенитов и нефелиновых сиенитов. Наиболее значительные из них связаны с зонами древних глубинных разломов, омоложенных в период тектоно-магматической активизации. Жилоподобные и уплощенные столбообразные рудные тела залегают непосредственно в сложно построенных зонах древних разломов и окаймляются ореолами зональных пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов [35].

Браннеритовые руды этих месторождений отличаются сложным минеральным составом, постоянной примесью дисперсного золота и брекчиевыми текстурами с развитием тонковкрапленной урановой минерализации в цементе мелкообломочных брекчий.

Средние содержания урана в рудах составляют последние сотые — первые десятые процента, считая на всю рудную массу в контурах промышленного оруденения.

Часто руды характеризуются полосчатыми, брекчиевидными, вкрапленными, пятнистыми и сетчатыми текстурами. Неравномерное распределение рудной минерализации в контурах промышленного оруденения, чередование их с участками пустых пород или некондиционных руд обеспечивает их высокую радиометрическую контрастность, что позволяет применять при разработке таких месторождений методы радиометрической сортировки. Руды этих месторождений хорошо поддаются гидрометаллургической переработке, чаще всего с применением кислотного выщелачивания.

По своим морфологическим особенностям рудные залежи приближаются к жилообразным, реже штокообразным телам, контуры которых устанавливаются исключительно по данным опробования. Размеры и формы рудных залежей находятся в прямой зависимости от установленных для оконтуривания кондиционных требований.

Крупные залежи урановых руд могут обрабатываться высокопроизводительными системами горных работ.

VIII. Ураноносные аргиллизиты в отложениях карбонатной углеродисто-кремнистой формации приурочены к периферическим блокам областей тектоно-магматической активизации, фундамент которых сложен дислоцированными вулканогенно-осадочными образованиями многоэпиклинального типа. Рудные концентрации связаны с интенсивно складчатыми и тектоническими проработанными толщами черных углисто-глинистых и углисто-кремнистых сланцев с повышенными содержаниями урана, молибдена, ванадия и некоторых других металлов. Рудные залежи, сложные по морфологии и строению, разделяются на стратиформные пластоподобные, приуроченные к участкам

относительно слабого развития послескладчатой тектоники и на секущие, штокверкоподобные и столбообразные залежи, связанные с участками интенсивного развития послескладчатых тектонических нарушений. Согласно залежи слагаются тонковкрапленными сульфидно-настурановыми рудами, а в секущих залежах преобладают прожилково-вкрапленные руды с крайне неравномерным размещением скоплений богатых руд [27].

Главным и единственным полезным компонентом руд является уран. Формы и размеры рудных скоплений внутри продуктивных горизонтов чрезвычайно разнообразны, в связи с чем морфологические особенности промышленных рудных залежей определяются кондициями, принятыми при оконтуривании и подсчете запасов. Несмотря на четкие контакты продуктивных горизонтов, контуры промышленных рудных залежей могут быть установлены только путем сплошного опробования, так как во многих случаях они не распространяются на всю мощность горизонта, а залегают внутри него, частично переходят в подстилающие, реже в перекрывающие образования.

Внутреннее строение оконтуренных рудных залежей весьма сложное и характеризуется чередованием рудных участков с участками некондиционных руд и практически пустых пород. Руды обладают радиометрической контрастностью, что позволяет в процессе их отработки отделять практически пустые породы от кондиционных руд.

Разработка верхних горизонтов месторождений может осуществляться открытым способом, а нижних горизонтов — высокопроизводительными системами подземной отработки.

IX. Ураноносные аргиллизиты в вулканогенных формациях [9, 35] приурочены к периферическим блокам областей автономной фанерозойской тектоно-магматической активизации и залегают в породах структурного этажа, сформированного в этот период. Рудоносные площади располагаются в крупных вулканотектонических депрессионных структурах кальдерного типа, развиты в участках пересечения или сопряжения глубинных разломов на существенно гранитном или гранито-гнейсовом доактивизационном основании. Месторождения связаны с проявлениями магматизма базальт-диоритовой вулканогенной формации. Рудные залежи приурочены к пологозалегающим слоистым толщам осадочно-вулканогенных пород и частично к породам гранитного фундамента. Оруденение контролируется системой сквозных крутопадающих нарушений, послойными срывами, сопряженными с ними трещинами оперения и зонами интенсивной трещиноватости в горизонтах наиболее хрупких эффузивных пород. Характерно разнообразие морфологических типов рудных залежей, среди которых наиболее существенное значение имеют штокверкоподобные залежи и сложные системы жилоподобных тел. Вдоль рудоконтролирующих и рудовмещающих разрывов прослеживаются мощные ореолы предрудной

аргиллизации вмещающих пород в виде зональных ореолов с существенно гидрослюдистыми внутренними зонами и широким проявлением процессов околорудной гематитизации. Главным урановым минералом является настуран, в меньшей степени коффинит, уранинит и титанаты урана. Состав руд сульфидно-флюорит-урановый, причем значения сопутствующего компонента обычно достигает молибденит (иордизит).

Средние содержания урана в рудах измеряются первыми десятиями долями процента. Руды обладают отчетливой радиометрической контрастностью и хорошими технологическими свойствами. Месторождения этого типа разрабатываются открытыми и подземными способами.

Х. Ураноносные песчаники и угленосные отложения относятся к самому перспективному промышленному типу урановых месторождений. Они широко известны на всех континентах в отложениях верхних молассовидных формаций, выполняющих посторогенные межгорные и предгорные впадины. Все ураноносные песчаники и угленосные отложения обладают рядом общих характерных особенностей, что позволяет рассматривать их как фациальные типы одной урановорудной формации. Среди них выделяется четыре фациальных типа:

- собственно ураноносные песчаники в сероцветных формациях,
- уранобитумные месторождения,
- медно-ванадий-урановые месторождения в красно- и пестроцветных формациях,
- ураноносные угли в песчано-глинистых лимнических формациях.

Все эти месторождения связаны с областями фанерозойской активизации, располагаются в пределах молодых эпиплатформенных орогенных поясов и приурочены к аллювиальным, лимническим или дельтовым фациям верхних молассовидных или платформенных формаций. Рудовмещающие терригенные образования всегда обогащены органическим веществом (от углефицированного детрита до погребенных растительных остатков), продуктами окисления нефтей или другими углеводородными соединениями. Рудные скопления сосредоточены в наиболее проницаемых породах, ограниченных горизонтами непроницаемых отложений, и пространственно связаны с зонами пластового окисления или ореолами обеленных аргиллизированных пород, особенно в участках, осложненных разрывными нарушениями. Содержания урана в рудах варьируют в широких пределах — от первых сотых до последних десятых долей процента. Месторождения принадлежат к стратиформному типу с пластолинзо- или роллообразными залежами, часто осложненными в результате переотложений руд по трещинам и разрывам [18, 27, 28, 35].

Месторождения собственно ураноносных песчаников в сероцветных терригенных формациях тяготеют к краевым частям наложенных впадин без проявлений магматической деятельности. Положение рудных залежей контролируется эпигенетической гидрогенной зональностью в местах выклинивания пластовых зон окисления. Роллообразные стратиформные рудные залежи с тонковкрапленным черневым (в меньшей степени, коффинитовым и настурановым) оруденением обычно характеризуются многоярусным строением. Кроме урана в рудах обычно присутствуют селен и молибден, как правило, в непромышленных концентрациях.

Уранобитумные месторождения известны как в красноцветных, так и в сероцветных терригенных формациях в пределах или по периферии нефтегазоносных бассейнов часто в раскрытых (окисленных) нефтеносных структурах. Рудные залежи приурочены к ореолам битуминизированных пород и характеризуются в основном существенно уранобитумным составом руд. На некоторых из этих месторождений наблюдался контроль купольными структурами или структурами обрушения. Однако наиболее крупные залежи имеют обычно пласто- и линзообразные формы, залегают в сероцветных песчаниках и часто переходят в роллообразные залежи на нижних горизонтах. Они сложены коффинитом в тесном сростании с органическим (битуминозным) веществом и окружены ореолами светлоокрашенных пород. Более поздние рудные тела сложных форм развиты на участках интенсивной трещиноватости в красноцветных отложениях, гипсометрически ниже стратиформных залежей.

Медно-ванадий-урановые месторождения в песчаниках красно- и пестроцветных формаций описаны в литературе как «колорадский» тип. Они связаны с областями мезозойской активизации с отчетливыми проявлениями магматизма этого периода. Участки продуктивных отложений располагаются во внутренних зонах обеленных аргиллизированных пород, рудные залежи обладают линзо- или пластоподобными формами, а руды (в отличие от остальных субформаций) отличаются сложным минеральным составом. Кроме урановых минералов (коффинита, настурана и урановых черней) в них постоянно присутствуют ванадиевые слюдки и сульфиды меди, часто в промышленных концентрациях.

Ураноносные угли в песчано-глинистых лимнических формациях отличаются слабой степенью углефикации. Угленосные толщи залегают непосредственно на складчатом фундаменте и представлены фациально неустойчивыми разрезами песчаников, алевролитов, глин и высокозольных бурых углей или лигнитов. Рудные залежи располагаются в кровлях угольных пластов и характеризуются незначительной мощностью. Оруденение проявляется многоярусно и тесно связано с зонами пластового окисления. Ураноносные угли

часто ассоциируют с роллообразными залежами ураноносных песчаников и перемежаются с ними. В составе руд преобладают урановые черни, коффинит и ураноорганические соединения.

В последнее время все чаще появляются сведения об ураноносных песчаниках или угленосных отложениях переходного типа, обладающих чертами, свойственными одновременно месторождениям двух и даже более рассмотренных фациальных типов.

Многие месторождения ураноносных песчаников успешно разрабатываются способами подземного выщелачивания, что способствует заметному снижению кондиционных требований к содержанию урана в рудах (до одной сотой процента) и обеспечивает низкую себестоимость готового продукта.

XI. Редкоземельно-ураноносные глины с костными остатками ископаемых рыб. Месторождения этой формации располагаются по окраинам молодых платформ в отложениях мелководных карбонатно-песчано-глинистых формаций с признаками сероводородного заражения. Выдержанные пластовые или линзовидные залежи связаны с определенными стратиграфическими горизонтами литологически благоприятных пород. Фосфатизированные костные остатки ископаемых рыб сцементированы пиритизированным глинистым материалом и характеризуются повышенными содержаниями урана и редких земель в концентрациях, достаточных для целей их промышленного использования [27].

Несмотря на низкое содержание урана в рудах, применение простых и эффективных методов обогащения (в частности, простой гидравлической классификации) позволяет получить концентрат костного детритуса со значительно более высоким содержанием в нем урана и редких земель. Извлечение обоих полезных компонентов из детритусовых концентратов может быть осуществлено гидрометаллургическим путем с попутным использованием фосфора как основы для изготовления минеральных удобрений.

Рудные залежи, связанные с глинами, содержащими рыбные остатки, обычно выдержаны по простиранию на больших площадях. Рудные пласты характеризуются или однородным строением, или же состоят из пачек чередующихся рудных и безрудных прослоев.

Внутреннее строение рудных залежей довольно простое, обычно полосчатое или слоистое, со сплошным оруденением в контурах промышленных запасов. Форма залежей близка к пластообразной с довольно выдержанными мощностями, постепенно уменьшающимися в периферических участках.

Кроме перечисленных промышленных типов урановых месторождений, крупным резервом промышленности являются морские ураноносные сланцы, широко развитые среди нижне-

среднепалеозойских платформенных отложений большинства континентов. Средние содержания урана в сланцах не превышают первых сотых долей процента, площадь распространения продуктивных отложений измеряется сотнями и тысячами квадратных километров. Уран равномерно распределен по всей мощности пласта, которая измеряется обычно одним-двумя метрами. Месторождения морских ураноносных сланцев содержат огромные запасы урановых руд, в несколько раз превышающие общие запасы этого металла во всех других промышленных типах. Однако вследствие убогого содержания урана и трудностей технологической переработки месторождения этого типа в настоящее время не разрабатываются.

Существенным резервом могут оказаться в будущем ураноносные кислые и щелочные породы, описанные в иностранной литературе под названием «урановые порфириновые месторождения», ураноносные карнититовые калькреты (карбонатные породы), ураноносные фосфориты платформенного и геосинклинального типов, а также урансодержащие морские песчаники и известняки. Отдельные месторождения перечисленных типов уже в настоящее время успешно разрабатываются промышленностью.

БЛАГОПРИЯТНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УРАНОВОГО И РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В зависимости от детальности изучения недр для оценки, прогноза, поисков или разведки уранового и редкометального орудений должны использоваться критерии, сопоставимые по масштабам с рудоконтролирующими элементами геологического строения. Это логически вытекает из принципа последовательных приближений при изучении геологического строения и оценки перспектив рудоносности разномасштабных участков недр, а эффективность такого подхода обеспечивается тем, что формирование крупных промышленно-ценных концентраций полезных минералов в конкретных участках земной коры происходит лишь при сочетании благоприятных глобальных, региональных и локальных геологических факторов. Использование геологических поисковых критериев месторождений эффективно лишь в пределах полей, а прогноз рудных полей имеет смысл лишь в пределах рудных узлов. И так далее, вплоть до оценки рудных районов в пределах рудных провинций. За пределами рудоносных участков недр по совокупности геологических поисковых критериев урановых или редкометальных месторождений часто не выявляются даже признаки урановой или редкометальной минерализации, либо обнаруживаются лишь мелкие непромышленные их проявления.

Обычно под термином «рудное месторождение» подразумевается природное скопление руд, которое в количественном и качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии горной технологии и в данных экономических условиях. Однако это широко распространенное определение весьма расплывчато, так как в нем нечетко сформулированы требования к масштабам природных скоплений руд. В горнорудной практике масштабы месторождений, как правило, сопоставляются с масштабами рудников, т. е. самостоятельных производственных единиц горнорудных предприятий. С учетом этого обстоятельства под термином «рудное месторождение» будем понимать такое *природное скопление руд, которое в количественном и качественном отношении может служить минерально-сырьевой базой для строительства самостоятельного участка горнодобывающего предприятия, т. е. рудника.*

По статистическим данным, масштабы месторождений редких и радиоактивных металлов варьируют в широком диапазоне, охватывая локальные участки недр с площадями от долей до десяти квадратных километров и характеризуются самым раз-

нообразным внутренним строением. Наряду с простыми месторождениями, представленными одним или несколькими участками оруденелых пород, широко распространены сложно построенные месторождения, состоящие из систем пространственно обособленных рудоносных зон, залежей и более мелких рудных скоплений различных размеров и продуктивности. При сложном строении месторождений они обычно разделяются на несколько пространственно обособленных участков — продуктивных зон, представляющих собой крупные рудные зоны сплошного строения с вкрапленным или прожилково-вкрапленным оруденением.

Часто помимо компактных продуктивных зон в контурах участков встречаются обособленные мелкие рудные скопления, не имеющие промышленного значения, а в контурах рудных зон выделяются системы пространственно обособленных рудных залежей. Наряду с ними в контурах рудных зон встречаются и многочисленные непромышленные рудные скопления.

Строение отдельных рудных залежей также может быть простым и сложным. В последнем случае в контурах рудных залежей выделяются морфологически обособленные участки и более мелкие локальные рудные образования, разделенные прослоями пустых пород или некондиционных руд.

Результаты статистической обработки огромного фактического материала по большому числу месторождений [9, 23, 38] свидетельствуют о том, что распределение рудных скоплений по их продуктивностям (и размерам) подчиняется определенной закономерности. Основные запасы месторождений (более 70—75 % от суммарных запасов) концентрируются, как правило, на одном (реже двух) участке, в одной или нескольких наиболее крупных залежах. Около четверти суммарных запасов приходится на один-два десятка залежей средних размеров, а в остальных, наиболее мелких залежах и рудных скоплениях, число которых может достигать десятков и даже сотен, содержится лишь несколько процентов от суммарных запасов месторождений. При этом чем меньше масштабы месторождений, тем большая часть их запасов рассеивается по мелким рудным залежам и еще более мелким рудным скоплениям.

В подавляющем большинстве случаев рудные месторождения встречаются не изолированно друг от друга, а группируются в рудные поля, представляющие собой единые в структурном отношении локальные участки земной коры размерами в десятки квадратных километров, объединяющие группы пространственно сближенных рудных месторождений. Помимо отдельных рудных месторождений в общих контурах рудного поля встречаются и более мелкие обособленные рудные скопления, не имеющие промышленного значения.

Группы пространственно сближенных рудных полей, приуроченные к единым структурам земной коры, объединяются в пределах рудных узлов, площади которых достигают нескольких сотен квадратных километров. Помимо рудных полей на территориях рудных узлов рассеяны многочисленные рудопоявления и могут встречаться обособленные мелкие рудные месторождения, не имеющие, как правило, самостоятельного промышленного значения.

Несколько пространственно сближенных рудных узлов, расположенных в сходных геотектонических условиях, образуют в совокупности рудные районы, площади которых измеряются тысячами и первыми десятками тысяч квадратных километров. За контурами рудных узлов, но в пределах рудных районов, встречаются многочисленные изолированные рудопоявления, реже мелкие рудные месторождения, образующие группы рудных скоплений, не имеющие в основном промышленной ценности.

Металлогеническими единицами глобального значения являются рудные провинции, объединяющие группы пространственно сближенных рудных районов и занимающие площади в сотни тысяч квадратных километров и более. Обычно в пределах рудной провинции выделяется несколько рудных районов, хотя основные запасы руд часто приурочены только к одному из них. За контурами рудных районов на территории рудной провинции рассеяны многочисленные рудопоявления, мелкие непромышленные месторождения и их группы, однако их роль в общей структуре запасов практически ничтожна.

Таким образом, для использования системного подхода при прогнозе, поисках и разведках уранового и редкометалльного оруденения может быть использована следующая иерархия структурных уровней:

- рудная провинция (сотни тысяч квадратных километров и более),

- рудный район (тысячи и десятки тысяч квадратных километров),

- рудный узел (сотни квадратных километров),

- рудное поле (десятки квадратных километров),

- рудное месторождение (единицы квадратных километров),

- рудная (продуктивная) зона (десятки гектар),

- рудная (продуктивная) залежь (первые гектары),

- рудное тело или морфологически обособленный участок рудной залежи (доли гектара),

- локальное рудное обособление (десятки, реже первые сотни квадратных метров).

Перечисленные геолого-структурные уровни рудоносных образований земной коры и определяющие их размеры отражают только общую тенденцию к размещению рудных скоплений

в земной коре. Применительно к отдельным регионам и металлогеническим единицам масштабы рудных скоплений и число выделяемых геолого-структурных уровней должны конкретизироваться и корректироваться.

В строении конкретных рудоносных участков недр в зависимости от их природных особенностей число структурных уровней может изменяться от одного-двух до десяти и более. При регламентированном подходе к их выделению число уровней может служить объективной характеристикой сложности внутреннего строения рудных образований.

Полная иерархия всех рудоносных структурных уровней прослеживается только в пределах крупных по масштабам и сложных по строению металлогенических единиц. Это обстоятельство свидетельствует о том, что крупные масштабы оруденения возможны лишь при совпадении благоприятных глобальных, региональных и локальных рудогенерирующих факторов. Их совокупное влияние должно последовательно учитываться при прогнозировании, поисках и оценках оруденения. Отступление от этого принципа или попытки связать несопоставимые по масштабам рудоносные объекты и контролирующие их структуры оказывают резко отрицательное влияние на результаты количественных прогнозов, часто приводят к ошибочным оценкам и выводам.

§ 1. КРИТЕРИИ РУДНЫХ ПРОВИНЦИЙ И РАЙОНОВ

Современная металлогения еще не располагает методами уверенного прогноза наиболее крупных металлогенических подразделений — рудных провинций и районов. Их границы определяются, как правило, только после обобщения результатов геологических съемок и поисков, опыта разведочных и горно-эксплуатационных работ. Однако знание их оценочных критериев позволяет своевременно отбраковывать (или отнести к числу второстепенных) обширные малоперспективные территории с проявлениями уранового или редкометалльного оруденения. В уже выявленных урановорудных провинциях знание региональных критериев ураноносности позволяет уточнить их контуры, обеспечивая тем самым локализацию наиболее перспективных площадей. Это особенно важно потому, что в приповерхностных слоях земной коры повсеместно формируются повышенные концентрации урана, которые легко выявляются современными высокочувствительными поисковыми методами.

В настоящее время установлено, что урановые и редкометалльные рудные провинции развиты только на континентах, а их положение определяется глубинными структурами Земли, охватывающими всю толщу тектоносферы. Границы урановых и редкометалльных провинций часто совпадают с крупными

линеamentами или краевыми швами, глубоко проникающими в верхнюю мантию.

Урановые и редкометальные провинции известны на древних платформах, в складчатых поясах и в областях мезо-кайнозойской тектоно-магматической активизации.

Урановые провинции тяготеют к архейским массивам, представляющим собой остовы древних платформ, часто претерпевшие более позднюю (протерозойскую) гранитизацию и метаморфизм. В пределах складчатых поясов урановые провинции приурочены к областям полициклического геосинклинального развития и пространственно тяготеют к жестким срединным массивам. Часто урановые провинции располагаются на активных окраинах континентов или во внутренних их частях в пределах перигеосинклинальных или интракратонных эпиплатформенных орогенных поясов. Первые из них обычно рассматриваются как области отраженной, а вторые — как области автономной тектоно-магматической активизации, возникающие в результате процессов эпиплатформенного орогенеза или рифтообразования. Некоторые урановые провинции такого рода проявляют тесную пространственную связь с краевыми вулканическими поясами.

К областям глубоко эродированных срединных массивов в пределах древних платформ тяготеют литиеносные, бериллиеносные и танталоносные провинции, в которых господствующим промышленным типом месторождений являются редкометальные пегматиты. В складчатых областях и на активизированных окраинах срединных массивов располагаются бериллиеносные, танталоносные и редкоземельные провинции, в которых широким развитием пользуются редкометальные граниты, альбититы и грейзены. По окраинам древних и молодых платформ в связи с глобальными рифтогенными структурами располагаются редкометальные танталоносные, ниобиевые и редкоземельные провинции с преобладающими карбонатитовыми типами редкометальных месторождений. В субтропической зоне современных платформ располагаются редкометальные провинции, представленные месторождениями россыпного типа.

Все урановые и редкометальные провинции расположены на древнем гранитоидном кристаллическом основании. В их пределах земная кора обладает двух- или трехслойным строением. На древних платформах осадочный слой практически отсутствует, а суммарная мощность земной коры составляет от 50 до 35—40 км, из которых примерно более половины приходится на гранитный слой. Для редкометальных провинций складчатых поясов типично увеличение мощности земной коры до 55—60 км при мощностях осадочного слоя порядка нескольких километров.

Являясь частями планетарных структур, урановые и редкометальные провинции не занимают отчетливого положения

в планетарной металлогенической зональности. Урановые провинции встречаются в пространственной связи с золоторудными, флюоритовыми, медно-молибденовыми и медно-полиметаллическими, а редкометальные — с вольфрам-оловянными рудными провинциями, накладываясь иногда на несколько из них одновременно. Как правило, урановорудные и редкометальные провинции пространственно разобщены.

Важнейшей особенностью последних является тесная взаимосвязь урановорудных или редкометальных проявлений различных формаций, видов и металлогенических эпох.

В пределах одной провинции урановорудные проявления различных формаций могут встречаться в породах кристаллического основания, складчатого фундамента и молодого чехла. На проявления древних металлогенических эпох часто накладываются урановые проявления более поздних периодов, в том числе периодов мезо-кайнозойской тектоно-магматической активизации.

В пределах редкометальных провинций также весьма отчетливо проявляется их металлогеническая специализация. В соответствующих редкометальных провинциях встречаются месторождения и рудопроявления нескольких генетических и промышленных типов. Например, в бериллиеносных провинциях наряду с бериллиевыми пегматитами встречаются бериллиеносные грейзены, скарны и метасоматические флюоритоносные образования с фенакитом и хризобериллом. Определенными редкими элементами обогащаются не только материнские изверженные породы, но также эффузивные и осадочные образования. Кроме того, повышенные концентрации этих элементов устанавливаются и во многих акцессорных минералах.

Строение редкометальных и урановорудных районов определяется структурами литосферы, т. е. земной коры и верхов мантии. По масштабам и положению в структурах рудных провинций они сопоставимы с отдельными структурно-формационными зонами.

В пределах древних платформ урановорудные районы располагаются в зонах сопряжения архейских гранитоидных массивов с ранне- или среднепротерозойскими складчатыми системами или в участках древнего архейского фундамента, охваченных позднепротерозойской гранитизацией. Для таких урановорудных районов характерно практически полное отсутствие верхнего осадочного слоя земной коры, широкое развитие процессов ультраметаморфизма с последующим внедрением магматических пород и других магматических формаций периодов протоактивизации платформ.

В пределах древних срединных массивов в осевых частях антиклинорий в связи с гранитоидными интрузиями зоны краевых разломов располагаются районы развития редкометальных пегматитов. Вмещающие их толщи пород отличаются интенсив-

ным региональным метаморфизмом и принадлежат к различным субфациям амфиболитовой фации метаморфизма.

В геосинклинальных складчатых областях урановорудные районы располагаются в орогенных поднятиях наиболее молодого тектоно-магматического цикла, особенно по их периферии, захватывая краевые зоны сопряженных с ними орогенных прогибов. Они отличаются широким проявлением многократного орогенного и постороннего магматизма в интрузивной, субвулканической и континентальной эффузивной фациях, причем наиболее поздние (предрудные) магматические проявления представлены в большинстве случаев трещинными интрузиями базальтоидных или близких к ним пород.

Строение этих районов и формационные комплексы урановых месторождений определяются геоструктурными особенностями фундамента, на котором формируются орогенные поднятия в прогибы. При заложении последних непосредственно на метаморфизованном кристаллическом фундаменте срединных массивов обычно формируются жильные месторождения кварц-карбонатной настурановой формации. Если же орогенные структуры формируются на геосинклинальном складчатом основании, то в них образуются месторождения низкотемпературных ураноносных альбититов или березитов.

В областях завершенной складчатости, в пределах складчатых поясов полициклического развития, часто в зонах сопряжения срединных массивов или докембрийских выступов с толщами дислоцированных фанерозойских образований располагаются районы развития редкометального оруденения. В зависимости от состава и формационной принадлежности гранитоидных интрузий и вмещающих пород в этих районах развиваются редкометальные альбититы, бериллиеносные грейзены или полевошпатовые метасоматиты.

В связи с процессами мезо-кайнозойской тектоно-магматической активизации в кристаллическом фундаменте древних платформ формируются месторождения ураноносных калиевых метасоматитов, а в породах складчатого фундамента и в отложениях молодых платформ — месторождения ураноносных аргиллизитов, песчаников, углей и глин.

В древних платформах, активизированных главным образом в фанерозое, в связи с проявлениями ультраосновного — щелочного магматизма располагаются районы редкометальных аптантов, а в связи с континентальными рифтогенными структурами — районы редкометальных карбонатитов.

В пределах рудных районов обычно встречаются месторождения нескольких урановорудных или редкометальных формаций, принадлежащих к различным металлогеническим эпохам. Для урановорудных районов весьма характерно развитие формационных комплексов магматических, осадочных и метаморфических пород, первично обогащенных ураном и его спутниками.

Контуры урановорудных районов часто совпадают с очертаниями континентальных глыб или срединных массивов, ограниченных долгоживущими глубинными или подкоровыми разломами типа внутренних швов.

§ 2. ПРОГНОЗНЫЕ КРИТЕРИИ РУДНЫХ УЗЛОВ И ПОЛЕЙ

Строение урановорудных и редкометальных узлов определяется структурами всего разреза земной коры, в частности блоковыми структурами, ограниченными подкоровыми или глубокими коровыми активизированными разломами. Допалеозойские рудные узлы с урановыми месторождениями эндогенного происхождения сложены метаморфическими породами древнего кристаллического фундамента с проявлениями процессов ультраметаморфизма, гранитизации, натрового или карбонатно-магнезиального метасоматоза. Положение рудных узлов определяется участками пересечения региональных изгибов коровых и верхнекоровых разломов, которыми на протяжении длительного периода контролировалось внедрение различных по составу комплексов магматических пород. Рудные узлы чаще тяготеют к периферическим частям рудоносных районов, где ограничивающие их коровые разломы сопрягаются с подкоровыми или пересекают их. Если же они расположены в их центральных частях, то один из сопряженных рудоконтролирующих разломов обычно достигает поверхности Мохоровичича или пересекает ее.

Урановорудные узлы складчатых областей характеризуются близповерхностным залеганием древнего гранитогнейсового или метаморфизованного складчатого фундамента, располагаются по периферии крупных орогенных и посторогенных интрузивных гранитных куполов либо в пределах вулканотектонических структур типа сводовых поднятий или остаточных вулканогенных депрессий. Для них характерно развитие процессов низкотемпературного натрового метасоматоза в образованиях флишовой и других геосинклинальных формаций, либо развитие континентальных вулканогенных образований с широким проявлением процессов березитизации.

Урановорудные узлы в фундаментах активизированных древних платформ сложены глубокометаморфизованными образованиями с отчетливыми признаками диафтореза, часто с проявлениями платформенных щелочных интрузий и связанных с ними процессов калиевого метасоматоза. В активизированных складчатых областях известны урановорудные узлы в отложениях метаморфизованных геосинклинальных формаций с проявлениями процессов аргиллизации.

В активизированных чехлах молодых платформ в краевых зонах орогенных межгорных и предгорных впадин, особенно

вблизи или по периферии нефтегазоносных бассейнов, располагаются урановорудные пояса с месторождениями отчетливо экзогенного (гидрогенного) происхождения. Рудоносные депрессии выполнены отложениями молассоидных формаций и по разломам сопряжены с блоками орогенных поднятий, в строении которых участвуют литолого-фациальные комплексы изверженных или осадочно-метаморфических пород с повышенными содержаниями урана. По масштабам проявления урановорудные пояса сопоставимы с урановорудными узлами. Они формируются в зонах сопряжения блоковых разломов с системами газоносных тектонических нарушений и трещин в свитах и толщах пород с повышенной восстановительной емкостью. Рудовмещающие литолого-фациальные комплексы отличаются контрастными физико-механическими и резко различными фильтрационными свойствами.

Специализированным геохимическим картированием [31] в пределах урановорудных узлов и поясов устанавливаются региональные зоны привноса и выноса щелочей, углекислоты, кремнекислоты и других химических компонентов, отражающих характер предрудных метасоматических изменений вмещающих пород, проявления альбитизации, березитизации, калиевого метасоматоза и аргиллизации, развитие межпластовых зон окисления или обеления пород.

В пределах отдельных рудоносных узлов или поясов встречаются урановые месторождения одного, реже двух промышленных типов (урановорудных формаций). В последнем случае наиболее типично сочетание месторождений эндогенных урановых формаций в кристаллическом или складчатом фундаментах с месторождениями гидрогенного типа в отложениях чехла молодых платформ.

Строение урановорудных и редкометальных полей определяется структурами верхней части земной коры — тектоническими блоками корового и верхнекорового происхождения.

Урановорудные поля располагаются в тектонических узлах на сопряжениях и пересечениях коровых разломов с тектоническими нарушениями различных порядков и ориентировки, развитых преимущественно в осадочном чехле и в верхней части гранитного слоя. Структуры урановорудных полей существенно различаются в рудных узлах древнего кристаллического фундамента, складчатых и активизированных областей.

В пределах древних платформ положение урановорудных полей контролируется системами коровых разломов, осложненных тектоническими нарушениями различных направлений, участками их пересечения и изгибов по простиранию, участками сложного строения и благоприятного литолого-петрографического состава пород с контрастными физико-механическими свойствами, широкими зонами проявления магнезиально-карбонатного или среднетемпературного натрового метасоматоза,

в то время как в складчатых областях основная роль принадлежит широким экзоконтактовым зонам орогенных и посторогенных гранитоидных массивов, субвулканическим интрузивным телам, дайковым поясам или вулкано-тектоническим структурам в неоднородных складчатых толщах благоприятного литолого-петрографического состава в связи со скрытыми («сквозными») коровыми и верхнекоровыми разломами [9]. Часто рудные поля располагаются в линейных или дугообразных зонах, ориентированных вдоль зон тектонических нарушений с повышенными концентрациями щелочей, карбонатов и других химических компонентов, указывающих на развитие процессов предрудного метасоматоза.

Прогнозные критерии урановорудных полей в области тектоно-магматической активизации зависят от их положения в структурных этажах активизированных районов.

В активизированных породах древнего кристаллического фундамента они контролируются системами омоложенных коровых разломов с признаками метасоматоза и диафтореза, а в активизированных складчатых областях тяготеют к краевым зонам наложенных впадин периода тектоно-магматической активизации, участкам интенсивной тектонической переработки складчатых толщ с контрастными физико-механическими свойствами или к площадям проявления гипергенных процессов, особенно аргиллизации пород.

Урановые рудные поля в активизированных молодых платформах часто имеют поясовое строение. Они располагаются в пологих крыльях грабенсинклиналей или межгорных впадин, на выклинивании фронтальных участков зон пластового окисления в толщах и горизонтах проницаемых пород. Протяженные рудные поля тяготеют к пачкам литологически благоприятных пород, содержащих углефицированные остатки, углеродистое или окисленное битумное вещество, занимающих четкое место в стратиграфических разрезах [35]. Положение рудных полей может контролироваться участками пересечения зон пластового окисления системами тектонических нарушений или другими структурами, обеспечивающими вертикальную проницаемость разреза и проникновение газов — восстановителей урана (водорода, углеводородов и др.), что проявляется в признаках обеления пород.

Прогнозные критерии редкометальных рудных узлов и полей также зависят от их положения в структурных этажах рудных районов. Узлы и поля редкометальных пегматитов, расположенные в пределах древних платформ, контролируются системами тектонических нарушений и гранитными интрузиями, приуроченными к зонам коровых разломов.

В областях завершённой складчатости рудные узлы и поля располагаются в местах сопряжения нескольких послескладчатых разломов или ограничиваются ими. Пространственное

размещение узлов и полей колумбитоносных гранитов, редкометальных альбититов и бериллиеносных полевошпатовых метасоматитов в значительной степени определяется особенно-стями размещения материнских интрузивов в складчатых и разрывных структурах рудных районов.

Рудные узлы бертрандитовых аргиллизитов располагаются в пределах вулкано-тектонических структур, а их поля часто приурочены к крупным вулканическим куполам или кальдерам обрушения.

Рудные узлы и поля редкометальных агпаитов и карбонатитов совпадают с площадями развития крупных платформенных интрузий ультраосновных — щелочных пород центрального типа, положение которых определяется местами сопряжения или пересечения глубинных и коровых разломов, а также тектонических нарушений более высоких порядков, развитых в верхних частях земной коры.

Ураноносные и редкометальные узлы и поля представляют собой объекты оценок и прогнозов при проведении геологосъемочных работ различных масштабов. Знание критериев прогноза ураноносных и редкометальных узлов необходимо при специализированном геологическом картировании масштаба 1:200 000—1:100 000. На основе геологических и металлогенических карт масштаба 1:50 000—1:25 000 появляется возможность прогноза урановорудных или редкометальных полей.

§ 3. ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Строение урановых и редкометальных месторождений зависит от характера структур осадочного слоя земной коры, а при его отсутствии — от характера структур приповерхностной части гранитного слоя. В зависимости от их промышленного типа рудоносные структуры определяются составом и физико-механическими свойствами минерализованных слоев и пачек пород, условиями формирования дорудных магматических пород, сочетаниями складчатых и разрывных тектонических нарушений, особенностями проявления рудометасоматических и иных процессов изменения рудовмещающих пород. Поэтому поисковые критерии различны и индивидуальны для месторождений каждой урановорудной и редкометальной формаций. Ниже для примера приводятся ведущие поисковые критерии некоторых формационных типов урановых и редкометальных месторождений.

Поисковые критерии ураноносных эйситов:

— участки сопряжения региональных тектонических нарушений и зон секущей трещиноватости вблизи или в зонах коровых разломов;

— зоны послойной трещиноватости в пачках и пластах пород благоприятного (карбонатного или терригенно-туфогенного) состава;

— тектонически осложненные экзоконтактовые зоны гранитных интрузивов орогенного периода;

— зональные ореолы интенсивных кварц-альбитовых или апатит-альбитовых изменений на участках развития благоприятных структур.

Поисковые критерии ураноносных березитов:

— участки сопряжения разноориентированных тектонических нарушений вблизи от коровых разломов или в сочетании с ними;

— мелкие интрузивные купола и нежки палеовулканов, контакты тел секущих и согласных субвулканических интрузивов;

— серии даек и малых интрузий в сочетании с рудоконтролирующими структурами;

— ореолы зональных березитовых метасоматитов на участках сочетания благоприятных структур.

Поисковые критерии жильных месторождений кварц-карбонатной настурановой формации:

— участки интенсивного развития серий сколовых трещин, сопряженных с более крупными рудоконтролирующими тектоническими нарушениями, особенно в антиклинальных структурах и пологих экзоконтактовых зонах орогенных гранитных интрузивов;

— участки неоднородного строения рудовмещающих метаморфических пород, включающие горизонты и пласты благоприятного состава (с повышенным содержанием карбонатного или органического вещества, дисульфидов или других минералов двухвалентного железа и др.), особенно зоны резкой смены пород различного литологического состава и физико-механических свойств.

Поисковые критерии ураноносных калиевых метасоматитов:

— участки плавных изгибов омоложенных древних коровых разломов в местах их пересечения другими региональными нарушениями;

— участки расщепления омоложенных коровых разломов или их сопряжения с системами молодых трещинных структур периода тектоно-магматической активизации;

— близость экранирующего плаща субгоризонтально залегающих платформенных отложений доактивизационного возраста;

— ореолы зональных пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов вдоль зон омоложенных разломов.

Поисковые критерии ураноносных аргиллизитов в углеродисто-кремнистых сланцах:

— участки интенсивно дислоцированных метаморфизованных пород, содержащих горизонты и пласты углеродисто-кремни-

стых сланцев с повышенными концентрациями урана и его спутников в разрезах пачек, обладающих контрастными физико-механическими свойствами (например, переслаивание их с углеродисто-глинистыми сланцами, известняками и силлами диабазов);

— до- и особенно послескладчатые круто- и пологопадающие тектонические нарушения, послойные срывы и зоны повышенной проницаемости;

— зональные ореолы аргиллизации вдоль зон послойных срывов, плоскостей секущих тектонических нарушений и сопряженных с ними систем наложенных или омоложенных трещин.

Поисковые критерии ураноносных аргиллизитов в вулканогенных формациях:

— участки совмещения сквозных крутопадающих тектонических разрывов и сопряженных с ними трещинных структур с пачками и слоями эффузивных пород, благоприятных для развития в них послойных субгоризонтальных нарушений и зон интенсивной трещиноватости;

— участки развития рудоносных трещинных структур в гранитах фундамента под экранирующим покровом базальных горизонтов;

— зональные ореолы аргиллизации вмещающих пород вдоль систем крутопадающих рудоконтролирующих разломов, послойных нарушений и зон трещиноватости в благоприятных пластах и пачках пород.

Весьма специфичны поисковые критерии месторождений ураноносных альбититов, ураноносных песчаников и угленосных отложений. Они подробно рассматриваются ниже, в гл. XI и XII.

Поисковые критерии редкометальных пегматитов:

— участки пологих контактов кровли преимущественно в экзоконтактовых зонах гранитных интрузивов;

— пачки вмещающих пород определенного (часто основного) состава и субфаций метаморфизма, благоприятных для локализации редкометальных пегматитов ожидаемого минерального типа;

— участки развития тектонических нарушений, сопряженных с рудоконтролирующими разломами в породах благоприятного состава.

Поисковые критерии колумбитоносных гранитов:

— наличие участков сопряжения нескольких разломов;

— апикальные зоны малых интрузивов амазонитовых или рибекит-альбитовых гранитов;

— линейные зоны пред- и послерудных порфировых, порфитовых и кварц-кератофировых даек, обогащенных литием и фтором;

— участки виргации и изгибов магмоконтролирующих тектонических нарушений в экзоконтактовых зонах более ранних гранитоидных интрузивов.

Поисковые критерии редкометальных альбититов:

— послескладчатые наиболее поздние трещинные интрузивы щелочных и нефелиновых сиенитов или интрузивы щелочных и субщелочных гранитов;

— мощные зоны постмагматического метасоматоза в виде микроклинизации, альбитизации, эгиринизации и рибекитизации вдоль краевых тектонических зон в интрузивных породах.

Поисковые критерии бериллиеносных метасоматитов:

— развитие послескладчатых малых интрузивов щелочных гранитов или граносиенитов;

— мощные зоны кварц-альбит-микроклинового, рибекит-эгирин-альбитового или полевошпат-флюоритового составов, развитые вдоль линейных тектонических зон в экзоконтактовых щелочных интрузивах.

Поисковые критерии бертрандитовых аргиллизитов:

— пачки кислых эффузивно-пирокластических пород с контрастными физико-механическими свойствами;

— системы разноориентированных тектонических нарушений в сочетании с вулcano-тектоническими структурами типа вулканических куполов, древних вулканических аппаратов и зон эруптивных брекчий;

— вулcano-тектонические структуры в образованиях континентальной липаритовой формации;

— небольшие субвулканические тела (некки, экстрезивы, дайки);

— зоны и участки аргиллизации и флюоритизации пород.

Поисковые критерии редкометальных нефелиновых сиенитов:

— участки многофазных стратифицированных интрузивов, представленные чередующимися телами уртитов, луавритов и малиньитов.

Поисковые критерии редкометальных карбонатитов рассматриваются ниже, в гл. XIII.

Поисковые критерии используются для прогноза и оконтуривания площадей, перспективных на выявление урановых и редкометальных месторождений, а их обоснованное выделение производится с учетом обнаруженных проявлений урановой или редкометальной минерализаций (их первичных и вторичных ореолов) и других поисковых признаков.

§ 4. ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫЕ КРИТЕРИИ РУДОНОСНЫХ ЗОН И РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Многие из урановых и редкометальных месторождений состоят из нескольких рудоносных зон, каждая из которых включает несколько рудных залежей, разделенных участками без рудных пород или некондиционных руд.

При детальном изучении рудных тел обычно выясняется, что они в свою очередь обладают прерывистым строением и состоят из групп сближенных рудных скоплений различных масштабов, разделенных участками пустых пород или некондиционных руд.

Иногда (например, на месторождениях ураноносных глинистых осадочных пород с остатками ископаемых рыб или танталовых гранитов) рудоносные зоны обладают технологически сплошным строением, и в этих случаях понятия о рудных зонах, рудных телах и морфологически обособленных участках рудных залежей практически совпадают.

Пространственное положение и условия залегания рудных (продуктивных) зон определяются сочетаниями основных рудоконтролирующих элементов геологического строения урановых месторождений, а положение рудных тел и более мелких скоплений — рудоконтролирующими элементами геологического строения второго и более высоких порядков.

Поскольку понятия о продуктивных зонах, продуктивных залежах и более мелких промышленно-ценных скоплениях урановых и редкометалльных руд определяются совокупностью геолого-экономических данных, представления об их размерах, морфологии и строении зависят не только от природных свойств месторождений, но также от условий горной технологии, принятых в основу их оконтуривания.

Типы и сочетания элементов геологического строения, контролирующих размещение продуктивных зон и тем более продуктивных залежей, весьма разнообразны.

Так, например, на месторождениях ураноносных эйситов к важнейшим поисково-разведочным критериям относятся:

- участки сопряжения, пересечения и изгибов секущих и послонных рудовмещающих трещин различного масштаба по падению и простиранию;

- пачки, пасты и прослои литологически благоприятных пород (известняков, терригенно-туфогенных и вулканогенных пород среднего состава), особенно вдоль послонных нарушений и в замках складок;

- внутренние зоны ореолов эйситизации с признаками интенсивного покраснения (гематитизации) околорудного пространства.

На месторождениях ураноносных березитов положение рудоносных зон и отдельных залежей контролируются:

- участками сопряжения, расщепления или пересечения рудовмещающих трещинных структур, особенно в экзо- и эндо-контактах субвулканических интрузивов, силлов, некков или даек;

- участками гетерогенного строения, представленными прослоями или покровами лав различного состава, фельзит-пор-

фиров, дацитов, андезитов-базальтов, туфов кислых пород, игнимбритов;

- внутренними зонами березитизированных метасоматитов, отличающихся повышенной пористостью и проницаемостью пород;

- местами изгибов, неровностей и осложнений контактовых поверхностей субвулканических интрузивов или древних вулканических аппаратов и зонами эруптивных брекчий.

Жильные зоны и урановые жилы кварц-карбонатно-наступранового состава локализуются:

- на участках сопряжения рудоносных трещин с трещинами отслоения, межпластового скольжения, оперяющими трещинами или с другими рудоносными трещинами;

- под экранами крупных даек или разрывных нарушений с мощными глинами притирания;

- на участках пологого искривления крупных жильных трещин по падению и простиранию;

- на участках рудоносных трещин, пересекающих горизонты боковых пород, благоприятных для локализации уранового оруденения (например, горизонты хлоритизированных пород);

- в зонах интенсивной гематитизации зальбандов жил, иногда с образованием яшмовидных пород или на участках повышенной микротрещиноватости пород вблизи рудоносных трещин.

На месторождениях ураноносных калиевых метасоматитов положение продуктивных зон и залежей определяется:

- контактами разновозрастных образований в структурах коровых разломов (бластомилонитов, древних даек, послонных мигматитов, кварц-баритовых жил и др.);

- небольшими изгибами разломов и трещинных рудовмещающих структур по падению и простиранию;

- минерализованными зонами дробления, брекчирования и катаклаза, сформированными в период тектоно-магматической активизации;

- внутренними, существенно ортоклазовыми зонами калиевых метасоматитов.

Для месторождений ураноносных аргиллизитов в углеродисто-кремнистых сланцах характерны следующие поисково-разведочные критерии:

- послонные нарушения в пластах глинисто-слюдистых сланцев или пропластках карбонатных пород на контактах их с диабазами или под экранами углеродисто-кремнистых сланцев;

- зоны крутопадающих постскладчатых нарушений и сопряженные с ними трещинные структуры более высоких порядков, секущие все литологические разновидности пород, включая углисто-кремнистые сланцы;

— зоны брекчирования, развитые по ранее заложенным трещинам отрыва;

— участки пересечения рудоносных нарушений с пластами карбонатных пород, особенно мелкие складки под экранами углеродисто-кремнистых сланцев;

— внутренние зоны ореолов осветленных (аргиллизированных) пород с признаками более поздней карбонатизации и доломитизации.

На месторождениях ураноносных аргиллизитов в вулканогенных формациях к числу важнейших поисково-разведочных критериев относятся:

— сквозные крутопадающие тектонические нарушения, полойные срывы, зоны трещиноватости в покровах фельзитов и других пород преимущественно кислого состава, а также сочетания перечисленных структур;

— приконтактные зоны пластов, резко различных по составу и физико-механическим свойствам;

— внутренние, существенно гидрослюдистые ореолы аргиллизации, ориентированные вдоль рудовмещающих структур и сопровождающие их более узкие ореолы вишнево-красных гематизированных пород.

Поисково-разведочные критерии продуктивных зон и залежей ураноносных альбититов, а также ураноносных песчаников описываются в гл. XI и XII.

Поисково-разведочные критерии редкометальных месторождений также весьма разнообразны и в зависимости от типов и сочетаний элементов геологического строения месторождений, контролирующих размещение продуктивных зон и залежей, различны даже для разных фацальных типов одной рудной формации. Так, например, положение рудоносных зон и отдельных залежей на месторождениях колумбитоносных гранитов контролируется:

а) в амазонитовых гранитах:

— участками сопряжения разноориентированных после-складчатых тектонических нарушений;

— горизонтами и пластами пород песчано-сланцевого состава, часто метаморфизованных до фации зеленых сланцев;

— зонами развития амазонитовых прожилков;

— породами амазонит-альбитовой фации гранитов, развитыми в апикальных частях интрузивов;

б) в рибекит-альбитовых гранитах:

— участками развития небольших тел трещинных интрузивов щелочного состава, локализующихся в местах сопряжения разноориентированных тектонических зон;

— телами магматических пород, близких по составу к аляскитовым гранитам, граносиенитам или кварцевым сиенитам;

— внутренними зонами наиболее интенсивной рибекитизации, эгиринизации и альбитизации.

Ниже, в гл. XIII, в качестве примера рассматриваются поисково-разведочные критерии редкометальных карбонатитов.

Поисково-разведочные критерии продуктивных урановорудных и редкометальных зон и залежей используются при поисково-оценочных работах, предварительной и детальной разведках, для проектирования и направления геологоразведочных работ, обоснованной увязки геологоразведочных пересечений и разрезов, оконтуривания и оценки запасов руд редких и радиоактивных металлов. В совокупности с выявляемыми поисковыми признаками они определяют направление поисковых рудных зон и залежей при проведении разведочных работ в пределах горных отводов действующих горных предприятий.

Обращает на себя внимание, что по мере перехода от региональных участков недр к локальным заметно снижается роль вулканотектонических и особенно магматических критериев уранового оруденения. В масштабах месторождений и крупнее они уже не имеют практического значения. В этом же направлении постепенно возрастает роль геохимических и литолого-стратиграфических критериев, которые при крупных масштабах исследования приобретают значение ведущих. Что же касается тектонических поисковых критериев, то они сохраняют свое ведущее значение во всем рассматриваемом диапазоне и различаются лишь масштабом рудоконтролирующих структур.

Применительно к прогнозу и оценке редкометального оруденения с укрупнением масштабов исследований снижается роль тектонических и возрастает значение геохимических критериев. На всех стадиях исследований сохраняется ведущая роль магматических критериев, а литолого-фацальные и стратиграфические критерии имеют отчетливо подчиненное значение.

ПРИЗНАКИ УРАНОВОГО И РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Признаки уранового и редкометального оруденения свидетельствуют о наличии в данной геологической обстановке повышенных концентраций искомых элементов как указателей возможных рудных скоплений. К ним относятся: аномальные концентрации редких, радиоактивных элементов и их элементов-спутников в горных породах, водах, рыхлых отложениях и растениях, аномальные концентрации радиоактивных газов, радиационные ореолы, радиационные дефекты кристаллов, высокие концентрации радиогенных свинцов в горных породах и, наконец, выходы урановых и редкометальных руд на дневную поверхность или проявления соответствующей рудной минерализации.

Как и при изучении благоприятных геологических критериев, в зависимости от масштабов проявлений следует различать прогнозные, поисковые и поисково-оценочные признаки уранового и редкометального оруденения. Применительно к разномасштабным геолого-структурным уровням рудных скоплений в земной коре они могут соответственно использоваться для целей прогноза рудных узлов и полей, поисков рудных месторождений, разведки и оценки рудоносных зон, залежей и их участков. Необходимость в этом возникает в связи с особенностями пространственного размещения повышенных концентраций и запасов руд редких и радиоактивных металлов в недрах.

На основании убедительных статистических данных установлено, что суммарные площади конкретных рудных провинций не превышают нескольких процентов от всей площади материков нашей планеты. В пределах каждой рудной провинции статистическое распределение числа месторождений различных масштабов имеет гиперболический характер, согласно которому 86 % от их общего числа приходится на рудопоявления, 12 % — на мелкие месторождения, 1,75 % — на средние месторождения и только 0,25 % — на месторождения крупного и очень крупного масштаба (рис. 1). При этом половина суммарных запасов сосредоточена в крупных и очень крупных месторождениях (46 %), около одной трети — в месторождениях среднего масштаба (32 %), а с мелкими месторождениями связано только 22 % их общего количества. Таким образом, в пределах рудных провинций на 400 рудопоявлений приходится в среднем 50 мелких, 7 средних и лишь одно крупное ме-



Рис. 1. Распределение рудных месторождений по численности и масштабам, по данным [9, 38]

сторождение. По мере перехода от рудных провинций к рудным районам и далее — к рудным узлам и полям вероятности выявления крупных и средних месторождений постепенно возрастают по сравнению с приведенными среднестатистическими данными и соответственно уменьшаются за их пределами. С другой стороны, по суммарным запасам металлов рудные районы, узлы и поля, как и рудные месторождения, отчетливо разделяются на классы мелких, средних, крупных и очень крупных. При этом в мелких рудных районах преобладают мелкие узлы, поля и месторождения. Крупные узлы, поля и месторождения встречаются, как правило, только в пределах крупных рудных районов, причем их основные запасы содержатся в единичных крупных и очень крупных рудных полях и месторождениях, что свидетельствует о наличии прямых корреляционных связей между масштабами рудных месторождений, полей, узлов и районов.

Таким образом, тенденция к неравномерному размещению рудоносных участков в структурах земной коры устойчиво проявляется при всех масштабах их изучения — от рудной провинции до участка рудной залежи, а в пределах рудных залежей — до микроскопического уровня строения природных рудных образований. Поэтому уверенная положительная оценка перспектив оруденения возможна лишь в тех случаях, когда поисково-оценочные признаки проявляются на площадях распространения поисковых признаков, а поисковые признаки — в контурах площадей распространения прогнозных признаков, т. е. в условиях их телескопирования в пределах рудных провинций.

Поскольку достоверность признаков оруденения закономерно снижается по мере перехода от локальных масштабов исследований к региональным, ниже рассматриваются сперва поисково-оценочные, а затем поисковые и прогнозные признаки оруденения.

§ 1. ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ РУДОНОСНЫХ ЗОН И РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

К числу поисково-оценочных признаков, указывающих на наличие повышенных концентраций редких и радиоактивных элементов в масштабах локальных рудных скоплений — гнезд, линз, рудных тел или рудоносных зон, относятся:

- выходы руд на дневную поверхность или проявление соответствующей рудной минерализации;
- радиационные дефекты кристаллов некоторых породообразующих минералов;
- первичные ореолы и ореольные зоны рудных элементов, их элементов-спутников и продуктов радиоактивного распада;
- остаточные ореолы и ореольные зоны тех же элементов в автохтонных отложениях;
- радиационные ореолы и ореольные зоны.

Выходами руд называются природные скопления урановых и редкометалльных минералов в коренных породах, обнажающиеся на дневной поверхности, вскрытые разведочными горными выработками или скважинами и удовлетворяющие по качеству и технологическим свойствам современным требованиям горнодобывающей промышленности. Для перевода рудного выхода в разряд месторождения требуется подтвердить наличие минимально необходимых запасов руд, возможность и экономическую целесообразность их промышленного использования.

Проявления урановой и редкометалльной минерализаций отличаются от рудных выходов тем, что они не удовлетворяют требованиям промышленности по качеству из-за малых средних содержаний металлов (реже из-за неблагоприятных технологических свойств). Эти проявления свидетельствуют лишь о повышенных концентрациях урана или редких металлов в пределах оцениваемого участка. Рудные выходы и проявления рудной минерализации всегда локальны и имеют значение только как поисково-оценочные признаки.

Изучение выходов урановых руд и проявлений урановой минерализации осложняется неустойчивостью урановых минералов в приповерхностных условиях. Определяющее влияние на ход гипергенных процессов оказывают климат и состав первичных руд. Наиболее устойчивы по отношению к выветриванию сложные окислы урана и урано-титанаты. Легче разрушаются ураниниты, настураны и особенно урановые черни. Ре-

шающее значение для поведения урана в зоне окисления имеет содержание в рудах высокосернистых сульфидов, в первую очередь пирита, поскольку при их окислении образуется серная кислота.

Выходы урановых руд и проявления урановой минерализации условно разделяются на две группы. К первой группе относятся выходы, в которых уран задерживается в приповерхностной зоне (месторождения настуран-карбонатных жил, ураноносных конгломератов, альбититов, эйситов, песчаников, угленосных отложений и глин), а ко второй группе — выходы ураноносных березитов (реже аргиллизитов), из которых уран частично или почти полностью выносится вследствие их ураново-сульфидного состава.

По составу вторичных минералов рудных выходов можно судить о вероятном минералогическом типе и составе первичных руд. Месторождения кварц-карбонат-настуранового типа представлены на выходах гидроокислами и силикатами урана или смешанными вторичными образованиями типа гуммитов, с подчиненным развитием люминесцирующих урановых слюдок. На выходах ураново-сульфидных месторождений широко проявлены зональные ореолы урановых слюдок, а при глубокой проработке зон окисления в приповерхностных участках сохраняются только люминесцирующие гяалиты и силикаты типа уранофана. В более глубоких зонах появляются сперва хорошо люминесцирующие кальциевые, глубже — нелюминесцирующие урановые слюдки и остаточные урановые черни.

При обнаружении на рудных выходах уранованадатов типа туюмунита и карнотита можно предположить экзогенное происхождение урановых скоплений.

Выходы руд редкометалльных месторождений и проявлений редкометалльной минерализации относятся к группе устойчивых в условиях дневной поверхности. В зонах окисления происходит концентрация редкометалльных минералов, в связи с чем их средние содержания в корах выветривания повышаются по сравнению с содержаниями в коренных месторождениях.

Радиационные дефекты в кристаллических решетках породообразующих и жильных минералов (полевых шпатов, кварца, циркона и др.), а также в основной массе кислых эффузивных пород возникают вокруг зерен и скоплений радиоактивных минералов под воздействием естественного радиоактивного излучения. Они проявляются точечными дефектами в узлах кристаллических решеток, нарушением их структур, а при особо интенсивном облучении — практически полным разрушением кристаллической структуры минералов. Дефекты кристаллических решеток минералов устанавливаются по скоплениям в них электронов, которые проявляют себя как парамагнитные центры (элементарные магниты). Для измерения концентраций парамагнитных центров в минералах, облучен-

ных в контактах с урановорудными скоплениями, используются спектрометры электронного парамагнитного резонанса, позволяющие по наличию и степени дефектов судить об интенсивности радиационного воздействия разных видов излучения. Высокая чувствительность измерений позволяет разделять анализируемые образцы горных пород по величинам полученных доз облучения и, тем самым, разбраковывать выходы современных (эпигенетических) и древних (предположительно рудных) урановых проявлений, или выявлять перспективные рудные участки в условиях разубоженного или полностью выщелочного с поверхности уранового оруденения. Радиационные дефекты проявляются в узколокальных зонах, расположенных непосредственно в контактах скоплений радиоактивных минералов и вмещающих их пород.

Первичные ореолы рудных элементов и элементов-индикаторов, окружающие локальные рудные скопления — гнезда, линзы или рудные тела оруденения, обладают отчетливой геохимической зональностью, значительным протяжением, сплошным или прерывистым строением. Крупные прерывистые ореолы, состоящие из групп сближенных ореолов сплошного строения, сопоставимые с размерами рудоносных зон, предпочтительнее называть ореольными зонами.

Элементарный состав первичных ореолов, тождествен составу рудных залежей. Типоморфные элементы, концентрация которых закономерно изменяется с изменением концентрации главных элементов, обычно называются элементами-спутниками оруденения. Концентрации элементов в ореолах колеблются в широких пределах — от величины геохимического фона до бортового содержания элемента в рудной залежи, т. е. от нескольких единиц до нескольких сотен кларковых концентраций (КК). Пространственное размещение химических элементов и их минералов-носителей весьма неравномерно. Их максимальные концентрации обычно совпадают с минерализованными трещинами и зонами повышенной проницаемости пород.

Формы ореолов и ореольных зон подобны формам рудных тел и зон. Вокруг крутопадающих рудных скоплений обычно развиваются симметричные ореолы, вытянутые по восстанию. Вокруг пологопадающих залежей, преимущественно в их висячих боках, развиваются асимметричные ореолы, вытянутые по простиранию рудных залежей.

Формы отдельных ореолов существенно зависят от состава и строения вмещающих пород. В однородных толщах развиваются практически сплошные ореолы простой формы. В неоднородных толщах на участках повышенной проницаемости пород форма ореолов заметно усложняется и приобретает неправильные очертания с многочисленными раздувами, пережимами и апофизмами.

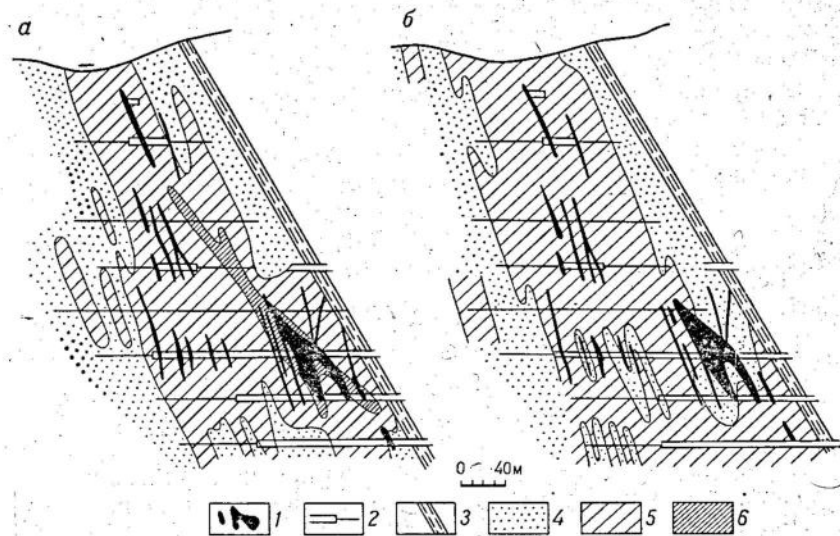


Рис. 2. Ореольная зона урана (а) и молибдена (б) вокруг уранового месторождения [12].

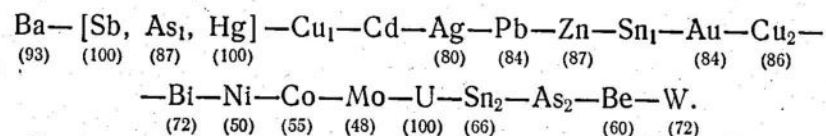
1 — рудные тела; 2 — горные выработки; 3 — трещины; 4, 5, 6 — различные концентрации элементов

Размеры первичных ореолов различны. Их вертикальная протяженность над отдельными крутопадающими телами может достигать нескольких сотен метров. В планах и разрезах размеры ореолов значительно превосходят размеры рудных залежей. Их соотношения зависят от типа месторождения, элемента-индикатора, уровня эрозионного среза и характера осевой зональности, которая проявляется в том, что одни элементы накапливаются преимущественно в надрудных, а другие — в подрудных частях ореолов.

Вокруг урановорудных месторождений формируются широкие первичные ореолы урана, молибдена, свинца, меди, мышьяка, серебра, фосфора, ванадия и некоторых других элементов-спутников в зависимости от состава первичных урановых руд. Наиболее протяженными из них являются ореолы подвижного урана. Размеры ореолов элементов-спутников несколько меньше уранового ореола и вписываются в него (рис. 2).

Вокруг месторождений редких металлов формируются первичные ореолы лития, рубидия, цезия, бериллия, фтора, олова, свинца и некоторых других элементов-индикаторов редкометального оруденения. Наиболее широкими из них на многих редкометальных месторождениях являются первичные ореолы лития и фтора.

Наиболее важной в теоретическом и практическом отношении является осевая зональность ореолов. С. В. Григорьяном [4] экспериментально доказано, что для ореолов самых различных по составу рудных месторождений типичны поразительно сходные ряды зональности основных элементов-индикаторов. В порядке убывания подвижности последних типовой ряд осевой зональности имеет следующий вид:



Поисковое значение первичных околорудных ореолов заключается в том, что при их использовании как поисково-оценочных признаков удастся на порядок увеличить рудоносные площади и тем самым существенно облегчить их выявление и оконтуривание. Для поисков групп сближенных рудных тел (продуктивных зон) используются сложнопостроенные ореольные зоны, которые образуются в результате слияния отдельных околорудных ореолов сравнительно простого строения.

Остаточные ореолы и ореольные зоны урана, тория и редких элементов формируются преимущественно в автохтонных отложениях, т. е. в продуктах выветривания пород, ранее содержавших их первичные концентрации. Наиболее существенное поисково-оценочное значение из них имеют остаточные ореолы в современных и древних корях выветривания и элювиально-делювиальных отложениях.

Во внешних зонах ореолов уран присутствует в безминеральных формах, поскольку он образуется в результате явлений сорбции на глинистых частицах и гидроокислах железа. В верхних глинистых частях современных кор выветривания часто наблюдается заметное смещение радиоактивного равновесия в сторону избытка радия, а в нижних частях (в областях аккумуляции выщелоченного урана) — в сторону избытка урана. Большинство элементов-спутников урана — Mo, Pb, As, Cu, Sb, Р и др. — задерживаются в верхних частях кор выветривания лучше, чем уран, в связи с чем их концентрации во внешних зонах ореолов возрастают по сравнению с концентрациями урана.

Поисково-оценочное значение остаточных вторичных ореолов урана в современных и древних корах выветривания очень велико. Они сравнительно легко обнаруживаются простейшими поисковыми методами, особенно в условиях сухого жаркого климата.

Остаточные ореолы и ореольные зоны в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях формируются в интенсивно денудировуемых районах. Они всегда содержат обломочные продукты разрушения месторождений и их первичных ореолов, а по составу являются обломочно-солевыми.

Формы и размеры остаточных ореолов или ореольных зон определяются характером рельефа и климатическими особенностями района. Их форма в разрезах обычно веерообразная, расширяющаяся к поверхности. В плане они на порядок превышают площади рудных выходов и их первичных ореолов за счет растяжения в стороны и вниз по склонам.

Во многих остаточных ореолах сохраняются элементы осевой зональности и тесные корреляционные связи между парами

элементов в первичных и вторичных ореолах. Особенно отчетливо они проявляются значениями индикаторных показателей аддитивных и мультипликативных ореолов.

Аномально высокие концентрации радиогенных свинцов во вмещающих породах и рыхлых отложениях возникают при радиоактивных распадах урана и тория. Свинец в земной коре входит в состав различных рудных минералов, однако его основная масса находится в рассеянном состоянии преимущественно в полевых шпатах и слюдах. Свинец представлен четырьмя стабильными изотопами, из которых ^{204}Pb имеет нерадиогенное происхождение, а изотопы ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb являются соответственно конечными продуктами распада ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th .

Установлено, что за геологическую историю Земли изотопный состав свинца земной коры существенно изменился. Отношение $^{206}\text{Pb} : ^{204}\text{Pb}$ увеличилось с 9,55 до 18,97, $^{207}\text{Pb} : ^{204}\text{Pb}$ — с 10,38 до 15,75, а $^{208}\text{Pb} : ^{204}\text{Pb}$ — с 29,54 до 38,89. Таким образом, первичный свинец составляет в настоящее время только две трети общего количества свинца, а одна его треть приходится на радиогенные продукты, образованные за период геологической истории Земли. При этом отношения радиогенных изотопов в разновозрастных минералах и породах изменяются, как правило, в ограниченных пределах. Точки, отражающие изотопический состав «обычных» свинцов самого различного возраста, укладываются на треугольной диаграмме в рамки малого треугольника (рис. 3, 4), а за его пределами располагается

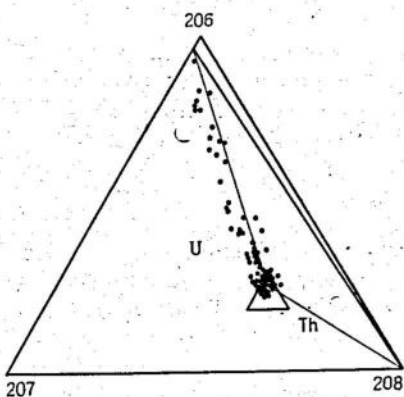


Рис. 3. Изотопный состав свинца из 1280 образцов рудных минералов, выраженный в виде суммы изотопов $^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb} = 100\%$ (по Кеннону и др.)

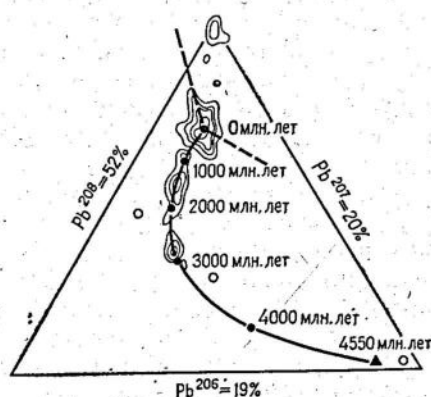


Рис. 4. Малый треугольник из диаграммы на рис. 3 в увеличенном масштабе (частоты распределения изотопов свинца различного возраста и генезиса на различных рудных месторождениях)

лишь ограниченное число точек, характеризующих составы так называемых «аномальных» свинцов.

Появление аномальных свинцов указывает на повышенные концентрации радиоактивных элементов в магматических расплавах и материнских породах. Свинецсодержащие минералы и горные породы, резко обогащенные продуктами распада урана при отношениях $\frac{^{203}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} > 0,9$ и $^{206}\text{Pb} : ^{208}\text{Pb} > 0,51$, могут

рассматриваться как следы или признаки уранового оруденения.

По величине радиогенной добавки ^{206}Pb (при известном возрасте урановой минерализации) можно оценить первичное количество урана для суждения о привносе или выносе урана в зоне гипергенеза и прогноза оруденения на более глубоких горизонтах.

В качестве поисково-оценочных признаков уранового оруденения используются радиационные ореолы и ореольные зоны, обусловленные главным образом гамма-излучением и, в значительно меньшей степени, бета-излучением природных радиоактивных скоплений. В природных условиях радиационные ореолы возникают не только вокруг скоплений урановых и ториевых руд, но и вокруг сопровождающих их первичных и вторичных ореолов и ореольных зон. Размеры радиационных ореолов превышают размеры всех других ореолов, что облегчает возможность их выявления радиометрическими методами.

Оценка перспективности радиационных ореолов и ореольных зон как важнейших поисково-оценочных признаков урановорудных тел и зон производится по спектральным характеристикам наблюдаемого гамма-излучения с выделением его урановой, ториевой и калиевой составляющих. Имея данные о пространственном размещении повышенных концентраций урана, тория и калия, можно уверенно разделять породные и рудные урановые аномалии и решать ряд других поисково-оценочных задач.

Размеры, формы и строение радиационных ореолов зависят от особенностей пространственного размещения радиоактивных минералов или металлов в породах и рудах, современных и палеоландшафтных условий районов поисков, применяемой радиометрической аппаратуры и способов интерпретации экспериментальных данных.

§ 2. ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В качестве поисковых признаков урановых и редкометалльных месторождений используются крупные ореольные зоны, группы ореолов или ореольных зон этих металлов, их элементов-спутников и продуктов радиоактивного распада, сопоставимые по размерам с площадями выходов (или поперечными сечениями) месторождений. Они могут быть

проявлены в коренных породах, автохтонных и реже — в дальнепринесенных рыхлых отложениях. В практике геохимических поисков основное внимание уделяется изучению параметров первичных ореолов, окружающих отдельные тела или группы сближенных рудных тел. Закономерности строения, состава и зональности ореольных зон и групп сближенных ореолов пока что изучены весьма слабо. В литературе имеются указания на то, что наряду с зональностью отдельных ореолов проявляется и зональность в масштабе всего месторождения в целом, которая выражается преимущественным развитием более интенсивных ореолов надрудных элементов вокруг рудных тел, расположенных на гипсометрически более высоких уровнях (см. рис. 21). Для выявления и оценки параметров крупных ореольных зон и групп первичных ореолов, составляющих единые ореолы месторождений, могут быть использованы методы обобщения и тренд-анализа исходных данных, способствующие выяснению закономерных составляющих изменчивости изучаемых признаков в масштабе месторождения в целом. В равной степени это относится к ореольным зонам и группам остаточных ореолов в автохтонных рыхлых отложениях, как поисковым признакам месторождений.

Важнейшим поисковым признаком редкометальных месторождений являются потоки рассеяния минералов тория и редких металлов, сформированные механическим путем в образованиях современной и древней речной сети.

Устойчивость в гипергенных условиях и высокие удельные массы редкометальных минералов способствуют их накоплению в рыхлых делювиально-пролювиальных и аллювиальных отложениях. Длины потоков механического рассеяния минералов редких элементов в речных отложениях достигают десяти километров и более.

Для целей поисков редкометальных месторождений минералы шлихов можно разделить по их плотности и цвету на несколько групп:

— в первую группу с очень высокой плотностью (8,5—14) входят черный ториацит и сопутствующие минералы — красная киноварь и серый галенит;

— во вторую группу с высокой плотностью (5,5—8,5) входят черные и бурые минералы: колумбит (5,2—6,6), танталит (7,0—8,2), пирохлор (4,2—6,4), фергусонит (5,6—5,8), бадделит (5,7—6,0), вольфрамит (7,1—7,5), касситерит (6,8—7,1);

— в третью группу с заметно повышенной плотностью (4,0—5,5) входят черные и бурые лопарит (4,6—4,9), пирохлор (4,2—6,4), гадолинит (4,2—4,5), перовскит (3,9—4,1), гранат (3,2—4,3), ильменит (4,6—5,2), торит (4,4—5,4), белые бесцветные и желтоватые циркон (4,0—5,1), барит (4,3—4,7), желтые красновато-желтые и коричневые монацит (4,9—5,9), ксенотим (4,4—4,6), циркон (4,4—4,7);

— в четвертую группу с повышенной плотностью (2,6—2,8) входят: сподумен, сфен, алмаз, турмалин и топаз.

Сведения об ассоциациях шлиховых минералов позволяют судить о вероятных формационных типах редкометальных месторождений. Так, для редкометальных гранитов и грейзенов характерны ассоциации минералов, включающие: пирохлор, циртолит, циркон, турмалин, рутил, монацит, колумбит, танталит, турмалин, топаз, флюорит, магнетит, пирит, гранат, гематит. Для сподуменовых пегматитов типична ассоциация танталита, колумбита, берилла, турмалина, сподумена, амблигонита, граната, циртолита, флюорита и касситерита, а для формации редкометальных карбонатитов и альбититов — ассоциация лопарита, монацита, флюорита, пирохлора, гатчеттолита, ксенотима, самарскита, фергусонита, гадолинита, торита, малакона, ортита, циркона, ильменита, титанита, перовскита, гематита, колумбита и танталита.

В качестве поисковых признаков урановых месторождений успешно используются зоны и группы эманионных ореолов в приповерхностном слое рыхлых отложений.

Торон и актинон, обладающие периодами полураспада соответственно 54,5 и 3,92 с, могут находиться только в непосредственной близости от эманлирующих источников, а радон с более длительным периодом полураспада (3,82 сут) может эманлировать дальше в окружающую среду.

Интенсивность эманирования и эманлирующая способность минералов, горных пород и руд зависят от их состава, плотности, структурно-текстурных особенностей, форм нахождения материнских радиоактивных элементов, температуры, влажности и других физико-механических свойств, определяющих состояние эманлирующей среды. Вторичные руды урана имеют, как правило, более высокий коэффициент эманирования, чем первичные. Величины коэффициентов эманирования возрастают с уменьшением плотности пород и руд, увеличением степени их разрушенности и трещиноватости. Так, плотные неразрушенные коренные породы обладают коэффициентами эманирования от 3 до 20 %, а рыхлые отложения и почвы — от 15 до 100 %. Высокие значения коэффициентов эманирования (до 95—98 %) характерны для сильно разрушенных пород в тектонических и других ослабленных зонах.

Перемещение радиоактивных газов от участков их повышенных концентраций в горных породах и рудных скоплениях к дневной поверхности, т. е. в направлении уменьшения концентрации, происходит главным образом диффузионным путем. В приповерхностном слое рыхлых отложений диффузия осложняется конвекционным переносом радиоактивных газов под влиянием метеорологических факторов: в основном атмосферного давления, выпадения осадков, промерзания почв и направления ветров. В условиях низкого давления и сильных

ветров перемещение газов с глубоких горизонтов к поверхности и их рассеивание в атмосфере заметно возрастают. Высокое барометрическое давление и выпадение осадков способствуют накоплению эманаций в почвенном воздухе и уменьшают их утечки в атмосферу.

Аномальные концентрации радиоактивных газов можно наблюдать в почвенном воздухе, в приповерхностных и подземных водах и в приземном слое атмосферы. В качестве признака уранового оруденения наиболее эффективно использование аномальных концентраций радиоактивных газов в почвенном воздухе.

Размеры групп эманационных ореолов и зон весьма разнообразны, а их формы отличаются сложностью в связи с неоднородностью строения вмещающих пород и рыхлых отложений, а также потому, что источниками эманации служат не только рудные скопления, но, в равной степени, их первичные ореолы в коренных породах, корах выветривания, водах, рыхлых отложениях и почвенно-растительном слое. В этих условиях размеры ореолов не ограничиваются предельными расстояниями миграции радиоактивных газов, поскольку большое число частных эманацирующих центров охватывает толщину пород и рыхлых отложений значительной мощности.

Наиболее достоверными поисковыми признаками с позиций их интерпретации являются группы актиноновых ореолов или ореольных зон, поскольку они образуются только вблизи ореолов рассеяния ^{235}U . К тому же в гипергенных условиях протактиний является малоподвижным элементом и поэтому почти не перемещается в сторону от урановорудных скоплений. Однако в поисковой практике более широко используются группы радоновых ореолов или зон. Являясь продуктами распада ^{238}U , они легче обнаруживаются современной поисковой аппаратурой, так как отличаются большей протяженностью, поскольку радон обладает значительно более продолжительным периодом полураспада.

При разбавке аэрогамма-спектрометрических радиационных ореольных участков и зон как поисковых признаков урановых месторождений оцениваются их масштабы, степень дифференцированности, анализируются связи с элементами геологического строения, изучаются пространственные особенности размещения повышенных концентраций урана, тория и калия, учитываются особенности методики измерения и обработки экспериментальных данных.

Пространственные связи радиационных ореольных участков и зон с ураноносными структурами месторождений и зонами околорудных метасоматитов, их крупные размеры, а также возможность выявления и оценки с помощью современных радиометрических методов обеспечивают их ведущее значение как важнейших поисковых признаков.

Значение водных ореолов радиоактивных элементов и их элементов-спутников как поисковых признаков урановых месторождений невелико вследствие сложностей их интерпретации и трудностей обнаружения урановых месторождений. В особо благоприятной природной обстановке в качестве поисковых признаков месторождений редких и радиоактивных элементов могут использоваться их контрастные ореольные зоны в растениях.

§ 3. ПРОГНОЗНЫЕ ПРИЗНАКИ РУДНЫХ ПОЛЕЙ И УЗЛОВ

В качестве прогнозных признаков рудных полей и узлов могут использоваться ореольные поля и ареалы рудных элементов и их спутников. Ореольные поля представляют собой совокупность сближенных ореольных групп или зон, развитых на площадях, соизмеримых с площадями соответствующих рудных полей. Под ареалами рудных элементов и их спутников подразумеваются площади, сопоставимые с территориями рудных узлов, в пределах которых ореольные поля развиты не повсеместно, а лишь в геологически благоприятных условиях.

Ореольные поля и ареалы соответствующих элементов развиваются в коренных породах и рыхлых отложениях, включая осадки современных водотоков, в поверхностных и подземных водах, в растительном покрове, а также проявляются как радиационные ореольные поля и ареалы.

Важнейшим прогнозным признаком урановорудных узлов и полей являются ареалы и ореольные поля подвижного (перераспределенного) урана. Содержания подвижного урана в горных породах оцениваются по степени его извлекаемости из проб с помощью различных способов выщелачивания. Чаще всего применяют кипячение пробы в 5%-ном растворе соды в течение 30 мин или в 2%-ном растворе соды с добавлением перекиси водорода.

Перераспределение урана в горных породах и обогащение их подвижной его формой происходит в связи с процессами регионального или гидротермального метаморфизма и гипергенеза.

Ареалы подвижного урана и его спутников представляют собой крупные территории, в пределах которых нарушено первично-конституциональное распределение многих элементов. Для них типично:

- нарушение обычных соотношений и содержаний петрогенных элементов в породах, в первую очередь натрия и калия;
- чередование зон привноса и выноса урана и резкие колебания величин торий-уранового отношения (от 0,5 и менее до 10 и более);

— повышенные концентрации радиогенных свинцов и элементов-спутников уранового оруденения.

Зоны привноса урана прослеживаются обычно вдоль тектонически ослабленных структур или в толщах хорошо проницаемых пород. Они отличаются резко пониженными торий-урановыми отношениями (до 1 и ниже), повышенными содержаниями подвижного урана, аномальными концентрациями радиогенных свинцов. К внутренним частям зон привноса урана часто (но далеко не всегда) тяготеют ореольные поля и развитые в них ореольные зоны урана и его спутников. В пределах ареалов с нарушенным первично-конституциональным распределением урана зоны привноса чередуются с зонами его выноса. Зоны выноса урана, приуроченные к хорошо проницаемым породам, обычно охватывают значительно большие площади по сравнению с зонами привноса. Для них характерны резко пониженные содержания подвижного урана, высокие торий-урановые отношения (до 10 и выше) и повышенные концентрации радиогенных свинцов.

Ареалы подвижного урана и радиогенных свинцов используются для оконтуривания ураноносных узлов, а ореольные поля — для оконтуривания урановорудных полей.

Потоки рассеяния урана и его элементов-спутников формируются в мелкозернистых и тонкодисперсных аллювиальных отложениях в виде «донных осадков». В связи со слабой химической устойчивостью многих урановых и сопутствующих рудных минералов их миграция происходит в водотоках в ионно-дисперсном и коллоидном состояниях. Содержание урана в механических потоках рассеяния редко превышает 4—30 г/т, а в солевых достигает сотен грамм на тонну. В донных осадках преобладает подвижный уран в дисперсной фракции, причем радиоактивное равновесие обычно смещено в сторону недостатка радия. Содержания урана в донных осадках прямо пропорциональны концентрациям в них органического вещества. Для формирования солевых ореолов урана наиболее благоприятны условия гумидного климата, слабая минерализация и слабокислая, близкая к нейтральной, реакция вод.

Потоки рассеяния, пространственно связанные со вторичными и первичными околорудными ореолами, отличаются меньшими длинами, локальностью и большей контрастностью по сравнению с потоками, образованными за счет пород или ареалов с повышенными концентрациями урана. Своими головными частями эти потоки примыкают ко вторичным ореолам и имеют сложное строение. В головных частях наблюдаются наиболее высокие содержания элементов (десятки и сотни КК), а вниз по потоку концентрации элементов уменьшаются.

Потоки рассеяния урана, объединенные в ареалы или ореольные поля, могут использоваться соответственно для прогноза урановорудных узлов и полей.

Наложенные вторичные ореолы и ореольные зоны характерны только для урана и некоторых его спутников. Они развиваются в дальнеприносных — мелкозернистых делювиальных, аллювиальных ледниковых, флювиогляциальных, озерных и эоловых отложениях, перекрывающих продукты выветривания урановых месторождений, их первичные и вторичные остаточные ореолы. Образование групп наложенных ореолов и ореольных зон связано с процессами проникновения солевых растворов в дальнеприносные отложения путем диффузии, инфильтрации или капиллярного подъема при испарении растворов. Мощность стерильных рыхлых отложений, которые могут быть захвачены этими процессами, измеряется несколькими метрами и редко достигает 10 м. При наличии развитого почвенного слоя в их образовании принимают участие процессы биогенной аккумуляции, которые приводят к максимальному накоплению урана и его элементов-спутников в одном из горизонтов почвенного разреза.

Значение групп наложенных вторичных ореолов и ореольных зон как прогнозных признаков уранового оруденения весьма ограничено, особенно если они оторваны от материнских источников. Наибольшее значение для прогноза урановорудных полей имеют зоны солевых ореолов вдоль кромок болот, характерные для условий гумидного климата.

Ареалы и ореольные поля повышенных концентраций урана, радия, радона и элементов-спутников уранового оруденения в открытых водотоках и подземных водах могут при благоприятных природных условиях служить прогнозными признаками урановорудных узлов и полей.

Возможность обогащения природных вод радиоактивными и другими элементами, их концентрации, размеры, строение и морфология ареалов и ореольных полей зависят от многих причин, среди которых ведущее значение имеют:

- химический состав, термический и газовый режим вод, их окислительно-восстановительные и гидродинамические свойства;

- геохимические свойства элементов, формы их нахождения в рудах и вмещающих породах;

- состав и физико-механические свойства вмещающих пород;

- физико-географические условия района.

Для растворения урана в катионной форме наиболее благоприятна 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 в формах комплексных ураногуматных и коллоидных соединений.

Важнейшим показателем, определяющим интенсивность миграций урана в природных водах, является их окислительно-

восстановительный потенциал E_h . Воды приповерхностных горизонтов обладают высокой окислительно-восстановительной способностью со значениями E_h более 4000 В. С глубиной величины E_h уменьшаются до отрицательных значений, что свидетельствует о восстановительных условиях, неблагоприятных для растворения и миграции урана. Для оценки интенсивности водной миграции элементов А. И. Перельманом предложен коэффициент водной миграции K_x , равный отношению содержания элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в горных породах, в которых происходит формирование вод. С использованием этого коэффициента им составлены ряды миграции химических элементов в зоне гипергенеза (рис. 5). Из рассмотрения приведенной таблицы видно, что окислительная обстановка природных вод способствует миграции урана и его важнейших спутников — молибдена, цинка, селена, никеля, кобальта и меди. В восстановительной обстановке все эти элементы практически инертны, так как обладают весьма низкими значениями K_x .

Гидродинамические условия подземных вод определяют интенсивность водообмена и длительность соприкосновения вод с породами и рудами. Чем выше скорость фильтрации и больше дебиты вод, тем меньше концентрации в них радиоактивных элементов.

Интенсивность выщелачивания урана из пород и руд зависит от их минерального состава. Наиболее легко уран переходит

I Окислительная обстановка						Контрастность миграции		II Резко восстановительная обстановка (H ₂ S)						
Интенсивность миграции	K _x	100	10	1	0,1	0,01	Слабая	Сильная	K _x	100	10	1	0,1	0,01
Очень сильная	S, Cl, B, Br						←	→	Cl, B, Br, I					
Сильная		Ca, Na, Mg, F, Sr, Zn, U, Mo, Se					←	→		Ca, Na, Mg, F, Sr				
Средняя		Si, K, Mn, P, Bo, Rb, Ni, Cu, Li, Co, Cs, As, Ti, Ra					←	→		Si, K, P, Pb, Li, Cs, Ti, Ra				
Слабая и очень слабая		Al, Fe, Ti, Zn, Y, Nb, TR, Th, Be, Ta, Sn, Hf, Rd, Ru, Ph, Os, Pt					←	→		Al, Ti, Zr, V, Zn, Ni, Cu, TR, Nb, Co, Sc, Be, Ta, Sn, U, Mo, Hf, Se, Pd, Rh, Os				

Рис. 5. Ряды миграции элементов в окислительной и восстановительной сероводородной обстановках зоны гипергенеза (по А. И. Перельману)

в воды из черниевых руд. Высокой растворимостью в нейтральных водах с pH 7 обладают сульфаты и некоторые карбонаты урана. Значительно труднее растворяются урановые силикаты, уранофосфорные и браннеритовые руды. Для них активными растворителями служат воды карбонатного типа с pH 8, кислые воды, содержащие фульвокислоты и гуминовые кислоты, и особенно кислые сульфидные воды.

Осаждение урана из природных вод при их взаимодействии с породами или в результате изменения химического и газового состава вод ограничивает размеры водных ареалов и ореолов аномальных концентраций урана и его спутников. Ведущую роль в качестве восстановителей играют органические вещества (битумы, углефицированные растительные остатки и др.), обладающие переменной валентностью и активно участвующие в окислительно-восстановительных реакциях.

Большое влияние на миграцию урана и его спутников в природных водах оказывают ландшафтно-географические условия района.

В зависимости от климата изменяются водообильность, модули подземного стока, уровни грунтовых вод и концентрации растворенных в них элементов. Рельефом местности определяется мощность зоны свободного водообмена. В равнинных районах кислородные воды распространяются до глубин первых десятков метров, а в горных областях мощности зон свободного водообмена увеличиваются до сотен метров.

При сочетании благоприятных природных условий: окислительной водной среды при кислой или щелочной реакции вод, невысоких содержаниях в водах анионов слабых кислот-минералообразователей, высокой проницаемости вмещающих пород, отсутствии в них активных осадителей урана и большой мощности зон свободного водообмена в подземных и поверхностных водах часто наблюдаются ареалы и ореолы аномально высоких содержаний радиоактивных элементов, но далеко не все они могут использоваться как прогнозные признаки уранового оруденения.

Радиоактивные воды, связанные с урановорудными концентрациями имеют, как правило, узколокальное распространение, отличаются высокой контрастностью и наиболее сложным радиологическим составом. В зависимости от геохимической обстановки на разных горизонтах от дневной поверхности могут формироваться радоно-урано-радиевые и радоно-радиевые воды. Радоно-урано-радиевые воды формируются в окислительной обстановке в зонах интенсивного водообмена. Содержание урана в них достигает $1 \cdot 10^{-1}$ г/л, радия $1 \cdot 10^{-9}$ г/л, радона — до $100 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Часто в водах постмагматических месторождений наблюдаются высокие содержания радона и урана, но меньшие содержания радия по сравнению с экзогенными урановыми месторождениями. Радоно-радиевые воды формируются

в бескислородной восстановительной обстановке в зонах затрудненного водообмена. Содержания урана снижаются в них до $n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-5}$ г/л, при содержаниях радия порядка $n \cdot 10^{-9}$ — $n \cdot 10^{-8}$ г/л и радона от 10 до 40 м⁻³·с⁻¹. Для вод, связанных с урановорудными концентрациями, характерны повышенные содержания элементов-спутников — молибдена, свинца, цинка, мышьяка, меди, ванадия, фосфора, кобальта и др. и высокие значения отношения изотопов $^{226}\text{Ra} : ^{228}\text{Ra} \geq 2$ [34].

Протяженность ореольных полей урана в подземных водах горно-складчатых областей колеблется от километра и более до 500—700 м, а в равнинных областях редко превышает 100—120 м. В открытых водотоках малых рек и ручьев ареалы повышенных концентраций урана достигают километров и могут использоваться для прогноза урановорудных узлов, а ореольные поля урана в подземных водах — для прогноза урановорудных полей.

Биогеохимические аномалии радиоактивных и редких элементов также могут служить прогнозными признаками оруденения, однако в связи с разнообразием факторов, влияющих на их концентрацию в растительном покрове, в каждом случае необходима тщательная интерпретация результатов биогеохимического опробования.

Согласно А. Л. Ковалевскому [21], определяющее влияние на формирование рудных биогеохимических ореолов оказывают:

- минеральные и химические формы элементов в рудах, литохимических и водных ореолах;
- характер контакта лито- и гидрохимических ореолов с корнями растений;
- наличие у растений физиологических барьеров поглощения рудных элементов;
- масштабы оруденения и связанных с ним ореолов рассеяния.

Условия формирования биогеохимических аномалий определяются прежде всего характером корневого питания растений — из твердой, жидкой или газовой фазы питающей среды. Установлено, что из водной среды растения поглощают химические элементы в 3000 раз интенсивнее, чем из твердой фазы, а из воздуха — в 100 раз интенсивнее, чем из водных растворов. Следовательно, для образования биогеохимических аномалий наиболее благоприятны легкорастворимые минеральные и химические формы элементов, а главной предпосылкой их проявления является развитие водных и газовых ореолов.

Для различных форм урансодержащих минералов значения растительно-почвенных коэффициентов радия (отношений его концентраций в золе растений и в почвах) изменяются от 0,01 (уранинит, монацит, титанаты урана) до 10 и более (урановые черни, сорбированные формы урана в глинах). Промежуточное

положение занимают настурн, урановые слюдки и железистые урансодержащие минералы. На усвоение растениями химических элементов влияют также размеры минеральных зерен. С увеличением их размеров усвояемость растениями рудных элементов уменьшается.

Условия формирования биогеохимических ореолов в значительной степени определяются глубиной проникновения корневых систем растений и характером их контакта с литохимическими ореолами. Этот контакт может быть прямым или косвенным — через водоносный горизонт или его капиллярную кайму при мощности рыхлого покрова, превышающей глубину проникновения корней в 3—10 раз.

Интерпретация биогеохимических аномалий большинства химических элементов существенно затрудняется из-за наличия у растений физиологических барьеров их поглощения. «Барьерность» химических элементов проявляется в том, что они усваиваются из почв и накапливаются растениями лишь до некоторого предельного уровня концентрации. Уран и редкие элементы относятся к числу отчетливо «барьерных» рудных элементов. По отношению к ним барьеры поглощения у большинства растений проявляются уже при низких концентрациях урана и других металлов в почвах. В отличие от них радий является «безбарьерным» элементом, а его концентрационные кривые в системе почва—растение характеризуются прямо пропорциональной линейной зависимостью (рис. 6). Это свойство радия позволяет использовать его в качестве весьма чувствительного индикатора урановой минерализации при проведении биогеохимических поисков.

Применительно к оценкам перспектив редкометального оруденения биогеохимические признаки наиболее полно обоснованы для бериллия. Установлено, что несмотря на слабую миграционную способность бериллия отчетливые его ореолы формируются в растениях над месторождениями бериллиеносных аргиллизитов, в которых рудные минералы представлены мелкой вкрапленностью гельвина, бертрандита и фенакита. Для уверенной оценки биогеохимических признаков бериллиевого оруденения предлагается при-

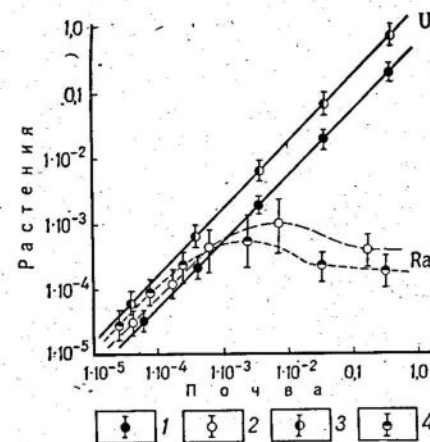


Рис. 6. Графики зависимости содержаний урана и радия в растениях от их содержания в почвах [20].

Стандартные отклонения: в травянистых (1, 2) и древесных (3, 4) растениях

менять вариант безбарьерных поисков, т. е. использовать для целей опробования такие виды и части растений, для которых отсутствуют барьеры поглощения бериллия [20].

Применение биогеохимических аномалий радия, урана и его элементов-спутников, а также элементов-индикаторов редких металлов в качестве прогнозных признаков уранового и редкометального оруденения наиболее целесообразно в условиях, когда литохимические и литогидрохимические ореолы погребены под покровом дальнепринесенных рыхлых отложений мощностью 10—15 м. При контактах нижних частей корневых систем с литохимическими ореолами через водоносные горизонты или зоны капиллярного поднятия грунтовых вод предельные мощности рыхлых отложений могут значительно увеличиваться, достигая последних десятков метров.

Важнейшими прогнозными признаками урановорудных узлов и полей являются соответственно дифференцированные радиационные ареалы и поля, выявляемые систематическими наземными и аэрогаммаспектральными наблюдениями.

Глава VI

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Под природными условиями ведения геологоразведочных работ подразумевается совокупность геологических, геоморфологических, биоклиматических и других природных факторов, определяющих формы нахождения, проявления и возможности обнаружения рудных месторождений. По времени проявления природных факторов их можно разделить на дорудные, интеррудные и пострудные. Дорудные и интеррудные факторы выявляются при металлогеническом анализе района и находят свое отражение на геологических, тектонических и прогнозно-металлогенических картах различных масштабов.

Послерудные геологические процессы приводят к переформированию первичных рудных концентраций — их окислению, выщелачиванию, регенерации, метаморфизму, эрозии или захоронению и определяют, таким образом, возможности и условия их обнаружения. Для выявления послерудных процессов и их влияния на современный облик рудных концентраций необходимо последовательное историко-геологическое и палеогеографическое изучение районов поисковых работ. Кроме того, для правильной ориентации прогнозных, поисковых и поисково-оценочных работ, выбора наиболее эффективных методов и технических средств геолого-разведочных работ, определения очередности изучения перспективных территорий и оценки достоверности полученных результатов необходимо знать современные ландшафтно-географические условия района. С этой целью на различных стадиях геологоразведочных работ составляются ландшафтно-географические (или ландшафтно-геохимические) карты изучаемых территорий, которые служат основой для их районирования по трудности и достоверности опробования отдельных площадей.

Для суждения о трудности опробования оцениваемых территорий в практике поисковых работ используются представления о критических мощностях рыхлых отложений и представительных горизонтах опробования.

Критической мощностью рыхлых отложений называется такая максимальная их мощность, при которой формируются выходящие на дневную поверхность ореолы рассеяния элементов, четко фиксируемые современными поисковыми методами. Если общая мощность покрова рыхлых отложений превышает критическую, то при проведении поисковых работ необходимо углубляться в рыхлый покров до представительного горизонта опробования. Критические мощности большинства

дальнеприносных рыхлых отложений не превышают первых долей метра, в автохтонных отложениях они достигают нескольких метров, а иногда и десятков метров.

Представительным горизонтом называется горизонт устойчивого и максимального площадного развития вторичных ореолов, наиболее близко расположенный к дневной поверхности.

§ 1. ПРИНЦИПЫ ЛАНДШАФТНОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

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

Сущность районирования территории по ландшафтным условиям заключается в выявлении связей и зависимостей между отдельными компонентами ландшафта. Понимание этих взаимосвязей позволяет реально оценить условия формирования и вероятного проявления признаков уранового и редкометального оруденения в конкретной ландшафтно-географической обстановке.

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 важнейших геоморфологических признаков и расположения относительно уровня грунтовых вод выделяется четыре доминирующих типа элементарных ландшафтов: водораздельные (элювиальные), склоновые (трансэлювиальные), подножий склонов (супераквальные) и местных водоемов (аквальные).

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 местных (автохтонных) подстилающих коренных пород. В пределах водораздельных ландшафтов образуются несмещенные остаточные (или почти несмещенные вторичные) ореолы рассеяния редких, радиоактивных металлов и их 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 зависит от состава коренных пород в пределах автономного элементарного ландшафта. Для ландшафтов склонов характерны в различной степени смешанные остаточные и наложенные ореолы или потоки рассеяния урана, редких металлов и их спутников.

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 делювиальных (реже колювиальных пролювиальных или аллювиальных) рыхлых отложений. При благоприятных условиях в пределах этих ландшафтов могут сохраняться смещенные остаточные ореолы, а за счет повышенных концентраций урана и некоторых его спутников в грунтовых водах нередко образуются вторичные их скопления в виде наложенных солевых ореолов.

К элементарным ландшафтам местных водоемов относятся участки болот, русел рек, водоемы прудов и озер, в которых развиваются водные и солевые ореолы (потоки) рассеяния урана и некоторых его спутников.

Естественная совокупность элементарных ландшафтов образует геохимический ландшафт. По А. И. Перельману, геохимический ландшафт представляет собой парагенетическую ассоциацию сопряженных элементарных ландшафтов; связанных между собой водной 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 биогеохимический круговорот атомов, тем сильнее связь между различными элементарными ландшафтами. Наиболее совершенная геохимическая связь между элементарными ландшафтами проявляется в жарких тропических областях, а наименее совершенная — в условиях пустынь и полярных областей.

Понятие «геохимический ландшафт» отвечает требованиям районирования территорий для оценки их ураноносности, поскольку геохимические методы являются ведущими при поисках урановых месторождений. Однако для оценок рудоносности территорий не только по урану, но и по редким металлам предпочтительнее более широкое понятие о географическом ландшафте, в котором учитывается влияние процессов как химического, так и физического выветривания. В условиях несовершенных геохимических связей между элементарными ландшафтами

процессы физического выветривания и денудации, а также связанные с ними механические ореолы и потоки рассеяния редких и радиоактивных металлов проявляются особенно отчетливо.

Элементарные ландшафты и их совокупности (геохимические ландшафты) проявляются в различных биоклиматических обстановках, что во многом определяет типы почвенных и растительных покровов, гидрографическую сеть, режимы подземных и поверхностных вод. Чем влажнее и теплее климат, тем больше образуется живого вещества (биоса), интенсивнее протекают процессы его разложения и миграции многих химических элементов. Практически наиболее важно выделить два типа биоклиматических областей — аридный и гумидный, в которых создаются принципиально различные условия приповерхностной миграции химических элементов.

Аридные области отличаются сухим климатом с отчетливым преобладанием испарения над количеством выпадающих осадков. Для аридных областей типично отсутствие лесного покрова, а часто и слабое развитие травянистой растительности, непромывной режим, гидрокарбонатно-кальцевый состав и слабощелочная реакция почвенно-грунтовых вод. В таких условиях происходит быстрое разложение и минерализация органических веществ, а уран и многие его спутники обладают слабой химической подвижностью, что приводит к образованию открытых несмещенных или слабосмещенных радиоактивных ореолов.

Гумидные области отличаются влажным климатом, в результате чего количество выпадающих осадков преобладает над их испарением. Для гумидных областей характерно развитие богатой лесной, кустарниковой и травянистой растительности, накопление большого количества органического вещества в понижениях рельефа, промывной режим и кислая реакция почвенно-грунтовых вод. В отличие от аридных областей геохимические процессы во многих гумидных областях ограничиваются не дефицитом влаги, а дефицитом тепла.

В тропических и субтропических гумидных областях с жарким климатом промывной режим вод приводит к образованию мощных кор выветривания латеритного типа и к практически полному выщелачиванию урана и его спутников из рыхлых отложений и приповерхностных участков коренных пород. В умеренно теплых гумидных областях также сохраняется высокая миграционная способность урана, что приводит к образованию ореолов большей протяженности и далеко оторванных от коренных урановородных концентраций. В холодных гумидных областях доминируют процессы физической дезинтеграции и морозного выветривания пород, а химическая миграция урана и его элементов-спутников проявляется слабо.

В аридных областях располагаются пустынные, полупустынные и степные ландшафтно-географические зоны. 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, горно-таежная, тундровая и полярная зоны [13].

Сходная вертикальная ландшафтно-климатическая зональность наблюдается в горных районах, где типы и число вертикальных поясных зон зависят от географического положения горного района и его абсолютных отметок. Вертикальная зональность горных районов не полностью аналогична горизонтальной географической зональности. Отдельные ландшафтные пояса могут выпадать из общей схемы, но в то же время в горах встречаются своеобразные ландшафты, например, ландшафты горных лугов.

§ 2. ЛАНДШАФТЫ АРИДНЫХ И ПОЛУАРИДНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Для типичных пустынных и степных ландшафтов характерны высокие летние температуры, дефицит влаги, ограниченность биологического круговорота веществ и интенсивность разложения отмерших растительных (преимущественно травянистых) остатков. В связи с этим биосфера не оказывает заметного влияния на водную миграцию урана и его элементов-спутников. Элювиальные почвы и коры выветривания почти не содержат органических веществ, имеют светлую окраску и характеризуются резко окислительными условиями. Непромывной режим предопределяет слабый вынос продуктов выветривания. В условиях пустынного климата подвижны только легко растворимые соли (сульфаты и хлориды), в результате чего почвы, коры выветривания и приповерхностные слои рыхлых отложений обогащены карбонатами, ураном и радием и имеют слабощелочную реакцию. При формировании различных рыхлых континентальных отложений из-за недостатка влаги уран не мигрирует, а накапливается в наиболее тонкозернистых (глинистых) фракциях.

В такырах — плоских глинистых депрессиях, которые формируются за счет сноса наиболее мелкозернистых фракций элювиальных отложений, часто встречаются повышенные концентрации урана.

В условиях расчлененного рельефа обычно образуются горизонты грунтовых вод, которые отличаются невысокой минерализацией (меньше 1 г/л), слабощелочной реакцией, сульфатным или гидрокарбонатным составом и повышенными содержаниями урана — до $n \cdot 10^5$ г/л. В некоторых районах содержание урана в водах сильно колеблется в зависимости от сезона. В периоды выпадения осадков оно возрастает в несколько раз, так как осадки обогащаются ураном, просачиваясь через

приповерхностные слои рыхлых отложений. В сухие сезоны грунтовые воды не соприкасаются с обогащенными ураном приповерхностными слоями рыхлых отложений и характеризуются заметно меньшими его содержаниями.

Двигаясь к областям разгрузки, пресные грунтовые воды подвергаются испарению, особенно на участках их близповерхностного залегания. В результате гидрокарбонатно-кальциевые воды постепенно становятся сульфатно-кальциевыми, хлоридно-сульфатными и, наконец, сульфатно-хлоридными. В них повышается содержание ионов Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ , а в почвах отлагаются сперва карбонаты кальция и гипс, а затем и легкорастворимые хлориды и сульфаты натрия, образуя различные подводные (супераквальные) почвы — луговые, солонцовые солончаковые и типичные солончаки. При глубине залегания грунтовых вод порядка 2—3 м в почвах образуется полный солевой профиль: на уровне грунтовых вод — углекислый кальций, выше — гипс и еще выше — хлориды и сульфаты натрия и магния. Уран при испарении осаждается вместе с карбонатом и гипсом, а вышерасположенные солевые корки обычно обеднены ураном. Как отмечает А. И. Перельман, концентрация урана в засоленных почвах может быть связана и с его осаждением на восстановительных сероводородном и глеевом барьерах.

Если при понижении базиса эрозии засоленные почвы попадают на речные или озерные террасы, то восстановительная среда сменяется окислительной, а испарительная концентрация — элювиальным выщелачиванием. В условиях сухого климата из них выщелачиваются только легко растворимые соли, а гипс и урановые соединения остаются в виде реликтов супераквальной стадии и образуют так называемые «эвапорационные» аномалии в виде желтых пленок вторичных урановых минералов, преимущественно силикатов и карбонатов.

Воды рек и озер в пределах пустынных и степных ландшафтов также отличаются повышенными содержаниями урана порядка $n \cdot 10^{-6}$ г/л, что связано с влиянием процессов испарительной концентрации.

Таким образом, ландшафты пустынь, полупустынь и сухих степей благоприятны для формирования повышенных урановых аккумуляций в приповерхностных природных образованиях. Выходы урановой минерализации в этих условиях практически не выщелачиваются, ореолы урана формируются и сохраняются в приповерхностном слое рыхлых отложений с концентрацией урана в почвах, водах и в некоторых растениях.

Для ураноносных провинций и районов, расположенных в пустынных ландшафтах, также характерны приповерхностные урановые аккумуляции в виде ярких желтых пленок вторичных урановых минералов, так как в аридном климате затруднены явления сорбции урана, а уран содержится в водах в анионной форме, что способствует образованию самостоятельных урано-

вых минералов. По данным А. И. Перельмана, желтые минералы в почвах появляются при содержании урана в глинах $n \cdot 0,001\%$, т. е. при сравнительно незначительных его концентрациях. Подобные проявления урановой минерализации неоднократно вводили в заблуждение геологов, рассматривающих их в качестве поисковых признаков урановых месторождений. Очевидно, что их следует рассматривать в качестве оценочных признаков ураноносных районов и провинций, а в ряде случаев — в качестве прогнозных признаков урановорудных узлов или полей.

Ландшафты северных степей и лесостепей располагаются в биоклиматических зонах, переходных от типично аридных к гумидным. Для них характерно увеличение годового количества осадков по сравнению с аридными зонами, большее увлажнение земной поверхности и менее интенсивное проявление процессов испарительной концентрации. В связи с этим испарительная концентрация вод завершается в основном на стадии осаждения кальцита, что способствует его накоплению в почвах и рыхлых отложениях. Грунтовые воды имеют гидрокарбонатный состав, нейтральную или слабощелочную реакции, а элювиальные почвы относятся к черноземному типу.

Нейтральное гидрокарбонатное выщелачивание в почвах весьма благоприятно для миграции урана в виде карбонатных комплексов. Из верхних горизонтов почв уран может выноситься, однако он концентрируется неглубоко от поверхности, а часто в черноземных степях содержание урана в почвах и рыхлых отложениях почти не различается. Грунтовые воды и реки лесостепей обычно содержат повышенные концентрации урана порядка $n \cdot 10^{-6}$ г/л, что связано со слабым развитием процессов сорбции урана и свидетельствует о благоприятных условиях для его миграции в природных водах.

В лесостепной зоне местами возникают условия, благоприятные для концентрации урана на глеевых и сероводородных барьерах в торфяниках и аллювиальных отложениях. В переходных условиях лесостепных ландшафтов воды еще сохраняют слабощелочную реакцию, благоприятную для накопления урана, а с другой стороны — здесь уже формируются восстановительные барьеры при накоплении торфов и органических остатков в аллювиальных отложениях.

Таким образом, в ландшафтах северных степей и лесостепей водная миграция урана происходит значительно интенсивнее, чем в пустынях, однако ограничивается расстояниями порядка сотен и первых тысяч метров от материнских источников. В этой связи в степных ландшафтах отчетливо проявляются все формы рассеяния урана и его спутников в виде ареалов, потоков и ореолов в самых различных природных образованиях.

§ 3. ЛАНДШАФТЫ ГУМИДНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Ландшафты тропиков и субтропиков. Жаркий климат, высокая влажность и обилие осадков в равнинных ландшафтах тропиков и субтропиков приводят к мощному развитию травянистой, кустарниковой и древесной растительности с накоплением органического вещества в пониженных участках рельефа.

Коренные породы подвергаются энергичному химическому разложению, в результате чего формируются мощные коры выветривания, в верхних горизонтах которых преобладают глины, а ниже — гидрослюдистые образования, резко обедненные щелочными, щелочноземельными металлами и ураном. Все легко-растворимые минеральные образования выщелачиваются поверхностными водами и многие элементы мигрируют в них на большие расстояния. В связи с большим количеством осадков, выщелоченностью почв и верхних горизонтов кор выветривания поверхностные и грунтовые воды тропиков минерализованы чрезвычайно слабо (менее 100 мг/л), обладают слабокислой реакцией и весьма невысокими содержаниями урана порядка $n \cdot 10^{-7}$ — $n \cdot 10^{-8}$ г/л.

Особенно интенсивно уран выщелачивается из верхних каолиновых горизонтов кор выветривания. Однако если он входит в качестве изоморфной примеси в состав устойчивых редкометаллических минералов — танталита, колумбита, циркона, монацита и др., то он накапливается вместе с ними в структурном элювии материнских пород.

Органическое вещество в болотах влажных тропиков определяет развитие в них слабовосстановительных условий, способствующих накоплению урана в результате адсорбции его гумусом и торфом. В участках болот, где создаются редковосстановительные условия, образуются нерастворимые соединения четырехвалентного урана. Однако низкое его содержание в грунтовых водах не способствует созданию высоких концентраций, за исключением участков, расположенных в непосредственной близости от урановых месторождений или пород с отчетливо повышенными средними содержаниями урана. В таких случаях уран осаждается на восстановительном геохимическом барьере вдоль кромок болот, образуя солевые ореолы, содержащие часто повышенные концентрации молибдена, свинца, ванадия, бериллия, германия и других элементов.

Энергичный вынос урана и его спутников из приповерхностных горизонтов мощных зон окисления урановых месторождений создает весьма неблагоприятные условия прогноза и поисков уранового оруденения в ландшафтах жарких тропиков.

Лесные ландшафты отличаются продолжительным, относительно влажным летом и морозной зимой. Среди них выделяются ландшафты южной тайги и смешанных лесов и

горно-таежные ландшафты северной тайги, расположенные в областях развития многолетней мерзлоты.

Ландшафты южной тайги и смешанных лесов характеризуются большим количеством осадков, умеренными среднегодовыми температурами и отсутствием многолетней мерзлоты. Состав природных вод, условия миграции в них урана и его элементов-спутников, а также строение почвенного покрова в значительной степени зависят от состава материнских пород.

Ландшафты, сформированные на силикатных и алюмосиликатных породах, характеризуются глинисто-щебенистыми корами выветривания, в которых среднее содержание урана и его спутников заметно ниже, чем в материнских породах. Верхние горизонты почв и кор выветривания очень часто отчетливо обеднены ураном. В разрезах почв, на глубинах порядка от 0,5 до 1,5 м. выделяется горизонт «вымывания» (иллювиальный горизонт), несколько обогащенный органическим веществом (гумусом) и ураном. Как правило, склоновые отложения ландшафтов южной тайги более глинисты, чем водораздельные элювиальные отложения.

Грунтовые воды отличаются низкой минерализацией (часто менее 100 мг/л), слабокислой или нейтральной реакцией, содержат органические соединения и минеральные коллоиды. Воды благоприятны для миграции в них большинства рудных элементов, в том числе и урана, который содержится в катионной форме и в комплексных ураноорганических соединениях, что способствует его адсорбции глинистыми и гумусовыми частицами. Содержание урана не превышает $n \cdot 10^{-7}$ г/л. Благодаря легкости извлечения урана из вод его гидрохимические ореолы в ландшафтах южной тайги весьма ограничены и редко превышают 100—150 м. Однако на участках развития ураноносных пород возможно формирование протяженных ореолов и потоков рассеяния урана в торфяниках и аллювиальных отложениях, содержащих органическое вещество. При этом оторванные ореолы урана накапливаются преимущественно в торфяниках и гумусовых болотах, а ореолы радия — в участках развития глинистых отложений, гидроокислов железа и марганца.

В целом для урановых месторождений в южнотаежных ландшафтах «кислого» класса типичны ослабленные ореолы рассеяния, возникающие в результате процессов приповерхностного выщелачивания урана и его спутников.

Южнотаежные ландшафты, сформированные на карбонатных породах, отличаются дерново-карбонатными, а не подзолистыми почвами, с большим количеством гумуса и карбонатными корами выветривания. Грунтовые воды здесь минерализованы и обладают нейтральной или слабощелочной реакцией. В таких водах уран находится в форме карбонатных комплек-

сов, которые не осаждаются на сорбционных барьерах, что создает более благоприятные условия для образования водных ореолов. Содержание урана в водах составляет $n \cdot 10^{-6}$ г/л, а размеры водных ореолов достигают 300 м. Однако более энергичная миграция урана в водах приводит к сильному ослаблению его вторичных ореолов в почвах и элювиально-делювиальных отложениях. В отличие от ландшафтов на некарбонатных породах, здесь не образуется горизонтов вымывания в почвах, ореолы резко ослаблены до глубин порядка нескольких метров и уверенно устанавливаются лишь на нижних горизонтах элювиально-делювиальных отложений.

Северотаежные ландшафты отличаются низкими среднегодовыми температурами, ограниченным вегетативным периодом и развитием сплошной или островной многолетней мерзлоты. Все эти особенности определяют существенно иную геохимическую обстановку с преобладанием процессов морозного выветривания и физической дезинтеграции над процессами химического выветривания горных пород. Наличие горизонтов многолетней мерзлоты затрудняет подземный сток грунтовых вод и процессы выщелачивания почв. Широким распространением пользуются заболоченная тайга и глеево-подзолистые типы почв, слабо выщелоченные с поверхности, несмотря на их отчетливо кислую реакцию. Уран, выщелачиваемый из пород и элювиально-делювиальных отложений автономных ландшафтов, в значительной мере аккумулируется в подчиненных супераквальных ландшафтах и может образовывать оторванные солевые ореолы в присклоновых зонах болот, в результате осаждения на глеевом и сорбционном барьерах. Содержание урана в водах таежно-мерзлотных районов не более $5 \cdot 10^{-7}$, преимущественно в виде ураноорганических комплексов.

На участках расчлененного, гористого рельефа широко развиты каменные россыпи (курумы), смещение которых вниз по склонам облегчается явлениями солифлюкции. При наличии повышенных концентраций урана в коренных породах в курумах образуются широкие грубообломочные механические ореолы, выявление которых возможно радиометрическими методами. Интенсивное морозное выветривание и физическая дезинтеграция пород способствуют вскрытию рудных минералов и их накоплению в аллювиальных потоках рассеяния, причем в этих условиях хорошо сохраняются не только типичные минералы шлиха, но также уранинит и многие сульфиды.

В районах развития островной мерзлоты процессы выщелачивания урана и других элементов из рыхлых отложений и почв усиливаются и возрастают возможности формирования оторванных ореолов и солевых потоков рассеяния, что сближает ландшафты этих районов с ландшафтами южной тайги.

Ландшафты тундр. Из-за крайне низких температур, длительности морозного периода и почти сплошного развития многолетней мерзлоты процессы химического выветривания пород резко ограничены, почвенные, грунтовые и поверхностные воды богаты органическими веществами, имеют кислую реакцию, но весьма слабо минерализованы (менее 100 мг/л).

Пологие склоны и равнинные участки заболочены, в почвах развиты восстановительные (глеевые) процессы. Состав природных вод способствует миграции урана и многих других металлов, однако из-за резкого преобладания физического выветривания над химическим современные зоны окисления месторождений, процессы миграции и образования вторичных солевых ореолов выражены слабо.

Горные ландшафты. В горных районах наблюдается отчетливое изменение климатов и ландшафтов с высотой, в результате чего образуются вертикальные ландшафтные пояса. В высокогорных условиях преобладают интенсивное морозное выветривание, физическая дезинтеграция и механическая денудация, опережающие процессы химического выветривания пород. В результате образуются глыбово-щебенистые коры выветривания, в которых основную роль играют механические ореолы и потоки рассеяния урана и его спутников. Ниже снеговой линии располагаются горные луга. В связи с энергичным водообменом и глубоким проникновением окислительных трещинно-грунтовых вод урановые концентрации легко окисляются, обогащая подземные воды, которые в горно-луговых поясах отличаются слабой минерализацией и низким фоновым содержанием урана. Книзу горные луга сменяются горной тайгой или широкolistвенными горными лесами, а еще ниже, в аридной биоклиматической зоне появляются горные и предгорные степи. В каждом вертикальном ландшафтном поясе изменяются условия миграции химических элементов, а следовательно и условия формирования их ореолов рассеяния, повторяя в первом приближении смену условий широтной ландшафтной зональности. Таким образом, современная ландшафтная обстановка районов геологоразведочных работ в значительной мере определяет условия выявления повышенных концентраций редких и радиоактивных элементов, особенно концентраций урана — элемента весьма подвижного в зоне гипергенеза. Наиболее благоприятны для прогноза и поисков уранового оруденения ландшафты пустынь, полупустынь, степей и лесостепей, в которых из-за недостатка влаги вокруг урановорудных скоплений образуются открытые несмещенные ореолы урана и его спутников, а в пределах потенциально рудоносных территорий развиты ореолы солевых новообразований, легко обнаруживаемые поверхностными поисковыми методами.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОЛАНДШАФТНЫХ ОБСТАНОВОК НА ПРОЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ УРАНОВОГО И РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В современных географических ландшафтах часто сохраняются черты более древних ландшафтов, реликты которых, в зависимости от характера неотектонических движений изучаемой территории, могут проявляться в более или менее отчетливых формах. Так, например, в ландшафтах пустынь, полупустынь и сухих степей нередко сохраняются реликты предшествующих гумидных стадий в виде древних кор выветривания, латеритов, кремневых кор, древних гипсоносных почв и других природных явлений, не свойственных аридным зонам. Мощные древние коры выветривания и выщелоченные зоны окисления рудных месторождений широко распространены на территориях тундровых и севернотаежных ландшафтов, что также не соответствует представлениям о развитии процессов гипергенеза в современной климатической обстановке. Поэтому при изучении природных условий пострудного периода необходимо выявлять не только современные, но и палеоландшафтные условия, обращая особое внимание на историю развития ландшафтов в послерудный период.

Для реконструкции палеоландшафтных обстановок первостепенное значение имеет знание палеогеографических, палеоклиматических и палеогеоморфологических особенностей изучаемых территорий.

Палеогеографический анализ проводится на основе детальных литолого-фациальных и стратиграфических исследований геологических разрезов, с массовыми замерами элементов директивных структур-индикаторов палеодинамической обстановки (знаков ряби, борозд течения, косой слоистости и др.) и мощностей литолого-стратиграфических комплексов. Результаты палеогеографического анализа отражаются на палеогеографических картах, составляемых для разных геологических периодов.

Реконструкция палеоклиматической обстановки осуществляется комплексом литологических и палеофаунистических методов. Палеогеоморфологические карты отражают морфологию, генезис, возраст и историю развития древнего рельефа. Реконструкции палеоландшафтных обстановок при изучении пострудных природных условий геологоразведочных работ помогает использование атласов литолого-палеогеографических и палеотектонических карт СССР [1]. Путем сопоставления климатов ландшафтов, закономерностей развития рельефа и блоковой тектоники послерудных эпох выявляются площади, на которых сохранились древние коры выветривания, оцениваются глубины послерудного эрозионного среза отдельных блоков (или мощности чехлов послерудных отложений), а также глубины зале-

гания горизонтов, представительных для выявления прогнозов оруденения с учетом влияния не только современных, но и палеоландшафтных условий.

При оценке представительных горизонтов должны учитываться существенные различия между современными и древними корами выветривания, а также степень их эродированности на различных участках поисковой площади.

§ 5. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ КАРТ

В настоящее время еще не существует единой общепринятой методики составления ландшафтных карт. Решению этой задачи посвящены исследования крупных отечественных географов — Л. С. Берга, Б. Б. Полюнова, Н. А. Солнцева и др. Применительно к изучению природных условий поисков методы составления ландшафтных карт разрабатывались М. А. Глазовской, О. А. Глико, А. И. Перельманом, В. И. Шарковым и другими геологами. В результате этих исследований наметились три методических подхода к решению этой задачи:

— раздельное картирование компонентов ландшафтов с составлением наборов специализированных карт;

— раздельное картирование и комплексный учет компонентов ландшафта;

— комплексные картирование и учет этих компонентов.

В практике геологоразведочных работ широко распространены методы раздельного картирования и учета компонентов географической обстановки. Они заключаются в том, что по данным литературных, фондовых и полевых материалов составляются специализированные геоморфологические, почвенные и геоботанические карты, карты рыхлых отложений, степени обнаженности района, почвенно-грунтовых вод или распространения многолетней мерзлоты, которые используются для оценок влияния каждого фактора на особенности проявления поисковых признаков. Эффективность такой методики невысока, так как большие затраты времени и труда на составление специализированных карт не оправдываются низкой информативностью каждой из них, поскольку сепаратная регистрация особенностей проявления отдельных компонентов географической обстановки резко ограничивает возможности учета их комплексного (суммарного) влияния на ландшафтные условия изучаемой территории.

Для повышения информативности ландшафтных карт многими исследователями используется метод раздельного картирования, но комплексного учета ландшафтных условий. Он основан на изучении специализированных карт и составлении сводной ландшафтной карты, на которой отдельные ландшафты выделяются по одному или нескольким ведущим компонентам. Такой подход может привести к нарушению принципа объек-

тивности при составлении ландшафтных карт, так как мнения исследователей о роли тех или иных природных компонентов субъективны. Избежать этого можно опираясь не на отдельные свойства важнейших компонентов, а на свойства ландшафта как единого природного объекта, используя комплексное картирование ландшафтов с помощью дистанционных методов. Ландшафтное дешифрирование космических и аэрофотографических, фотоэлектронных, инфракрасных, радиолокационных и других снимков с выявлением морфологических структур каждого ландшафта позволяет объективно картировать любые географические комплексы и с предельной точностью проводить природные границы между ними. Это оказывается возможным потому, что каждый географический ландшафт характеризуется своеобразной, только ему присущей морфологической структурой в натуре и соответствующей структурой изображения на дистанционных снимках. Это своеобразие обусловлено свойственным каждому ландшафту сочетанием исторически сложившихся геолого-геоморфологических, климатических, почвенных и биоценологических условий. Таким образом, сплошное дешифрирование аэрофотоснимков и материалов других дистанционных съемок позволяет оконтуривать природные исторически сложившиеся географические комплексы по их собственным границам без составления промежуточных карт отдельных компонентов ландшафта. В дальнейшем наиболее типичные морфологические структуры всесторонне изучаются в натуре на так называемых «ключевых» участках, а результаты изучения распространяются на однотипные ландшафты в пределах всего макета карты.

Выявление естественных географических комплексов является лишь начальным этапом районирования территорий по ландшафтным условиям ведения геологоразведочных работ. Дальнейшая задача сводится к тому, чтобы выделить среди них географические комплексы, однородные в отношении эффективных методов специализированных геологосъемочных и поисковых работ с учетом масштабов их проведения.

Для выявления географических комплексов, однородных в отношении методов геологоразведочных работ, необходимо изучение не только современных, но и палеоландшафтных условий пострудного периода — реконструкция палеогеоморфологических, палеогеографических условий и палеоклиматов, выявление эпох формирования кор выветривания, глубин пострудных эрозийных срезов отдельных блоков и других палеогеоморфологических особенностей, позволяющих судить о степени сохранности рудных месторождений.

Карты, отражающие особенности современных и палеоландшафтных условий изучаемых территорий, служат основой для

их районирования по трудности опосредования отдельных площадей, по эффективности применения тех или иных технических средств или комплексов съемочно-поисковых методов а также для оценки степени достоверности прогнозов и результатов поисковых работ. С этой целью составляются специализированные карты районирования территорий по глубинам эрозийных срезов, карты критических мощностей или глубин залегания горизонтов, представительных для проведения поисковых работ, карты достоверности проведенных работ и другие карты, способствующие оптимизации условий геологоразведочных работ и оценке их результатов.

В зависимости от масштабов геологических исследований изменяются и масштабы ландшафтных карт. Обзорные карты районирования СССР по природным условиям ведения геологоразведочных работ в масштабах 1:5 000 000 и мельче составлены О. А. Глико, В. И. Красниковым и А. И. Перельманом. Для целей прогнозирования и направления рекогносцировочных работ необходимы обзорные карты масштабов 1:1 000 000 — 1:200 000, а для проведения поисков — карты масштабов 1:50 000 и крупнее. На картах крупного масштаба (1:10 000) выделяются элементарные ландшафты или их комплексы, которые могут рассматриваться как морфологические единицы, однородные по условиям проведения поисково-оценочных работ.

С уменьшением масштабов карт возникает проблема генерализации элементарных ландшафтных единиц путем их объединения в ландшафтные комплексы, сохраняющие свойства однородности по условиям проявления признаков оруденения в заданном масштабе изображения. Наиболее приемлемая иерархия морфологических ландшафтных единиц для районов со сложным геологическим строением разработана М. А. Глазковской. Она включает элементарный ландшафт, звено элементарных ландшафтов, местный простой и местный сложный ландшафты. Для целей мелкомасштабного ландшафтного картирования В. Я. Каценбогеном предложено использовать еще две таксонометрические единицы — ландшафтно-структурные блоки и ландшафтно-структурные зоны. По масштабам проявления элементарные ландшафты и их комплексы сопоставимы с рудными месторождениями и их участками, простые и сложные ландшафты — с рудными месторождениями и полями, ландшафтно-структурные блоки второго и первого порядка — с рудными узлами и районами, а ландшафтно-структурные зоны — с рудными провинциями. Чем больше генерализация выделенных ландшафтных единиц, тем отчетливее проявляются в их облике особенности глубинного строения земной коры. Так, морфоструктуры ландшафтно-структурных зон в значительной степени зависят от особенностей тектонического развития континентальных глыб, ограничивающих их глубинных разломов,

крупных линеаментов и краевых швов. В облике ландшафтно-структурных блоков отчетливо проявляются особенности блоковой тектоники земной коры и магматизма в связи с развитием подкоровых и коровых разломов. Морфоструктуры простых и сложных местных ландшафтов отражают особенности состава и строения пород верхней части гранитного или осадочного слоев земной коры, а морфоструктуры элементарных ландшафтов и их комплексов — локальные структурные и литолого-петрографические особенности ее приповерхностных участков.

Глава VII

ОПРОБОВАНИЕ ПОРОД И РУД

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На всех стадиях геологоразведочных работ породы и руды подвергаются систематическому опробованию для изучения их минерального и химического состава, физических и технологических свойств, инженерно-геологических характеристик, зональности и внутреннего строения. По данным опробования выделяются и оконтуриваются аномалии, рудопоявления, месторождения и их участки, сложенные различными природными и технологическими типами руд, оцениваются концентрации в них редких, радиоактивных и сопутствующих элементов. В зависимости от целевого назначения различают:

- геохимическое опробование коренных пород и перекрывающих их рыхлых отложений;

- рядовое, технологическое и техническое опробование руд и вмещающих их пород в естественном залегании;

- опробование горных пород и руд в рыхлом перемешанном состоянии, в отвалах или транспортных емкостях.

Геохимическое опробование рыхлых отложений проводится в процессе геохимического картирования и поисков для выявления и оконтуривания ареалов и ореолов редких и радиоактивных металлов, элементов-спутников урана или редкометального оруденения в корах выветривания, элювиально-делювиальных, аллювиальных отложениях или в рыхлых отложениях других генетических типов. Для выявления и оконтуривания первичных ореолов перечисленных элементов, радиогенных свинцов или радиационных дефектов геохимическому опробованию подвергаются скважины, поверхностные и подземные горные выработки, коренные выходы и элювиальные развалы пород.

Рядовому опробованию подвергаются все разведочные выработки и скважины, в которых повышенные концентрации редких или радиоактивных элементов установлены по данным геохимического опробования или геофизическими методами. Рядовое опробование проводится для систематической оценки качества руд. Если рудные скопления не обладают четкими геологическими границами, то по данным рядового опробования производится также оконтуривание промышленноценных участков в недрах.

Технологическое опробование обеспечивает отбор представительных проб для проведения технологических испытаний в лабораторных, полупромышленных или в промышлен-

ных условиях. Этими испытаниями выявляются технологические свойства руд, устанавливаются исходные данные для выбора наиболее эффективных схем их обогащения и переработки.

Техническое опробование проводится для определения объемных масс пород и руд, их влажности, крепости, буримости и других физико-механических или инженерно-геологических свойств.

Опробование руд в рыхлом перемешанном состоянии производится в транспортных емкостях (вагонетках, автомобилях, вагонах и др.) в процессе разработки месторождений или переработки руд. Результаты опробования используются для оценок и сортировки рудных концентраций в добытых или переработанных массах, отвалах пустых пород и отходах производства.

Геохимические, рядовые, технологические и технические пробы отбираются различными механическими способами. При поисках и разведке редких и радиоактивных элементов наиболее широким распространением пользуются штупные, бороздовые, керновые и валовые способы пробоотбора.

Природная радиоактивность урановых и ториевых руд, четкая корреляция содержаний урана и тория с продуктами их радиоактивного распада обеспечивают широкое применение радиометрических методов анализа содержаний радиоактивных элементов непосредственно на месте залегания пород и руд. При разведках урановых и ториевых месторождений радиометрические методы опробования естественных обнажений, горных выработок, скважин и транспортных сосудов приобрели значение основных методов. Механические способы пробоотбора используются в этих случаях только для целей контроля, а также для оценки содержаний сопутствующих и вредных компонентов. Лишь на месторождениях со сложными радиологическими условиями они применяются как основные методы отбора проб. Применительно к опробованию месторождений радиоактивных элементов *пробой называется не только порция материала, отобранная из рудного скопления или из добытой рудной массы, но также единичное радиометрическое наблюдение на месте залегания руд.* Как и проба, отобранная механическим способом, оно обладает областью воздействия и характеризуется определенной геометрией, т. е. объемом, формой, размером и ориентировкой.

Радиометрические методы опробования радиоактивных элементов в массиве коренных пород обладают рядом существенных преимуществ. Они обеспечивают получение результатов немедленно после замера, что позволяет использовать их для проведения экспресс-анализов руд на содержание радиоактивных элементов. Радиометрические пробы отличаются от бороздовых (и других малогабаритных проб) повышенной представительностью. По сравнению с объемами керновых проб обла-

сти воздействия наблюдений при гамма-каротаже скважин возрастают примерно на один—два порядка, а площади поперечных сечений линейных радиометрических проб превышают площади поперечных сечений бороздовых проб в десятки раз. Поэтому линейные эквиваленты радиометрических проб (в пересчете на 1 м «радиометрической борозды» или ствольной мощности в скважине) могут превышать линейные эквиваленты бороздовых и керновых проб в 1,5 раза и более. Так, например, при опробовании стенки орта бороздой с поперечным сечением 2×5 см линейный эквивалент бороздовой пробы (l_b) длиной в 1 м составит:

$$l_b = a + b + \frac{c}{2} = 100 + 5 + 1 = 106,$$

а линейный эквивалент радиометрической борозды (l_p) длиной 1 м:

$$l_p = a + 0,25d\sqrt{\pi} = 100 + 26,6 \approx 127.$$

Соответственно линейный эквивалент керновой пробы (l_k) длиной 1 м и диаметром 59 мм составит:

$$l_k = 100 + 0,75d\sqrt{\pi} = 100 + 7 = 107.$$

а область воздействия руды при гамма-каротаже на 1 м ствольной мощности (l_r):

$$l_r = 100 + 0,75d\sqrt{\pi} = 100 + 80 = 180.$$

Это означает, что дисперсии содержаний радиоактивных элементов, вычисленные по данным поинтервального радиометрического опробования (при длинах интервалов в 1 м), будут меньше дисперсий содержаний, вычисленных по данным метровых бороздовых или керновых проб (указанных поперечных сечений) соответственно в 1,2 и 1,7 раза [19].

К числу достоинств радиометрических методов опробования относятся возможности дифференциальной интерпретации данных с оценкой содержаний радиоактивных элементов в элементарно малых объемах недр, что способствует изучению деталей строения рудных скоплений на высоких структурных уровнях. Кроме того, форма получения исходной информации способствует широкому применению электронно-вычислительной техники для целей обработки получаемых данных.

Наряду с большими преимуществами методы радиометрического опробования обладают и некоторыми недостатками. К их числу относятся зависимость результатов замеров от состояния радиоактивного равновесия продуктов радиоактивного распада, от эффективных атомных номеров пород (плотностей рудных масс) и мощностей рудных скоплений.

Нарушение равновесия в рядах продуктов радиоактивного распада приводит при радиометрическом опробовании урановых руд к искажению результатов, так как по интенсивности гамма-излучения фактически определяется не содержание урана, а концентрации радия и продуктов его распада, по которым оценивается содержание «эквивалентного» урана. Нарушение радиоактивного равновесия обычно связано с тем, что продукты радиоактивного распада урановых рядов, обладая резко различными геохимическими свойствами, проявляют склонность к разделению и пространственному обособлению, особенно в условиях зоны гипергенеза. Наиболее типичны три случая нарушения радиоактивного равновесия в рудах:

- общее нарушение равновесия, при котором в пределах всего объема урановорудного скопления наблюдается одностороннее его смещение в сторону недостатка радия;

- зональное нарушение равновесия, когда в пределах отдельных участков или зон рудных скоплений устанавливается смещение равновесия в сторону как избытка, так и недостатка радия, на фоне которого могут проявляться второстепенные нарушения равновесия также различных знаков;

- локальные нарушения равновесия, при которых в отдельных ограниченных объемах урановорудных скоплений наблюдаются смещения равновесия как в ту, так и в другую сторону.

Общее смещение радиоактивного равновесия возникает в случаях молодого возраста уранового оруденения. Для установления радиоактивного равновесия между ураном и всеми продуктами его распада (при условии, что эти продукты не будут удаляться из мест их образования) необходим период времени около одного миллиона лет. Следовательно, общее одностороннее смещение равновесия в сторону недостатка радия возможно только в урановорудных скоплениях послетретичного возраста. К числу таких образований относятся скопления урановых руд в четвертичных торфяниках, илесто-глинистых отложениях, битуминозных породах и других осадителях урана.

Зональные смещения равновесия типичны для многих урановорудных скоплений в песчаниках, гравелитах или угленосных отложениях и для зон гипергенеза урановых месторождений, в которых процессы инфильтрации и переотложения урана происходят в настоящее время или происходили в течение четвертичного периода. Обычно в нижних, головных частях ролловых залежей ураноносных песчаников радиоактивное равновесие смещается в сторону избытка урана, а в их более верхних размытых и расщепленных хвостовых частях — в сторону избытка радия. В сложных по морфологии переходных зонах, в верхних и нижних крыльях роллов местные смещения равновесия различных знаков наблюдаются только на отдельных небольших участках.

Сложное зональное смещение радиоактивного равновесия наблюдается в современных (четвертичных) глубокопроработанных зонах гипергенеза урановых месторождений. Смещение равновесия в сторону избытка урана типично для молодых зон цементации и нижних частей зон окисления, где процессы новообразования урановых минералов преобладают над процессами их выщелачивания. В верхних же промытых частях молодых зон окисления смещение радиоактивного равновесия может быть как в ту, так и в другую сторону, в зависимости от состава рудничных вод. При отчетливо сульфатном их составе происходит преимущественный вынос урана и равновесие смещается в сторону избытка радия, соли которого задерживаются в виде труднорастворимых сульфатов. Гидрокарбонатный состав или глеевая восстановительная обстановка подземных вод способствуют преимущественному выносу радия и смещению равновесия в сторону избытка урана. Как правило, во всех гипергенных зонах и подзонах урановых месторождений на фоне зональных смещений радиоактивного равновесия встречаются многочисленные локальные участки с разными знаками смещений.

Локальные смещения радиоактивного равновесия возникают в слабопроработанных зонах гипергенеза урановых месторождений. Особенно отчетливо они проявляются в случаях резких различий в степени тектонической проработки ураноносных зон, когда процессы растворения и переотложения урановых минералов развиваются не по всему объему минерализованных пород, а выборочно по ослабленным зонам и участкам интенсивной трещиноватости.

Таким образом, при правильном понимании времени и условий формирования уранового оруденения геолог может предсказать не только вероятность нарушения радиоактивного равновесия в рудах, но и знаки этих нарушений. При отсутствии послетретичных признаков переотложения урановорудных скоплений поверхностными или подземными водами можно уверенно утверждать, что руды в них должны быть равновесными.

Для предупреждения неизбежных систематических погрешностей, связанных с нарушениями радиоактивного равновесия урановорудных скоплений, в данные радиометрического опробования приходится вводить соответствующие поправки.

Искажения значений истинных содержаний урана, связанные с изменениями эффективных атомных номеров (плотностей рудных масс) и мощностей рудных скоплений, также корректируются путем введения поправок в результаты интерпретации данных радиометрического опробования.

Радиометрические методы, основанные на измерениях естественной радиоактивности вмещающих пород, не применимы для целей опробования руд редких элементов, так как примеси урана и тория в них непостоянны, однако могут использоваться

для уточнения общих контуров зон с редкометальной минерализацией.

Опробование руд редких элементов возможно ядерно-физическими методами, основанными на использовании искусственных источников ионизации с помощью нейтронов или гамма-излучения. В практике геологоразведочных работ широко используются гамма-нейтронные (фотонейтронные) методы опробования горных выработок и каротажа скважин при поисках и разведках бериллиевых месторождений. Экспериментальными работами доказана практическая возможность применения нейтрон-нейтронных и рентген-радиометрических методов для целей опробования литиевых, редкоземельных, танталовых и некоторых других руд.

§ 2. ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОЛОГОСЪЕМОЧНЫХ, ПОИСКОВЫХ И РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Вопросам геохимического опробования коренных пород и рыхлых отложений при проведении различных видов геологоразведочных работ отводится в методической литературе неслаженно мало внимания, хотя общеизвестно, что методы пробоотбора в коренных породах и рыхлых перемешанных массах принципиально различны.

В рыхлых перемешанных минеральных массах первоначальные структуры рудных скоплений нарушены. Опробуемые объемы рассматриваются как совокупности некоторых элементарных объемов, в которых содержания оцениваемых элементов взаимонезависимы и распределены статистически нормально. Поэтому увеличение объемов проб в n раз приводит к соответствующему уменьшению дисперсий содержаний по пробам также в n раз. Если суммарные объемы частных проб одинаковы, то практически безразлично, будет ли отобрано много проб малых объемов или ограниченное число проб больших объемов, так как дисперсия пробы объемом $V = nv$ равна суммарной дисперсии n проб объемом v . При опробовании рыхлых перемешанных минеральных масс геометрия проб (т. е. их форма, размеры и ориентировка) не оказывает влияния на статистические характеристики изменчивости содержаний. Этим условиям практически удовлетворяют геохимические пробы, отбираемые из дальнеприносных рыхлых отложений: шлиховые пробы, пробы донных осадков (в значительной степени — пробы из делювиальных и пролювиальных отложений). Средние содержания элементов по таким пробам могут рассматриваться как оценки, близкие к истинным средним в объемах, на которые распространяются данные опробования. Продукты выветривания и денудации представляют собой почти идеальную среднюю природную пробу, отражающую в своем составе на-

личие повышенных концентраций рудных элементов в материнских породах. Поскольку геометрия проб не оказывает в данном случае существенного влияния на результаты опробования, а изучаемые рудные элементы и их элементы-спутники содержатся в рыхлых отложениях в тонкорассеянном состоянии, в процессе пробоотбора необходимо обеспечить только оптимальные массы проб, их благоприятный гранулометрический состав и глубины представительных горизонтов.

Значительно сложнее решается вопрос об оптимальных условиях отбора геохимических проб из коренных пород, кор выветривания и элювиальных отложений. При изучении их свойств на статистические характеристики изменчивости содержаний по пробам оказывают влияние не только объемы, но также формы, размеры и ориентировка проб. Это объясняется тем, что при опробовании руд в естественном залегании проявляются пространственные взаимосвязи между значениями содержаний по соседним пробам, влияние которых может различаться по разным направлениям вследствие анизотропии строения рудных скоплений. В отличие от случая опробования рыхлых перемешанных минеральных масс увеличение объемов проб v в n раз не снижает дисперсии в n раз, поэтому при опробовании минерализованных коренных пород, кор выветривания и элювиальных отложений лучше отбирать много проб малых объемов, равномерно размещенных по всей опробуемой площади, чем малое число проб большого объема. Однако и в этом случае средние содержания, вычисленные по совокупности мелких проб, часто не обеспечивают уверенных оценок содержаний изучаемых элементов в объемах, на которые распространяются данные опробования. Кроме того, любые разновидности точечного пробоотбора обеспечивают получение только выборочных исходных данных по отдельным пунктам, что существенно снижает достоверность конечных результатов опробования и исключает возможность последующих оценок влияния геометрии проб на статистические характеристики содержаний.

Широко применяемый способ пробоотбора «пунктирной» бороздой может привести к систематическому завышению содержаний элементов-индикаторов по сравнению с бороздовым и штучным методами, а искажения истинных содержаний рудных элементов в свою очередь приведут к систематическим погрешностям в оценках их прогнозных запасов по данным геохимических исследований. Как и во всех других случаях опробования рудных скоплений в естественном залегании, наиболее стабильные результаты обеспечиваются применением линейных способов пробоотбора. Для отбора линейных проб из массивов коренных пород или из керна скважин наиболее эффективны пробоотборники режущего действия типа мелкоалмазных дисковых пил. Как правило, материал от пропиливания или фрезерования небольшой борозды (сечением порядка 1 см²) (со-

бранный с двухметрового интервала, обеспечивает возможность проведения всех необходимых анализов, а остальная его часть может сохраняться в виде дубликата.

При опробовании рыхлых структурных кор выветривания или элювия минерализованных пород бороздовые пробы должны отбираться вручную или механизированными способами по всей линии опробования с последующим сокращением до установленной массы. При этом поперечные сечения борозд практически могут быть любыми, так как при длинах проб в 2 м их площади не окажут существенного влияния на статистические характеристики содержаний рудных элементов.

Для целей геохимического опробования широко используются возможности радиометрических и ядерно-геофизических методов. При специализированных съемках, поисках и разведке урановых месторождений проводятся гамма-спектрометрические наблюдения в наземных и воздушных вариантах. При поисках и разведках месторождений бериллиевых руд для целей геохимического опробования используются специальные бериллометры.

§ 3. РЯДОВОЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ В ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ

Рядовое опробование руд редких и радиоактивных элементов производится на всех стадиях поисковых и разведочных работ линейным способом — путем опробования керна, гамма-каротажа скважин, механического отбора бороздовых (значительно реже шпуровых) проб или с помощью линейных радиометрических замеров рудных тел в горных выработках.

Основными методами рядового опробования руд радиоактивных элементов являются радиометрические методы в скважинном и подземном вариантах, с отбором керновых и бороздовых проб для целей контроля радиометрических методов. На молибден-урановых, урано-фосфорных и других комплексных месторождениях со сложной радиологической характеристикой руд, а также на месторождениях редких элементов в массовом масштабе применяется рядовое керновое и бороздовое опробование.

Количественный гамма-каротаж является главным методом опробования разведочных скважин на всех стадиях поисков и разведки урановых месторождений. Приоритет в разработке методов гамма-каротажа и широком внедрении их в геологоразведочную практику принадлежит советским ученым [33].

Гамма-каротаж заключается в измерении интенсивности естественного гамма-излучения пород и руд по оси разведочной скважины для определения концентрации радиоактивных элементов. Мелкие скважины глубиной до 120 м каротируются

вручную легкими каротажными радиометрами КРЛ-М (Истра) на газоразрядных источниках или каротажными приборами на сцинтилляционных счетчиках с автоматической записью показаний ПРКС-2 (Виток-2), КУ-59, РКР.

Для каротажа глубоких скважин применяются специальные каротажные станции на автомашинах, оборудованных механическими лебедками и измерительными блоками с пультами управления, — КРТ (Рица), РАРК, КРС на газоразрядных счетчиках. Сцинтилляционные счетчики, обладающие очень высокой чувствительностью, обеспечивают хорошие результаты при поисковом каротаже, а для целей количественного опробования их приходится экранировать специальными свинцовыми экранами для устранения зависимости показаний прибора от состава пород и руд.

Количественная интерпретация данных гамма-каротажа производится по гамма-каротажным кривым. В практике геологоразведочных работ используются два способа интерпретации гамма-каротажных диаграмм: интегральный и дифференциальный.

При интегральном способе интерпретации главная задача сводится к выбору приема определения мощностей (границ) рудных скоплений. При четких контактах и мощностях рудоносных пластов более 50 см применяется способ $1/2 I_{\max}$ (рис. 7), а при малой мощности рудных пластов — способ $4/5 I_{\max}$.

При неравномерном содержании, но резких границах раздела рудных скоплений и вмещающих пород Л. Ч. Пухальский рекомендует применять способ z_0 [33].

При отсутствии четких геологических границ контуры рудных тел и прослои пустых пород определяются по способу заданной интенсивности, т. е. условно, по точкам гамма-каротажной кривой, которые соответствуют значениям интенсивности, отвечающим нижнему пределу содержания урана в рудах, принятому для оконтуривания рудных тел (рис. 8, 9).

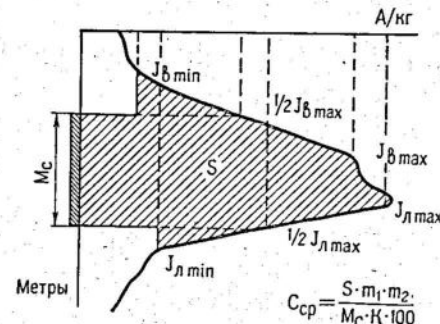


Рис. 7. Схема определения мощности ураноносного пласта и среднего содержания урана по способу $1/2 I_{\max}$.

$I_{\min}$, $I_{\max}$, $1/2 I_{\max}$ — значения минимальной, максимальной и половины максимальной интенсивностей для участка гамма-каротажной кривой висящего бока залежи; $I_{\min}$, $I_{\max}$, $1/2 I_{\max}$ — то же, для участка кривой лежащего бока залежи; M_c — стволовая мощность залежи; C_{cp} — содержание урана в процентах на стволовую мощность; K — пересчетный коэффициент в гаммах на 0,01 % урана; S — площадь в квадратных сантиметрах; m_1 , m_2 — вертикальный и горизонтальный масштабы построения графиков; I_0 — значение интенсивности, соответствующее бортовому пределу содержания урана в руде

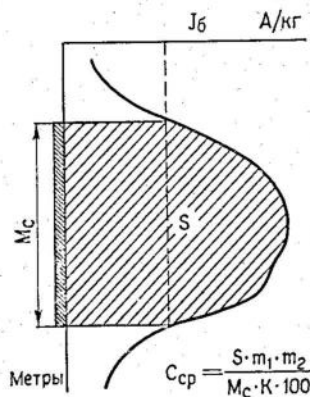


Рис. 8. Схема определения мощности урановой залежи и среднего содержания урана по способу заданной интенсивности.

I_6 — значение интенсивности, соответствующее бортовому пределу содержания урана в руде

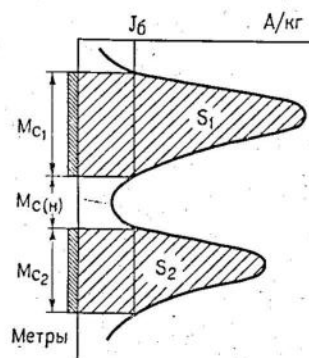


Рис. 9. Схема выделения прослоя некондиционных руд в сложной залежи по способу заданной интенсивности.

M_{c1} — стволовая мощность верхнего рудного прослоя; M_{c2} — стволовая мощность нижнего рудного прослоя; M_{cn} — стволовая мощность прослоя некондиционных руд

Основой интерпретации гамма-каротажа является уравнение

$$S = mqk, \quad (7.1)$$

где S — площадь аномалии на гамма-каротажной кривой; m — мощность радиоактивного пласта; q — среднее содержание урана, выраженное в сотых долях процента; k — пересчетный коэффициент, выраженный в А/кг на 0,01 % урана.

Многочисленные определения пересчетного коэффициента при эффективном атомном номере ($z_{эф}$) пород 15 дают для стандартной гильзы обычных гамма-каротажных радиометров величину порядка $828 \cdot 10^{-14}$ А/кг на 0,01 % равновесного урана. Для урановых руд в углях и битумах со значением $z_{эф} = 10$ величина этого коэффициента повышается до $864 \cdot 10^{-14}$ А/кг, а для урановых руд в железистых кварцитах со значением $z_{эф}$ от 18 до 24 снижается до $777 \cdot 10^{-14}$ А/кг.

При исследовании скважин в условиях проведения разведочных работ в результаты гамма-каротажа необходимо вводить поправки на поглощение гамма-лучей обсадными трубами и буровым раствором. Величина поправки за нарушение радиоактивного равновесия между ураном и радием оценивается коэффициентом радиоактивного равновесия K_{pp} по формуле

$$K_{pp} = \frac{C_{Ra}}{C_U}, \quad (7.2)$$

где C_{Ra} — содержание радия, выраженное в единицах равновесного урана, а C_U — содержание урана в рудах. Для пересчета содержания радия в единицы равновесного урана оно уменьшается на $2,94 \cdot 10^6$.

Значения K_{pp} рассчитываются по данным кернового или бороздового опробования. С этой целью по разведочному пересечению отбираются интервальные пробы длиной по 20 см с выходом во вмещающие породы лежащего и висячего боков рудной залежи, в которых определяются содержания урана и радия [14].

Метод количественного гамма-каротажа может быть использован и для опробования скважин при разведке ториевых месторождений. Для пересчета данных гамма-каротажа на содержание тория применяется пересчетный коэффициент 374×10^{-14} А/кг на 0,01 % тория. Этот же коэффициент используется при введении поправок на содержание тория в рудах.

Для дифференциального способа интерпретации гамма-каротажа удобнее не непрерывная, а дискретная запись наблюдений по интервалам, однако не исключается возможность дифференциальной интерпретации гамма-каротажных диаграмм и по непрерывным кривым.

Дифференциальная интерпретация гамма-каротажа позволяет характеризовать изменения содержания урана по оси скважины в интервалах от 5—10 см и более. Использование результатов дифференциальной интерпретации способствует выявлению деталей внутреннего строения урановорудных скоплений в масштабах забоев горных выработок и вероятных объектов селекции руд. В практике геологоразведочных работ эти данные используются для выбора оптимальных кондиций, вариантов оконтуривания рудных скоплений при подсчетах запасов и геолого-экономических оценках месторождений, оценок степени радиометрической контрастности руд, перспектив их радиометрического обогащения и сортировки при добыче.

Задача дифференциальной интерпретации каротажа сводится к решению интегрального уравнения вида:

$$I_z = K \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(z-x) q(x) \cdot dx, \quad (7.3)$$

где $q(x)$ — содержания в элементарных «пластах» (интервалах), на которые условно разделяется урановорудное скопление; I_z — величина гамма-излучения, измеряемая в скважине.

Для практических целей интегральные уравнения заменяются системами линейных уравнений с допущением одинаковой плотности пород и руд, равномерного распределения оруденения в элементарном пласте и линейного изменения коэффициента поглощения (Н. Скотт, Р. Рейслер, 1965 г.).

В нашей стране разработан ряд алгоритмов для решения этой задачи на малых ЭВМ [33].

При дифференциальном способе интерпретации поправки за нарушения радиоактивного равновесия вводятся в каждое значение на выходе ЭВМ, для чего они делятся на величину K_{pp} .

Радиометрическое опробование руд заключается в определении средней концентрации радиоактивных элементов в рудах путем измерения их гамма-излучения непосредственно на месте залегания. Для решения этой задачи из общего гамма-излучения, измеряемого радиометром, выделяется излучение опробуемого участка. Общее гамма-излучение на месте залегания руд складывается из излучения опробуемого участка, излучения прилегающих к нему участков и окружающих пород (руд) и фона прибора (рис. 10). Для выделения из общего гамма-излучения только излучения опробуемого участка руд применяются экраны различных конструкций: цилиндрические с продольной щелью и цилиндрические с окном в торце.

Для производства радиометрического опробования на месте залегания сконструированы специальные рудничные радиометры направленного действия (РНП), в которых автоматически исключается влияние фона гамма-излучения прилегающих участков, что позволяет ограничиться одним замером вместо двух. Для гамма-опробования с экранами могут быть использованы обычные радиометры, применяемые для геофизической документации горных выработок. Наиболее удобен из них универсальный рудничный радиометр «Дедал».

Радиометрическое опробование проводится в горных выработках по тем же линиям, что и отбор бороздовых проб. Точки измерений располагаются по всей длине опробуемых линий на расстоянии длины катода счетчика (примерно 10 см), что обеспечивает получение сплошной «радиометрической борозды». По результатам измерений для каждой опробованной линии строится кривая разности интенсивностей, т. е. кривая значений ΔI в каждой измеренной точке.

При опробовании рудных скоплений с резкими контактами и высокой радиометрической контрастностью радиометрическая борозда разделяется на отдельные секции с богатым, рядовым, бедным, убогим и некондиционным содержанием. При интерпретации кривых опробования менее контрастных рудных залежей с нечеткими

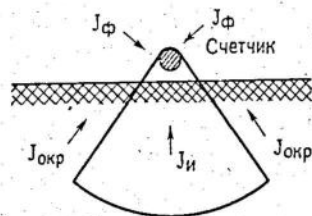


Рис. 10. Схема составляющих общего гамма-излучения при радиометрическом опробовании (без экрана).

$I_{и}$ — излучение опробуемого участка; $I_{окр}$ — излучение окружающих пород и руд; $I_{ф}$ — фоновое излучение

постепенными переходами во вмещающие породы радиометрическая борозда иногда разделяется на секции, а внутри нее выделяют участки некондиционных руд и практически пустых пород.

На рудниках с очень большими объемами опробования, когда радиологические и химические свойства руд изучены хорошо, используются радиометры направленного приема со спектрометрическими счетчиками.

При гамма-опробовании маломощных рудных тел возможно появление систематических погрешностей в сторону некоторого занижения содержания урана, так как максимумы кривых становятся непропорциональными содержаниям урана. При очень малых мощностях рудных пластов погрешности могут достигать значительных размеров, но уже при мощностях рудных тел порядка 50 см они не превышают 15 %. Так как для большинства урановых рудных залежей рабочие мощности превышают 0,6 м, то погрешностями, обусловленными неполным снятием кривой разности интенсивностей, практически можно пренебречь.

При гамма-опробовании пород и руд с эффективными атомными номерами, заметно меньшими по сравнению с $Z_{эф}$ обычных силикатных руд (ураноносные угли, торфяники, глины и др.), экспериментальное определение коэффициента экрана для предупреждения систематических погрешностей необходимо проводить на рудах данного месторождения.

Влияние резкой неравномерности оруденения на точность результатов гамма-опробования ограничивается тем, что приводит к расхождению результатов по отдельным пробам, но не дает систематических погрешностей, так как при осреднении результатов опробования по линиям, отдельным сечениям и блокам эти расхождения взаимно компенсируются.

При разведке урановых месторождений с весьма и крайне изменчивым распределением рудных компонентов может оказаться целесообразным опробование двумя и даже тремя радиометрическими бороздами обеих стенок разведочного орта с последующим осреднением полученных данных как для вывода средних содержаний, так и для оконтуривания рудной залежи или для вычисления коэффициента рудоносности.

Таким образом, гамма-опробование как основной метод может применяться при разведке почти всех известных промышленных типов урановых месторождений, за исключением залежей инфильтрационного происхождения со сложным зональным смещением радиоактивного равновесия и зон окисления урановых месторождений.

Шпуровое гамма-опробование горных выработок производится по отпалочным шпурам или по специальным шпурам, которые пробуриваются для оконтуривания руд-

ных тел, залегающих вблизи пройденной разведочной выработки. Шпуровое гамма-опробование по существу аналогично гамма-каротажу, но производится обычными рудничными радиометрами СРП-2к и др. Замеры интенсивности гамма-излучения производятся через интервалы 10—20 см (примерно равные длине катода счетчика).

При весьма неравномерном характере распределения рудных минералов расстояния между точками замера могут сокращаться до половины длины катода счетчика. По данным гамма-опробования шпуров отстраиваются соответствующие кривые, интерпретация которых производится теми же приемами, что и интерпретация гамма-каротажных кривых.

По сравнению с данными радиометрического опробования на месте залегания шпуровое гамма-опробование обеспечивает повышенную достоверность и точность замеров, так как на их проведение не оказывают влияние помехи от гамма-радиации соседних участков.

Шпуровое гамма-опробование может применяться как самостоятельный метод или в комплексе с радиометрическим гамма-опробованием на месте залегания (рис. 11).

Ядерно-физические методы опробования находят применение и при разведках некоторых месторождений редких металлов. В последние годы широко применяются фотонейтронные методы для опробования на месте залегания бериллиевых руд.

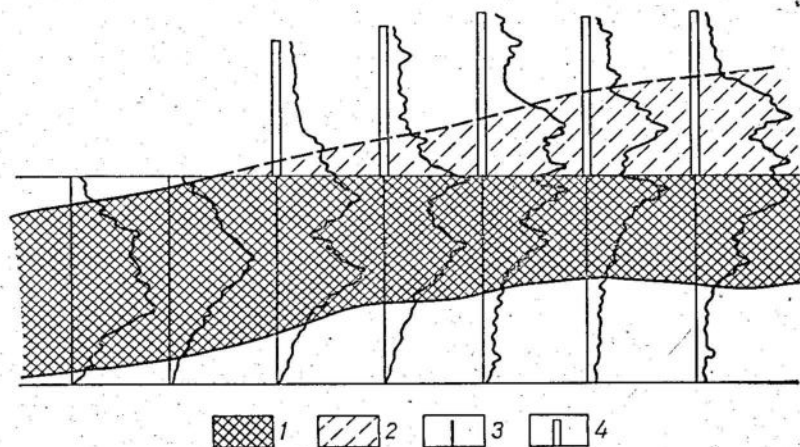


Рис. 11. Использование шпурового гамма-опробования в комплексе с радиометрическим опробованием при вскрытии пологозалегающей рудной залежи в стенке штрека.

1 — контуры рудной залежи по данным радиометрического опробования в стенке штрека; 2 — контуры рудной залежи по данным шпурового опробования в породах кровли; 3 — радиометрические борозды; 4 — шпуров

С этой целью используются датчики типа ФНД-4-59-1 на газоразрядных пропорциональных борных счетчиках медленных нейтронов. Заслуживает внимания и опыт применения люминесцентных методов для опробования на месте залегания циркониевых и некоторых других руд.

Технологическое опробование руд редких и радиоактивных элементов проводится на всех стадиях разведочных работ, а для многих сложных по составу редкометальных руд — уже на поисково-оценочной стадии.

Технологические пробы должны обладать максимальной представительностью, т. е. воспроизводить все основные количественные и качественные показатели, типичные для тех рудных блоков или залежей, из которых они отобраны. Представительность технологического опробования в конце периода детальной разведки определяется следующим комплексом требований:

- технологические пробы должны быть отобраны по всем типам и сортам руд, которые в дальнейшем потребуют самостоятельных схем переработки или будут резко различаться по технико-экономическим показателям при переработке по одной и той же схеме;

- среднее качество, забойная кусковатость и другие свойства руд в каждой технологической пробе должны соответствовать среднему качеству и другим свойствам руд опробуемого блока, рудного тела или группы рудных тел;

- места отбора частных валовых проб, составляющих каждую технологическую пробу, должны быть равномерно распределены по всем разведочным выработкам, входящим в контуры руд данного технологического типа или сорта, а количество рудного материала, отбираемого в технологическую пробу из каждого блока или самостоятельного рудного тела, должно быть пропорциональным запасам руд в этих блоках и телах;

- техника пробоотбора по возможности должна приближаться к условиям будущей разработки руд.

Для выполнения всех этих требований наиболее ответственные полужаводские и заводские технологические пробы отбираются из специально проводимых для этой цели горных выработок.

К одному из видов технологического опробования относится также изучение радиометрической контрастности руд, необходимое не только для расчетов технологических показателей радиометрического обогащения руд, но и для выбора оптимальных систем разведки и разработки месторождений. Исследования радиометрической контрастности урановых руд производятся в опытным порядке на крупных технологических пробах;

а предварительная оценка обеспечивается по данным дифференциальной интерпретации результатов радиометрического опробования и гамма-каротажа скважин. Подробнее методика изучения радиометрической контрастности руд рассматривается в главе X.

Техническое опробование руд редких и радиоактивных элементов в скважинах, шпурах и горных выработках производится в ограниченных объемах главным образом для определения объемных масс и влажности руд, а также некоторых горно-технических или инженерно-геологических свойств вмещающих пород. Исключение в этом отношении представляют урановые месторождения, предназначенные к добыче способом подземного выщелачивания, при разведке которых проводится разнообразный комплекс испытаний руд и вмещающих пород для оценки их гранулометрического состава, пористости, проницаемости, фильтрационных и других свойств, необходимых для проектирования добычных работ (см. гл. XII).

Для определения объемных масс и влажности руд отбираются штучные пробы, которые сразу же после отбора подвергаются лабораторным исследованиям. Объемные массы, влажность и важнейшие инженерно-технологические свойства определяются в рудах каждого природного и технологического типа и сорта, а также во всех рудовмещающих породах. Число единичных лабораторных определений по каждой из разновидностей руд и вмещающих пород должно быть не менее 2—3 десятков, что обеспечивает уверенный вывод средних значений.

Параллельно с лабораторными определениями объемных масс рекомендуется проводить их контрольные определения непосредственно в целиках, совмещая эти исследования с определениями кусковатости и коэффициентов разрыхления руд. Для этого в разведочной выработке, сечение которой полностью расположено в руде, производится тщательный маркшейдерский замер стенок забоя. После замера производятся отпалка руды, очистка забоя и вторичный маркшейдерский замер. Вся отпаленная руда собирается в мерные ящики и взвешивается, а объем отпаленного пространства вычисляется по разности двух маркшейдерских замеров. Полученные данные позволяют определить коэффициент разрыхления пород и руд путем сравнения их объемов в первичном залегании и в разрыхленном состоянии, а также величину объемной массы как частное от деления массы руды на тот объем, который она занимала в естественном залегании. Опробование целиков для определения коэффициента разрыхления и объемной массы оформляется специальным актом.

Основные определения объемной массы руд и вмещающих пород при разведке месторождений редких и радиоактивных металлов проводятся радиометрическим методом, основанным на измерении степени ослабления гамма-излучения точечного

источника при прохождении гамма-лучей через толщу пород различной плотности. Сущность этого метода сводится к следующему.

В месте измерения объемной массы (плотности) пород или руд пробуриваются несколько шпуров глубиной по 0,6 м. Шпуры располагаются на некотором расстоянии друг от друга с таким расчетом, чтобы в плане они образовали квадратную ячейку со стороной, равной 30 см. В качестве точечного источника гамма-излучения используется мезоториевый или другой эталон. Этот эталон помещается поочередно в каждый из пробуренных шпуров, а в другом шпуре замеряется интенсивность его гамма-излучения, ослабленная при прохождении через толщу пород или руд. Для расчета объемной массы измеряемых пород используется функциональная зависимость величины поглощения гамма-лучей от плотности поглощающей среды:

$$\frac{I}{I_0} = F(\rho_x, z_{\text{эф}}, E_0), \quad (7.4)$$

где I и I_0 — величины гамма-радиации на расстоянии x от точечного источника соответственно при наличии поглощающей среды плотностью ρ и при ее отсутствии; $z_{\text{эф}}$ — эффективный атомный номер среды; E_0 — энергия гамма-лучей точечного источника.

Для постоянных значений $z_{\text{эф}}$ и E_0 поглощение гамма-лучей будет пропорционально поверхностной плотности ρ_x . На основании этого принципа А. А. Татарниковым (1957 г.) предложена формула:

$$\rho = -\frac{28}{x} \ln \frac{I_1}{I_0}, \quad (7.5)$$

где I_0 — активность, измеряемая от эталона в воздухе; I_1 — активность в месте измерения, т. е. в шпуре, за вычетом активности вмещающих пород или руд; x — путь гамма-лучей в породе (расстояние, измеренное между шпурами); 28 — коэффициент, определенный экспериментальным путем.

Определение плотности пород с эффективными номерами от 13 до 27 можно проводить по усредненной кривой (палетке), предложенной Л. Ч. Пухальским [33]. По данным этого автора, величина погрешности при использовании усредненной кривой не превышает 7 %.

Многочисленная проверка метода радиометрического определения объемной массы в условиях месторождений радиоактивных руд различного генезиса показала, что по достоверности результатов он превосходит способы лабораторного определения и приближается к методу определения объемной массы руд в целиках.

§ 4. ОПРОБОВАНИЕ РУД РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЫХЛОМ ПЕРЕМЕШАННОМ СОСТОЯНИИ

Необходимость опробования руд редких и радиоактивных элементов в рыхлом состоянии возникает в процессе проведения массовых поисков, разведки и эксплуатации месторождений.

В процессе массовых поисков урановых руд опробованию подвергаются старые отвалы горных выработок и отходы горного производства. В случаях, если гамма-съемками или какими-либо другими методами устанавливается повышенная радиоактивность старых отвалов или отходов, возникает необходимость их опробования для оценки содержащихся в них запасов урана. В процессе разведочных и эксплуатационных работ на месторождениях редких и радиоактивных руд отвалы и материал закладки горных выработок систематически опробуются для определения потерь металлов и контроля за качеством отработки. На урановых месторождениях широко практикуется радиометрическое экспресс-опробование отбитых руд и горных масс в различных транспортных емкостях: вагонетках, автомашинах, железнодорожных вагонах, ковшах экскаваторов, а также на лентах транспортеров, в бункерах и др. Экспресс-анализы урановых руд в емкостях проводятся с целью их селективной добычи, сортировки по сортам или радиометрического обогащения.

На месторождениях с особо сложным, прерывистым размещением богатых, но весьма малых по размерам рудных скоплений в недрах рядовое опробование руд заменяется опробованием добычей. В качестве пробы используется весь добытый материал штучных руд, который вынимается из недр селективно, упаковывается в специальные мерные ящики и подвергается экспресс-анализу (бедные руды, а также все виды потерь в закладке, отвалах и в недрах опробуются и учитываются особо). При опробовании добычей в рудах оценивается не среднее содержание металла, а его валовое количество, по которому рассчитывается «выход» металла на единицу площади жилы или на единицу объема недр.

Опробование отвалов, бункеров и транспортных сосудов производится горстьевым способом (способом вычерпывания) непосредственно с поверхности отбитой и перемешанной рудной массы или из лунок, для предупреждения систематических погрешностей, связанных с избирательными потерями обогащенной рудной мелочи. Объемы частных проб зависят от требований к массе общей пробы, а места их отбора равномерно размещаются на поверхности отбитой рудной массы. В простейшем случае отбирается пять частных проб — по углам сосуда и в его центре (конвертом). Иногда на поверхность отбитой рудной массы набрасывается сетка, а пробы отбираются из цент-

ров каждой (или «л»-ой) ячейки. При опробовании крупных отвалов по геометрически правильной сети проходятся специальные шурфы. Частные пробы отбираются порциями, равномерно с различных горизонтов каждого шурфа.

Для целей опробования урановых руд в транспортных емкостях сконструированы специальные радиометрические контрольные станции (РКС). Вагонеточное опробование и сортировка руд производится с помощью РКС на каждом горизонте горных работ или на поверхности у устья шахты (штольни). РКС оборудованы радиометрами типа РСР-3 («Стрела»), позволяющими выделять до пяти сортов руд в диапазоне содержания равновесного урана от 0,001 до 1 %, или более совершенными радиометрами «Шифр» с дешифрирующим устройством для автоматического определения адреса каждой вагонетки. Относительные погрешности экспресс-анализа руды в вагонетке могут достигать значений ± 25 %, однако для групп в десятки вагонеток предельные ошибки снижаются до ± 10 %, а для партий руды за срок в неделю и более погрешности оценки содержания урана не превышают ± 3 %. Для карьерных разработок урановых месторождений созданы специальные конструкции радиометров, монтируемые в ковшах экскаваторов, а также конструкции РКС для экспресс-анализов урановых руд в автосамосвалах и железнодорожных вагонах. Для опробования урановых руд на транспортерах используются радиометры типов РКС-Т, РКС-Р-10 и другие приборы, оборудованные счетчиками сцинтилляционного типа.

Экспресс-опробование богатых штучных руд в ящиках или иных стандартных емкостях производится сцинтилляционными стационарными радиометрами различных типов. Для более подробного знакомства с методами опробования урановых месторождений и аппаратурой для экспресс-анализа урановых руд на месте залегания и в различных транспортных емкостях рекомендуется книга Л. Ч. Пухальского и М. В. Шумилина [33].

§ 5. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗОВ ПРОБ

Все пробы, отобранные механическими способами из недр (за исключением материала распила при использовании дисковых алмазных пробоотборников), подвергаются последующему измельчению для обеспечения отбора представительных навесок. Совокупность операций по измельчению, просеиванию, перемешиванию и сокращению рядовых проб производится на установках для обработки геологических проб. Расчет рациональных схем обработки проб осуществляется по формуле Ричардса—Чечотта, а погрешность, вносимая в оценку содержания полезного компонента за счет сокращения пробы, может быть рассчитана по формуле Ю. А. Ткачева [19].

При обработке геохимических проб, отобранных из рыхлых отложений, они подвергаются предварительному просеиванию для отбора гранулометрических фракций, наиболее благоприятных для выявления концентраций подвижного урана.

Все отобранные пробы подвергаются анализам или испытаниям. Виды анализов и методы испытаний зависят от назначения проб, комплекса анализируемых элементов и областей применения результатов. При поисках и разведках редких и радиоактивных металлов используются физические (эмиссионные спектральные, атомно-абсорбционные и пламенно-фотометрические), физико-химические колориметрические и люминесцентные), радиометрические, радиохимические, и ядерно-физические (рентгеноспектральные, нейтронно-активационные, изотопного разбавления и радиографические) анализы.

Спектральные, атомно-абсорбционные и пламенно-фотометрические анализы особенно широко применяются на ранних стадиях изучения месторождений. Среди них наиболее широким распространением пользуется приближенно-количественный эмиссионный спектральный анализ, обеспечивающий высокую чувствительность и воспроизводимость порядка $\pm 20-50\%$ для большинства рудных элементов и их спутников. Применительно к радиоактивным элементам, а также литию и танталу эмиссионный спектральный анализ не обеспечивает стабильных результатов (табл. 13, 14).

Спектральные анализы должны предшествовать всем другим видам массовых анализов проб. Современная аппаратура для производства приближенно-количественных спектральных анализов позволяет выполнять работу в короткие сроки и обеспечивает возможность определений большого числа анализируемых элементов в каждой отдельной пробе.

Спектральные анализы используются для предварительного определения всех полезных компонентов в рядовых пробах, что необходимо для отбраковки проб с заведомо малыми содержа-

Таблица 13

Пороги чувствительности и погрешности анализов редких элементов

Элемент	Эмиссионный спектральный		Химический		Рентгеноспектральный		Активационный	
	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %
Бериллий	1-100	± 20	1	± 10	—	—	0,5	± 5
Редкие земли	30-500	± 30	100	± 10	200	± 5	1-10	$\pm (3-5)$
Тантал	—	—	20	± 15	200	5-15	0,5	$\pm (3-5)$
Ниобий	30-500	± 30	15	± 15	50	5-15	—	—
Цирконий	10-300	± 20	200	± 20	50	5-15	0,5	$\pm (3-5)$

Таблица 14

Пороги чувствительности и погрешности анализов радиоактивных элементов

Элемент	Эмиссионный спектральный		Химический		Радиометрический		Радиохимический	
	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %
Уран	—	—	$3 \cdot 10^{-3}$	$\pm 5-10$	$5 \cdot 10^{-3}$	$\pm (2-10)$	—	—
Торий	100-300	± 20	10^{-4}	$\pm 5-40$	10^{-4}	$\pm (5-10)$	$2 \cdot 10^{-4}$	$\pm (15-20)$
Радий	—	—	—	—	10^{-3} (экв)	—	$n \cdot 10^{-10}$	$\pm (10-15)$

Продолжение табл. 14

Элемент	Люминесцентный		Рентгеноспектральный		Активационный		Изотопного разбавления	
	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %	Порог, г/т	Погрешность, %
Уран	$2 \cdot 10^{-7}$	$\pm (10-45)$	$(3-5) \cdot 10^{-4}$	$\pm (5-15)$	10^{-7}	$\pm (5-35)$	10^{-8}	$\pm (10-40)$
Торий	—	—	10^{-4}	—	10^{-7}	—	10^{-5}	—
Радий	—	—	—	—	—	—	—	—

ниями. Такая отбраковка позволяет резко сократить число последующих количественных анализов и способствует тем самым удешевлению стоимости геологоразведочных работ.

Химические или физико-химические анализы производят для количественного определения полезных и вредных компонентов, валового химического состава руд и вмещающих оруденение пород, форм нахождения тех или иных элементов в рудах и химического состава рудообразующих минералов.

Определение содержаний главных и сопутствующих полезных компонентов производится путем химических анализов рядовых проб. Содержания главных полезных компонентов определяются в каждой рядовой пробе, а содержания сопутствующих и вредных элементов — в групповых пробах. Методика химических анализов выбирается в зависимости от минерального и химического состава руд. Для определения урана и тория используются колориметрические методы с высокоселективным реагентом — арсеназо III.

Для определения подвижных форм урана в рудах применяются люминесцентные анализы, обладающие более высокой чувствительностью по сравнению с химическими. Методика люминесцентных анализов сводится к переводу урана в раствор, последующему его осаждению и сплавлению с фтористым

натрием. Активированный ураном фтористый натрий люминесцирует под действием ультрафиолетовых лучей. Интенсивность люминесценции, пропорциональная содержанию урана, измеряется с помощью фотоэлектрических флуориметров типа ФАС-2.

Определение химического состава рудообразующих минералов в мономинеральных фракциях необходимо для подсчета запасов:

- главных компонентов некоторых коренных редкометалльных месторождений, когда в одном рудообразующем минерале содержатся несколько редких металлов (например, тантал, ниобий и редкие земли в лопаритах);

- сопутствующих компонентов, когда эти компоненты распределены по нескольким минеральным составляющим (например, уран в пирохлоре и в гатчеттолите);

- россыпных месторождений.

Использование данных химических анализов отдельных рудных минералов для подсчета запасов целесообразно в двух первых случаях только при условии более или менее выдержанного химического состава анализируемых минералов.

Радиометрические анализы широко применяются для определения содержания урана и тория в пробах. По точности они не уступают химическим анализам, но выполняются значительно быстрее. Благодаря этим качествам радиометрические анализы приобрели в настоящее время главное значение при разведке урановых месторождений. Наибольшим распространением пользуются:

- измерения общей радиоактивности проб;
- комплексные бета- и гамма-измерения для определения урана и радия в пробах, не содержащих тория;
- комплексные бета- и гамма-спектральные измерения для определения всех трех радиоактивных элементов;
- гамма-метод определения радия.

Радиометрические анализы выполняются на лабораторных установках типа Б, ЛСУ-5, ДП-100, «Кварта» и др. Достоверность результатов массовых радиометрических анализов проверяется контрольными химическими и радиометрическими анализами дубликатов проб в соответствии с общеустановленными правилами внутреннего и внешнего контроля.

Радиохимическими методами определяются содержания радия и тория в пробах. С этой целью анализируемая проба переводится в раствор химическими методами, а содержания радия и тория определяются путем измерения альфа-активности радона и торона на лабораторных анализаторах типа «Альфа-1» или «РАЛ».

Последние годы радиометрические и радиохимические методы вытесняются высокопроизводительными и чувствительными ядерно-физическими методами.

Рентгеноспектральные анализы с помощью флуоресцентных рентгеновских спектрометров ФРС-2 и ФРА-4 обеспечивают определение содержаний тяжелых элементов, начиная с кобальта. Флуоресцентное излучение возбуждается рентгеновской трубкой, а интенсивность линий спектров регистрируется сцинтилляционными счетчиками. В практике геологоразведочных работ на редкие и радиоактивные металлы рентгеновские спектрометры используются для определения содержания урана, тория, тантала, ниобия, циркония, редких земель, а также многих элементов-индикаторов: свинца, молибдена, цинка, меди, олова и др.

Нейтронно-активационные методы определения урана и тория основаны на облучении образцов или проб потоком тепловых нейтронов с последующим определением наведенной активности, обусловленной возникновением радиоактивных изотопов. Нейтронно-активационные методы обладают наивысшей чувствительностью из всех известных аналитических методов. Анализ производится на нейтронно-активационных комплексах с импульсным ядерным реактором типа ИИН-3 («Гидра»).

Облучение образцов и проб потоками тепловых нейтронов применяется и для целей количественного определения урана и тория в шлифах по подсчетам плотностей треков от осколков индуцированного (принудительного) деления изотопов U^{235} . Этот микрорадиографический метод часто называют «методом осколковой радиографии».

Активационные методы определения металлов в рудах, в частности титана, циркония, полиметаллов и благородных металлов, основанные на гамма-облучении испытуемых проб, выполняются на гамма-активационных аналитических комплексах с микротронами типа МТ-20 и аппаратурой «Луч».

Высокочувствительным методом количественного анализа элементов, имеющих два и более природных изотопа, является метод изотопного разбавления, основанный на смешении раствора анализируемой пробы с точно известным количеством трассера (стандарта), который по изотопному составу резко отличается от природного элемента (например, трассер, обогащенный изотопом U^{235}). После химического выделения элемента масс-спектрографом определяют состав смеси и по степени изменения соотношений изотопов вычисляют содержания природного элемента.

Минералогические (шлиховые) анализы проб являются главным видом массовых анализов при разведках россыпных редкометалльных и ториевых месторождений.

Минералогические пробы, отобранные путем промывки песков, подвергаются анализу в специальных шлиховых лабораториях. Отмытые шлихи разделяются на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции, после чего каждая из них подвергается дальнейшему разделению по плотности в тяжелых

жидкостях. Ценные минералы, содержащие в своем составе редкие и радиоактивные элементы, извлекаются различными способами из соответствующей фракции шлиха и взвешиваются. Содержания ценных компонентов в пробах выражаются в граммах минералов на исходную массу шлиха, а в дальнейшем переводятся в граммы на 1 м³ песков.

Минералогические методы могут использоваться в качестве ведущих и при анализе коренных месторождений, если редкие металлы содержатся в одном рудном минерале, а его химический состав отличается постоянством (например, для определения содержания редких элементов в лопаритоносных ультраосновных — щелочных породах). Замена дорогостоящих химических анализов минералогическими обеспечивает высокий экономический эффект и сокращает время, необходимое для производства сложных массовых определений большого комплекса компонентов.

§ 6. КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ОПРОБОВАНИЯ

В процессе отбора, обработки и анализов проб неизбежно появляется ряд случайных, а часто и систематических погрешностей, связанных как с техникой производства этих операций, так и с методикой пробоотбора и анализов.

При производстве достаточно большого количества единичных операций случайные погрешности взаимно компенсируются и не препятствуют выводу близких к истинным средних значений. Их отрицательное влияние сказывается тем сильнее, чем меньше единичных наблюдений участвует в выводах средних величин и чем выше уровень случайных погрешностей.

При наличии систематических погрешностей, независимо от количества участвующих в выводах единичных наблюдений, средние результаты будут либо завышены, либо занижены по сравнению с истинными на величину, определяемую уровнем систематической погрешности. Поэтому все основные операции процесса опробования должны подвергаться контролю для получения надежных данных, подтверждающих отсутствие систематических погрешностей, и для выявления уровней случайных погрешностей. Достоверность данных опробования устанавливается по отсутствию систематических погрешностей, а точность этих данных — по значению средних случайных погрешностей.

Контроль опробования проводится в процессе отбора и обработки проб, а анализы проб проверяются путем организации систематического внешнего и внутреннего контроля работы лабораторий.

Контроль отбора и обработки проб. Главной задачей контроля качества пробоотбора является подтверждение отсутствия систематических погрешностей. В процессе поисков и разведки

месторождений редких и радиоактивных металлов контроль пробоотбора необходимо проводить для проверки качества бороздового и радиометрического опробования на месте залегания, а также количественного гамма-каротажа скважин.

Проверка качества бороздового пробоотбора необходима в тех случаях, когда возникают подозрения о возможном обогащении или разубоживании проб за счет избирательного выкрашивания хрупких минералов (например, при отборе проб в зонах окисления урановых руд, сложенных урановыми слюдками). Контроль бороздового пробоотбора лучше всего производить с помощью борозд большего поперечного сечения, которые могут располагаться на местах отбора контролируемых борозд, или с помощью валовых проб.

Результаты контроля определяются сравнением не единичных проб, а средних содержаний, вычисленных по достаточно большому количеству контрольных и контролируемых проб. Их число зависит от степени неравномерности оруденения, однако во всех случаях должно быть не менее 40 проб. При сравнении коэффициентов вариации содержаний, вычисленных по совокупности контрольных и контролируемых проб, следует учитывать различия их линейных эквивалентов и вводить соответствующие поправки в получаемые оценки дисперсий содержаний.

Проверка качества радиометрического опробования проводится путем проведения повторных замеров по той же линии «радиометрической борозды». В случаях весьма неравномерного урановорудного оруденения рекомендуется сгустить интервалы наблюдений до половины длины катода счетчика. В отличие от условий механического пробоотбора, когда контрольная и контролируемая пробы представляют различные объемы недр, при радиометрическом опробовании контрольный и контролируемый замеры относятся к одному и тому же объему недр. Поэтому результаты контроля могут сравниваться попарно, по каждой «радиометрической борозде».

Число контрольных радиометрических замеров должно составлять 10 % от их общего числа.

Внутренний контроль качества гамма-каротажа скважин также осуществляется путем повторных замеров, число которых составляет 10 % от их общего числа. Результаты контроля считаются удовлетворительными, если площади аномалий на графиках расходятся не более чем на 10 %.

Контроль качества радиометрического опробования путем сравнения результатов, полученных по радиометрическим бороздам и контрольным бороздовым пробам, а также качества количественного гамма-каротажа скважин путем сравнения результатов интерпретации гамма-каротажных кривых и результатов анализов керновых проб, отобранных с тех же интервалов

(при условии стопроцентного выхода керна), следует рассматривать как внешний контроль.

Поскольку при гамма-каротаже измеряется активность руд, окружающих скважину, а при анализе керновых проб — содержание урана в рудах, вынутых из скважины, нельзя ожидать совпадения результатов по отдельным разведочным скважинам, так как сравниваются содержания, относящиеся к разным частям рудных тел. Эти расхождения будут тем заметнее, чем неравномернее распределено оруденение в рудных телах. Однако если в керновом опробовании и в данных гамма-каротажа нет систематических погрешностей, то эти расхождения взаимно компенсируются при вычислении средних величин по достаточно большому количеству скважин. Сказанное полностью относится и к сопоставлению данных радиометрического и бороздового опробования. Если же по результатам обоих видов опробования будут установлены систематические расхождения, то для решения вопроса о достоверности того или другого метода потребуется проведение дополнительных исследований (в частности, полного комплекса исследований по выявлению радиологических свойств руд).

При обработке проб погрешности обычно имеют случайный характер, однако возможно возникновение и систематических погрешностей в связи с избирательным истиранием и потерями рудного материала. Для контроля способа и качества обработки проб проводится систематический контроль всех отходов, которые получают при сокращении проб, или экспериментальная обработка нескольких партий проб по схеме, составленной с заведомо большим значением коэффициента « k » в формуле $Q = kd^2$.

Контроль анализов проб. Для установления надежности определения содержаний полезных и вредных компонентов в анализируемых пробах качество работы всех лабораторий подвергается специальному внутреннему и внешнему контролю.

Внутренний контроль проводится в той же лаборатории, в которой производятся массовые анализы рядовых и групповых проб. С этой целью в лаборатории повторно направляются зашифрованные дубликаты некоторой части проб, приготовленные из материала последних отбросов каждой пробы.

Контрольные пробы подбираются группами, отдельно по каждому природному технологическому типу руд, а также по классам с различными содержаниями полезных компонентов (класс ниже минимального промышленного содержания, классы убогих, рядовых и богатых руд).

Внутренний контроль проводится на протяжении всего срока разведочных работ (например, поквартально). Для каждого периода контроля должно быть не менее 25—30 контрольных проб по каждому классу. Общее же количество контрольных проб — не менее 5 % всего числа проанализированных проб за

весь период разведочных работ. Внутренним контролем устанавливаются только значения средних случайных погрешностей анализов.

Для каждого элемента, в зависимости от его среднего содержания в руде, инструкциями ГКЗ установлены требования к точности анализов, которые выражаются предельными значениями допустимых средних погрешностей (табл. 15). Средние случайные погрешности определяются как среднеарифметические из единичных расхождений контрольных и контролируемых анализов без учета их знаков.

Таблица 15

Предельные значения допустимых средних случайных погрешностей анализов редких и радиоактивных металлов

Металлы	Содержания металла в руде, %	Предельно допустимые средние погрешности к содержанию определяемого компонента, %	
		Химические анализы	Радиометрические анализы
Литий	>1	10	—
	$1-0,1$	10—20	—
Бериллий	$0,1-0,01$	20—30	—
	>5	5	—
Редкие земли	$5-0,1$	5—10	—
	$0,1-0,01$	10—30	—
Тантал и ниобий	>1	10	—
	$1-0,1$	10—20	—
Цирконий	$0,1-0,01$	20—30	—
	>10	5	—
Уран	$10-1$	5—10	—
	$1-0,1$	10—20	—
Торий	$<0,1$	20—25	—
	>3	5	—
Радий (в единицах эквивалентных урану)	$3-1$	5—10	—
	$1,0-0,1$	10—15	—
	$<0,1$	15—25	—
	>1	5	5
	$0,1-1$	5—7	5—7
	$0,03-0,1$	—	7—10
	$<0,03$	—	до 20
	>1	—	6
	$0,1-1$	—	6—9
	$0,03-0,1$	—	9—16
	$0,02-0,03$	—	16—21
	$<0,02$	—	до 35
	>1	3 *	3
	$0,01-1$	3—4 *	3—4
	$0,03-0,01$	4—7 *	4—7
	$<0,03$	до 15 *	до 15

Примечание. Допустимые погрешности для промежуточных содержаний в пределах выделенных классов определяются соответствующей интерполяцией.

* Радиохимический анализ.

Внешний контроль анализов проводится в другой, как правило, более квалифицированной лаборатории, имеющей опыт выполнения анализов на редкие и радиоактивные металлы. Главной задачей внешнего контроля является своевременное вскрытие и устранение систематических ошибок в работе основной лаборатории.

В отличие от случайных погрешностей, средние значения систематических погрешностей позволяют судить о достоверности анализов проб, т. е. о том, в какой степени полученные содержания полезных компонентов соответствуют истинным их содержаниям в пробах.

На внешний контроль пробы также подбираются группами по классам содержаний, отдельным технологическим и природным типам руд. Внешний контроль производится периодически на протяжении всего срока разведки, но не реже двух раз в год. Количество контрольных проб в каждой партии и в каждом классе руд должно быть не менее 25—30, а общее их количество — не менее 3—5 % от общего числа проанализированных проб. При небольших объемах опробования общее количество контрольных анализов должно быть не менее 50—60 по каждому классу и каждому полезному компоненту.

Для оценки результатов внешнего контроля не устанавливается никаких пределов, так как при удовлетворительном качестве анализов систематическая погрешность в работе лаборатории должна практически отсутствовать. Вычисление средней систематической погрешности по расхождениям контрольных и контролируемых анализов производится путем раздельного суммирования всех единичных расхождений с положительными и отрицательными знаками. По их алгебраической сумме вычисляется среднеарифметическое значение систематической погрешности, которое, кроме цифрового значения, характеризуется и знаком отклонения.

Глава VIII

МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ И РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Важнейшие методы поисков месторождений редких и радиоактивных металлов различаются техническими приемами выявления поисковых признаков. В зависимости от этого все современные поисковые методы разделяются на три группы:

- геолого-минералогические,
- геофизические (радиометрические),
- геохимические.

На ранних стадиях исследований эти же методы в совокупности с методами специального геологического картирования используются для создания геологической основы поисков. Применительно к прогнозу и поискам урановых месторождений эффективность использования различных методов иллюстрируется табл. 16.

§ 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПОИСКОВ

Эффективное проведение поисков возможно лишь на доброкачественной геологической основе. С этой целью для перспективных территорий составляются специализированные геологические, геофизические и другие карты, обеспечивающие возможность уверенного прогнозирования рудоносных площадей, выбора эффективных методов и направлений поисковых работ. В отличие от обычного геологического картирования специализированные геологические карты с наибольшей полнотой отражают те особенности геологического строения, которыми определяются ведущие поисковые критерии урановых и редкометальных месторождений ожидаемых промышленных типов. Они составляются в масштабах от 1:200 000 до 1:10 000 при проведении геологопрогнозных, геологосъемочных и поисковых работ.

Специализированное геологическое картирование включает в себя:

- комплекс структурно-геофизических работ;
- составление аэрогеологических и ландшафтных карт;
- специальное картирование метасоматитов;
- водно-гелиевую съемку;
- геохимическую съемку, специализированную на редкие или радиоактивные элементы с опробованием пород на содержание радиогенного свинца.

Комплекс структурно-геофизических работ (глубинное сейсмическое зондирование, гравиметрические и магнитные съемки,

Эффективность применения различных методов при прогнозе и поисках уранового оруденения

Методы исследований		Стадии изучения недр				
		Региональные металлогени- ческие иссле- дования м-ба 1 : 1 000 000 (и мельче)	Съемочно- прогнозные работы м-ба 1 : 200 000 (1 : 100 000)	Съемочно- поисковые работы м-ба 1 : 50 000 (1 : 25 000)	Поисковые работы м-ба 1 : 10 000	Поисково- разведочные работы м-ба 1 : 2000 (и крупнее)
Дешифрованное снимков	Космические снимки	XXX	XXX	X	—	—
	Высотные аэроснимки	—	XXX	XXX	X	—
	Обычные аэроснимки	—	—	XXX	XXX	X
Структурно- геофизические методы	Глубинное сейсмозондирование	XXX	X	—	—	—
	Гравиметрия	XXX	XXX	XXX	X	—
	Магнитометрия	X	XXX	XXX	XXX	XXX
	Электроразведка	—	—	XXX	XXX	XXX
Ядерные	Аэрогамма-спектрометрия	X	XXX	XXX	—	—
	Автогамма-съемки				XXX	X
Радиометри- ческие методы	Пешеходные гамма-съемки, в том числе гам- ма-спектрометрические наблюдения	—	X	X	XXX	XXX
	Гамма-картаж скважин и профилирование горных выработок	—	X	X	XXX	XXX
Литогеохимические методы	Геохимические съемки в комплексе с оскол- ковой радиографией и изотопией свинца	—XXX	XXX	XXX	—	—
	Съемки дошлых осадков	—	XXX	X	—	—
	Ореольные уранометрические съемки	—	—	X	XXX	XXX
	Изотопно-свинцовый метод или метод РД	—	—	—	X	XXX
Гидрогеохимиче- ские методы	Опробование малых рек и ручьев	XXX	XXX	—	—	—
	Радиогидрогеологическая съемка	—	—	0	0	0
	Наблюдения в горных выработках и сква- жинах	—	—	—	X	X
	Радиобогеохимическая съемка	—	0	0	0	—
Газовые съемки	Водно-гелиевая съемка	XXX	XXX	—	—	—
	Эманиционно-гелиевая съемка	—	—	XXX	XXX	X

Примечание. XXX — ведущий метод, X — вспомогательный метод, 0 — применяется только в благоприятных природных условиях.

электроразведочные и др. работы) проводится до начала или, во всяком случае, с опережением специализированного геологического картирования. В масштабах 1:1 000 000 и мельче ведущее значение имеют методы ГСЗ и гравиметрия, в масштабах 1:200 000—1:50 000 — гравиметрия и магнитометрия, а в масштабе 1:10 000 и крупнее — высокоточная гравиметрия, магнито- и электроразведка.

При составлении геологических карт масштабов 1:1 000 000 и мельче используются космические телевизионные фотоснимки малого и среднего разрешения. Снимки малого разрешения обеспечивают выявление глыбовых и крупных кольцевых структур, шовных зон и крупных глубинных разломов, а по снимкам среднего разрешения выявляются структурные блоки, глубинные разломы, вулканотектонические и кольцевые структуры, многие структурно-вещественные комплексы пород. При составлении карт масштабов 1:200 000 и 1:50 000 используются космические снимки высокого разрешения, высотные аэро- и радарные снимки, по которым дешифрируются зоны повышенной проницаемости и тектонические нарушения, массивы изверженных пород, вулканотектонические, кольцевые и другие рудоконтролирующие структуры. При картировании в масштабах 1:10 000 и крупнее применяются различные черно-белые, цветные, спектрзональные и другие аэрофото- и радарные снимки.

В совокупности с космическим и аэрофотогеологическим дешифрированием составляются карты современных и палеоландшафтных условий районов поисковых работ, позволяющие оценить особенности проявления поисковых признаков уранового и редкометального оруденения в приповерхностном покрове Земли.

Особое внимание при специализированном геологическом картировании уделяется изучению метасоматических изменений вмещающих пород, выделению формационных и фациальных типов метасоматитов, оконтуриванию площадей развития метасоматических пород, перспективных на выявление месторождений различных урановорудных и редкометальных формаций. На ранних этапах картирования метасоматитов может быть использован экспрессный петрофизический метод, разработанный М. И. и В. И. Пахомовыми. Метод основан на том, что характерные для неизмененных пород положительные корреляционные связи между их плотностью и магнитной восприимчивостью исчезают или меняют свой знак в метасоматически измененных породах. Проведение работ сводится к массовому определению указанных свойств пород и построению карт изолиний значений коэффициентов корреляции [32]. В дальнейшем зоны метасоматически измененных пород изучаются обычными петрографическими и геохимическими методами.

Существенную помощь при изучении блоковых структур рудоносных районов оказывают водно-гелиевые съемки, фикси-

рующие проявления гелиевых аномалий вдоль зон глубинных разломов. Использование водно-гелиевых съемок наиболее эффективно на ранних этапах исследований. В зависимости от детальности водно-гелиевых съемок одна проба воды при масштабе 1:1 000 000 приходится примерно на 50—70 км², а при масштабе 1:200 000 — на 10—15 км². Поскольку концентрации гелия в приповерхностных частях земной коры ослабляются пропорционально квадрату мощности покрова осадочных пород, отбор проб производится при небольших глубинах залегания фундамента (порядка 100—200 м) с горизонтов 5—10 м ниже дневной поверхности, а при глубоком залегании фундамента (более 500 м) — с горизонтов глубиной до 100—150 м.

Содержания гелия в водах определяются на мембранных индикаторах гелия масс-спектрометрического (ИКГМ-1) или магнитозарядного (ИНГЕМ-1) принципов. Концентрация гелия в водах выражается в миллилитрах на литр воды. В приповерхностных горизонтах фоновые содержания гелия в водах обычно не превышают $1 \cdot 10^{-4}$ мл/л, а вблизи разломов они достигают 0,1—1 мл/л. На более глубоких горизонтах фоновые концентрации гелия повышаются до $1 \cdot 10^{-3}$ мл/л, а аномальные — до 10—30 мл/л.

Принципы и методы геохимического картирования радиоактивных элементов (и их элементов-спутников), рассеянных в горных породах, разработаны и внедрены в практику геологических исследований А. А. Смысловым и др. [31].

Радиогеохимические карты составляются на геолого-формационной основе с выделением тех особенностей геологического строения и развития района, которые способствуют нарушению первично-конституционального рассеяния радиоактивных элементов. Изучение радиогеохимических карт помогает выявлению главных закономерностей миграции урана и условий формирования его повышенных концентраций.

Геохимическая нагрузка карт зависит от их масштаба. На мелкомасштабных картах (от 1:200 000 и мельче) отражаются средние содержания урана в геологических формациях или в однородных геологических полях, степень неоднородности распределения урана и тория, торий-урановые отношения, формы нахождения этих элементов в породах, аномальные концентрации элементов-спутников урана, аномальные отношения радиогенных свинцов (особенно повышенные концентрации Pb^{206}) и геохимические специализированные на уран формации пород. По совокупности перспективных данных на картах выделяются радиогеохимические провинции, а внутри них — зоны с нарушенным первично-конституциональным распределением элементов, наиболее перспективные на выявление повышенных концентраций подвижного урана.

На радиогеохимических картах средних масштабов (1:50 000—1:25 000) отражаются содержания урана в однород-

ных геологических полях в абсолютных значениях и по отношению к геохимическому фону, а в пределах зон с нарушенным первично-конституциональным распределением элементов выделяются зоны привноса и выноса урана и наиболее типичных элементов-спутников.

§ 2. ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Геолого-минералогические методы поисков основаны на визуальном обнаружении коренных выходов уранового или редкометалльного оруденения, проявлений рудной минерализации в естественных и искусственных обнажениях или механических ореолов рассеяния рудоносных минеральных образований в виде оруденелых пород, рудных обломков или минералов.

Поскольку большинство урановых минералов неустойчивы в гипергенных условиях и легко разрушаются под влиянием экзогенных факторов, то шлиховые, обломочные и другие визуальные геолого-минералогические методы мало пригодны для поисков урановых месторождений. Однако в условиях арктических, высокогорных и тундровых ландшафтов, благоприятных для сохранения первичных урановых минералов, при доминирующей роли физического, а не химического выветривания, эти методы не только могут применяться наравне с другими, но в ряде случаев приобретают значение ведущих.

Устойчивость редкометалльных минералов в гипергенных условиях способствует их накоплению в корах выветривания, элювиальных, делювиальных и аллювиальных отложениях. Поэтому геолого-минералогические методы являются ведущими при поисках редкометалльных месторождений.

Шлиховый метод применяется в масштабах 1:200 000, 1:50 000 и 1:10 000. Методика шлиховых поисков редкометалльных месторождений не отличается от методики поисков других тяжелых металлов, таких как золото, олово, вольфрам, титан и др. При всех масштабах шлиховых поисков пробы отбираются по современной гидрографической сети, причем обязательно опробуются все притоки выше их устьев на 100—200 м. В зависимости от масштаба съемок рекомендуется следующая густота опробования аллювиальных отложений.

Масштаб	1:200 000	Расстояния между пунктами опробования	1—2 км
»	1:50 000	То же	0,25—0,5 км
»	1:10 000	»	0,1—0,2 км

Среди редкометалльных минералов и их спутников наиболее устойчивы в шлихах монацит, ксенотим, лопарит, пирохлор, циркон, ильменит и ортит. От источника сноса монацит, цир-

кон, ильменит и ортит прослеживаются в аллювиальных россыпях на расстоянии до 30—40 км. При этом зерна минералов приобретают хорошую окатанность и уменьшаются в размерах до 40 %. Эвксенит, фергусонит, пирохлор, гатчеттолит, танталит, колумбит разрушаются при переносе быстрее. Из них более устойчив фергусонит, который перемещается на многие километры, за ним следует колумбит, а затем танталит, который не удаляется от коренных источников более чем на 1—2 км. Пирохлор устойчив к переносу только в тех случаях, когда он не изменен гидротермальными процессами. Наименее устойчив в зоне гипергенеза гатчеттолит, который быстро переходит в рыхлые охристые продукты. При переносе эвксенита и фергусонита на 2—3 км размеры их зерен уменьшаются на 75—80 %, однако зерна этих минералов размерами 0,1—0,2 мм могут переноситься на большие расстояния без дальнейшего уменьшения размера.

При поисках редкометалльного оруденения следует учитывать как положительные признаки: появление в немагнитной фракции пирохлора, бипирамидального циркона, бастнезита, апатита; в электромагнитной фракции — лопарита, бадделита, перовскита, ильменита, иногда пирохлора, а также увеличение магнетита в магнитной фракции.

При отборе шлиховых проб рекомендуется опробование кос и отmelей до уровня воды, со взятием проб из всей толщи рыхлых отложений секциями по 0,5 м. Пробы отбираются объемами 0,02 м³, что соответствует объему стандартного лотка. Для получения большего количества шлиха увеличивают объем пробы в 2—3 раза. Промывка ведется только до серого шлиха, так как возможен снос зерен редкометалльных минералов в связи с малым размером зерен. Диагностику редкометалльных минералов в шлихах целесообразно проводить в полевых лабораториях, а в камеральный период проводить дополнительные виды анализов минералов: рентгеноструктурный, рентгеноспектральный, химический и др.

Полученные результаты анализов шлиховых проб наносятся на карты различного масштаба в виде кружков, лент или изолиний. В дальнейшем эти карты используются для разработки прогноза при поисках редкометалльных месторождений на изучаемой территории.

§ 3. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Все радиометрические методы поисков основаны на выявлении радиационных ореолов вокруг урановорудных или редкометалльных скоплений, их первичных и вторичных ореолов в коренных породах и рыхлых отложениях, а также на выявлении ореолов радиоактивных эманацй в рыхлых отложениях и почвах.

Главные радиометрические методы основаны на регистрации естественного гамма-излучения урана, тория и калия. Значительно реже с этой целью используются бета- и альфа-излучения.

Глубинность проникновения гамма-лучей в горных породах и перекрывающих рыхлых отложениях не превышает одного метра. Однако за счет развития в них вторичных ореолов рассеяния глубинность радиометрических методов часто оказывается значительно большей.

Сущность всех разновидностей гамма-методов сводится к измерению суммарного (интегрального) радиоактивного гамма-излучения или к дифференциальной его регистрации в определенных интервалах энергии частиц с последующим выделением участков повышенной радиоактивности.

По условиям применения радиометрические методы подразделяются на:

- аэроадиометрические;
- наземные (автомобильные и пешеходные);
- глубинные (в шпурах, скважинах и разведочных горных выработках).

Аэроадиометрические методы — наиболее совершенные и скоростные методы поисков месторождений радиоактивных металлов. Они основаны на выявлении в приземном слое атмосферы радиационных гамма-ореолов урана (радия), тория и калия с помощью высокочувствительных радиометров-анализаторов.

Для проведения аэрогамма-спектрометрических съемок используется аппаратура повышенной чувствительности — комплексные аэрогеофизические станции типа АГС-70с, ГСА-75 и др., включающие в себя пятиканальный гамма-спектрометр, протонный магнитометр, электроразведочную аппаратуру по методу индукции, курсограф и высотограф. Для предварительной интерпретации данных с целью оперативного обнаружения и проверки аномалий используются специализированные бортовые или множительно-делительные устройства (БУК-4; МДУ; ИКА-2). Методика проведения аэрогамма-съемки, выделения и оценки аномалий и полей детально описывается в специальных инструкциях и руководствах [2, 3].

Для целей прогноза и поисков урановых и редкометалльных месторождений гамма-спектрометрическая аппаратура монтируется на самолетах или вертолетах. Максимальная эффективность поисков обеспечивается при малых высотах наблюдений порядка 30—50 м, но не более 75 м, при скоростях полетов от 110 до 170 км/ч. Привязка наблюдений осуществляется визуально с применением подвижных ориентиров путем фотографирования последних или радиогеодезическим способом (с применением системы «Поиск-М»).

Обработку материалов аэрогамма-спектрометрических (АГСМ) наблюдений целесообразно проводить с использованием ЭВМ и графопостроителей. Поправки вводятся за высоту полета, космическую составляющую остаточного фона, гамма-излучение продуктов атмосферного радона, экранирующее действие лесного покрова (по бонитету), влажность почв и эманирование горных пород.

Аэрогамма-спектрометрические съемки в масштабах 1:200 000—1:50 000 проводятся в урановорудных районах для совершенствования геологической основы поисков и выявления зон метасоматически измененных пород. Аэропоиски проводятся в масштабе 1:25 000 маршрутами через 250 м длиной до 30 км.

При обработке лент АГСМ записи протяженностью до 500 м на половине их максимальной эффективности оцениваются как аномалии, а более протяженные — как поля. Аномальными считаются записи, превышающие фон на $1,3\sigma$ измерений. При слабом проявлении урановорудных выходов на дневной поверхности интерпретация исходных данных осложняется. Выявлению таких урановорудных концентраций существенно способствуют аэромагнитные и аэроэлектроразведочные данные. Эффективность использования аэромагнитных данных зависит от присутствия в ураноносных структурах магнитоактивных горных пород или пород с измененными магнитными свойствами, что способствует проявлению пространственных связей между аномалиями (полями) урана и магнитными полями определенного типа (рис. 12). Изучение взаимного пространственного расположения магнитных и радиоактивных аномалий, ориентировка их осей и глубин залегания магнитоактивных

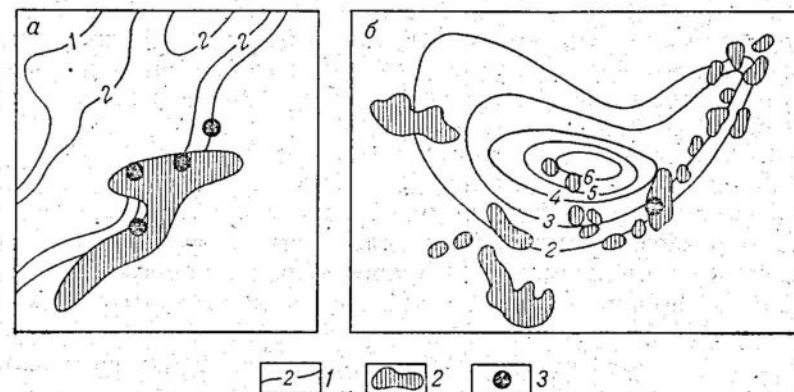


Рис. 12. Пример связи эндогенного уранового оруденения с аэромагнитными аномалиями [3].

а — в краевой части зоны контактового метаморфизма, б — в приконтактной части слепой интрузии; 1 — изодинамы магнитного поля, мТ; 2 — поля повышенной гамма-активности; 3 — проявления урановой минерализации

масс обеспечивают дополнительную информацию о связях урановых аномалий с конкретными геологическими структурами. Так, например, знакопеременные магнитные поля в породах базальт-диоритовой формации отражают условия пространственного размещения аномалий, связанных с месторождениями в ураноносных аргиллизитах, а отрицательные магнитные поля типичны для ураноносных зон березитов или калиевых метасоматитов.

Для оценки перспектив ураноносности составляются карты изоконцентраций урана (радия), тория, калия и интегральной интенсивности гамма-полей (рис. 13). Сравнительное изучение таких карт способствует выявлению не только повышенных концентраций урановой (радиевой) природы, но также ореолов, зон и полей метасоматических изменений вмещающих пород, с которыми пространственно связаны многие редкометалльные и урановорудные поля. Среди неизмененных пород такие поля проявляются аномальными соотношениями радиоактивных элементов, маловероятными в статистическом и геохимическом смыслах для фоновой среды. При изучении ураноносных метасоматитов отчетливо проявляется антагонизм калия и тория, что способствует выявлению перспективных участков с помощью индикаторных отношений типа:

$$F = \frac{q_U q_K}{q_{Th}}, \quad (8.1)$$

где q_U , q_K и q_{Th} — содержания урана (радия), калия и тория в точках наблюдений.

Зоны ураноносных средне- и низкотемпературных альбититов выявляются по данным аэроспектрометрии повышенными содержаниями урана (радия) и тория и резко пониженными содержаниями калия, а зоны ураноносных березитов и аргиллизитов — повышенными содержаниями урана и калия на отчетливо пониженном фоне тория.

Повышению информативности аэроспектрометрических съемок способствует специализированная математическая обработка результатов. Наибольшую эффективность обеспечивают методы распознавания образов, для применения которых необходимо использование ЭВМ. В простейшем варианте решается задача отнесения объекта к одному из двух классов — «рудному» или «безрудному» по комплексу наблюдаемых признаков. Задача сводится к сопоставлению параметров аномальных записей с параметрами известных месторождений (рудопоявлений) и безрудных участков. С этой целью используется отношение:

$$I = \frac{P_1(x_i)}{P_2(x_i)}, \quad (8.2)$$

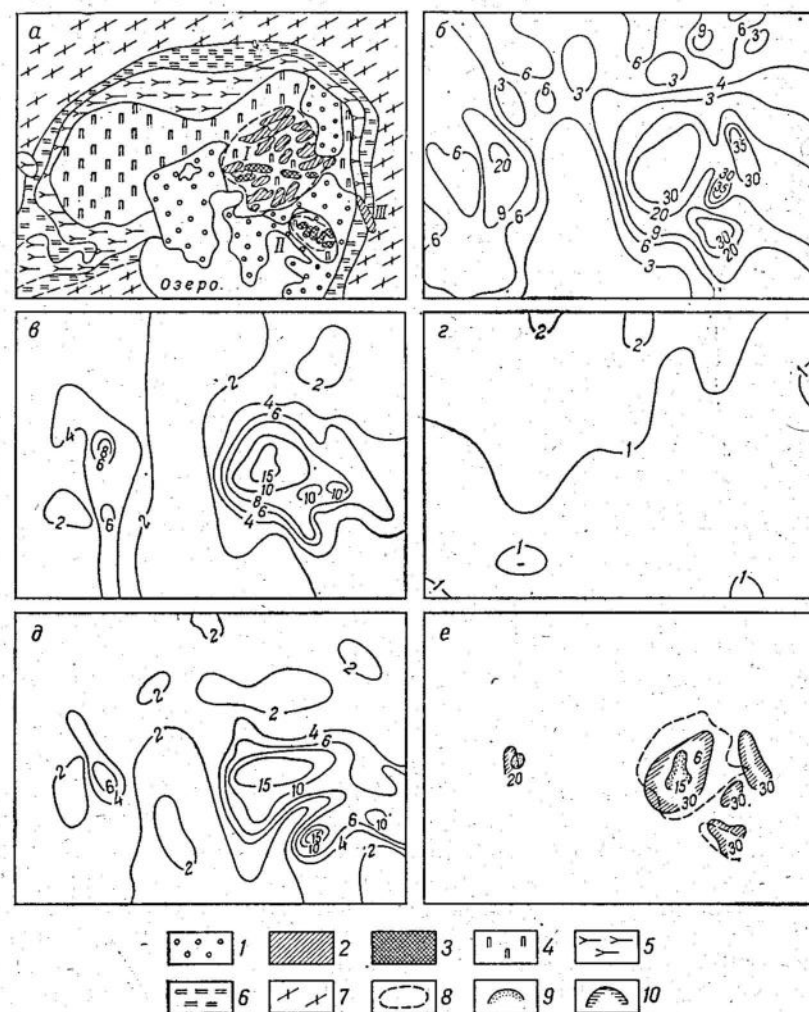


Рис. 13. Проявление карбонатитового рудного поля по данным аэрогамма-спектрометрической съемки [2].

Схемы: а — геологическая, б — концентраций тория, 10^{-4} %; в — концентраций урана, 10^{-4} %; г — концентраций калия, %; д — интегральной интенсивности гамма-полей; е — интерпретационная. 1 — четвертичные отложения; 2 — карбонатиты; 3 — апатит-форстерит-магнетитовые породы; 4 — пироксениты; 5 — ибोलиты и мельтейгиты; 6 — фелитизированные гнейсы; 7 — гранито-гнейсы; 8 — контуры месторождения; 9—10 — участки с максимальными содержаниями урана, 10^{-4} % (9) и тория, 10^{-4} % (10).

где $P_1(x_i)$ и $P_2(x_i)$ — вероятности встречи i -го значения вектора признаков x интервалов содержаний урана, тория и калия в точках наблюдений с объектами соответственно «рудного» и «безрудного» классов.

Вычисленные значения l выносятся на карты и по ним проводятся линии одинаковых значений этих величин. Наиболее перспективные площади оконтуриваются изолиниями максимальных значений.

Влияние ландшафтно-геохимических условий учитывается с помощью переходных коэффициентов, значение которых определяется по данным заверочного радиогеохимического опробования горных пород, перекрывающих их рыхлых отложений и почвенного покрова.

Наземная проверка аномалий и полей проводится с целью их оконтуривания и предварительной оценки. В процессе проверки выясняется геологическая природа аномалий и полей урана, их радиогеохимические, структурные и минерало-геохимические особенности. Для этого участки аномалий изучаются автомобильной гамма-спектрометрической или пешеходной гамма-съемкой с гамма-спектрометрическими наблюдениями, в комплексе со схематическим геологическим, структурно-геофизическим и геохимическим картированием масштаба 1:10 000 (рис. 14). Выявленные аномалии и поля оконтуриваются, закрепляются на местности, вскрываются поверхностными горными выработками и подвергаются выборочному опробованию на уран и элементы-спутники.

Наземные радиометрические методы поисков. Основными видами наземных радиометрических поисков являются автомобильные и пешеходные.

Автомобильные гамма- и гамма-спектрометрические поиски развились на основе аэрогамма-методов, заимствовав у них самопишущую аппаратуру и важнейшие теоретические положения метода. Для проведения автомобильных гамма-поисков используются газоразрядные радиометры РА-69, а для автомобильных гамма-спектрометрических поисков — сцинтилляционные гамма-спектрометры АГС-3, которые монтируются на автомашинах ГАЗ-69, УАЗ-469 или на вездеходах.

Радиометр РА-69 обладает повышенной чувствительностью (не менее 65 имп/с на $7,2 \cdot 10^{-14}$ А/кг) и обеспечивает возможность автоматической записи показаний в двух диапазонах до 1200 и 2400 имп/с. Четырехканальный сцинтилляционный гамма-спектрометр АГС-3 обладает чувствительностью интегрального канала около 100 имп/с на $7,2 \cdot 10^{-14}$ А/кг и порогами чувствительности интегрального канала — $23,8 \cdot 10^{-14}$ А/кг, уранового — $1,5 \cdot 10^{-4}$ %, ториевого — $3,0 \cdot 10^{-4}$ % и калиевого — 0,5 %. В комплексе с автогамма-радиометрами используются топопривязки ГАЗ-69-ТМГ, с помощью которых прокладываются и

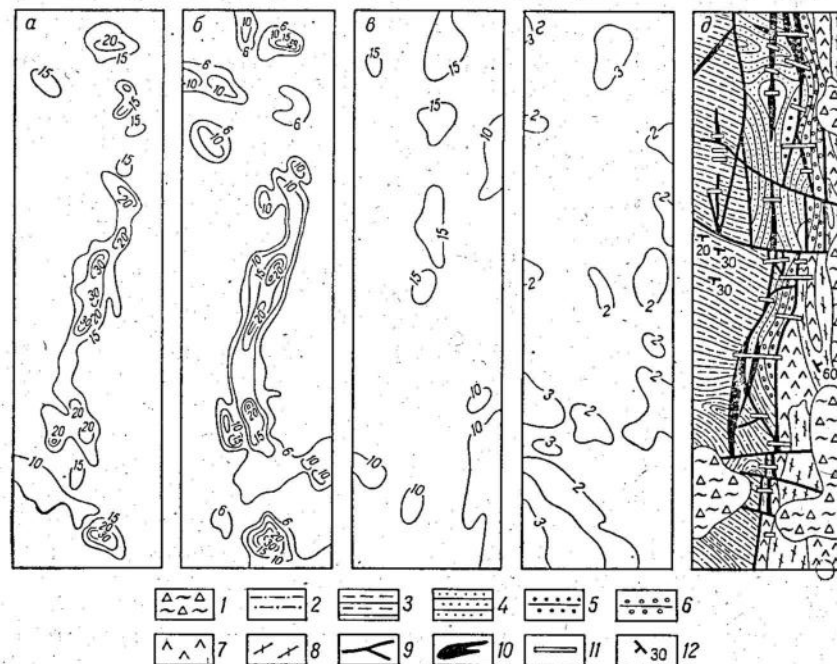


Рис. 14. Схема детальной наземной проверки участка аэрогамма-спектрометрической аномалии [3].

Схемы в изолиниях по данным автогамма-спектрометрической съемки: а — интегральной интенсивности гамма-поля; б — концентрации урана (радия), 10^{-4} %; в — концентрации тория, 10^{-4} %; г — концентрации калия, %; д — схема геологического строения. 1 — суглинки; 2 — алевролиты; 3 — мелкозернистые песчаники; 4 — красноцветные средние и крупнозернистые песчаники; 5 — гравелиты, конгломераты; 6 — туфогравелиты и туфо-конгломераты; 7 — порфиroidы; 8 — сланцы, гнейсы; 9 — разрывные нарушения; 10 — рудные зоны; 11 — канавы; 12 — элементы залегания пород.

разбиваются сети наблюдений, наносятся на карту ориентиры и выполняются топографические съемки.

Возможность применения автомобильных поисков ограничивается условиями проходимости местности.

Наиболее широким распространением пользуются площадные автогамма-съемки масштаба 1:10 000, которыми покрываются перспективные площади порядка десятков квадратных километров. В соответствии с этим масштабом расстояния между смежными маршрутами составляют 100 м при оптимальной длине маршрутов около 2,5 км. В благоприятных ландшафтных условиях успешно применяются автогамма-съемки и более крупных масштабов (1:5 000—1:2 000). Маршруты прокладываются на местности с помощью топопривязчиков ГАЗ-69-ТМГ или передвижных ориентиров.

Обнаруженные при съемке аномальные повышения интенсивности гамма-излучения проверяются и детализируются путем повторных заездов на пониженных скоростях (до 5 км/ч)

со сгущением сети наблюдений сериями коротких параллельных заездов.

Результаты автомобильных гамма-съемок изображаются в виде карт изолиний гамма-активности, сечение которых в зависимости от характера гамма-поля выбирается от $14 \cdot 10^{-14}$ до $57 \cdot 10^{-14}$ А/кг. Проверка автогамма-аномалий проводится в три этапа. На первом этапе проводится геологическое и геоморфологическое обследование аномальных площадей, обычно в комплексе с пешеходной гамма-съемкой. В результате этих исследований уточняются положение эпицентров и их пространственные связи с благоприятными структурами и комплексами пород. При наличии таких связей, а также если причины проявления аномалий неясны, они подвергаются сперва предварительной, а затем детальной проверкам по общепринятой методике.

Пешеходные гамма-съемки и наземные гамма-спектрометрические наблюдения являются основными видами наземных поисков радиометрических аномалий и рудопроявлений. Широкая распространенность пешеходных поисков объясняется возможностью их применения в районах, недоступных для других видов радиометрических поисков работ, их высокой результативностью и низкой себестоимостью, возможностями тесной взаимосвязи радиометрических и геологических наблюдений, непрерывной оценки радиоактивности не только по маршруту, но и в прилегающей к нему зоне, а также оперативной детализации выявляемых аномалий. Если измерения проводятся по маршрутам, отстоящим друг от друга на расстояния, заведомо превышающие густоту точек фиксированных наблюдений, исследования называются маршрутными гамма-поисками. Если же расстояния между смежными маршрутами и фиксированными точками наблюдений по маршруту сопоставимы — применяется термин «гамма-съемка». Обычно маршрутные гамма-поиски проводятся в мелких масштабах (от 1 : 200 000 до 1 : 25 000), а гамма-съемки — в масштабах от 1 : 10 000 и крупнее.

Пешеходные гамма-поиски и гамма-съемки проводятся в районах со сравнительно хорошей обнаженностью, в ландшафтных условиях, способствующих формированию открытых ореолов рассеяния урана, когда представительный горизонт совпадает с дневной поверхностью или приближен к ней, располагаясь на глубине не более 0,3 м. Для проведения пешеходных поисков применяются портативные полевые сцинтилляционные радиометры СРП-2 «Кристалл» и СРП-68-01. Наиболее благоприятны для проведения пешеходных поисков высокогорные и горные районы, где наряду с хорошей обнаженностью широко развиты механические ореолы рассеяния урана в виде каменных и глыбовых россыпей, а также умеренно-расчлененные районы с хорошей обнаженностью коренных пород и широким развитием рыхлых автохтонных отложений.

При проведении маршрутных гамма-поисков и гамма-съемок активность пород непрерывно прослушивается с помощью телефона радиометра и измеряется в фиксированных точках наблюдений. Маршруты ориентируются вкrest простирания рудовмещающих структур. Густота маршрутов и фиксированных точек наблюдений по маршруту зависит от масштаба поисков и от сложности геологического строения изучаемой территории. Привязка маршрутной сети наблюдений в масштабах до 1 : 25 000 включительно выполняется визуально с использованием аэрофотоосновы или полуинструментально, с помощью буссоли. При гамма-съемках масштаба 1 : 10 000 и крупнее необходима разбивка магистралей и пикетажа с последующей их инструментальной привязкой.

В районе выявленных аномалий сеть наблюдений сгущается. Параллельно основным маршрутам проходятся промежуточные профили с выходами в нормальное поле и по совокупности полученных данных производится предварительное определение площади аномалии.

Интерпретация результатов гамма-съемок существенно зависит от правильной оценки нормальных полей активности вмещающих пород.

Нижние пределы аномальных гамма-активностей (I_a) определяются для однородных площадей, сложенных породами одного состава. Обычно они оцениваются статистически, как

$$I_a = I_0 + 3\sigma, \quad (8.3)$$

где I_0 — фоновое поле гамма-активности на площади развития данной породы; σ — среднее квадратическое отклонение фоновых значений гамма-поля для пород данного состава.

Результаты маршрутных гамма-поисков оформляются в виде графиков, а результаты гамма-съемок — в виде карт корреляционных графиков или карт гамма-полей, выполненных в масштабе съемки (рис. 15).

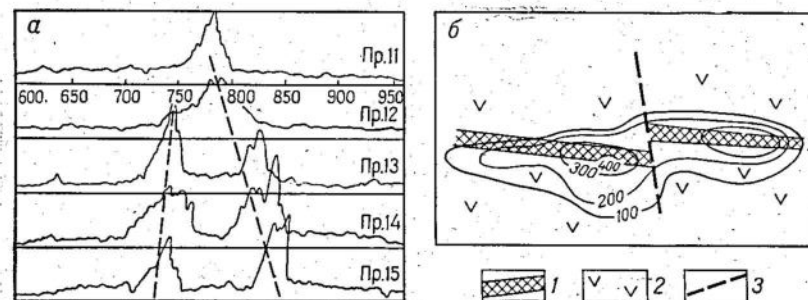


Рис. 15. Изображение результатов пешеходных гамма-поисков:

а — карта корреляционных графиков; б — карточка гамма-аномалий в изолиниях интенсивности
1 — рудная зона; 2 — вмещающие породы; 3 — линия смещения

Наземные гамма-спектрометрические наблюдения применяются для оценки выявленных аномалий и выделения перспективных площадей. Они основаны на различии спектрального состава гамма-излучения радия, тория и радиоактивного калия.

Наземные гамма-спектрометрические наблюдения проводятся портативными радиометрами-анализаторами типа СП-3 и СП-3М, с помощью которых регистрируются не истинные, а аппаратные спектры, измененные за счет взаимодействия гамма-квантов с веществом кристаллического счетчика (рис. 16). Задача сводится к определению скорости счета в трех энергетических интервалах спектра гамма-излучения, в каждом

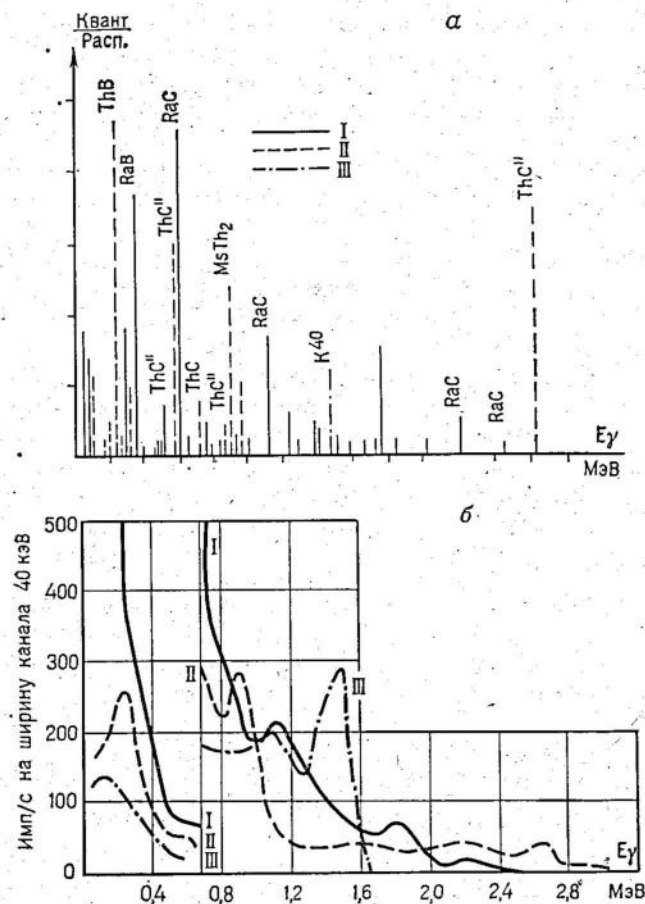


Рис. 16. Природные и аппаратные спектры гамма-излучения.

а — спектральный состав первичного гамма-излучения радиоактивных рядов урана (I), тория (II) и радиоактивного изотопа калия (III); б — аппаратные спектры гамма-излучения радиоактивных элементов (урана — I, тория — II, калия — III)

из которых доли гамма-излучения одного из этих элементов являются наибольшими. Определение концентраций урана (радия), тория и калия производится путем сравнения замеренных интенсивностей гамма-излучения в каждом из участков спектра с их значениями, полученными на моделях. Порог чувствительности гамма-спектрометров зависит от времени измерений и содержания радиоактивных элементов. Для СП-3 при суммарном времени измерения 15 мин он составляет для радия и тория $1 \cdot 10^{-4} \%$, а для калия 0,1 %. Измерения можно производить как в дифференциальном, так и в интегральном режимах. При проведении измерений в дифференциальном режиме диапазон измеряемого спектра составляет от 0,3 до 3,0 мэВ. Этот диапазон разбит на 60 ступеней, которые определяют уровень дискриминации прибора. В интегральном режиме прибор регистрирует гамма-излучение с энергией от 0,3 мэВ.

Количество замеров и сеть наблюдений зависят от геологической обстановки и параметров аномалий. Обычно каждая аномалия изучается несколькими профилями (не менее 3-х) по 10 точек наблюдений и более на каждом профиле. Для выполнения гамма-спектрометрических наблюдений необходимо обеспечивать геометрические условия замеров — выход коренных пород площадью не менее 1 м^2 с ровной поверхностью и оптимальное время наблюдений. Время измерений зависит от типа радиометра-анализатора, содержания радиоактивных элементов и требуемой точности. Так, например, для прибора СП-3М при изучении слабопроявленных аномалий оптимальные экспозиции в «калиевом» и «урановом» интервалах составляют 1,5—2,0, в «ториевом» — 2—3 мин, а при изучении рудных аномалий сокращаются до одной минуты.

Результаты гамма-спектрометрических наблюдений оформляются в виде графиков содержаний радиоэлементов по профилям (рис. 17) или в виде планов (в изолиниях содержания этих элементов).

Глубинные радиометрические методы поисков применяются для поисков слабопроявленных скрытопогребенных или скрытых радиационных или газовых ореолов. К числу скрытопогребенных относятся ореолы, ранее выходившие на поверхность, а затем перекрытые плащами дальнепринесенных рыхлых отложений или маломощными толщами осадочных пород. Скрытыми (слепыми) считаются не

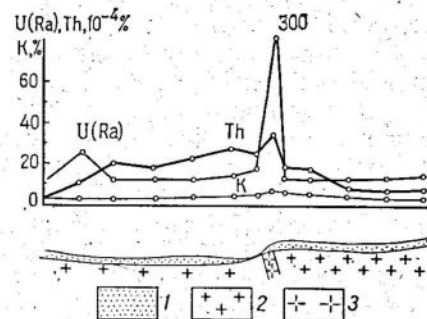


Рис. 17. Гамма-спектрометрические профили на радиоактивной аномалии урано-радиевой природы.

1 — четвертичные отложения; 2 — мигматиты; 3 — пегматоидные граниты

вскрытые эрозией ореолы, залегающие вокруг урановорудных скоплений в толщах вмещающих пород.

Для вскрытия перечисленных ореолов используются различные технические средства — плуги, шпury, скважины шнекового, колонкового или ударно-вращательного бурения.

Шпуровые гамма-поиски проводятся с помощью полевых радиометров (каротажный вариант — приборы типа СРП-2к с датчиком диаметром 32 мм, типа СРП-68-02-03 с датчиками соответственно 35 и 25 мм или типа СРП-2 с датчиком ШГ-25 диаметром 25 мм). Мелкие шпury глубиной от 0,6 до 0,8 м проходятся вручную (с помощью буров, ломиков или труб), а шпury глубиной до нескольких метров — с помощью виброустановок, гидрозадавливателей и др.

Глубина шпуров в зависимости от положения представительного горизонта изменяется от долей метра до 1—2 м.

Интенсивность гамма-излучения измеряется в шпурах в направлении от устья к забою с интервалами в мелких шпурах через 10—20 см, а в глубоких шпурах через 0,5—1,0 м. По сравнению с наземными гамма-съемками шпуровые съемки обладают повышенной чувствительностью, так как телесный угол облучения датчика увеличивается в два раза.

Применение шпуровой гамма-съемки наиболее эффективно в таежных и горно-таежных районах на площадях развития автономных ландшафтов с приповерхностным залеганием представительного горизонта, а также в районах развития маломощных (до 1 м) дальнеприносных отложений. Чаще всего шпуровая гамма-съемка проводится в масштабе 1:10 000, при расстояниях между смежными маршрутами 100 м и между шпурами по маршруту 10—20 м. На площадях с глубоким залеганием представительного горизонта при мощностях дальнеприносных отложений порядка нескольких метров шпуровые съемки проводятся только выборочно — для целей детализации аномалий. Развитие мощных покровов ледниковых, аллювиальных, эоловых и других дальнеприносных отложений неблагоприятны для применения шпуровых съемок. При мощности перекрывающих отложений до 3 м для целей радиометрических поисков вместо шпуров часто проходятся дудки диаметром 30 см с помощью агрегатов БКМ (бурильно-крановая машина, смонтированная на автомобилях ЗИЛ-164 или ГАЗ-53). Для каротажа дудок БКМ используются радиометры СРП-68-02 или СРП-2к.

Плужные гамма-съемки проводятся на площадях, перекрытых маломощными эоловыми (лессовидными) отложениями. С помощью плужного канавокопателя (плантажного плуга типа КМ-1400, заглубителя типа АГП-1,7 и др.) проходятся канавы глубиной 0,4—0,8 м и одновременно с проходкой канавы производится непрерывный замер гамма-излучения обнажаемого горизонта пород. Для целей плужных гамма-поис-

ков используются автомобильные радиометры типа РА-69 или сцинтилляционные радиометры РТС с непрерывной записью. Пульта управления радиометра с самописцем размещается в кабине трактора. Результаты шпуровых и плужных гамма-съемок выражаются линиями изогамм на разрезах или планах соответствующих масштабов.

Эманиационный метод поисков основан на выявлении ореолов радиоактивных эманиций в почвенном воздухе. Сущность эманиционных поисков заключается в отборе проб почвенного воздуха из рыхлых отложений и измерении концентраций в них радона, торона и, значительно реже, актинона.

Эманиционные поиски выполняются с помощью сцинтилляционных полевых эманометров ЭМ-6 (в модернизированном варианте «Радон»). В зависимости от масштаба эманиционной съемки (от 1:10 000 до 1:2 000) расстояния между профилями составляют от 100 до 20 м при расстояниях между точками наблюдений 5—10 м.

Проведение работ сводится к бурению шпуров глубиной 0,6—0,8 м, отбору из них проб почвенного воздуха и определению содержания радона и торона (по измерениям с экспозициями одна и пять минут). Величина ионизационного тока, измеренная за первую минуту, характеризует суммарный ионизационный эффект от радона и торона. Через пять минут после отбора пробы торон практически полностью распадается и, следовательно, второе измерение характеризует концентрацию радона.

Для уточнения природы радоновых аномалий и оценки их перспективности в шпурах с максимальным содержанием радона иногда проводятся исследования по определению концентрации в них актинона (дочернего продукта распада ^{235}U). Вследствие весьма короткого периода полураспада актинона измерение его концентрации производится по специальной методике в струе проходящего воздуха. Повышенные концентрации актинона свидетельствуют о близости ^{235}U , который в отличие от ^{238}U проявляет себя в зоне гипергенеза как весьма инертный элемент и, следовательно, его присутствие однозначно свидетельствует об урановой природе данной аномалии.

Результаты эманиционных поисков отражаются в виде графиков или карт в масштабах выполненных работ.

В последние годы применяется новая эманиционно-трековая методика поисков урановых месторождений (ЭТМ), основанная на подсчетах числа альфа-треков (следов, фиксирующих пути пробега альфа-частиц) на специальных диэлектрических пленках. Методика сводится к тому, что в шпury глубиной 0,6—0,9 м закладываются перфорированные чашечки с пластмассовой диэлектрической пленкой, чувствительной к альфа-излучению, и выдерживаются в них в течение нескольких недель.

Альфа-частицы, испускаемые радоном, проникают через пластмассу, вызывая при этом разрушение пленки. После облучения пленки подвергаются химическому травлению, а число альфа-треков (в виде микроскопических бороздок) подсчитывается под микроскопом. Концентрация радона в почвенном воздухе оценивается по числу альфа-треков на квадратный миллиметр. При экспозиции в шпурах около одного месяца фоновая плотность треков составляет от 30 до 150 бороздок на квадратный миллиметр. Аномальными считаются пленки с трехкратным превышением над фоном, при возможном диапазоне измерений от 10 до 100 000 треков на квадратный миллиметр.

ЭТМ отличается повышенной чувствительностью и весьма малыми погрешностями измерений, в связи с тем что на их результаты не оказывают влияния суточные вариации содержания радона в почвенном воздухе, которые могут достигать десятикратных значений. Поэтому глубинность метода значительно увеличивается, превышая на порядок глубинность обычной эманиционной съемки.

Радиометрические поиски агрегатами шнекового и колонкового бурения проводятся для выявления погребенных и скрытых радиационных и газовых ореолов рассеяния, залегающих на глубинах более 5 м от дневной поверхности. При мощностях рыхлых отложений до 20 м для бурения скважин используются агрегаты шнекового бурения БС-3А и УГБ-50-А соответственно на базе автомобилей ГАЗ-63 и ГАЗ-66, а при мощностях рыхлых отложений или перекрывающих пород более 20 м — самоходные буровые установки типа СБУД-150-ЗИВ и др. Для проведения гамма-каротажа скважин применяются радиометры СРП-2к (до 20—25 м), СРП-68-02 (до 60 м), переносные сцинтилляционные каротажные радиометры ПРКС-2 («Виток») и «Агат-69». Каротажный сцинтилляционный радиометр ПРКС-2 («Виток») предназначен для гамма-каротажа буровых скважин глубиной до 120—150 м и диаметром свыше 45 мм. Он оборудован скважинными приборами диаметрами 28 и 36 мм для каротажа скважин глубиной до 300 м. Каротажный радиометр «Зонд-1» предназначен для проведения поискового (и разведочного), литологического и плотностного каротажа. Он имеет пять поддиапазонов измерений с автономными интеграторами и обеспечивает возможность измерений в скважинах с диаметрами 25 и 38 мм до глубины 1000 м.

Радиометрические методы могут с успехом применяться при поисках редкометалльных пегматитов, карбонатитов, гранитов, альбититов и россыпей, поскольку некоторые редкометалльные минералы содержат примеси радиоактивных элементов. На многих месторождениях редких металлов повышенная радиоактивность обусловлена наличием урана и тория в составе пирок-

хлора. Для выявления корреляционных зависимостей между ниобием, танталом, ураном и торием необходимо знать различия в составе пироксенов. Так, например, на месторождениях редкометалльных карбонатитов радиоактивность пироксенов вызвана наличием в нем урана, торий же отмечается в малых количествах, а в редкометалльных альбититах пироксен содержит только торий.

Природа радиоактивности редкометалльных рудных образований может быть выяснена с помощью гамма-спектрометрических измерений или эманиционной съемки.

Данные радиометрии широко используются и при геологическом картировании. Они способствуют разделению интрузивных массивов, выявлению даек щелочных пород, пегматитов и зон метасоматических изменений вмещающих пород.

§ 4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Геохимические методы поисков основаны на выявлении и оценке локальных аномалий элементов-индикаторов в виде геохимических ореолов урана, редких элементов и их элементов-спутников в коренных породах, рыхлых отложениях, природных водах и растениях. В зависимости от этого различают: литогеохимические, радиогидрогеохимические, биогеохимические и атомохимические методы поисков.

Все геохимические методы сводятся, в конечном итоге, к опробованию объектов исследования по выбранной сети, анализам проб на главные и сопутствующие элементы и интерпретации полученных результатов для оценки перспективности выявляемых аномалий.

Наибольшим распространением пользуются литогеохимические методы поисков. В зависимости от природных условий; целей и задач литохимические поиски проводятся по первичным (гипогенным), вторичным (гипергенным) ореолам или по потокам рассеяния элементов-индикаторов.

Поиски по первичным ореолам заключаются в выявлении повышенных концентраций редких, радиоактивных элементов и их спутников в коренных рудовмещающих породах и в изучении закономерностей их пространственного размещения по данным сплошного геохимического опробования горных выработок и скважин.

Отбор проб производится по линиям, ориентированным вкрест простирания рудовмещающих структур, чаще всего способом «пунктирной борозды». Обычно длины интервалов по однородным породам составляют 5 м. Густота наблюдений зависит от целей и задач проводимых геологоразведочных работ и, как правило, определяется геометрией поисковой или разведочной сети. С каждого погонного метра в пробу отбирается несколько мелких сколов по 3—4 см² в поперечнике.

Определение содержаний большинства элементов-индикаторов уранового и редкометалльного оруденения: молибдена, свинца, цинка, меди, ванадия, никеля, кобальта, мышьяка, серебра, бериллия, циркония, ниобия и других выполняется методами приближенно-количественного анализа, чаще всего по способу просыпки. Для оценки содержаний урана, лития, тантала, рубидия, цезия, ртути и золота необходимо применение специальных методов анализов, поскольку приближенно-количественный спектральный метод не обеспечивает в этих случаях удовлетворительных результатов.

Валовые количества урана и тория в пробах могут быть установлены рентгеноспектральными анализами на установках ФРС-2 или ФРА-4, лабораторными радиометрическими или более чувствительными нейтронно-активационными методами. Для целей поисков урановых месторождений в геохимических пробах часто определяется содержание не валового, а подвижного урана. Для этого используются методы количественного перлюво-люминесцентного анализа на люминесцентных фотометрах типа ЛЮФ-55 или приборах типа ФАС-1, с предварительным выщелачиванием урана из проб.

Выявление и оконтуривание первичных ореолов производится по результатам анализов геохимических проб по общепринятой методике, основанной на сравнении геохимических параметров изучаемых участков с параметрами фонового распределения элементов. За величину «фоновое» содержания обычно принимается среднее арифметическое или меридианное содержание из всей выборки проб, расположенных в пределах данной петрографической (литологической) разновидности неизменных вмещающих пород.

Значения минимально-аномальных содержаний определяются действующей инструкцией [15] по формуле

$$C_a \geq C_{\phi} \varepsilon^3 / \sqrt{m}, \quad (8.4)$$

где C_a — минимально-аномальное содержание элемента; C_{ϕ} — фоновое содержание; $\varepsilon = \text{antlg } S_{lg}$ (где S_{lg} — среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний; $m \geq 9$ — число смежных точек (проб) с содержаниями элемента выше C_{ϕ}). В сложных случаях для выделения слабых локальных аномалий могут быть использованы методы тренд-анализа.

Оконтуривание первичных ореолов урана и его спутников производится на планах и в разрезах по значениям минимально-аномальных содержаний. Установлено, что для большинства месторождений убывание концентраций рудных элементов по мере удаления от рудных скоплений происходит по экспоненциальному закону. Поэтому графики их размещения вокруг рудных тел, построенные в полулогарифмической системе координат близки к прямым линиям (рис. 18). Однако эта закономерность вуалируется неравномерным характером распределе-

ния рудных элементов в ореолах и выявляется только после соответствующего сглаживания (рис. 19).

Из графика на рис. 18 следует, что ширина ореола прямо пропорциональна логарифму концентрации элемента в рудном теле и находится в обратной зависимости от величины его минимального аномального содержания «а» в ореоле и угла, образованного линией графика с осью абсцисс (α). Значение тангенса угла принято называть градиентом концентрации элемента в поперечном сечении первичного ореола.

Градиент концентрации является функцией многих переменных. На его величину влияют химические свойства элемента, физико-механические свойства вмещающих пород и многие другие факторы. Поэтому значение градиента концентрации любого элемента непостоянно даже в пределах одного месторождения. В то же время соотношения градиентов concentra-

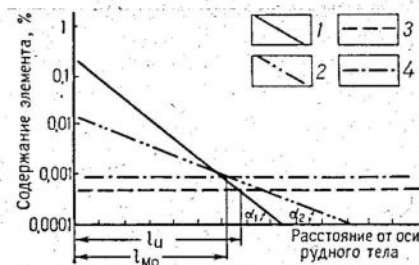


Рис. 18. График распределения урана и молибдена вокруг рудного тела.

1 — содержание урана; 2 — содержание молибдена; 3 — минимальное аномальное содержание урана в ореоле; 4 — минимальное аномальное содержание молибдена в ореоле; α_1 — угол, определяющий градиент концентрации урана в ореоле; α_2 — угол, определяющий градиент концентрации молибдена в ореоле; l_U — половина ширины эндогенного ореола урана; l_{Mo} — половина ширины эндогенного ореола молибдена

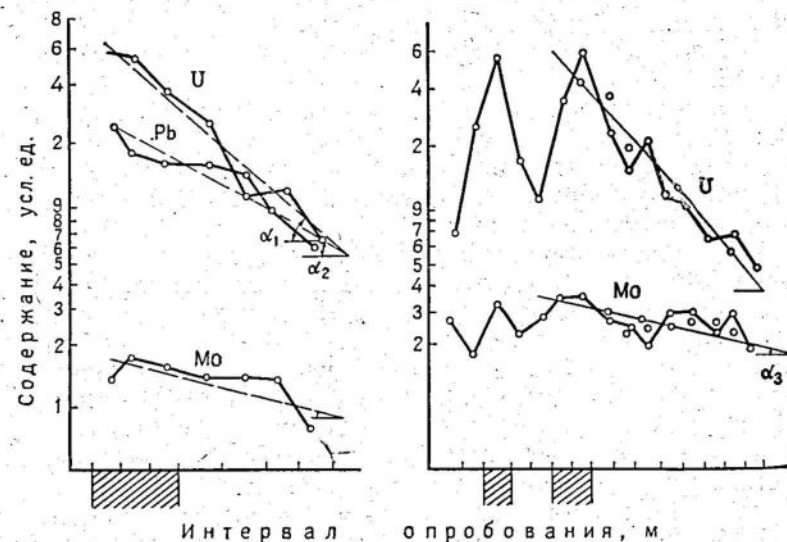


Рис. 19. Эмпирические и сглаженные графики распределения элементов вокруг рудных тел [4]

ций определенных элементов-индикаторов остаются постоянными, что может быть использовано для характеристики подвижности различных элементов при формировании первичных ореолов. Для этого значение минимального из градиентов условно приравнивается к единице, а значения остальных градиентов выражаются цифрами относительно единицы. Так, например, для месторождений ураноносных березитов был установлен следующий ряд значений относительных градиентов концентрации элементов: 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, а их значения могут быть использованы для расчета показателей рассеяния элемента-индикатора (X) вокруг рудных залежей по формуле

$$X = \frac{\ln \frac{C_p}{a}}{K_{отн}}, \quad (8.5)$$

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

Величину, обратную градиенту концентрации $\frac{1}{\lg a} = \frac{1}{\lambda}$, А. П. Соловов предложил использовать для количественной характеристики миграционной способности элемента.

Для усиления слабых ореолов необходимо ослабить влияние фоновых содержаний элементов путем:

- применения более чувствительных методов количественного анализа;

- использования анализов тяжелых фракций геохимических проб;

- использования рациональных (фазовых) анализов для тех элементов, формы нахождения которых во вмещающих породах и в ореолах различны;

- суммирования или перемножения содержаний групп элементов, сходных по условиям их пространственного размещения, с последующим построением соответствующих аддитивных или мультипликативных ореолов [4].

Построение аддитивных ореолов производится путем сложения содержаний элементов-индикаторов, нормированных по их среднефоновым содержаниям. По сравнению с моноэлементными аддитивными ореолами обладают большими размерами, контрастностью и проявляют более тесные связи с рудоконтролирующими элементами геологического строения продуктивных залежей, зон и месторождений, поскольку влияние многочисленных случайных погрешностей при сложении содержаний нивелируется. Мультипликативные ореолы получаются путем

перемножения содержаний элементов-индикаторов в каждой пробе, причем необходимость их предварительного нормирования по фоновым содержаниям отпадает. Контрастность мультипликативных ореолов проявляется еще более резко, а их размеры могут быть еще большими по сравнению с аддитивными.

Для целей интерпретации результатов поисков по первичным ореолам первостепенное значение имеет расшифровка зональности их строения, обусловленной закономерным пространственным размещением элементов-индикаторов.

Наиболее отчетливо зональность ореолов проявляется в месторождениях ураноносных березитов, калиевых метасоматитов, натровых метасоматитов и аргиллизитов, а также в редкометалльных метасоматических месторождениях. В рядах зональности урановых месторождений в зависимости от минерального состава руд встречаются практически все элементы-индикаторы эндогенных рудных месторождений, среди которых главным распространением пользуются Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, U, реже As, Au, Ni, Co, V, Be. Типоморфными элементами многих пегматитовых и метасоматических месторождений редких металлов являются Li, Rb, Cs, F, P, Zr, Nb, Sn, Be и W.

На рис. 20 приведены графики изменений содержаний урана, молибдена и свинца в первичном ореоле урановорудной залежи. В надрудной части развиты интенсивные ореолы всех трех элементов и особенно свинца. Ниже рудной залежи заметно проявлен только ореол урана. Осевая (вертикальная) зональность может быть проиллюстрирована не только графиками изменения средних содержаний элементов с глубиной, но и графиками изменения их соотношений или изменения линейных продуктивностей ореолов (произведения ширины ореола на среднее содержание элемента на данном горизонте). Для количественной характеристики осевой зональности используется коэффициент контрастности, представляющий собой отношение содержаний элемента-индикатора и линейных продуктивностей ореола в его надрудной и подрудной частях. В качестве примера в табл. 17 приведены значения линейных продуктивностей ореолов и коэффициента контрастности осевой зональности по одному из урановых месторождений.

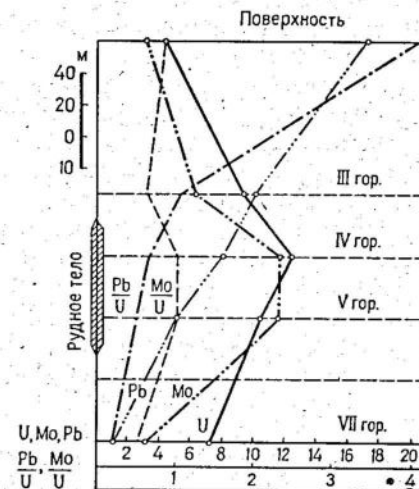


Рис. 20. Графики изменения с глубиной средних содержаний элементов и их соотношений в ореолах [12]

Таблица 17

Значения линейной продуктивности (метропроценты) и коэффициента контрастности осевой зональности ореолов

Показатель	Элементы-индикаторы			
	U	Cu	Zn	Pb
Линейная продуктивность на:				
поверхности	0,3	1,2	3,0	12,0
V горизонте	0,45	1,3	1,6	5,0
VII горизонте	0,5	0,7	0,2	0,26
Коэффициент контрастности	0,6	1,7	15,0	46,0

В ряду, расположенном по возрастанию коэффициента контрастности: уран (0,6) — медь (1,7) — цинк (15,0) — свинец (46,0), наиболее надежные индикаторные отношения для оценки уровня эрозионного среза ореола могут быть получены для пары элементов, наиболее удаленных друг от друга. В рассмотренном примере эта пара свинец—уран.

Если характер изменения продуктивностей ореолов по вертикали не отличается монотонностью, использование коэффициента контрастности не обеспечивает получения однозначных результатов. В таких случаях рекомендуется рассчитывать показатели зональности элементов-индикаторов как отношения продуктивностей ореолов всех остальных элементов-индикаторов, нормированных по их среднефоновым содержаниям. Показатель зональности количественно отражает в относительных единицах интенсивность накопления элемента на каждом из оцениваемых горизонтов. Таким образом, знание осевой зональности ореолов позволяет отличать надрудные их части от подрудных, оценивать уровни эрозионных срезов ореолов и прогнозировать вероятные глубины их распространения, а при благоприятных уровнях эрозионных срезов — выявлять слепые рудные зоны и залежи.

На рис. 21, заимствованном из работы [4], изображены первичные ореолы пяти рудных элементов, развитые вокруг двух групп слепых рудных скоплений; верхней (горизонты II—III) и нижней (горизонты VI—VII). Рудные скопления нижних горизонтов и окружающие их ореолы урана обладают большими шириной, интенсивностью и размерами. В отличие от урана, поля максимальных концентраций свинца и цинка располагаются над группами урановорудных скоплений, образуя над каждой из них своеобразные «шапки» ореолов. При этом ореолы свинца и цинка, связанные с верхней группой урановорудных скоплений, отличаются от нижних более крупными размерами и интенсивностью, несмотря на то что группы верхних урановорудных скоплений меньше и беднее нижних. Это сви-

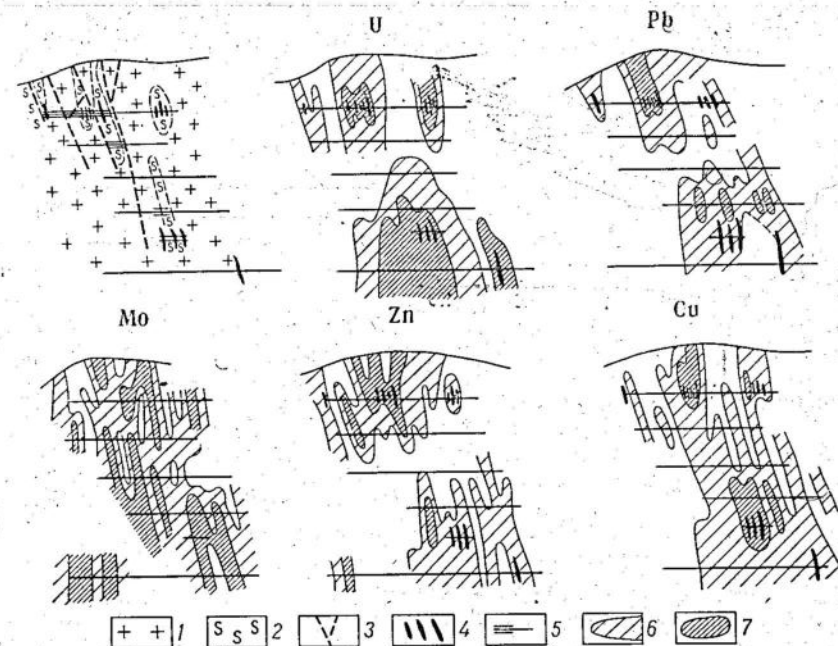


Рис. 21. Первичные ореолы вокруг скрытых урановых рудных тел [4].

1 — лейкократовые граниты; 2 — зоны грейзенизации; 3 — трещины; 4 — рудные тела; 5 — опробованные горные выработки и скважины; 6—7 — первичные ореолы: первое (6) и второе (7) аномальные поля

детельствует о том, что наряду с зональностью ореолов, развитых вокруг каждой из групп, существует зональность месторождения в целом, которая проявляется большей интенсивностью ореолов надрудных элементов на более высоких гипсометрических уровнях.

Целью интерпретации геохимических аномалий, выявленных в коренных породах, в конечном счете, является оценка перспектив рудоносности данного участка земной коры, которая включает в себя решение следующих оценочных и прогнозных задач:

- разделение первичных ореолов промышленно ценных рудных залежей и зон рассеянной минерализации;
- оценка рудопроявлений и вероятных запасов руд в пределах участков развития первичных ореолов;
- прогноз слепого оруденения и оценка глубинности поисков слепого оруденения по первичным ореолам.

Методические подходы к решению первой задачи разработаны С. В. Григорьяном [4] на примерах рудных месторождений цветных, редких и радиоактивных металлов. Им установ-

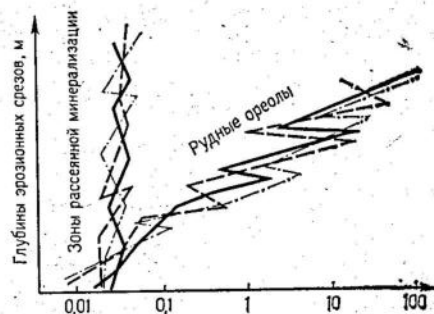


Рис. 22. Индикаторные отношения мультипликативных продуктивностей надрудных и подрудных ореолов и зон рассеянной вкрапленности для нескольких месторождений (по С. В. Григоряну)

лено, что в обоих случаях в коренных породах образуются геохимические аномалии сходного типа, близкой морфологии и идентичного элементного состава. Однако в отличие от ореолов рудных скоплений в зонах рассеянной минерализации не выявляются поля высоких концентраций элементов-индикаторов, отсутствуют элементы зональности и сколько-нибудь заметная дифференциация в пространстве (рис. 22).

Поиски по вторичным ореолам и потокам рассеяния заключаются в выявлении повышенных концентра-

ций урана и его спутников в рыхлых элювиальных, элювиально-делювиальных или аллювиальных отложениях; реже в рыхлых отложениях других генетических типов по данным геохимического опробования. Наиболее эффективно проведение поисков по открытым или ослабленным (реже погребенным) остаточным ореолам, а на ранних стадиях поисково-съёмочных работ — по потокам рассеяния урана и его спутников.

Поиски месторождений и их участков по ореолам рассеяния урана и редких элементов в корях выветривания, элювиально-делювиальных отложениях или в почвах проводятся в масштабах 1:10 000 и крупнее. Опробованию подвергается мелкая песчано-глинистая фракция рыхлых отложений. Эффективность поисков в значительной степени зависит от правильности выбора представительного горизонта отбора проб и от их фракционного состава, поскольку ими определяется представительность получаемой информации о распределении элементов-индикаторов в опробуемых рыхлых отложениях. Поэтому широкому применению метода обычно предшествуют работы по выявлению специфических особенностей ореолов рассеяния редких и радиоактивных элементов в данном районе. Этими работами устанавливаются:

- характер развития вторичных ореолов по вертикали с выявлением оптимальных глубин представительных горизонтов в рыхлых отложениях различных типов;

- распределение элементов-индикаторов по фракциям ситового анализа проб;

- значения местных фоновых и аномальных концентраций элементов-индикаторов и их спутников;

- морфологические особенности и элементы зональности вторичных ореолов.

Массы отбираемых проб в зависимости от фракционного состава рыхлых отложений могут изменяться в пределах от 50 до 200 г. При поисках урановых месторождений массы возрастают с увеличением долей крупной фракции, так как повышенные концентрации урана и его спутников преобладают в тонких илистых фракциях рыхлых отложений. Отбор проб производится с помощью специальных пробоотборников или из мелких закопшек.

Глубины представительных горизонтов зависят от объектов поисков, генетических типов рыхлых отложений и от ландшафтно-географических условий изучаемого района. При поисках урановых месторождений в пустынных, полупустынных и степных зонах с сухим климатом и щелочной реакцией почв оптимальные глубины отбора проб составляют 0,1—0,2 м. В лесных заболоченных и горно-таежных районах с кислыми подзолистыми почвами глубины залегания представительных горизонтов достигают 0,5—1,5 м; в тропических или субтропических условиях, а также при опробовании кор выветривания (структурного элювия) коренных пород, они могут достигать 3—5 м и более. Для отбора проб из погребенных ореолов проходятся специальные скважины агрегатами шнекового бурения (БС-3А, УГП-50А и др.) бурильно-крановыми машинами (БКМ) и другими техническими средствами.

Металлометрические съемки выполняются обычно по системам профилей, ориентированных вкрест простирания рудных структур. Расстояние между профилями принимается равным не более 0,9 предполагаемой средней длины ореола, а расстояние между точками отбора проб по профилям — не более половины его предполагаемой средней ширины. В зависимости от масштабов поисковых работ рекомендуются следующие примерные размеры сетей опробования:

для масштаба 1:10 000 — $100 \times (20 \div 10)$ м,

для масштаба 1:5 000 — $50 \times (20 \div 10)$ м,

для масштаба 1:2 000 — $20 \times (10 \div 5)$ м.

Первичная обработка проб заключается в их регистрации, сушке и ситовом анализе для выделения одной или нескольких подлежащих анализу фракций. Выделенные фракции истираются до состояния пудры (150—200 меш) и подвергаются количественному перлово-люминесцентному анализу на содержание подвижного урана, общего урана и приближенно-количественному анализу на редкие элементы и элементы-спутники.

Геохимические карты вторичных ореолов редких, радиоактивных металлов и их спутников составляются в масштабах геологической основы. Концентрации элементов-индикаторов выражаются в изолиниях, а оконтуривание ореолов производится по минимально-аномальным содержаниям, часто для различных уровней значимости стандартного отклонения логариф-

мов содержаний (например, для 5,1 или 1 % уровней значимости).

Оценка перспективности вторичных остаточных ореолов возможна с использованием некоторых приемов, эффективных при оценке первичных ореолов. По сравнению с первичными вторичные остаточные ореолы обладают увеличенными размерами и отличаются несколько более равномерным распределением элементов-индикаторов. Поэтому оценка уровней прогнозных срезов и перспективности первичных геохимических аномалий возможна по результатам изучения вторичных остаточных ореолов, в частности, по индикаторным отношениям в них мультипликативных надрудных и подрудных элементов. При этом, однако, необходимо учитывать возможное влияние комплекса геологических, геохимических и ландшафтно-географических факторов, так как ни продуктивность, ни контрастность, ни размеры остаточных ореолов, взятые отдельно, не могут служить однозначным критерием для оценки их перспективности.

Поиски по потокам рассеяния эффективны только для урана и его элементов-спутников. Потоки рассеяния урана в донных осадках постоянно и временно действующих водотоков могут рассматриваться как внешние зоны вторичных урановых ореолов, примыкающие к ним своими головными частями.

Полевые работы заключаются в отборе проб илистых русловых отложений или песчано-глинистых фракций аллювиальных и пролювиальных отложений, часто обогащенных органическим веществом. При отсутствии подобного материала в русловых отложениях опробуются пойменные образования и верхние кромки заболоченных речных долин, рыхлые илесто-глинистые отложения временных водотоков, а при слабо развитой гидросети — сходные по составу рыхлые отложения нижних частей склонов долин.

Пробы массой 50—100 г отбираются непосредственно с поверхности или с глубины 15—20 см. Густота маршрутов и длина шага опробования зависят от масштабов съемок и степени разветвленности гидросети. При мелкомасштабных съемках длина шага опробования составляет 300—500 м, а с укрупнением масштабов уменьшается до 100—200 м.

Обобщение международного опыта проведения съемок донных осадков свидетельствует о том, что при плотности опробования 1 проба на квадратный километр обеспечивается выявление всех потоков рассеяния, связанных с рудными полями месторождений крупного и среднего масштабов.

Анализы проб на содержание подвижного урана производятся количественным перлюво-люминесцентным методом на фотоэлектрических флуориметрах-абсорбциометрах типа ФАС-2 или ФАС-4, а на остальные элементы — приближенно-полуколичественным спектральным методом.

Состав элементов-индикаторов урана в потоках рассеяния зависит от состава первичных руд и ореолов, а также от особенностей их гипергенной миграции в различных ландшафтно-геохимических обстановках. Наибольшей протяженностью в ландшафтных условиях гумидной зоны отличаются потоки рассеяния меди, молибдена, цинка и некоторых других элементов, легко мигрирующих в формах истинных или коллоидных растворов.

Обработка материалов съемок донных осадков заключается в составлении сводной карты, оценке величины геохимического фона и выделении аномалий. Наиболее перспективными считаются аномалии, содержащие кроме урана типичные элементы-спутники уранового оруденения. Для выделения слабых аномалий и отделения их от фоновых содержаний учитывается содержание органического вещества в пробе. С этой целью при интерпретации результатов используются частные отделения содержаний урана на содержания органического вещества.

Использование съемок донных осадков наиболее эффективно на стадиях специализированного картирования масштабов 1:200 000 и 1:500 000 для целей прогноза потенциальных урановорудных узлов и полей.

Поиски по водным ореолам рассеяния используются только применительно к урановым месторождениям. Они основаны на выявлении в природных водах повышенных концентраций радиоактивных элементов — урана, радия и радона, которые часто сопровождаются комплексом элементов-спутников уранового оруденения, хорошо мигрирующих в водной среде в условиях зоны гипергенеза.

Сущность радиогидрогеохимического метода состоит в отборе проб поверхностных, грунтовых или подземных вод, анализе этих проб на содержания радиоактивных элементов и элементов-спутников уранового оруденения и выяснении закономерностей пространственного размещения их водных ореолов. Наличие аномальных концентраций урана, радона и радия, а также элементов-спутников уранового оруденения в природных водах свидетельствует в определенных условиях о наличии повышенных концентраций радиоактивных элементов в коренных породах и в перекрывающих их рыхлых отложениях.

Радиогидрогеохимические методы являются одними из наиболее глубинных методов выявления повышенных концентраций урана в коренных породах.

Пробы воды отбираются более или менее равномерно со всей территории исследуемого района. Число точек отбора проб зависит от масштаба радиогидрогеохимических съемок, сложности строения и водообильности района. При съемках масштаба 1:200 000 одна проба отбирается в среднем на 4—10 км² (при опробовании открытых водотоков через 300—500 м). С укрупнением масштаба работ до 1:50 000 одна проба прихо-

дится в среднем на 1 км² (при опробовании открытых водотоков проба отбирается через 100—200 м).

Из каждого водопункта отбираются пробы воды на уран, радон и выборочно на радий. Анализы вод на элементы-спутники уранового оруденения и определение общей минерализации вод (по массе сухого остатка) производятся только для проб с повышенными концентрациями радиоактивных элементов. В них кроме того определяются концентрации кислорода, сероводорода, водородных ионов (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Еh).

Для определения урана требуется объем воды не менее 0,3 л, а для анализов проб на радий — не менее 1 л. Пробы воды на радон объемом не менее 0,1 л отбираются в специальные «промывалки», из которых предварительно выкачивается воздух [34].

Уран в водах (от $n \cdot 10^{-7}$ до $n \cdot 10^{-4}$ г/л) определяется люминесцентным методом с использованием фотоэлектрических флуориметров типа ФАС-2 или ФАС-4. Для определения радия в водах применяется ускоренный радиохимический метод с использованием альфа-радиометра РАЛ-1. Радон в водах определяется вакуумным методом с применением эманометров ЭМ-6 или «Радон», а при малых концентрациях — альфа-сцинтилляционным методом на лабораторных установках типа РАЛ-1. Анализы вод на широкий спектр элементов-спутников уранового оруденения на ранних стадиях работ производится полуколичественным методом сухих остатков. Анализы быстро изменяющихся компонентов (рН, Еh, Fe²⁺, Fe³⁺, CO₂, O₂, H₂) выполняются, как правило, на местах отбора проб с помощью полевых лабораторий типа «Комар», «ПЛГ-1», полевых потенциометров и другой специализированной аппаратуры. Для замеров значений Еh непосредственно в скважинах используются специальные каротажные зонды.

Проведение радиогидрогеологических съемок наиболее эффективно в горно-складчатых районах, для которых характерны большие мощности зон свободного водообмена, слабая минерализация и высокий окислительный потенциал вод. В этих условиях возможно выявление радиогидрогеологических аномалий на глубинах до нескольких сотен метров от дневной поверхности.

Хорошие результаты обеспечивает применение радиогидрогеохимического метода в гористых лесных, лесостепных и горно-таежных ландшафтах без многолетней мерзлоты.

В степных, полупустынных и пустынных ландшафтах возможности использования радиогидрогеохимических методов ограничиваются дефицитом вод, а наилучшее время для проведения съемок приходится на весенние месяцы.

Результаты гидрогеологических наблюдений и анализов вод наносятся на карты и разрезы для составления специализиро-

ванных радиогидрогеохимических карт и геометризации ореолов урана, продуктов его распада и элементов-спутников в поверхностных и подземных водах.

К числу положительных прогнозно-оценочных радиогидрогеохимических критериев относятся:

— совместное нахождение в водах аномальных количеств всех трех радиоактивных элементов: урана, радона и радия. При этом резко повышенные концентрации радона указывают на непосредственную близость урановорудных концентраций;

— повышенные содержания в водах элементов-спутников уранового оруденения: молибдена, цинка, свинца, меди, мышьяка и др.;

— повышенное значение отношений изотопов $^{234}\text{U} : ^{238}\text{U}$ (порядка 1,4—2) при высоком содержании урана в водах и преобладание изотопов радия уранового и актино-уранового рядов над изотопами радия ториевого ряда (т. е. $^{226}\text{Ra} : ^{228}\text{Ra} > 1$ и $^{223}\text{Ra} : ^{224}\text{Ra} > 1$);

— зональность водных ореолов, сходная с зональностью связанных с ними сорбционно-солевых ореолов в рыхлых отложениях или коренных породах. Как правило, в околорудной зоне наблюдаются повышенные концентрации в водах бериллия, кобальта, висмута, свинца, золота, в промежуточной зоне — меди, молибдена и сурьмы, а во внешней зоне — цинка, серебра, фтора, бора и йода. Место каждого элемента в ряду зональности определяется устойчивостью его основной формы миграции в данном диапазоне рН—Еh ореольных вод, а также составом и концентрацией самого сильного лиганда-комплексобразователя. Поэтому наименьшее постоянство в рядах зональности свойственно элементам с переменной валентностью U, As, Mo, Au и др.).

Основными показателем перспективности водных ореолов служит тенденция увеличения комплексности их состава по мере приближения к рудным скоплениям. Однако гидрохимическая зональность водных ореолов обычно отличается сложностью вследствие неоднородности состава вмещающих пород, различий гидродинамического режима вод разных глубин, влияния зон тектонических нарушений и других геологических факторов.

Биогеохимические методы поисков сводятся к отбору проб живой массы травянистых, кустарниковых или древесных растений, произрастающих в пределах изучаемых площадей, сжиганию (озолению) этих проб и определению концентраций редких и радиоактивных элементов, а также их элементов-спутников в золе растений.

Для опробования используются безбарьерные и высокобарьерные виды и органы растений. У древесных растений

(сосны, лиственницы, осины и др.) лучше всего опробовать верхний пробковый слой коры (без живой коры и луба), которая является безбарьерным органом по отношению к урану, свинцу, цинку, бериллию, фтору, литию, цирконию и ряду других элементов.

Для опробования на радий пригодны любые виды и части растений.

Главным радиоактивным элементом, который используется при проведении радиохимических съемок для оценки потенциальной ураноносности поисковых площадей, является радий. Анализы зола растений на содержание радия проводятся альфаспектральным методом с применением лабораторных анализаторов Альфа-1 или радиометров РАЛ-1. Все золные пробы с аномальными содержаниями радия подвергаются перлюминесцентным анализам на содержание урана и спектральным анализам на содержания элементов-индикаторов уранового оруденения.

Диапазон концентраций радиоактивных элементов в золах растений весьма широк. Фоновые содержания радия в золах изменяются от 1 до 70 г/т эквивалентного урана, а аномальные его концентрации могут достигать 3000 г/т эквивалентного урана. Минимально-аномальные содержания радия составляют около 150 г/т эквивалентного урана. Фоновые содержания урана изменяются в еще более широких пределах в зависимости от концентрации их усвояемых форм в почвах, видов и органов растений, а также от возраста растения и периода опробования.

По мнению многих исследователей тантал, ниобий, цирконий и редкие земли иттриевой группы преимущественно концентрируются в хвойных деревьях, а редкие земли цериевой группы — в лиственных деревьях. Концентраторами иттербия и иттрия являются те же растения, что и для бериллия (горичвет, пижма, лиственница, лапчатка пижмолистная, вика однопарная и др.). Церий и лантан накапливаются в полыни, березе, травах семейства бобовых. Все это крайне осложняет разделение аномальных и фоновых содержаний и особенно оценку перспективности выявляемых ореолов. Для уменьшения влияния ряда внешних условий на показательность биохимических проб опробование лучше проводить зимой или в период летне-осеннего условного физиологического покоя, отбирая за один день серии проб по крайней мере с нескольких смежных профилей. При этом наиболее стабильные результаты получаются для безбарьерных элементов-индикаторов, к числу которых относится в первую очередь радий.

Глубинность биохимического метода выше, чем глубинность большинства других поверхностных поисковых методов.

Максимальная мощность дальнеприносных рыхлых отложений, ограничивающая возможность метода, определяется опытным путем. По данным [20], в степных и пустынных районах она составляет 20—50 м, в лесных районах гумидной зоны 10—30 м, а в районах с многолетней мерзлотой не превышает 3—10 м.

С учетом возможностей использования биохимических съемок в зимнее время, что особенно ценно при изучении труднодоступных таежных и тундровых ландшафтов, их применение может оказаться весьма эффективным при специализированных поисково-съемочных работах масштабов 1:200 000 и 1:50 000.

Результаты биохимических съемок оформляются в виде карт и разрезов с геометризацией моноэлементных ореолов на геологической и ландшафтно-географической основах, а также в виде схем индикаторных отношений между элементами-индикаторами оруденения (например, $Ra:U$; $U:Mo$ и др.).

§ 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ СВИНЦОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРАНОНОСНОСТИ ИЗУЧАЕМЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Определения изотопного состава свинцов из нерадиоактивных минералов или вмещающих пород, где они содержатся в рассеянном состоянии, производятся для оценки перспектив ураноносности обширных территорий, а также локальных ураноносных структур.

В первом случае аномальные соотношения радиогенных свинцов, в особенности повышенные количества ^{206}Pb , используются в качестве положительных прогнозных признаков уранового оруденения при составлении радиохимических карт. Во втором случае данные систематического опробования рудных выходов на изотопы свинца позволяют уверенно различать вторичные ореолы эндогенных урановых месторождений от экзогенных урановых аккумуляций.

При оценке ураноносности локальных участков пробы на определение изотопного состава свинца отбираются из коренных пород или рыхлых отложений по сети $10 \times (20 \div 40)$ м, с выходом профилей за пределы аномальных зон. Пробы массой 200—300 г подвергаются дроблению, сокращению и растиранию до 200 меш. Анализы проб производятся изотопно-спектральным методом на установке УИСА-64-М на содержания изотопов ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb и рентгеноспектральным методом на определение содержаний валового свинца, урана и тория.

К числу «аномальных» относятся пробы с изменением состава изотопов свинца в сторону его относительного обогаще-

ния радиогенными составляющими (^{206}Pb и ^{207}Pb). В аномальных свинцах отношения

$$\frac{^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}} = 0,9, \quad (8.6)$$

$$a \frac{^{206}\text{Pb}}{^{203}\text{Pb}} = 0,51, \quad (8.7)$$

что свидетельствует об урановой природе наблюдаемой аномалии.

Величина радиогенной добавки ^{206}Pb при оценке радиоактивных аномалий рассчитывается по формуле:

$$^{206}\text{Pb}_{\text{ан}} = 1,07\text{Pb}_{\text{вал}} \left(a_{205} - \frac{a_{208}^0}{a_{207}^0} a_{207} \right), \quad (8.8)$$

где $\text{Pb}_{\text{вал}}$ — валовое содержание свинца в пробе по данным рентгеноспектрального анализа, a_{206} , a_{207} — долевые содержания ^{206}Pb и ^{207}Pb в пробе, a_{206}^0 , a_{207}^0 — долевые содержания тех же изотопов свинца в пробах с фоновыми содержаниями.

По величине радиогенной добавки может быть рассчитано первичное содержание урана в объеме пробы, которое обусловило накопление добавки ^{206}U , если известно время образования урановой минерализации. Первичное содержание урана в объеме пробы ($U_{\text{перв}}$) рассчитывается по формуле

$$U_{\text{перв}} = 1,16K \cdot ^{207}\text{Pb}_{\text{ан}}, \quad (8.9)$$

где K — коэффициент, зависящий от возраста урановой минерализации (табл. 18).

Таблица 18

Зависимость значения коэффициента K от возраста урановой минерализации

Время (млрд. лет)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Значение K	74,5	37,1	24,6	18,2	14,5	11,9	10,1	8,82	7,81	6,96

Использование изотопно-свинцового метода для оценки перспектив локальных структур, аномалий и рудопроявлений основано на различиях миграционных способностей свинца и урана в зоне гипергенеза. При разбраковке аномалий расчетная величина $U_{\text{перв}}$ сравнивается с фактическим содержанием урана в пробе, что позволяет судить о гипергенных изменениях изучаемого объекта в его приповерхностном слое. При значениях $U_{\text{перв}} < U_{\text{факт}}$ предполагается привнос урана, а при $U_{\text{перв}} >$

$> U_{\text{факт}}$ — его вынос в период после образования первичной урановой минерализации. Поисково-оценочное значение изотопно-свинцового метода заключается в том, что с его помощью в зонах гипергенеза уверенно выявляются участки аномалий, рудопроявлений и месторождений, из которых уран и продукты его распада в значительной мере или полностью выщелочены, а по избыточной радиогенной добавке ^{206}Pb и расчетному значению $U_{\text{перв}}$ оцениваются вероятные концентрации урана в первичных ореолах и рудах. Достоверность результатов изотопно-свинцового метода в значительной степени зависит от правильности определения возраста первичной минерализации, для чего следует использовать доступную совокупность геологических, минералого-геохимических и масс-спектрометрических методов.

Метод радиационных дефектов (РД) практически решает те же задачи, что и изотопно-свинцовый метод, применительно к оценке локальных ураноносных структур. Обычно он используется на стадии поисково-оценочных работ для выявления и прослеживания остаточных ореолов рассеяния урана, поисков эпигенетически разубоженных ореолов, определения генетического типа аномалий (рудопроявлений) или отбраковки современных повышенных концентраций урана.

Отбор проб производится по профилям, расположенным через 40—50 м друг от друга с шагом опробования от одного до десяти метров. При опробовании аномалий или рудопроявлений эпигенетического типа в пробу отбираются сколки измененных пород по всей мощности зоны пластового окисления с выходами в неизменные породы. Пробы массой 150—200 г дробятся до 1 мм без истирания. Навеска пробы отмучивается для удаления пылеватой и глинистой фракции и просушивается, после чего из нее удаляется магнитная фракция.

Удаление ферромагнитных минералов (которые часто присутствуют в виде включений в кварцевых зернах) необходимо для получения надежных результатов, так как даже небольшая примесь магнетита полностью маскирует измеряемый сигнал. По возможности выделяются также кварцевые зерна, поскольку концентрации радиационных дефектов, возникающие под влиянием одной и той же дозы облучения, в несколько раз больше в полевых шпатах, чем в кварце.

Анализы на радиационные дефекты выполняются на радиоэлектронных спектрометрах типа РЭ-1301. Результаты анализов выражаются в условных единицах, характеризующих число парамагнитных центров на грамм породы. Одна условная единица соответствует $5 \cdot 10^{14}$ п. ц./г.

При проведении метода РД необходимо оценить местные фоновые и выделить минимально-аномальные значения радиационных дефектов. Поэтому по каждой петрографической или

литологической разновидности пород изучаемого участка производится не менее 20—25 определений. Обычно фон вмещающих пород колеблется от 1 до 3 усл. ед и более, а минимально-аномальные значения РД — соответственно от 2 до 10 усл. ед. Наиболее четкие результаты обеспечиваются при измерениях проб изверженных пород кислого состава и терригенных кварцсодержащих пород. В породах основного состава радиационные дефекты не фиксируются даже в пробах, отобранных из урановых руд. Поэтому при неблагоприятном составе вмещающих пород вместо метода РД для решения тех же задач следует применять изотопно-свинцовый метод.

Глава IX

МЕТОДИКА РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

В зависимости от целей и задач разведочных работ различают предварительную, детальную и эксплуатационную разведку месторождений редких и радиоактивных металлов, а также разведку в пределах горного отвода. Две первые, предпроектные стадии проводятся на вновь выявленных месторождениях, а эксплуатационная разведка и разведка в пределах горного отвода — в условиях действующего горного предприятия.

На стадии предварительной разведки выясняются общие масштабы редкометального или уранового оруденения, среднее качество руд, их важнейшие технологические свойства и горно-технические условия эксплуатации месторождения.

В стадию детальной разведки выясняются все сведения, необходимые для проектирования горного предприятия и начала отработки месторождения.

В условиях действующих горных предприятий продолжают поиски и разведка новых рудных зон, участков и залежей на флангах и глубоких горизонтах месторождения, а на эксплуатируемых участках одновременно с разработкой месторождения проводится эксплуатационная разведка для выявления деталей строения рудных скоплений, оценки запасов, качества и технологических свойств руд в пределах каждого эксплуатационного участка и блока.

Разведка месторождений редких и радиоактивных элементов так же, как и их поиски, осуществляется геолого-минералогическими, геофизическими и геохимическими методами, совокупность которых используется для изучения проводимых разведочных горных выработок и скважин.

Для выбора геометрии разведочной сети, разведочных систем, технических средств разведки, оптимального сочетания буровых и горноразведочных выработок на различных стадиях разведочных работ необходима классификация месторождений редких и радиоактивных металлов по совокупности признаков, определяющих подходы к решению геологоразведочных задач. К числу таких признаков в первую очередь относятся строение, условия залегания и морфогенетические особенности рудных скоплений на различных структурных уровнях.

§ 1. РАЗВЕДОЧНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В практике разведки урановых месторождений широко используется разведочная группировка, предложенная Д. Я. Суражским [39]. Согласно этой группировке все урановые место-

Группировка урановых и редкометалльных месторождений для целей их разведки

Группа (по числу структурных уровней)	Подгруппа (по характеру залегания рудных скоплений)	Тип (по морфогенетическим особенностям рудных скоплений)	Примеры рудных формаций (промышленных типов)
I. Простого строения (1—2)	I (согласное)	I-1 (стратиформный)	Редкометалльные нефелиновые снгиты Ураноносные глины с костными остатками рыб Моначитовые россыпи
II. Умеренно сложного строения (до 3)	II (согласное)	II-1 (стратиформный)	Ураноносные конгломераты
		II-2 (уплощенный штокообразный)	Ураноносные альбиты железоурановой формации
III. Сложного строения (до 4)	III-A (согласное)	III-A-1 (стратиформный)	Ураноносные песчаники и угленосные отложения
		III-A-4 (тип жильной зоны или жиллообразный)	Ураноносные карбонатно-магнезиальные метасоматиты
		III-A-6 (трубообразный)	Ураноносные калиевые метасоматиты, редкометалльные пегматиты
		III-B-1.5 (стратиформный пластоподобный на низких уровнях, штокверкообразный)	Редкометалльные карбонатиты
		III-B-1.5 (стратиформный пластоподобный на низких уровнях, штокверкообразный)	Ураноносные аргиллизиты в углесто-кремнистых формациях

Доминирующий тип стратиформный

III-B (несогласное)	подобный на высоких уровнях	III-B-1,2 (стратиформный на низких структурных уровнях, штокверкоподобный или столбообразный на высоких уровнях)	Урано-битумный фацальный тип ураноносных песчаников
IV-A (согласное)	III-B-3 (тип минерализованной зоны дробления)	IV-A-3 (тип минерализованной зоны дробления)	Ураноносные и редкометалльные альбититы
		IV-A-4 (тип жильных зон или жил)	Ураноносные низкотемпературные натровые метасоматиты
IV-B (несогласное)	IV-B-5,6 (штокверкоподобный и трубообразный)	IV-B-1,4 (стратиформный, трубообразный и жиллообразный)	Ураноносные кварц-карбонатные жильные зоны
		IV-B-5,1.6 (штокверкоподобный жиллообразный, трубообразный и стратиформный)	Ураноносные низкотемпературные альбититы сульфидно-урановой субформации
			Ураноносные низкотемпературные альбититы фосфорно-урановой субформации
			Ураноносные беззтиты в породах флишовой формации
			Ураноносные низкотемпературные альбититы
			Ураноносные беззтиты
			Ураноносные аргиллизиты в вулканогенных формациях
			Бериллоносные аргиллизиты

Доминирующий тип минерализованной зоны дробления или штокверкоподобный

рождения разделяются по размерам и морфологии рудных тел, характеру их границ, изменчивости содержания урана и продуктивности на пять групп. Для каждой из этих групп месторождений по опыту геологоразведочных работ установлены ориентировочные средние расстояния между скважинами или горбыми выработками по падению и простираанию рудных тел, раздельно для запасов категорий А, В и С₁. Позже на основе системного подхода Д. Я. Суражским опубликован опыт морфогенетической группировки урановых рудных систем—совокупности рудных проявлений, закономерно связанных друг с другом единством структурного контроля и заключенных в пространстве, границы которого могут изменяться в зависимости от экономических факторов. Основой предлагаемой иерархической структуры считается рудное тело—система, которая состоит из рудных агрегатов и безрудных пород и содержит полезные компоненты в количестве, оправдывающем предстоящие расходы на добычу и переработку руд. Совокупность родственно связанных рудных тел образует рудные залежи, совокупность рудных залежей—рудные месторождения, а совокупность рудных месторождений—рудные поля. Выделенные рудные системы группируются по сочетаниям природных факторов, определяющих геометрию рудных объемов, их размеры, положение в пространстве, изменчивость и прерывистость оруденения [40].

Разведочная классификация урановых месторождений по признакам морфологии оруденения и особенностям его геологического контроля была предложена М. В. Шумилиным и А. Б. Кажданом [33]. В этой классификации по размерам и морфологии рудных залежей выделяются 12 типов урановых месторождений, которые по особенностям их геологического контроля группируются в четыре класса.

Ниже предлагается разведочная классификация урановых и редкометалльных месторождений, основанная на системном подходе к выделению объектов разведки и учитывающая основные положения, разработанные в перечисленных выше классификациях и группировках (табл. 19).

По сложности строения все урановые и редкометалльные месторождения разделяются на четыре группы. Критерием сложности строения месторождений служит число дискретных структурных уровней—от уровня строения месторождения до уровня строения, сопоставимого с объемами селекции руд при добыче. В зависимости от условий залегания и анизотропии строения рудных скоплений на различных структурных уровнях в пределах групп выделяются две подгруппы: с согласным и с несогласным залеганием разномасштабных рудных скоплений. По ведущим морфогенетическим особенностям рудных скоплений каждая группа или подгруппа разделяется на типы—стратиформный, тип минерализованной зоны, жильной зоны, штокообразный, трубообразный, штокверкоподобный и др. Внутри

типов по размерам или мощностям рудных скоплений могут быть выделены соответствующие подтипы.

Месторождения первой группы простого строения. Как правило, это протяженные стратиформные рудоносные горизонты с технологически сплошными и равномерными оруденением. В подавляющем большинстве случаев представления о месторождении, продуктивной зоне и продуктивной залежи совпадают. Реже в пределах месторождения обособляются несколько продуктивных зон или залежей, образуя второй структурный уровень.

Разведка месторождений первой группы осуществляется буровыми скважинами системами вертикальных разрезов. В стадию детальной разведки скважины в пределах разрезов сгущаются. Необходимости в проведении эксплуатационной разведки обычно не возникает. Характерным представителем месторождений I-1 типа являются ураноносные глины с костными остатками ископаемых рыб и редкометалльные месторождения в стратифицированных интрузивах ультраосновного-щелочного состава.

Месторождения второй группы характеризуются согласным строением, т. е. одинаковой пространственной ориентировкой разномасштабных рудных скоплений. В строении месторождений выделяются до трех структурных уровней; месторождения, продуктивные зоны (толщи), продуктивные залежи (пласты). В месторождениях стратиформного типа (ураноносные конгломераты) продуктивные толщи большой мощности включают несколько маломощных продуктивных пластов, а в маломощных монацитовых россыпях рудные линзы обособляются в плане. В месторождениях уплощенно-штокообразного типа (ураноносные альбититы железо-уранового фациального типа) продуктивные зоны состоят из сближенных согласных с ними продуктивных штокообразных или уплощенных столбообразных залежей.

Разведка месторождений второй группы проводится преимущественно системами вертикальных разрезов с помощью вертикальных или наклонных буровых скважин. Горно-разведочные выработки необходимы только для изучения детализационных участков.

Месторождения третьей группы. В строении этих месторождений выделяются до четырех структурных уровней: месторождения, продуктивные зоны, продуктивные залежи и морфологически обособленные участки продуктивных залежей. Среди месторождений третьей группы встречаются представители обеих подгрупп—с согласным (А) и с несогласным (Б) залеганием разномасштабных рудных скоплений.

В подгруппу III—А входят месторождения стратиформного типа, которые в свою очередь отчетливо разделяются на два подтипа: маломощные—ураноносные песчаники и угленосные

отложения и мощные — ураноносные карбонатно-магнезиальные метасоматиты. Кроме того, в подгруппе III—А выделяются месторождения типа минерализованных зон дробления (ураноносные и редкометальные альбититы), месторождения жиллоподобного типа (ураноносные калиевые метасоматиты) и редкометальные пегматиты. К этой же группе относятся многие месторождения редкометальных карбонатитов с согласным залеганием трубообразных рудных скоплений различных размеров. Подгруппа III—Б с несогласным залеганием разномасштабных рудных скоплений включает в себя месторождения с урановыми рудными скоплениями стратиформного типа на низких уровнях строения и штокеркоподобного или сложного столбообразного на высоких структурных уровнях. К первому из них относятся ураноносные аргиллизиты в углисто-кремнистых формациях, а ко второму — урано-битумный фациальный тип месторождений ураноносных песчаников.

Разведка месторождений третьей группы осуществляется поверхностными и подземными горными выработками и скважинами.

В стадию предварительной разведки преобладают буровые скважины, а на стадии детальной разведки горные выработки и скважины проходятся в сопоставимых соотношениях. Разведка месторождений подгруппы III—А осуществляется системами вертикальных разрезов, в плоскостях которых часто располагаются не только буровые скважины, но и разведочные горные выработки. В случаях больших мощностей и крутых падений рудных залежей на стадии детальной разведки горные выработки располагаются в плоскостях горизонтальных разрезов.

Предварительная разведка месторождений подгруппы III—Б производится системами вертикальных разрезов, а при использовании горных выработок — комбинированными системами ортогонально расположенных разрезов. Для изучения объектов детальной разведки, расположенных несогласно по отношению к залеганию продуктивных зон, создаются новые горно-буровые разведочные системы, ориентированные в соответствии с элементами залегания разведываемых продуктивных залежей.

Месторождения четвертой группы обладают наиболее сложным строением. Кроме продуктивных зон, залежей и морфологически обособленных участков в их строении выделяются обособленные рудные скопления еще более мелкого масштаба — локальные рудные обособления и часто слагающие их минеральные агрегаты. Общее число структурных уровней достигает пяти и более. Среди месторождений четвертой группы известны представители подгруппы А — с согласным залеганием разномасштабных рудных скоплений и подгруппы Б — с несогласным залеганием.

В подгруппе IV—А встречаются месторождения типа минерализованных зон дробления (ураноносные низкотемпературные натровые метасоматиты, ураноносные березиты в породах флишоподобных формаций) и ураноносные жильные зоны кварц-карбонатно-настурановой формации. В подгруппу IV—Б входят сложно построенные урановые месторождения формации низкотемпературных натровых метасоматитов, березитовой и аргиллизитовой формаций, а также формации бериллиеносных аргиллизитов. По морфогенетическим особенностям месторождений и продуктивных участков они относятся к типу минерализованных зон дробления или скоплениям штокеркоподобного типа, а на более высоких структурных уровнях образуют продуктивные залежи штокеркоподобного, трубообразного, стратиформного и жиллообразного типов. При этом в пределах одного месторождения могут встречаться два, три и более морфогенетических типа продуктивных залежей.

Разведка месторождений четвертой группы проводится с помощью различных технических средств, среди которых на детальной стадии доминируют горные выработки, шпуровые и подземные буровые скважины.

Предварительная разведка месторождений подгруппы IV—А осуществляется системами вертикальных разрезов, часто в сочетании с системами горизонтальных разрезов, если на этой стадии используются горно-разведочные выработки. В стадию детальной разведки эти разведочные системы сохраняются, а при изучении маломощных рудных тел дополнительно создаются разведочные системы в продольных плоскостях продуктивных залежей.

Предварительная разведка месторождений IV—Б подгруппы также проводится системами вертикальных разрезов или комбинированными системами ортогонально расположенных разрезов. При переходе к детальной разведке число разведочных систем возрастает, поскольку для изучения продуктивных залежей разных морфогенетических типов, различно ориентированных по отношению друг к другу и по отношению к элементам залегания продуктивных зон, приходится создавать самостоятельные разведочные системы. Так, например, штокеркоподобные продуктивные залежи сложно построенных месторождений ураноносных аргиллизитов в вулканогенных формациях обычно разведываются системами вертикальных или комбинированных ортогонально расположенных разрезов, для разведки жиллоподобных залежей дополнительно создаются разведочные разрезы в продольных плоскостях, а для разведки трубообразных залежей — дополнительные горизонтальные разрезы с радиальным расположением в них разведочных пересечений. Если в пределах месторождения выявляются еще продуктивные залежи стратиформного типа, то их разведка осуществляется самостоятельной системой вертикальных разрезов с помощью подземных

буровых скважин, ориентированных в соответствии с положением осей анизотропии стратиформных залежей.

Предлагаемая группировка месторождений по сложности их строения согласуется, в первом приближении, с группировкой месторождений, установленной ГКЗ СССР. Так, месторождения простого и умеренно сложного строения примерно соответствуют месторождениям I—II групп, а сложные и весьма сложные месторождения — месторождениям III группы, установленным классификацией ГКЗ СССР.

§ 2. ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Принадлежность месторождений к одной из групп разведочной классификации способствует до некоторой степени и выбору оптимальной геометрии разведочной сети, поскольку она отражает степень сложности их строения, а размеры месторождений и слагающих их более мелких рудных скоплений проявляют тенденцию к уменьшению по мере перехода от первой группы к четвертой. Однако решающее влияние на выбор геометрии разведочной сети оказывают конкретные размеры разведываемых рудных скоплений и характеристики анизотропии их формы и строения. На стадии предварительной разведки — это характеристики продуктивных зон, на стадии детальной разведки — продуктивных залежей, а на стадии эксплуатационной разведки — локальных рудных обособлений или минеральных агрегатов, сопоставимых с объемами селекции руд при добыче. Для выбора оптимальной геометрии разведочной сети необходимо обладать информацией о размерах и анизотропии разведываемых рудных образований. Она может быть получена на ближайшем эталонном объекте или предположена по принципу аналогии с учетом всех известных данных о разведываемом месторождении. Задаваясь ожидаемыми размерами и характеристиками анизотропии рудных скоплений, определяют оптимальную геометрию сети. Для относительно простых по морфологии и строению рудных образований необходимо обеспечить минимум три кондиционных (и два контурных) пересечения в каждом разведочном разрезе и минимум три параллельных разреза, а при сложной морфологии и строении этих образований минимальное число кондиционных пересечений в разрезе и самих разрезов возрастает до 5. В контурах разведываемых объектов минимальное число кондиционных разведочных пересечений соответственно от 9 до 25. При крупных размерах рудных скоплений минимальное число разведочных пересечений относится не ко всему разведочному разрезу, а к его части в пределах одного подсчетного блока. Форма ячейки раз-

ведочной сети определяется соотношением показателей анизотропии строения (или формы) разведываемого рудного скопления по направлению разведочного разреза и в поперечном направлении. Очевидно, что минимальное число разведочных пересечений на ортогональных разведочных разрезах остается при этом одним и тем же, а изменяются лишь расстояния между смежными пересечениями в зависимости от степени вытянутости ячейки разведочной сети.

Таким образом, в отличие от установившихся традиций, нельзя обосновать оптимальные параметры сети для разведки месторождений только в зависимости от их принадлежности к различным группам, подгруппам или типам приведенной классификации из-за широкого диапазона изменений размеров и характеристик анизотропии разномасштабных урановорудных скоплений в пределах месторождений одного промышленного типа. По этой причине использование регламентированных разведочных сетей применительно к любой группировке месторождений малоэффективно.

В процессе разведки проводятся систематическая обработка и анализ получаемой геологической информации, которая служит основой для корректировки разведочной сети по степени увязки смежных разведочных пересечений и разрезов путем выборочного сгущения разведочных пересечений в разрезе и путем создания эталонных разрезов или участков.

Оптимальность разведочной сети оценивается методами экспериментального разрежения разведочной сети, на эталонных участках или путем сопоставления ранее проведенных разведочных работ с результатами эксплуатационной разведки.

Для оценки детальности оконтуривания рудных скоплений методом разрежения сети определяются погрешности геометризационных контуров (δ), которые рассчитываются по формуле

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\sum (S')}{S_{\text{ист}}}, \quad (9.1)$$

где $\sum (S')$ — сумма всех безрудных площадей, обнаруженных внутри «истинного» контура и рудных площадей, оказавшихся за его пределами; $S_{\text{ист}}$ — «истинная» площадь рудного скопления, за которую принимается площадь, оконтуренная по предельно густой сети.

Погрешность геометризации отражает степень изученности условий залегания, формы и строения рудных скоплений в зависимости от густоты разведочной сети и может рассматриваться в качестве важнейшего количественного критерия их разведанности [19]. Для запасов категории C_1 величина погрешности геометризации колеблется в пределах от 30 до 50 %, а для категории В — от 20 до 30 %.

§ 3. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

При разведке месторождений редких и особенно радиоактивных металлов составление первичных геологических документов обязательно сопровождается радиометрическими измерениями.

Для правильного и оперативного направления геологоразведочных работ чрезвычайно существенно, чтобы документация проводилась непосредственно вслед за проходкой разведочных выработок и скважин. Кроме того, первичные документы имеют исключительно важное значение как основа для составления сводных документов: геологических погоризонтных планов, разрезов и проекций.

Документация разведочных горных выработок представляет собой разновидность крупномасштабного подземного геологического картирования. Наиболее распространенными масштабами подземной документации являются масштабы 1:25 и 1:50. На участках, где можно наблюдать детали, определяющие строение рудных образований на изучаемых структурных уровнях или важные для понимания генезиса оруденения, зарисовки выполняются в более крупных масштабах (1:10, 1:5), вплоть до зарисовок в натуральную величину.

При документации канав зарисовываются дно канавы и одна стенка. В шурфах зарисовываются все или две взаимно перпендикулярные стенки и забой, а при простом геологическом строении месторождения — только одна стенка и забой. При документации большинства подземных горных выработок (кваршлагов, ортов, гезенков и восстающих) зарисовываются стенки, а при документации штреков — кровля и забой при пологих залеганиях рудных залежей — одна или две стенки.

В последние годы в практику геологоразведочных работ все шире внедряются методы фотодокументации горных выработок. Это позволяет производить геологическую документацию на фотограмметрической основе, что заметно улучшает качество зарисовок и сокращает время, необходимое на их производство. Фотограмметрическая основа представляет собой геологически дешифрированную масштабную зарисовку, снятую с фотографии забоя или стенки выработки.

Описание участков наблюдений, как необходимое дополнение к зарисовке, должно содержать только те сведения, которые нельзя отобразить графическим способом.

Отбор образцов руд и вмещающих пород в процессе документации разведочных выработок проводится для составления и пополнения эталонных коллекций и для их систематического изучения в процессе камеральной обработки каменного материала.

Радиометрические измерения разведочных выработок производятся с помощью полевых радиометров, часто с применением свинцовых экранов.

Гамма-профили составляются по осям выработки (при рабочем положении гильзы прибора без свинцового экрана) в ее центре, примерно на высоте 1—1,5 м от почвы и (реже) раздельно по стенкам и кровле выработок. В последнем случае гильза прибора прикладывается непосредственно к стенке выработки на высоте 1—1,5 м от ее почвы или к кровле по ее осевой линии. Наиболее употребительный шаг гамма-профилирования 1 м. Результаты гамма-профилирования оформляются в виде графиков в масштабе геологической документации выработок.

Гамма-съемка производится с помощью полевого радиометра со свинцовым экраном с фиксированными точками наблюдения по сетке 20×20 см. Такой сетью радиометрических замеров покрывается вся поверхность документируемой стенки, кровли или забоя выработки, а результаты измерений оформляются в виде плана изограмм, который вычерчивается на кальке в масштабе геологической документации.

Совместное изучение геологической документации и планов изограмм способствует выяснению геологических закономерностей размещения урановой или ториевой минерализации, правильному выбору участков расположения проб и позволяет откорректировать положение контуров рудных залежей при составлении сводных документов.

При геологической документации горных выработок в зонах окисления урановых месторождений могут быть использованы люминесцентные методы.

При документации скважин получаемый из колонковой скважины керн подвергается тщательному изучению, описанию и фотографированию. Перед отбором керновых проб производится радиометрическое профилирование керна для выделения участков, подлежащих дальнейшему более тщательному изучению и опробованию.

Длина пройденного интервала скважины за один рейс при сравнении с длиной керна, вынутого из скважины за тот же рейс, позволяет вычислить линейный выход керна, который является одним из основных показателей качества буровых работ. При разведке урановых месторождений следует иметь в виду, что из-за легкости выкрашивания или вымывания многих урановых минералов даже очень высокий выход керна не гарантирует достоверности результатов опробования.

Замеры искривлений колонковых скважин с помощью электрических, фото- или гироскопических инклинометров проводятся через каждые 20—25 м по мере их углубления. Измерения зенитных углов должны производиться во всех колонко-

вых скважинах глубиной более 100 м, а азимутальных углов — при глубинах скважин более 200 м.

Геофизическая документация скважин включает в себя различные виды каротажных работ, из которых при разведке месторождений руд редких и радиоактивных металлов применяются гамма-каротаж (ГК), гамма-гамма-каротаж (ГГК), фотонейтронный каротаж (ФНК), различные виды нейтронного каротажа (НК) и электрического каротажа (ЭК). Наиболее широким распространением пользуется гамма-каротаж (ГК), который применяется для:

— обнаружения в скважинах уранового и ториевого оруденения, признаков редкометального тантало-ниобиевого и редкоземельного оруденения, содержащего постоянную примесь радиоактивных минералов;

— определения глубины и мощности радиоактивных залежей и количественной оценки концентраций в них радиоактивных элементов;

— литолого-стратиграфического расчленения и корреляции геологических разрезов скважин.

С помощью гамма-гамма-каротажа скважин (ГГК) выделяются породы повышенной и пониженной плотности (прослой плотных известняков в разрезе осадочных пород, дайки и рудные образования с заметными количествами тяжелых элементов, покровы и силлы основных пород, прослой углей, осадочных пород с повышенной пористостью, брекчированные тектонические зоны и т. д.) (рис. 23).

Фотонейтронный каротаж (ФНК) применяется при разведке бериллиевых месторождений, так как из всех элементов бериллий обладает самым низким порогом фотонейтронной реакции (1,67 МэВ).

Для документации скважин при разведке месторождений редких и радиоактивных металлов могут быть использованы методы нейтрон-нейтронного каротажа (ННК) и нейтронного гамма-каротажа (НГК). Нейтронные методы исследования скважин дают возможность выделять в разрезе пород водообильные горизонты и природные скопления борсодержащих минералов, фиксировать высокопористые водоносные породы, которые выделяются на диаграммах минимумами кривых.

Различные виды электрического каротажа (ЭК) позволяют получить дополнительные данные для расчленения разрезов скважин, выделить прослой различного литологического состава, оценить пористость, проницаемость и водоносность пород, а также установить участки или пласты с повышенными содержаниями сульфидов и тектонические нарушения.

Методы электрического каротажа обычно применяются в комплексе с радиометрическими методами, что позволяет более уверенно проводить литологическое расчленение разрезов скважин (рис. 24).

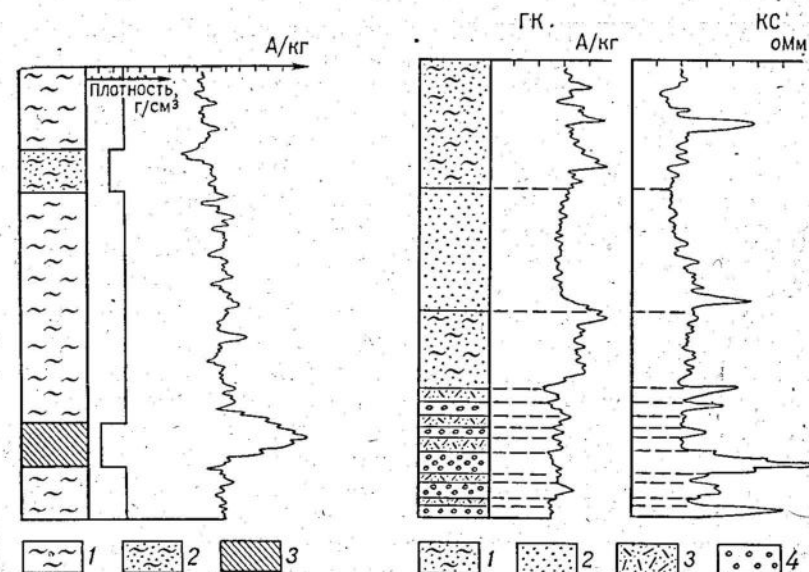


Рис. 23. Участок кривой гамма-каротажа по скважине.

1 — глинистые породы; 2 — аргиллиты; 3 — угольный пласт

Рис. 24. Совмещенные кривые гамма-каротажа (ГК) станцией АСГ-26 без экрана и электрического каротажа методом кажущихся сопротивлений (КС).

1 — переслаивающиеся песчаники и алевролиты; 2 — песчаники; 3 — туфопесчаники; 4 — гравелиты

Гидрогеологическая документация разведочных скважин включает в себя опробование вод на содержание радиоактивных элементов и их спутников для обнаружения новых не вскрытых скважиной скоплений урановых руд.

В задачу минералого-геохимических исследований входит детальное изучение химического и минерального состава руд, окорудных изменений вмещающих пород, первичных ореолов рудообразующих элементов и их спутников. Изучение вещественного состава и минералого-геохимических особенностей руд редких и радиоактивных элементов проводится для:

— выявления парагенетических минеральных ассоциаций и элементов зональности в пространственном размещении химических элементов, минеральных образований и участков гидротермально измененных вмещающих пород, которые используются при увязке разведочных пересечений и разрезов как минералого-геохимические критерии рудоносности;

— оценки качества и выявления технологических типов руд, выбора наиболее рациональных методов их обогащения и

переработки, обеспечивающих возможность наиболее полного извлечения всех содержащихся в них полезных компонентов.

Для целей геометризации выявляемых минералого-геохимических особенностей руд и измененных пород минерализованный объем недр опробуется по регулярной сети, а отобранные пробы подвергаются детальному минералогическому, химическому и минералого-петрографическому изучению. По всем разведочным горным выработкам и скважинам проводится комплекс геохимических исследований по данным геохимического опробования.

По результатам анализов геохимических проб отстраиваются изолинии концентраций главных и сопутствующих металлов, содержаний щелочей, уголекислоты, серы и других компонентов, позволяющих судить о зональности метасоматитов и рудных залежей, что способствует достоверности их увязки и эффективности прогнозов изменения качества руд на флангах и глубоких горизонтах месторождения. Данные о зональности первичных ореолов рудных элементов вокруг рудных залежей используются для оценки нижних горизонтов, увязки соседних разведочных сечений и направления дальнейших разведочных работ.

При изучении минерального и химического состава руд для оценки их качества и технологических свойств первостепенное значение приобретает выяснение текстурных и структурных особенностей, размеров и форм рудоминеральных скоплений, их физических свойств и элементного состава. Для руд сложного состава выясняется распределение основных и сопутствующих ценных элементов по рудообразующим минералам, устанавливаются валовый химический состав руд и содержания в них вредных примесей. Изучение окolorудных изменений боковых пород, ореолов рассеяния редких, радиоактивных элементов и их спутников проводится в тесной связи с изучением минерального и химического состава рудных залежей, поскольку в генетическом отношении все они представляют собой единые природные образования.

Существенное значение для выбора технологической схемы переработки урановых руд имеет их валовый химический состав. Повышенные содержания в рудах карбонатов кальция и магния, железа и фосфатов кальция снижают технико-экономические показатели кислотного способа выщелачивания урановых руд, а при значительных содержаниях этих компонентов применение кислотного способа становится экономически нецелесообразным.

Детальное изучение минерального состава руд и закономерностей распределения главных промышленно ценных элементов по минеральным составляющим приобретает исключительное значение при разведке большинства редкометалльных месторождений. Наряду с основными рудными минералами редко-

металльные руды содержат большое количество второстепенных минералов, в состав которых входят уран, торий, титан, тантал, ниобий и редкие земли. От минерального состава этих руд и от особенностей распределения промышленно ценных элементов по минеральным составляющим в значительной мере зависят схема и методы технологической переработки.

Текстурные и структурные особенности руд оказывают решающее влияние на возможность и эффективность их обогащения. Так, например, руды с прожилковыми, пятнистыми, вкрапленными и полосчатыми текстурами легко поддаются обогащению, причем экономический эффект процесса обогащения находится в прямой связи с крупностью рудных вкраплений. Для руд с брекчиевидными текстурами большое значение имеет распределение рудных минералов по текстурным элементам. Наиболее благоприятно для обогащения присутствие рудных компонентов только в цементе; хуже если рудные минералы присутствуют только в обломках. Весьма тяжелыми объектами обогащения являются руды с тонкой эмульсионной вкрапленностью рудных минералов.

Особенность методов механического обогащения урановых руд (рудоразборки и радиометрического обогащения) заключается в их тесной связи с процессами отработки месторождения. Рудоразработка производится непосредственно в забоях, а радиометрическая сортировка и обогащение — на дневной поверхности или на горизонтах горных работ. Возможность радиометрической сортировки зависит от степени радиометрической контрастности руд, которая изучается как одно из технологических свойств в процессе разведки месторождений.

Понятие контрастности руд может быть применено к рудам самого различного состава. Относительно урановых руд широкое распространение получило понятие «радиометрической» контрастности благодаря внедрению радиометрических экспресс-методов анализа содержания урана в массивах и в отбитых рудных массах.

Изучение радиометрической контрастности проводится по таким элементарным объемам, по которым впоследствии можно будет проводить селекцию руд и вмещающих пород, сортировку и обогащение урановых руд*.

Для оценки технологических свойств урановых руд, экономического эффекта их радиометрической сортировки и обогащения Л. Ч. Пухальским [33] предложен показатель контра-

* Радиометрическим обогащением руд называется их автоматическая сортировка, дополненная комплексом операций по дроблению крупных фракций, классификацией руды по крупности, выделению мелких несортируемых классов, промывке и поточной порционной подаче руды на сепараторы.

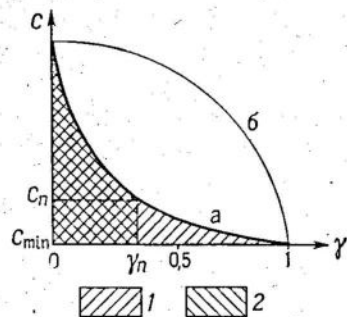


Рис. 25. Зависимость среднего содержания урана (C) в обогащенном сорте руды от выхода обогащенной руды (γ).

a — кривая контрастной руды, b — кривая неконтрастной руды; 1 — площадь, эквивалентная общему количеству урана в руде (S); 2 — площадь, эквивалентная количеству урана в обогащенном сорте (S_n).

Если принять, что вся площадь под кривой (S) эквивалентна общему количеству урана в руде, а площадь (S_n), ограниченная абсциссой γ_n , эквивалентна количеству урана в обогащенном сорте, то можно считать, что $\varepsilon = \frac{S_n}{S}$. Сопоставляя кривые a и b , можно убедиться, что в контрастных рудах количество урана в обогащенной руде уменьшается незначительно и постепенно, в то время как для слабоконтрастных руд оно сни-

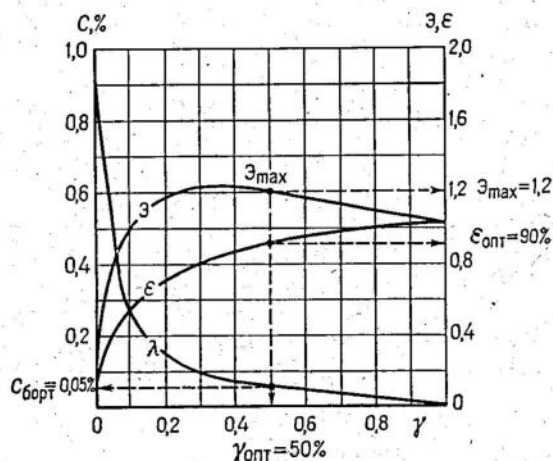


Рис. 26. График показателя экономической эффективности сортировки (ε) и определение оптимальных параметров [33]

стности $P_{\max}$, вычисляемый как экспериментальное значение функции

$$P_{\max} = \frac{2\varepsilon}{1+\gamma}, \quad (9.2)$$

где ε — извлечение урана в обогащенный сорт руды (в долях единицы); γ — выход обогащенного сорта руды (в долях от исходного, принятого за единицу).

Значения ε и γ зависят от степени контрастности и гранулометрического состава (кусковатости) руды. На рис. 25 показана зависимость среднего содержания урана (C) в обогащенном сорте контрастной руды от выхода обогащенной руды (γ). Если принять, что вся площадь

Таблица 20

Классификация урановых руд по контрастности (по Л. Ч. Пухальскому)

Типы руд	Показатель контрастности, $P_{\max}$	Возможные показатели сортировки		
		извлечение урана, ε , %	коэффициент обогащения, ζ	выход обогащенной руды, γ , %
Неконтрастные	1	100	1	100
Слабоконтрастные	1,1–1,1	90–95	1,1–1,3	75–100
Среднеконтрастные	1,1–1,3	90–95	1,3–2	50–75
Высококонтрастные	1,3–1,5	90–95	2–4	25–50
Особоконтрастные	1,5–2	95–100	>4	>25

жается почти пропорционально снижению выхода обогащенного сорта руды.

Графическое изображение показателя экономической эффективности (ε), характеризующего показателем контрастности, степенью извлечения урана в обогащенный сорт ε и кривой обогащенности λ , показано на рис. 26.

С учетом соотношений затрат на добычу урановых руд (a_2) и их переработку (a_1), при значительных отклонениях коэффициента обогащения $\rho =$

$\frac{a_1}{a_2}$ от единицы, формула (9.2) приобретает более сложный вид:

$$P_{\max} = \frac{1+\rho}{1+\rho\gamma}. \quad (9.3)$$

Однако даже при значениях ρ , близких к ± 2 , положение экстремальных значений кривых контрастности, определяющих все оптимальные показатели сортировки, изменяется в весьма ограниченном интервале (рис. 27). Поэтому в большинстве случаев можно пользоваться формулой (9.2).

С использованием показателя контрастности $P_{\max}$ урановые руды разделяются на пять типов, характеристика которых приведена в табл. 20.

Изучение радиометрической контрастности начинается

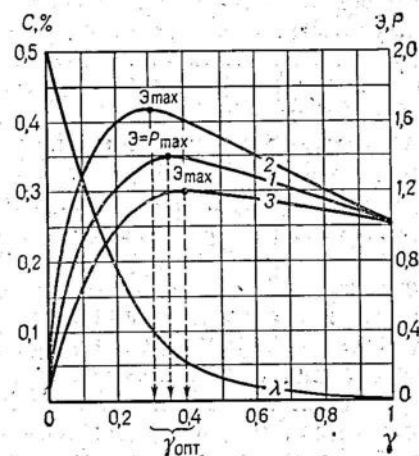


Рис. 27. Кривые показателя экономической эффективности сортировки при разных соотношениях затрат на добычу и переработку руды [33].

1 — затраты на добычу и переработку равны ($\varepsilon_{\max} = P_{\max}$); 2 — затраты на добычу в 2 раза меньше затрат на переработку; 3 — затраты на добычу в 2 раза больше затрат на переработку

с определения ее в массиве по данным дифференциальной интерпретации радиометрических проб или гамма-каротажа скважин и шпуров. Путем трансформации шага квантования радиометрических измерений получают данные о контрастности руд в различных элементарных объемах. В дальнейшем эти данные проверяются экспериментальными работами.

Технология переработки руд редких металлов также имеет ряд особенностей, связанных с малыми содержаниями ценных компонентов в исходных рудах, комплексным химическим составом руд, сложным и непостоянным составом рудных минералов. В отличие от урановых руд, руды редких металлов хорошо обогащаются механическими методами. Основными методами обогащения являются ручная рудоразборка (литий и бериллий), гравитация (тантал, ниобий, редкие земли и торий), флотация (литий и бериллий), магнитная и электромагнитная сепарации (доводка тантало-колумбитовых, монацитовых и редкоземельных концентратов) и др. Поэтому при изучении технологических свойств редкометалльных руд особое внимание уделяется минералам, содержащим редкие металлы, выяснению их взаимоотношений между собой и с другими минералами, установлению корреляционных связей между отдельными элементами в рудах, определению размеров зерен, соотношений различных по крупности классов и изучению сростков минеральных агрегатов, их размеров и характера сростаний. Если в изучаемых рудах один и тот же редкий металл присутствует в различных минералах, необходимо определить количественные соотношения этих минералов и распределение редких металлов между ними.

С развитием ядерно-физических методов опробования применительно к редким металлам, по аналогии с радиометрической сортировкой и обогащением, неизбежно возникает проблема их ядерно-физической сортировки и обогащения, а следовательно, и необходимость изучения «ядерно-физической» контрастности руд.

Горногеологические (горнотехнические) условия эксплуатации месторождений изучаются параллельно с проведением разведочных выработок и скважин.

Специальными гидрогеологическими и инженерно-геологическими наблюдениями выясняется обводненность месторождения и определяются возможные водопритоки в эксплуатационные горные выработки, а также инженерно-геологические свойства руд, вмещающих пород и перекрывающих их отложений. В задачу гидрогеологических наблюдений входит и оценка водных ресурсов для использования их в качестве источников питьевого и технического водоснабжения будущего горного предприятия.

Если в районе разведываемого месторождения уже имеются действующие рудники или карьеры, расположенные в аналогич-

ных или сходных с ним гидрогеологических и инженерно-геологических условиях, то для характеристики разведываемого месторождения должны быть использованы данные об обводненности и инженерно-геологических условиях этих предприятий, а также изучен опыт борьбы с рудничными водами и эффективность мероприятий по осушению горных выработок.

Гидрогеологические наблюдения производятся по возможности во всех разведочных скважинах и, кроме того, в специальных гидрогеологических скважинах. В процессе бурения отмечаются уровни различных водоносных горизонтов, самоизливание вод из скважин, поглощение промывочной жидкости, выход газов из скважин, замеряется температура воды и т. п. При проходке пьезунов проводятся наблюдения за подъемом «пробок» (масс водоносных песков, заполняющих нижние части скважин после удаления из них бурового снаряда). Высота «пробки» позволяет судить о степени пьезунности песка и о величине гидростатического напора. Большое значение имеют наблюдения за трещиноватостью пород, которые проводятся путем документации керна.

При проходке горных выработок на урановых месторождениях водопоявления опробуются также на радиоэлементы, описываются и фиксируются в геологических документах. При радиогидрохимическом опробовании горных выработок необходимо учитывать пути движения вод в горных породах, так как по аномальным содержаниям урана и особенно радона в водах определяется местоположение не вскрытых выработками рудных тел.

Инженерно-геологические наблюдения в горных выработках включают отбор проб для определения физико-механических свойств пород и руд и изучение трещиноватости горных пород, для чего отмечаются направления трещин и углы их падения, подсчитывается количество трещин на единицу площади, выясняется происхождение трещин и описывается состав выполняющего их вещества. Особое внимание уделяется явлениям пучения, оползания и обрушения пород. При проходке выработок в глинистых породах часто отбираются пробы на анализ глин, так как влажные глины обладают свойствами вспучивания.

В горных выработках проводятся наблюдения за прорывами подземных вод и пьезунов, за их агрессивностью, а также за изменением состава, цвета, влажности и пластичности вмещающих пород. В опасных по нефти и газу месторождениях (какими часто являются урановые месторождения, связанные с битумами) особое внимание уделяется качественной и количественной характеристикам нефте-водо-газовыделений. Наиболее опасными в инженерно-геологическом отношении являются газы углеводородного ряда и сероводород. В опасных по газу подземных выработках проводятся специальные газовые съемки, в процессе которых в шпурах измеряется давление

газов и отбираются пробы газов на анализ. Данные газовой съемки наносятся на погоризонтные геологические планы, что позволяет оконтуривать участки с повышенной газоносностью.

При разведке урановых месторождений проводятся также специальные наблюдения за содержанием радона в выработках, что необходимо для проектирования мероприятий по технике безопасности ведения работ.

§ 4. ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ И КОНДИЦИИ К ПОДСЧЕТУ ЗАПАСОВ

Геолого-экономическая оценка месторождений производится на всех стадиях разведочных работ. По результатам предварительной и детальной разведок обеспечиваются соответственно предварительная и окончательная предпроектные геолого-экономические оценки месторождения, а по данным эксплуатационной разведки — оперативная геолого-экономическая оценка отдельных участков месторождения. Периодическая переоценка месторождения проводится в связи с изменениями кондиций, горной технологии или минерально-сырьевой базы горных предприятий.

По результатам геолого-экономической оценки выявляется сравнительная промышленная ценность разведываемых месторождений, устанавливается очередность их изучения и промышленного освоения, обосновываются темпы геологоразведочных работ, оптимальная степень разведанности запасов и целесообразность соответствующих затрат.

Геолого-экономическая оценка месторождений включает в себя выяснение:

- геолого-минералогических особенностей месторождения;
- промышленной ценности руд;
- вероятного экономического эффекта от использования добытых руд в народном хозяйстве.

Для целей подсчета запасов необходима хотя бы примерная оценка ожидаемого экономического эффекта от возможного использования данного месторождения в народном хозяйстве. Такая оценка проводится при составлении промышленных кондиций к подсчету запасов, а подсчитанные запасы принимаются в дальнейшем в основу экономической оценки месторождения.

Для подсчета запасов урановых и редкометалльных месторождений устанавливается широкий комплекс кондиционных параметров, главным из которых является минимальное промышленное содержание металла в подсчетном блоке.

Минимальное промышленное содержание редких металлов в рудах может изменяться в широком диапазоне от первых сотых до последних десятых долей процента, в зависимости от

их состава, комплексности и технологических свойств. Для многих комплексных месторождений редкометалльных руд минимальные промышленные содержания устанавливаются в условном металле (тантале, бериллии и др.) с помощью пересчетных коэффициентов, учитывающих преysкурантные цены на каждый из металлов и плановые коэффициенты извлечения каждого из них в готовую продукцию.

В числе дополнительных кондиций к качеству руд обычно устанавливаются:

— перечни основных и сопутствующих металлов, подлежащих учету и подсчету;

— технологические типы и сорта руд, подлежащие разделному учету в недрах.

Важнейшими кондициями к оконтуриванию рудных залежей являются:

— бортовые содержания металла (или условного основного металла) для оконтуривания балансовых и забалансовых запасов;

— предельно допустимая мощность участков пустых пород (или некондиционных руд), включаемых в контур промышленной минерализации;

— минимальная (рабочая) истинная мощность рудных залежей и соответствующий метропроцент;

— предельные размеры подсчетных блоков.

Выбор и обоснование кондиционных параметров производится, как правило, методом вариантов.

§ 5. ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ

Подсчеты запасов руд и металлов выполняются общепринятыми способами, преимущественно способами разрезов и блоков [19].

Для подсчета запасов урановых и некоторых редкометалльных месторождений, которые характеризуются крайне неравномерным гнездовым распределением рудных компонентов, когда обычные способы опробования не обеспечивают получения представительных данных, применяется статистический способ подсчета. Сущность его заключается в том, что по результатам разведочно-эксплуатационных и эксплуатационных работ определяется среднее количество («выход») металла, приходящееся на единицу площади или объема рудного тела, что характеризует его «продуктивность». При подсчете запасов эту величину распространяют на всю продуктивную площадь или на весь продуктивный объем рудной залежи (рудоносной зоны).

Наиболее полно статистический способ разработан для подсчета запасов жильных урановых месторождений, представленными системами сближенных ветвящихся жил и жильных зон.

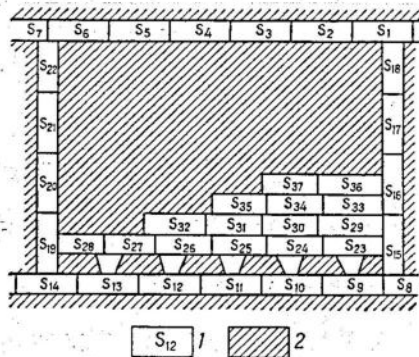


Рис. 28. Схема определения продуктивности рудной жилы по частным валовым пробам при разведке и опытной отработке блока.

1 — элементарные площади, учитываемые при проходке; 2 — непогашенные части блока

По сумме отдельных валовых проб определяется средняя продуктивность отработанной части блока

$$q_{\text{ср}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} = \frac{\sum P}{\sum S} \quad (9.4)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ — выходы товарного металла, полученные по отдельным валовым пробам при проходке оконтуривающих блок выработок и очистных лент, кг; $S_1, S_2, \dots, S_n$ — погашенные жильные площади по отдельным валовым пробам при проходке этих выработок, м^2 .

По средней продуктивности определяются запасы извлекаемого металла в неотработанной части блока:

$$P_{\text{н}} = S_0 q_{\text{ср}}, \quad (9.5)$$

где S_0 — оставшаяся неотработанной часть площади в данном блоке, м^2 .

Для получения запасов металла в недрах к извлекаемым запасам прибавляются запасы, содержащиеся во всех видах потерь, которые определяются экспериментальным путем. Основными видами потерь при разработке жильных урановых месторождений являются потери в закладке, в целиках и боковых породах, в отвалах, потери при транспортировке, а также технологические потери при обогащении и переработке фабричных руд. По сумме экспериментально определенных потерь вычисляется коэффициент K извлечения товарного металла из недр,

с помощью которого рассчитываются запасы P металла в недрах по каждому блоку:

$$P = \frac{P_{\text{н}}}{K} \quad (9.6)$$

Разведанные запасы по каждой жиле определяются путем суммирования поблочных запасов, а разведанные запасы по месторождению — путем суммирования запасов по отдельным жилам.

Подсчет предварительно оцененных запасов (категории C_2) на нижних слабо разведанных или неразведанных горизонтах производится путем экстраполяции данных, полученных на детально разведанных и отработанных этажах. Предварительно оцененные запасы определяются не по отдельным жилам, а по перспективным участкам, включающим группы или системы сближенных ураноносных жил с промышленным оруденением. Для этого участки оконтуриваются по совокупности геолого-разведочных данных сначала на хорошо разведанных и отработанных верхних этажах, а затем, по данным буровых и единичных горных выработок, — на нижних горизонтах.

Для выделения и оконтуривания участков с промышленным оруденением используются: контуры развития благоприятных для оруденения пород, границы распространения главных ураноносных жил, расположение рудовмещающих послойных и секущих нарушений, контуры, ограничивающие развитие урановых рудопроявлений (по данным редкой сети разведочных выработок), и др.

Объемы рудовмещающих пород в контурах выделенных промышленных участков подсчитываются способом горизонтальных разрезов, а остальные подсчетные параметры устанавливаются по данным опорного горизонта. Для этого по всем разведанным и отработанным этажам вычисляются объемные жильные коэффициенты $k_{\text{ж}}$, характеризующие продуктивность выделенных участков:

$$k_{\text{ж}} = \frac{S_n + S_0}{V}, \quad (9.7)$$

где S_n — жильные площади, погашенные в пределах данного контура; S_0 — жильные площади, содержащие разведанные балансовые запасы; V — объемы промышленных участков между соответствующими горизонтами.

Используя выведенный объемный жильный коэффициент, можно определить количество вероятных жильных площадей в перспективных участках нижних горизонтов по формуле:

$$S_{\text{в}} = k_{\text{ж}} V_{\text{н}}, \quad (9.8)$$

где $V_{\text{н}}$ — объем рудовмещающих пород в перспективном участке.



Рис. 29. Кривые изменения средних продуктивностей и средних жильных площадей с глубиной.

1 — кривая продуктивности по данным горных работ; 2 — кривая изменения жильных площадей по тем же данным; 3 — фактические данные продуктивности жил по соседним участкам; 4 — фактические данные по жильным площадям по соседним участкам; 5 — экстраполированная кривая продуктивности; 6 — экстраполированная кривая жильных площадей.

Оконтуривание запасов производится последовательно — сначала по разведочным пересечениям, затем по разведочным разрезам и после этого — в продольных плоскостях рудных залежей.

Рудные интервалы по разведочному пересечению выделяются по данным сплошного интервального опробования в соответствии с утвержденными условиями и в увязке с данными геолого-геофизической документации.

При проведении контуров по данным опробования двух противоположных стенок ортов или гезенков необходимо предварительно осреднять данные опробования каждого интервала по обеим стенкам, выделяя участки пустых пород и опорные точки для проведения внешних контуров по средним значениям обеих проб, иначе

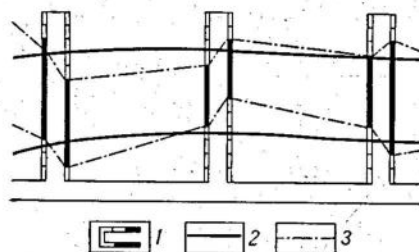


Рис. 30. Пример правильного и неправильного оконтуривания рудной залежи по данным опробования обеих стенок ортов.

1 — места отбора проб (черный цвет — с кондиционным, белый — с некондиционным содержанием); 2 — контур, проведенный по средним значениям, выведенным по двум противоположным пробам; 3 — контур, проведенный по содержанию проб в каждой стенке без их усреднения.

Запасы перспективных участков определяются путем умножения вероятных жильных площадей S_v на предполагаемые средние продуктивности жил q_v , которые устанавливаются экстраполяцией фактических продуктивностей верхних этажей на нижние горизонты. С этой целью для оценки глубоких горизонтов могут использоваться графики фактических изменений жильных площадей и продуктивности рудных жил на отработанных и разведанных горизонтах, отражающие общую тенденцию изменения этих параметров с глубиной, а также фактические данные по продуктивности жил на нижних горизонтах, вскрытых горными работами в соседних месторождениях или на соседних участках (рис. 29).

Контурные рудных тел приобретают искусственную зигзагообразность, природа которой объясняется недостатком статистических данных (рис. 30). Аналогичное осреднение необходимо производить и при использовании кривых гамма-опробования для оконтуривания рудных тел.

Если рудные интервалы фиксируются макроскопически, они выделяются по данным геолого-геофизической документации с проверкой их соответствия установленным кондициям.

При оконтуривании запасов в плоскостях разведочных разрезов и в продольных плоскостях рудных залежей или зон данных, установленных по разведочным пересечениям, распространяются на прилегающие к ним объемы недр путем их интерполи экстраполяции. Оконтуриванию запасов предшествуют обобщение геологических данных, построение поперечных и продольных геологических разрезов. При этом главное внимание уделяется выявлению и взаимоувязке рудовмещающих геологических структур, поскольку они значительно лучше выдерживаются по различным направлениям и обладают более крупными размерами, чем приуроченные к ним рудные скопления. После обобщения геологических данных на планы и разрезы опробования выносятся горизонты «благоприятных» пород, зоны метасоматитов, рудоконтролирующие тектонические нарушения, экранирующие и другие рудоконтролирующие структуры.

Для того чтобы объединить в едином контуре два рудных интервала по смежным разведочным пересечениям, нужно быть уверенным в том, что оба они принадлежат к одному и тому же рудному скоплению. Таким образом, важнейшая задача оконтуривания прерывистых сложнопостроенных рудных образований в разведочных разрезах сводится к установлению того уровня в их строении, для которого при данной густоте сети еще допустима геометризация технологически сплошных рудных скоплений. Нарушение этого требования приводит к серьезным ошибкам оконтуривания, искажениям представлений о строении рудных образований и качестве руд (рис. 31).

Из рассмотрения схемы, приведенной на рис. 31, видно, что редкая сеть буровых скважин не позволяет выявить даже самые основные законо-

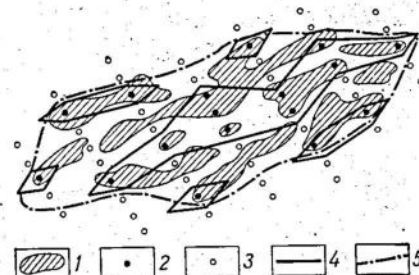


Рис. 31. Пример неправильного оконтуривания рудных залежей со сложным внутренним строением (коэффициент рудоносности $K = \frac{16 \text{ скв}}{33 \text{ скв}} \approx 0,48$).

1 — истинные контуры рудных скоплений; 2 — рудные скважины; 3 — пустые скважины; 4 — неправильно проведенные контуры; 5 — общий контур залежи, при котором влияние пустых участков учитывается коэффициентом рудоносности.

мерности размещения пустых участков в контуре промышленного оруденения прерывистой залежи. Поэтому оконтуривание отдельных безрудных блоков с применением формальных геометрических приемов геологически необоснованно. Оно приводит к представлениям о наличии нескольких субпараллельных рудных линз с технологически сплошным внутренним строением. Очевидно, что при сгущении сети эти представления не подтверждаются, поскольку в проведенных контурах промышленного оруденения выявятся многочисленные безрудные участки, а за их пределами — не учтенные ранее рудные линзы или их участки. В подобных случаях уверенно можно провести только общий контур всей рудной залежи, а влияние пустых «окон» учесть с помощью коэффициента рудоносности.

Оконтуривание участков залежей, расположенных за пределами разведочных выработок, производится с максимальным использованием геологических данных, полученных в результате разведки месторождения. Установленные таким путем запасы относятся в большинстве случаев к категории C_2 .

Поскольку запасы категории C_2 определяют промышленные перспективы месторождений и служат основанием для проектирования дальнейших геологоразведочных работ, экстраполяция внешних контуров должна отличаться известной смелостью, но

лишь в пределах перспективных рудовмещающих структур, достаточно обоснованных с геологической точки зрения. Так, например, для оконтуривания рудных залежей инфильтрационного происхождения могут быть использованы данные о положении межпластовых зон окисления и о распространении литологически благоприятных горизонтов вмещающих пород (рис. 32), а для проведения внешних контуров — данные о связи оруденения с благоприятными рудовмещающими структурами или элементы склонения рудных тел (рис. 33).

Формальные геометрические приемы проведения внешних контуров рудных тел за пределами разведочных выработок могут применяться только в тех случаях, когда возможности всех остальных

методов полностью исчерпаны или когда для применения геологических приемов недостает фактических данных.

Кроме обобщающих контуров продуктивных зон и залежей внутри них проводятся сортовые и блоковые контуры. При подсчетах запасов руд редких и радиоактивных металлов сортовыми контурами ограничиваются участки, сложенные различными природными типами руд (зоны окисления, регенерации и первичных руд, участки залежей или зон в породах различного состава, участки резко различающиеся по текстурно-структурным особенностям руд и т. п.), а также участки, сложенные рудами различных технологических типов и сортов. В случаях, когда такие участки не могут быть уверенно геометризованы вследствие их сложного строения и редкой сети наблюдений, количественные соотношения руд различных типов и сортов в контурах промышленного оруденения оцениваются статистически.

Блоковыми контурами ограничиваются отдельные подсчетные блоки, отвечающие требованиям геологической и технологической однородности. При подсчетах предварительно оцененных запасов размеры подсчетных блоков не ограничиваются.

При оценке разведанных запасов объемы подсчетных блоков не должны превышать объемов годовой мощности проектируемого горного предприятия. Размеры эксплуатационных блоков зависят главным образом от принятой системы разработки месторождения или его участка.

Исходными геологоразведочными параметрами для подсчета запасов являются: объемы рудных залежей (V), объемные массы руд (d), содержания металлов в них (c) и поправочные коэффициенты (k). Для оценки запасов в каждом подсчетном блоке вычисляются средние значения этих параметров.

Для вычисления объемов (V) при подсчете запасов способом разрезов определяются площади рудных залежей в ограничивающих сечениях, средние значения которых умножаются на расстояния между смежными разрезами. При подсчетах запасов, разведанных скважинами колонкового бурения (особенно в случае заметных отклонений осей скважин от плоско-

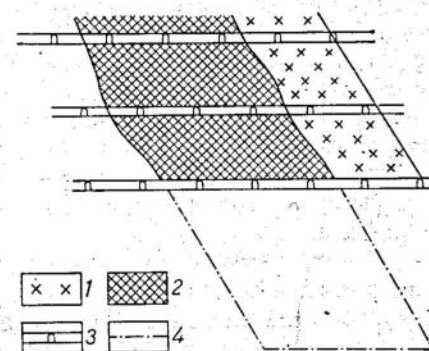


Рис. 33. Проведение внешнего контура рудной залежи по элементам ее строения.

1 — экранирующая дайка; 2 — разведанная часть рудной залежи; 3 — штреки и орты; 4 — внешний контур

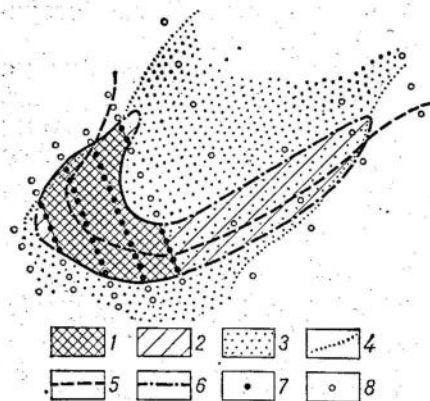


Рис. 32. Схема проведения внешнего контура с использованием геологических критериев контроля оруденения на инфильтрационном месторождении.

1 — блоки рудной залежи, разведанные по категории C_1 (внутренний контур); 2 — блоки категории C_2 , оконтуренные с помощью геологических приемов экстраполяции; 3 — площадь распространения песчанников, благоприятных для локализации оруденения; 4 — контуры линз песчанников; 5 — границы зоны межпластового окисления; 6 — внешний контур залежи; 7 — рудные скважины; 8 — пустые скважины

стей разведочных разрезов), объемы блоков могут вычисляться с применением ЭВМ путем аппроксимации лежащих и висячих боков залежей криволинейными поверхностями с помощью степенных полиномов по методу наименьших квадратов. При подсчетах запасов способом блоков объемы вычисляются путем умножения среднечлочных мощностей рудных залежей на площади блоков. Для вычисления средних истинных мощностей в их наблюдаемые значения вводятся поправки за элементы залегания рудных тел, зенитные и азимутальные углы наклона скважин.

Средние значения объемных масс вычисляются по данным их радиометрического определения на месте залегания с поправками на влажность пород и руд.

Средние содержания по разведочным пересечениям рассчитываются как средневзвешенные по длинам проб. Вычисления среднечлочных содержаний металлов (c) — наиболее ответственная операция подсчета запасов, поскольку из всех геолого-разведочных параметров они, как правило, являются наиболее изменчивыми, а неподтверждение их значений сказывается с первых же дней работы горных предприятий. Решение этой задачи сводится к выбору методики распространения содержаний металлов по разведочным пересечениям на прилегающие к ним объемы недр.

При вычислении среднечлочных содержаний как средневзвешенных по фактически опробованным мощностям в условиях неравномерного и весьма неравномерного пространственного размещения оруденения обычно возникают систематические погрешности их оценок. В бедных блоках истинные среднечлочные содержания систематически оказываются выше расчетных,

а в богатых блоках — ниже. Для устранения этих систематических погрешностей в расчетные среднечлочные содержания можно вносить поправки, вычисленные по данным экспериментальных работ. Методика расчета этих поправок предложена Д. Г. Криге, а вид графика зависимости истинной продуктивности блока от величины ее оценки, рассчитанной по данным эксплуатационного опробования, приведен на рис. 34. При использовании логарифмического масштаба по обеим осям координат графики обнаруживают закономерности, близкие к линейным.

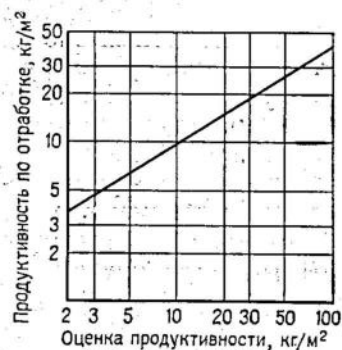


Рис. 34. График зависимости фактической продуктивности блоков от величины ее оценки по данным оконтуривающих выработок (по Д. Г. Криге)

Для более обоснованного выбора весовых функций, обеспечивающих получение наименьших дисперсий оценок среднечлочных содержаний, исходные данные могут быть подвергнуты операции «крайгинга» — отысканию наилучшей оценки содержаний металла в подсчетном блоке с учетом его содержаний в пробах, расположенных как внутри, так и вне оцениваемого блока, геометрии блока, пространственного расположения и геометрии проб.

Ж. Матероном предложены решения задач дискретного и непрерывного крайгинга для оценок среднечлочных содержаний металлов в месторождениях, отвечающих по своему строению так называемой «изотропной схеме» [19]. Применение дискретного крайгинга для оценки среднечлочных содержаний металлов в блоках, разведанных сетью буровых скважин, или непрерывного крайгинга — в блоках, оконтуренных со всех сторон системами штреков и восстающих, позволяет исключить систематические погрешности завышения оценок средних содержаний в богатых блоках и погрешности их занижения в бедных блоках.

С проблемой выбора весовых функций тесно связан вопрос о так называемых ураганных пробах. Ураганные пробы возникают при оценках среднечлочных содержаний редких и радиоактивных металлов в месторождениях с контрастными рудами при редкой разведочной сети, малом числе наблюдений и небольших размерах проб. С возрастанием плотности разведочной сети, количества проб и их размеров число ураганных проб в отдельных блоках постепенно сокращается, а затем вообще исчезает.

Ураганные пробы отличаются от остальных проб весьма малыми размерами реальных зон влияния, что связано с попаданием в пробу рудных скоплений, незначительных по размерам, но богатых по содержанию металлов. Таким образом, первопричиной ураганных проб являются особые природные свойства руд: прерывистость их строения, высокая контрастность содержаний и резкая неравномерность пространственного размещения. Чем ярче проявлены эти признаки, тем плотнее должна быть сеть наблюдений, больше число и крупнее размеры проб для исключения эффекта «ураганности». На одних месторождениях для этих целей достаточно сравнительная редкая сеть наблюдений, а на других даже предельно густая сеть опробования не исключает появления ураганных проб, что заставляет применять методику опробования «добычей» и статистические способы подсчета запаса металлов в недрах.

Предложенные к настоящему времени способы выявления и учета ураганных проб предусматривают преднамеренное занижение среднечлочных содержаний для уменьшения степени риска при эксплуатации месторождений. Все эти способы осно-

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ

§ 1. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Региональные прогнозно-металлогенические исследования проводятся научно-исследовательскими организациями на основе формационного анализа состава и строения земной коры для выяснения пространственных и временных связей рудных и геологических формаций, выявления критериев рудоносности геологических формаций и выделения потенциально рудоносных территорий.

В процессе региональных прогнозно-металлогенических исследований составляются геологоформационные, геохимические и прогнозно-металлогенические карты масштабов 1:2 500 000 и 1:1 000 000 (1:500 000), на которых выделяются территории потенциально рудоносных провинций и районов. Для повышения глубинности прогнозирования используются геофизические данные, отражающие глубинное строение земной коры и результаты дистанционных методов изучения Земли.

Наиболее сложной и ответственной задачей региональных прогнозно-металлогенических исследований является оценка вероятных запасов редких и радиоактивных металлов в пределах выделенных рудных провинций и районов. Для этого применяются различные методы, среди которых наиболее широким распространением пользуются:

- методы экспертных оценок;
- вероятностно-статистические методы;
- геохимические и геофизические методы.

Наибольшей достоверностью и объективностью отличаются геохимические и геофизические методы оценки предполагаемых запасов рудных провинций и районов, поскольку исходные геохимические или геофизические данные отличаются параметричностью, универсальностью и устойчивостью.

Возможности оценки потенциальных запасов большинства химических элементов в породах верхней части земной коры по их кларковым содержаниям доказаны исследованиями В. Мак-Кельви, Р. Эриксона, Л. Н. Овчинникова, Е. М. Квятковского и др. Ими установлено, что суммарные запасы элементов в земной коре (ΣQ) пропорциональны их кларкам (K):

$$\Sigma Q = K A,$$

(10.1)

ваны только на использовании методов математической статистики или на эмпирических данных и игнорируют зависимость «ураганных» значений от плотности сети наблюдений, геометрии проб и размеров реальных зон их влияния. До тех пор, пока проблема распространения данных опробования на прилегающие объемы недр не будет практически решена, учет ураганных проб останется волевым приемом, зависящим от соображений конъюнктурного характера. С позиций страховки оценок среднеблочных содержаний от возможного их завышения правомерно применение любого из опубликованных в литературе способов выявления и учета ураганных проб, в том числе и довольно «жесткого» способа И. Д. Когана, рекомендуемого к применению инструкциями ГКЗ СССР. Однако, используя эти методы, следует иметь в виду, что учет ураганных проб имеет своей целью страховку от возможного завышения среднеблочных содержаний металлов, но не от завышения их общих запасов по месторождению. Поэтому дефицит запасов, возникающий вследствие преднамеренного занижения среднеблочных содержаний, должен компенсироваться путем размещения неучтенных запасов по всем подсчетным блокам месторождения, пропорционально запасам каждого из них.

Поправочные коэффициенты к подсчету запасов редких и радиоактивных металлов (k) разделяются на две группы:

- связанные с неполнотой геологических данных;
- связанные с низким качеством геологоразведочных работ.

К числу важнейших поправочных коэффициентов первой группы относятся:

- коэффициент рудоносности;
- коэффициент на влажность;
- коэффициент на смещение радиоактивности равновесия;
- коэффициент на содержание тория в рудах;
- коэффициент на поглощение гамма-излучения обсадными трубами и буровым раствором.

Поправочные коэффициенты второй группы, исправляющие систематические погрешности замеров мощностей, содержаний металлов и других расчетных геологоразведочных параметров, практически должны отсутствовать.

где A — коэффициент пропорциональности, значение которого по данным различных исследователей и для различных элементов изменяется от $3 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{12}$.

Потенциальные запасы редких и радиоактивных металлов в пределах рудных провинций ($\Sigma Q_{\text{пр}}$) могут быть оценены по формуле

$$\Sigma Q_{\text{пр}} = az = ak_{\text{ср}} dv, \quad (10.2)$$

где a — коэффициент пропорциональности; z — общее количество металла в оцениваемых блоках пород; $k_{\text{ср}}$ — среднее содержание оцениваемого металла во вмещающих породах до рудного возраста; d — средняя объемная масса пород; v — суммарный объем оцениваемых блоков вмещающих пород в пределах рудной провинции.

Наиболее сложна оценка величины коэффициента « a », которая характеризует степень концентрации элемента в его природных скоплениях со средними содержаниями заведомо выше кларковых. По эмпирическим данным значение этого коэффициента различно для разных металлов и может изменяться от десятых до тысячных долей процента.

Используя материалы геохимических карт, можно существенно уточнить оценки потенциальных запасов редких и радиоактивных металлов в пределах рудных провинций и районов, если в формуле (10.2) вместо значения среднего содержания металла во вмещающих породах ($k_{\text{ср}}$) использовать его средние содержания в геохимически специализированных комплексных породах ($k_{\text{гс}}$), а суммарные потенциальные запасы металла в рудах (Q) оценивать как функцию $z_{\text{гс}}$:

$$z_{\text{гс}} = k_{\text{гс}} dv. \quad (10.3)$$

Для расчета необходимо оценить значение коэффициента рудного фракционирования (КРФ), выражающего долю металла, сосредоточенную в месторождениях относительно всего металла, рассеянного в горных пределах. По предложению А. А. Смылова [22] коэффициент рудного фракционирования рассчитывается как произведение модуля потенциальной рудоносности МПР (доля металла, находящаяся в породах в концентрированном состоянии и соответствующая рудным концентрациям) и модуля масштабности ММ (доля концентрированного металла, сосредоточенная в массах заданного масштаба), т. е.

$$\text{КРФ} = \text{МПР} \cdot \text{ММ}. \quad (10.4)$$

Значения МПР определяются экспериментально путем изучения поминеральных балансов вмещающих пород, а значения ММ — путем оценки долей «рудных площадей» в эталонных шлифах, которые ставятся в соответствие с вероятными долями рудных площадей в пределах исследуемых территорий.

Суммарные потенциальные запасы рудной провинции или района рассчитываются по формуле

$$Q = \text{КРФ} \cdot z_{\text{гс}}. \quad (10.5)$$

Основной недостаток метода связан с условностями при определении модулей МПР и особенно ММ, поскольку количественные закономерности, выявленные в масштабах шлифов, без каких-либо изменений переносятся на оценки в масштабах рудных провинций или районов.

§ 2. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Геологические съемки, специализированные на выявление редкометального и уранового оруденения, проводятся на территориях рудных районов для оконтуривания в их пределах более локальных перспективных площадей и прогноза потенциальной рудоносности.

В задачи специализированных съемок входит изучение геологического строения рудных районов, закономерностей пространственного размещения проявлений редкометального, уранового оруденения и их элементов-спутников, выяснение благоприятных геологических критериев и признаков оруденения, особенностей их проявления в местных ландшафтах и оценки прогнозных запасов перспективных территорий по совокупности всех геологических, геофизических и геохимических данных.

Специализированные геологические съемки проводятся последовательно, две подстадии — в масштабах 1:200 000 (реже 1:100 000) и 1:50 000 (реже 1:25 000), с учетом металлогенических особенностей изучаемых территорий и наиболее вероятного комплекса полезных ископаемых.

Объектами исследований при проведении специализированных съемок масштаба 1:200 000 является вся территория рудного района, а объектами выявления и оценки — площади потенциальных рудных узлов.

Специализированные геологические съемки масштаба 1:50 000 проводятся, как правило, в пределах потенциальных рудных узлов, а объектами их оценки являются потенциальные рудные поля, которые могут быть рекомендованы для проведения поисковых работ.

В комплексе с геолого-геофизическим картированием проводятся шлиховые, геохимические, радиогидрохимические, радиобioхимические, ландшафтные и другие специализированные съемки, обеспечивающие получение необходимой информации для оценки прогнозных запасов. Выбор рационального комплекса работ и видов специализированного геолого-геофизического картирования зависит от геотектонических и ландшафтных особенностей рудного района. Например, для выявления геологических критериев, прогнозных признаков и прогнозных

запасов урановородных узлов в комплексе со специализированной геологической съемкой масштаба 1:200 000 наиболее целесообразно проведение:

— аэрогамма-спектрометрической съемки масштаба 1:200 000;

— пешеходной гамма-съемки с гамма-спектрометрическими наблюдениями (в наземном или шпуровом вариантах);

— водно-гелиевой съемки (1 точка наблюдений на 10—15 км²);

— геохимической (радиогеохимической) съемки масштаба 1:200 000 (1:100 000).

В благоприятных ландшафтных условиях (таежных и лесостепных районах) эффективно опробование открытых водотоков (1 проба на 4—10 км²) в комплексе со съемкой донных осадков (через каждые 250—300 м), а в гумидных зонах с резко ослабленными ореолами рассеяния урана под экранами дальнепринесенных отложений мощностью до 5—15 м — проведение радиобиогеохимических съемок при сети 0,5×3 км с обязательным охватом всех типов местных ландшафтов.

При проведении специализированного геологического картирования масштаба 1:200 000 в редкометальных рудных районах взамен радиогидрохимических съемок и съемок донных осадков проводятся шлиховые съемки с отбором проб через 300—500 м, а с помощью геохимических съемок изучаются не только коренные породы, но и различные по генезису рыхлые отложения.

В комплексе с крупномасштабным специализированным геологическим картированием масштаба 1:50 000 (1:25 000) проводятся:

— пешеходные гамма-съемки с полевыми гамма-спектрометрическими наблюдениями (в наземном и шпуровом вариантах);

— аэрогамма-спектрометрические съемки масштаба 1:25 000 в совокупности с аэромагнитной съемкой того же масштаба;

— радиогеохимические съемки масштаба 1:50 000 (1:25 000).

По данным аэрогамма-спектрометрических съемок изучаются закономерности пространственного размещения радиоэлементов в горных породах, выявляются зоны метасоматитов различных формаций и региональные зоны радиационных ореолов урановой (радиевой) природы.

В совокупности с результатами радиогеохимического картирования выявляются локальные зоны привноса и выноса урана, сопоставимые с площадями рудных полей.

В благоприятных ландшафтных условиях (таежных и лесостепных районах) эффективно радиогидрогеохимическое опробование малых рек, ручьев и выходов грунтовых вод (1 проба

на 1 км²) в комплексе с опробованием илистых донных осадков (через 150—200 м), а также проведение уранометрических съемок рыхлых отложений, особенно на границах субаквальных ландшафтов (например, вдоль кромок присклоновых болот) для выявления зон оторванных солевых ореолов урана и его спутников. В ландшафтах с резко ослабленными или экранированными ореолами урана целесообразно проведение радиобиогеохимических съемок по сети 0,1×0,5 км.

Для оценки прогнозных запасов потенциальных рудных узлов и полей должны использоваться различные, независимые друг от друга методы.

По предложению А. П. Соловова продуктивность потоков рассеяния оценивается по формуле

$$P'_x = S_x(C'_x - C'_ф) = k'P, \quad (10.6)$$

где P'_x — площадная продуктивность потока рассеяния в пределах бассейна водосбора, на который распространяются данные опробования; S_x — площадь бассейна водосбора, отвечающего точке опробования; C'_x — содержание металла в пробе из ила или песчано-гравелитового аллювия; $C'_ф$ — фоновое содержание металла в илах или песчано-гравелитовом аллювии; k' — коэффициент пропорциональности между продуктивностями потоков рассеяния и вторичных ореолов; P — продуктивность вторичных ореолов рассеяния в пределах данного водо-

сбора, равная $\frac{P'_x}{k'}$.

Прогнозные запасы потенциальных рудных узлов подсчитываются через площадную продуктивность ~~первичных ореолов~~ по формуле *вторичных ореолов*

$$Q'_H = \frac{1}{k \cdot k'} \sum_{i=1}^m P'_i \frac{H}{40}, \quad (10.7)$$

где m — число смежных ~~проб или~~ русел, дренирующих участок оцениваемого объекта; H — принятая глубина подсчета прогнозных запасов (деление на 40 связано с переходом от метропроцентов к тоннам металла); k — коэффициент пропорциональности между продуктивностями вторичных ~~и первичных~~ ореолов *и коренного сружения*.

Очевидно, что достоверность оценок прогнозных запасов существенно меняется при изменении значений коэффициентов k и k' , величины которых зависят от свойств химических элементов, ландшафтных условий и других природных факторов. Так, например, по данным А. И. Перельмана, только за счет различия ландшафтных условий кларки концентраций многих элементов изменяются в литохимических ореолах от 50

до 500, а в гидрохимических ореолах — от единиц до 1000, в связи с чем резко изменяется их геохимическая контрастность. Даже в одном и том же ландшафте, но в разных геосферах (рыхлых отложениях, водах, атмосфере и биосфере) их содержания и контрастность будут заметно различаться. Поэтому для получения уверенных результатов необходимо детальное изучение современных и палеоландшафтных условий формирования ореолов и потоков рассеяния, а также разработка методов обоснования коэффициентов k и k' .

Прогнозные запасы потенциальных рудных полей, выявленных специализированными съемками масштаба 1:50 000 (1:25 000), могут быть оценены по продуктивностям вторичных ореолов рассеяния редких и радиоактивных металлов в автохтонных или дальнепринесенных отложениях. Подсчет продуктивности, характеризующих надфоновое количество металла в сечении или в контуре аномалии, производится по формуле

$$P = \Delta S \left(\sum_{x=1}^n C_x - n \cdot C_{\phi} \right) = S (\bar{C}_x - C_{\phi}), \quad (10.8)$$

где ΔS — площадь ячейки сети наблюдений геохимической съемки; n — число ячеек с аномальными значениями содержания металла в контуре ореола; C_x — содержание металла в точке отбора пробы; C_{ϕ} — фоновое содержание металла; S — общая площадь ореола.

Подсчет запасов на заданную глубину H производится по формуле:

$$Q_H = \frac{1}{k} \cdot \frac{P}{40} H, \quad (10.9)$$

причем глубина подсчета выбирается по совокупности представлений о геометрическом подобии всех месторождений данной рудной формации.

Для оценки вероятных прогнозных запасов потенциальных рудных полей (или участков) в значения продуктивностей (геохимических запасов) вводятся поправки за глубину их регионального эрозионного среза $\eta \approx 1$ и на вероятную долю концентрированного металла в первичном ореоле по отношению ко всей массе рассеянного «геохимических запасов» ($\alpha < 1$). По данным А. П. Соловова [38], коэффициент α , выражающий долю кондиционных запасов металла в общем контуре первичного ореола, изменяется в среднем от 0,9 в крупных и очень крупных месторождениях до 0,7 в средних и до 0,5 в мелких месторождениях, а в ореолах рудопроявлений он может достигать нулевого значения.

Очевидно, что как и при подсчете прогнозных запасов по продуктивностям потоков рассеяния, основные трудности возникают при оценках значений поправочных коэффициентов « k »,

« η », и « α », величины которых зависят от формационных типов рудных месторождений, особенностей геологического строения оцениваемых блоков земной коры, глубин их послерудных эрозионных срезов, современных и палеоландшафтных условий и других природных особенностей объектов изучения.

Связи между совокупностью геологических факторов (критериев и признаков), характеризующих условия локализации рудных образований, и их масштабами могут быть использованы для целей прогнозирования запасов выявляемых объектов с применением аналитико-статистических методов, в частности методов распознавания образов.

Для оценки прогнозных запасов потенциальных рудных узлов и полей могут быть использованы и вероятностно-статистические методы, а также методы экспертных оценок и упомянутый выше геохимический метод, основанный на определении КРФ в формациях геохимически специализированных горных пород.

§ 3. ПОИСКОВЫЕ РАБОТЫ

Поисковые работы проводятся преимущественно на площадях прогнозируемых рудных полей на основе специализированного геологического картирования масштаба 1:10 000 с целью выявления и оконтуривания потенциальных рудных месторождений (рудоносных участков недр, сопоставимых по масштабам с месторождениями редких и радиоактивных элементов).

В задачу поисковых работ входит:

- изучение общих геолого-структурных особенностей прогнозируемых площадей и установление поисковых критериев рудных месторождений;

- изучение особенностей проявления поисковых признаков редкометального и уранового оруденения в местных ландшафтах;

- выявление участков потенциальных месторождений и основных закономерностей пространственного размещения редкометального и уранового оруденения в структурах рудных полей;

- проверка всех выявляемых аномалий, аномальных зон, проявлений рудной минерализации и рудопроявлений для выяснения их геологической природы, минералого-геохимических особенностей и связей со структурными элементами рыхлых отложений и вмещающих коренных пород;

- выборочная детализационная оценка участков наиболее перспективных рудопроявлений (эталонных участков) для уточнения поисково-оценочных критериев их разработки;

- оценка вероятных масштабов потенциальных месторождений редких и радиоактивных металлов с подсчетом их прогнозных запасов.

Объекты исследований поисковых работ — территории потенциальных рудных полей, оконтуренных по результатам специализированных геологических съемок масштаба 1:50 000 (1:25 000), а объекты оценки — участки предполагаемых (потенциальных) рудных месторождений.

Поиски месторождений редких и радиоактивных металлов проводятся на основе специализированного геологического картирования масштаба 1:10 000 в комплексе с ореольными (геохимическими или радиогеохимическими) съемками того же масштаба, картированием современных ландшафтов и изучением палеоландшафтных условий.

Для обнаружения поисковых признаков уранового оруденения проводятся поверхностные и глубинные гамма-съемки маршрутами через 100 м с широким использованием гамма-спектрометрии. Обнадеживающие результаты для выявления концентраций подвижного урана во вмещающих породах обещает применение методов осколковой радиографии.

При поисках редких элементов существенную помощь оказывают шлиховые съемки аллювиальных отложений с прослеживанием потоков рассеяния редких металлов и минералов-индикаторов в делювиальных и делювиально-элювиальных образованиях.

Проведение эманационных съемок целесообразно при ограниченной мощности (3—8 м), благоприятных строении и коллекторских свойствах рыхлых отложений. Наиболее эффективно применение эманационно-трекового метода съемки, обладающего повышенной глубиной.

Радиогидрогеохимическое опробование как поисковый метод эффективно только в районах с особо благоприятными ландшафтными условиями: расчлененным рельефом, интенсивным водообменом, обилием естественных выходов подземных вод с низкими фоновыми содержаниями радиоактивных элементов.

Проведение радиобиогеохимических съемок по сети 50×100 м имеет смысл лишь в особо благоприятной природной обстановке, когда совмещенные литохимические и водные ореолы рассеяния радиоактивных элементов экранированы покровом дальнепринесенных отложений.

В задачу поисковых работ входят не только выявление, но и предварительная проверка всех аномалий, аномальных зон, рудных минерализаций и рудопроявлений для массовой отбраковки заведомо неперспективных находок.

В комплекс работ по предварительной оценке аномалий и аномальных зон входят:

- детальные структурно-геофизические измерения;
- детальные радиометрические поиски (часто в шпуровом варианте) по сети 20×20 м;
- гамма-спектрометрические измерения;

— проходка поисково-оценочных расчисток, канав и шурфов;

— бурение поисково-оценочных скважин и шпуров;

— радиометрические измерения в выработках и скважинах, их геохимическое и рядовое опробование;

— отбор образцов и проб для последующего петрографического, минералого-геохимического изучения, изотопных анализов свинца или для изучения радиационных дефектов.

Основные критерии перспективности участков потенциальных урановых месторождений на стадии их предварительной оценки:

— урановая природа радиоактивности;

— пространственная связь аномально-ураноносных участков и зон с участками изменений магнитного и электрического полей;

— присутствие радиогенных свинцов и элементов-спутников урановой минерализации, типичных для ожидаемого формационного (промышленного) типа месторождений;

— масштабность развития метасоматических изменений вмещающих пород, типичных для месторождений прогнозируемой урановорудной формации;

— связь радиоактивных аномалий с благоприятными элементами геологического строения, которые по масштабу их проявления могут считаться поисковыми критериями уранового оруденения;

— увеличение гамма-активности и содержаний урана по мере углубления поверхностных горных выработок и поисково-оценочных скважин по разрезам рыхлых отложений и в толщу коренных пород;

— минеральный состав рудных образований, характерный для месторождений прогнозируемой урановорудной формации.

Наиболее перспективные участки потенциальных рудных месторождений подвергаются детализационным поисково-оценочным работам и используются в качестве эталонных для уточнения критериев оценки месторождений по совокупности результатов поисковых работ. При этом, если в процессе детализационных работ по проверке перспективных участков будут получены положительные данные об их вероятной промышленной ценности, не исключается возможность передачи таких объектов непосредственно в предварительную разведку.

Ведущими методами оценки прогнозных запасов потенциальных месторождений являются геохимические методы.

Площадные продуктивности первичных ореолов (P) рассчитываются по формуле

$$P = S(\bar{c}_x - c_f), \quad (10.10)$$

где S — общая площадь ореола; $\bar{c}_x$ — среднее содержание металла в ореоле; c_f — фоновое содержание металла.

Запасы металла на расчетную глубину H оцениваются по формуле

$$Q_H = \eta \alpha \frac{P}{40} H, \quad (10.11)$$

где η и α — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно уровень эрозионного среза и долю концентрированного (кондиционного) металла в первичном ореоле.

Для оценки значения коэффициента η могут быть использованы индикаторные отношения продуктивностей мультипликативных надрудных и подрудных ореолов важнейших элементов-спутников основного оруденения (см. рис. 22). Зная величину индикаторного отношения, можно в первом приближении выяснить глубину эрозионного среза относительно средней, наиболее продуктивной части среза и, пользуясь данными об интервалах глубин месторождений данной рудной формации, оценить наиболее вероятное значение H . Существенную помощь в уточнении оценок вероятных глубин распространения рудных образований могут оказать эталонные графики изменения индикаторных отношений продуктивностей мультипликативных надрудных (подрудных) ореолов, составленные по уже изученным месторождениям данной рудной формации, особенно для месторождений одной и той же рудной провинции, района или узла.

В условиях четкого структурного контроля оруденения оценка вероятных минерализованных объемов недр может быть существенно откорректирована методами структурной геометризации с использованием геофизических данных.

При наличии в данной рудной провинции, районе или узле хорошо изученных месторождений-аналогов для оценки прогнозных запасов потенциальных рудных месторождений могут привлекаться и методы распознавания образов.

§ 4. ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫЕ РАБОТЫ

В процессе поисков и разведки месторождений редких и радиоактивных металлов поисково-оценочные работы занимают особое положение как подстадия, переходная от поискового этапа к разведочному. В общей структуре затрат на геолого-разведочные работы более половины всех средств затрачивается именно на поисково-оценочные работы. Это связано с тем, что они имеют своей целью массовую разбраковку всех выявленных объектов и прогнозную геолого-экономическую оценку перспективных объектов.

В задачи поисково-оценочных работ входят:

— выявление основных геолого-структурных особенностей месторождения, определяющих закономерности пространствен-

ного размещения оруденения в масштабе всего оцениваемого объема;

— уверенное определение промышленного (формационного и фациального) типа месторождения и минеральных типов руд;

— оконтуривание площади месторождения в плане и подтверждение наличия оруденения на глубинах первых сотен метров от дневной поверхности;

— выборочная оценка условий залегания, морфологии строения и характеристик изменчивости рудных образований в эталонных (как правило, наиболее доступных) участках месторождений;

— прогнозная оценка технологических свойств руд и горно-геологических условий эксплуатации месторождения с их детализацией (по данным изучения эталонных участков);

— сбор исходных данных для определения браковочных (оценочных) кондиций к подсчету прогнозных запасов;

— подсчет прогнозных запасов руд и металлов по всему месторождению и запасов категории C_2 по участкам детализационных работ.

В отличие от всех других стадий геологоразведочных работ, объекты исследования и объекты оценки на этой стадии практически совпадают. Объектами исследования являются потенциальные рудные месторождения, которые по результатам прогнозной геолого-экономической оценки либо подтверждаются, либо относятся к числу рудопоявлений, не заслуживающих дальнейшего изучения.

На стадии поисково-оценочных работ впервые появляется необходимость геолого-экономической оценки изучаемых объектов как возможных источников минерального сырья. Данные для суждения об ориентировочных технико-экономических показателях возможной эксплуатации месторождения обобщаются в записках по технико-экономическому обоснованию целесообразности их промышленного использования (ТЭО). Для получения этих данных кроме работ, связанных с детальной проверкой аномалий, выполняются значительные объемы буровых и горно-проходческих работ.

Основные технические средства проведения поисково-оценочных работ — поверхностные скважины колонкового бурения и поверхностные горно-разведочные выработки. Большая вероятность получения отрицательных оценок изучаемых объектов приводит к тому, что при выборе комплекса технических средств и методов проведения поисково-оценочных работ первостепенное значение имеют соображения экономии денежных средств и материальных ресурсов. Только после подтверждения хотя бы нескольких кондиционных рудных пересечений рекомендуется переходить к выявлению закономерностей пространственного размещения оруденения в масштабе всего оцениваемого объема

и лишь после этого — к буровым работам для оценки оруденения на глубину.

Общее число «рудных» и «безрудных» скважин достигает на месторождениях среднего масштаба двух десятков и заметно возрастает на месторождениях, не имеющих выхода на дневную поверхность.

В процессе проведения поисково-оценочных работ весьма важно как можно раньше выявить полный комплекс полезных компонентов для правильной геолого-прогнозной оценки месторождения. На урановых месторождениях особое внимание следует уделять изучению радиологических свойств руд, особенно состоянию радиоактивного равновесия, гипергенной зональности месторождений, выявлению и прослеживанию остаточных ореолов рассеяния урана с помощью изотопно-свинцовых методов или метода радиационных дефектов.

Для суждения о технологических свойствах руд используются данные о переработке аналогичных руд в производственных условиях. Однако для редкометальных руд сложного состава уже на этой подстадии проводятся лабораторные технологические испытания проб для решения вопроса о принципиальной возможности их обогащения и извлечения полезных металлов.

Подсчет запасов руд и металлов по результатам поисково-оценочных работ проводится на основе браковочных кондиций, которые ориентируются не на среднеотраслевые, а на максимально допустимые («замыкающие») затраты с поправками на возможное ухудшение горно-геологических и географо-экономических условий.

Подсчет прогнозных запасов по результатам поисково-оценочных работ производится по совокупности геологических, геофизических и геохимических данных с использованием результатов опробования поверхностных горных выработок и скважин. На участках детализационных работ запасы геометризуются и подсчитываются по категории C_2 . Прогнозные запасы не оконтуриваются, однако по данным геофизических работ, каротажа и геохимического опробования горных выработок и скважин, совокупности поисково-разведочных критериев и признаков оруденения проводится структурная геометризация рудовмещающих участков месторождения с оценкой запасов и качества руд в каждом из них.

§ 5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Предварительной разведке подвергаются все вновь выявленные месторождения, получившие положительную геолого-экономическую оценку по результатам поисково-оценочных работ. Цель предварительной разведки — оценка масштабов месторождения, среднего качества и технологических свойств руд, горнотехнических условий эксплуатации месторождения для

решения вопроса о целесообразности и очередности его промышленного освоения.

На стадии предварительной разведки вероятно еще получение как положительной, так и отрицательной геолого-экономической оценки месторождения. Однако оценка, полученная по результатам предварительной разведки, должна быть однозначной.

Объекты исследования в стадии предварительной разведки — месторождения редких и радиоактивных металлов в целом, а объекты оценки — их отдельные участки (продуктивные зоны), которые в свою очередь разделяются на подсчетные блоки.

В тех случаях, когда промышленные перспективы разведкуемого месторождения сомнений не вызывают, его детальная разведка осуществляется вслед за предварительной без перерыва во времени. Поэтому крайне важно определить тот переломный момент, при котором первоочередность промышленного освоения месторождения становится очевидной. До этого момента предварительная разведка должна осуществляться с минимальными затратами.

Главные задачи предварительной разведки:

- изучение общих геолого-структурных особенностей месторождения, пород и рудоконтролирующих структур, определяющих закономерности пространственного размещения, и условий залегания отдельных его участков (продуктивных зон);

- выявление условий залегания, морфологии, строения и характеристик изменчивости важнейших геологоразведочных параметров, продуктивных зон и среднего качества слагающих их руд;

- выборочная оценка условий залегания, морфологии, строения и характеристик изменчивости отдельных рудных залежей в пределах участков детализационных работ (эталонных участков) продуктивных зон;

- выявление технологических типов руд, их примерных количественных соотношений и главных технологических свойств с детальностью, обеспечивающей выбор принципиальной схемы их технологической переработки;

- оценка общих горно-геологических условий эксплуатации месторождения с детальностью, обеспечивающей выбор способа вскрытия и вероятных систем отработки рудных залежей, с детализацией этих сведений на эталонных участках;

- сбор исходных данных для расчета ориентировочных технико-экономических показателей возможной эксплуатации месторождения и обоснования временных кондиций при составлении ТЭД;

- подсчет запасов категории C_2 по всем участкам (продуктивным зонам) месторождения и запасов категории C_1 по участкам детализационных работ.

Решение всего комплекса перечисленных задач требует рационального сочетания работ относительно мелкого масштаба с детальным крупномасштабным изучением отдельных участков месторождения.

При выборе геометрии разведочной сети ориентируются на оконтуривание продуктивных зон, а размеры ячеек принимаются несколько менее ожидаемых средних размеров отдельных рудных залежей. При проведении же детализационных работ геометрия разведочной сети выбирается из расчета уверенного оконтуривания отдельных рудных залежей и выявления главных особенностей их внутреннего строения. К качеству и полноте геологической документации разведочных выработок и скважин на стадии предварительной разведки предъявляются повышенные требования в связи с ограниченностью разведочных пересечений и еще слабым знанием геологии разведываемого месторождения.

При опробовании горных выработок и скважин рекомендуется сокращать интервалы частных проб и дублировать методы механического пробобора и радиометрического (ядерно-физического) опробования, что обеспечивает контроль процесса пробобора, возможность детального изучения радиологических свойств руд, а также получение исходных данных для изучения особенностей внутреннего строения рудных образований.

При проходке разведочных скважин и горных выработок в них проводятся гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения, а образцы наиболее типичных вмещающих пород подвергаются испытаниям для определения их физико-технических свойств.

Технологические свойства руд определяются на стадии предварительной разведки с детальностью, позволяющей судить о возможности промышленного использования главных и сопутствующих компонентов, о принципиальной схеме технологической переработки руд и о наиболее вероятном экономическом эффекте технологического процесса.

Вначале технологические испытания проводятся на отдельных штучных (или групповых) пробах, по мере выяснения контуров рудных тел и примерного распределения руд различных технологических сортов — на лабораторных технологических пробах.

Радиометрическая контрастность руд и ожидаемые технико-экономические показатели их радиометрической сортировки или обогащения оцениваются по данным дифференциальной интерпретации гамма-каротажа.

Подсчет запасов по результатам предварительной разведки производится на основании временных кондиций, которые составляются перед окончанием разведочных работ по их результатам и с учетом опыта эксплуатации месторождений аналогичного промышленного типа. Запасы оконтуриваются и подсчитываются

только в пределах рудных зон, представленных группами сближенных рудных тел, а морфологические особенности и строение отдельных наиболее типичных рудных тел выясняются на участках детализации разведочных работ. Для объективной оценки качества руд используется коэффициент рудоности.

Ответственная операция, завершающая работы по предварительной разведке месторождений, — составление технико-экономических докладов (ТЭД) «О целесообразности и очередности промышленного освоения месторождения». ТЭД, согласованные с заинтересованными промышленными организациями, служат основой для составления проектов на организацию и проведение детальных геологоразведочных работ.

§ 6. ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Детальная разведка проводится только на тех месторождениях, которые получили положительную геолого-экономическую оценку по результатам предварительных разведочных работ и заслуживают по данным ТЭД первоочередного промышленного освоения.

Цель детальной разведки — выяснение геологического строения месторождения, условий залегания и морфологических особенностей рудных залежей, вещественного состава руд и технологических условий эксплуатации месторождения с полнотой и достоверностью, достаточной для передачи месторождения в промышленное освоение и для составления проекта строительства горнодобывающего предприятия.

В зависимости от масштабов месторождения детальная разведка может проводиться на всем объекте или только на отдельных его участках с таким расчетом, чтобы детально разведанные запасы обеспечили бы работу предприятия на ближайшие 5—8 лет.

Объекты детальной разведки — продуктивные зоны, а объекты оценки — рудные залежи и их подсчетные блоки.

В задачу детальной разведки входит не столько уточнение основных цифр запасов и средних оценочных параметров, сколько детализация всех геологических, горнотехнических и технологических данных, характеризующих пространственное положение, строение, состав и средние подсчетные параметры рудных залежей и отдельных подсчетных блоков.

Перед детальной разведкой ставятся следующие главные задачи:

— изучение геологоструктурных особенностей, определяющих закономерности размещения и условия локализации отдельных рудных залежей и их морфологически обособленных участков;

— выявление условий залегания, морфологии, строения и характеристик изменчивости важнейших геологоразведочных

параметров рудных залежей и участков, сложенных рудами различных природных и технологических типов;

— выборочная оценка условий залегания, морфологии, строения и характеристик изменчивости рудных залежей на участках детализационных работ;

— проведение дополнительных работ для предварительной оценки запасов руд и металлов на флангах и глубоких горизонтах месторождения;

— всестороннее изучение вещественного состава руд, их технологических свойств и особенностей технологической переработки на основании лабораторных, полупромышленных, а если необходимо, то и промышленных испытаний проб каждого технологического сорта руд;

— детальное изучение горнотехнических условий эксплуатации месторождения с детализацией этих сведений на эталонных участках;

— разработка и обоснование кондиций к подсчету запасов;

— подсчет разведанных запасов по рудным залежам и отдельным подсчетным блокам по категории C_1 (по участкам детализационных работ — по более высоким категориям), а также запасов категории C_2 на флангах и глубоких горизонтах месторождения;

— выявление и разведка источников водоснабжения и местных строительных материалов.

На выбор технических средств детальных разведочных работ решающее значение оказывают не только геологические, но и ведущие горнотехнические факторы, особенно предполагаемый способ вскрытия и разработки. Месторождения, подлежащие отработке открытыми способами или способами подземного выщелачивания, разведываются преимущественно буровыми скважинами, а месторождения, предназначенные к отработке подземным способом, — горными выработками.

Глубина детальной разведки месторождений, залегающих в условиях слаборасчлененного рельефа и предназначенных для разработки подземными способами, измеряется сотнями метров.

Детализационные работы на этой стадии проводятся не только для подтверждения правильности общих представлений о строении месторождения и рудных образований, но и для получения представительных данных, характеризующих все разведанные запасы. Поэтому общие запасы эталонных участков достигают не менее 15—20 % от разведанных запасов месторождения.

При проведении детальных разведочных работ нерационально сгущение разведочной сети на участках, сложенных мелкими залежами с изменчивой конфигурацией, если они не определяют основных запасов месторождения. Экономически целесообразнее учесть эти запасы по более низким категориям,

оставляя их более детальное изучение на период эксплуатационной разведки.

В связи с резким возрастанием объемов геологоразведочных работ исключительно важное значение приобретают правильная организация и контроль геологической документации и опробования. Не меньшее значение имеют и своевременное создание эталонных коллекций, организация лабораторий по изучению минерального и химического состава пород и руд, использование фотодокументации горных выработок и керна скважин.

Для изучения технологических свойств руд вначале отбираются пробы для лабораторных испытаний, а к концу детальной разведки (когда размещение запасов руд различных технологических сортов в недрах месторождения уже более или менее выяснится) отбираются полупромышленные или промышленные технологические пробы.

Полупромышленные радиометрические испытания урановых руд на обогатимость проводятся непосредственно на месторождении с тем, чтобы результаты этих испытаний могли быть учтены при составлении кондиций к подсчету запасов месторождения.

Особенно важное значение имеет детальное изучение минерального и химического состава промышленных продуктов и хвостов для выяснения содержания в них отдельных редких и рассеянных элементов, так как только этим путем возможно решение вопроса о целесообразности промышленного извлечения того или иного металла из руд, а следовательно, и вопроса о целесообразности подсчета запасов этих компонентов.

§ 7. РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

После передачи месторождения в промышленное освоение перед геологами горного предприятия возникает необходимость:

— уточнения сведений о разведанных запасах по мере их вскрытия, подготовки и отработки;

— выявления и оценки новых запасов руд и металлов в районе горного отвода для расширения минерально-сырьевой базы действующего предприятия и продления срока его существования;

— детализации сведений о геологическом строении месторождения и составе руд для контроля за качеством и полнотой отработки запасов и оказания помощи горному предприятию по совершенствованию технологии разработки месторождения и переработки руд.

Для решения задач первой группы на месторождении проводится эксплуатационная разрядка. Для выявления новых запасов в районе горного отвода проводятся специальные поисково-разведочные работы. Решения задач третьей группы входит в повседневные обязанности рудничной геологической службы.

Перечисленные виды работ проводятся одновременно, как правило, на различных участках месторождений. Все они тесно взаимосвязаны и в совокупности составляют содержание работ по геологическому обслуживанию действующего предприятия.

Цель эксплуатационной разведки — уточнение сведений о разведанных запасах для рационального планирования, проектирования и своевременного обеспечения фронта горно-капитальных, горно-подготовительных, нарезных и очистных работ. По целевому назначению эксплуатационная разведка разделяется на опережающую и сопровождающую добычу руд.

Опережающая эксплуатационная разведка проводится одновременно с горно-капитальными, горно-подготовительными и нарезными работами для уточнения сведений о запасах по вскрываемым иготавливаемым эксплуатационным участкам. Ее цель — определение запасов руд и металлов, их среднего качества, состава и условий пространственного размещения в пределах каждого эксплуатационного участка и подготавливаемого блока. Данные опережающей эксплуатационной разведки используются для текущего (месячного, квартального, годового) производственного планирования деятельности горного предприятия.

Сопровождающая эксплуатационная разведка проводится одновременно с очистными работами для уточнения запасов руд и металлов, особенностей их пространственного размещения и среднего качества руд в пределах каждого обрабатываемого блока. В процессе сопровождающей разведки уточняются контуры промышленно-ценных скоплений, безрудных и некондиционных участков, детали пространственного размещения руд различных технологических сортов. Результаты сопровождающей эксплуатационной разведки используются для оперативного (сменного, суточного и декадного) производственного планирования горно-добычных работ.

В задачу обоих видов эксплуатационной разведки входят:

- систематическое изучение вещественного состава, текстурно-структурных особенностей и технологических свойств руд;
- уточнение физико-механических свойств руд и вмещающих пород, горно-технических и инженерно-геологических условий разработки конкретных участков или блоков;

- выявление ранее неизвестных рудных скоплений (апофиз, параллельных линз, гнезд и др.) в околорудных пространствах;

- оперативный подсчет запасов по отдельным эксплуатационным участкам и блокам, текущий учет их движения по мере доразведки, обработки и погашения отдельных блоков.

По сравнению со всеми предшествующими стадиями разведочных работ эксплуатационная разведка отличается специфическими особенностями, которые определяются ее целевым назначением:

- эксплуатационная разведка производится на протяжении всего периода деятельности горного предприятия, опережая добычу и сопровождая очистные работы в эксплуатационных блоках;

- выбор систем эксплуатационной разведки и ее технических средств определяется способом вскрытия и принятой системой разработки, а густота разведочной сети зависит не только от геологических факторов, но и от технических условий системы отработки, размеров эксплуатационных блоков и требований в отношении селекции, потерь и разубоживания руд;

- в качестве разведочных пересечений широко используются пройденные горно-подготовительные, нарезные и очистные выработки, минные скважины и взрывные шпурь. Специальные разведочные пересечения (скважины, шпурь и значительно реже горно-разведочные выработки) проходятся в минимально необходимых объемах, а их расположение зависит от расположения эксплуатационных горных выработок;

- результаты опробования используются не только для оконтуривания рудных скоплений и оценки средних содержаний металлов, но и для контроля за полнотой и качеством отработки;

- при проведении эксплуатационной разведки возникает необходимость текущего (оперативного) учета движения запасов.

Выбор технических средств эксплуатационной разведки предопределяется способом вскрытия и принятой системой разработки месторождения.

Опережающая эксплуатационная разведка проводится колонковыми или ударно-канатными буровыми скважинами из карьеров, скважинами и шпурами из подземных горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок. Значительно реже в условиях эксплуатационной разведки проходятся специальные разведочные горные выработки.

Основными техническими средствами эксплуатационной разведки, сопровождающей подземную разработку месторождений, служат минные скважины, взрывные шпурь, а при возможности доступа в очистные пространства — и сами очистные выработки.

При оперативной оценке состояния минерально-сырьевой базы действующего предприятия кроме степени разведанности запасов в недрах учитывается степень их подготовленности к отработке.

Оптимальные соотношения вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов неодинаковы для месторождений редких и радиоактивных металлов, различных по сложности геологического строения. Они зависят от состава и качества руд, производительности и темпов горно-добычных работ.

Последовательность развития и густота разведочной сети эксплуатационной разведки определяются способами вскрытия, системами разработки и сложностью геологического строения месторождений.

Опробование горных выработок и скважин приобретает на этой стадии массовый характер, а количество отбираемых проб увеличивается по сравнению с детальной разведкой в десятки и сотни раз. Расширяется и круг задач, решаемых с помощью опробования разведочных и эксплуатационных выработок. Кроме определения средних содержаний металлов и оконтуривания рудных скоплений, в задачи опробования входит сбор исходных данных для суждения о полноте отработки недр, оценки вероятных потерь и степени разубоживания руд при эксплуатации.

В процессе эксплуатационной разведки продолжают работы по дальнейшему изучению и детализации технологических свойств руд, горно-геологических и инженерно-геологических условий эксплуатации месторождения.

Предельно густая сеть наблюдений позволяет создавать весьма детальные геологические модели разрабатываемых месторождений, что создает исключительно благоприятные условия для широкого применения методов геометризации недр и геолого-математического моделирования.

Главная особенность подсчета и учета запасов в условиях эксплуатационной разведки заключается в том, что запасы руд и металлов в недрах непрерывно изменяются. Поэтому ежегодно составляется полный баланс запасов, в котором отражаются изменения цифр запасов, их качественного состава, степени разведанности и подготовленности к отработке.

Одновременно с эксплуатационной разведкой в пределах горного отвода и на его периферии проводятся поисково-разведочные работы для выявления новых участков и месторождений. Цель этих работ — расширение перспектив месторождения для продления срока существования горного предприятия и повышения эффективности капитальных затрат, вложенных в промышленный комплекс.

По детальности проведения геологоразведочные работы в пределах горного отвода могут соответствовать поисковым работам, предварительной или детальной разведке.

Глава XI

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ УРАНОНОСНЫХ АЛЬБИТИТОВ

В этой главе в качестве примера рассматриваются особенности поисков и разведки наиболее древних эндогенных месторождений — ураноносных альбититов. Они располагаются в метаморфических докембрийских породах и тесно связаны с зонами щелочных среднетемпературных натровых метасоматитов. Для них характерны:

- тонковкрапленное строение руд, указывающее на избирательный метасоматический характер рудообразующего процесса;

- относительно равномерное размещение рудных концентраций и невысокие средние содержания урана в рудах;

- сложный минеральный состав руд, включающий уранотитанаты, уранинит, настуран, коффинит и другие урановые силикаты;

- нечеткие, постепенные контакты рудных залежей с вмещающими породами и зависимость представлений о морфологии и строении рудных залежей от кондиций и горной технологии.

В строении месторождений ураноносных альбититов выделяется четыре дискретных структурных уровня: продуктивные зоны, продуктивные залежи, морфологически обособленные участки продуктивных залежей и локальные урановорудные обособления, обладающие технологически сплошным строением. Все они залегают согласно с литолого-структурными элементами и зонами метасоматических изменений вмещающих пород, а по своим морфологическим особенностям относятся к уплотненным, часто ветвящимся пласто- или линзоподобным рудным скоплениям. В соответствии с разведочной классификацией (гл. IX, § 1) ураноносные альбититы относятся к третьей группе месторождений со сложным прерывистым строением.

§ 1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Специализированная геологическая съемка масштаба 1:200 000 проводится на всей территории урановорудного района для выявления и оценки потенциальных урановорудных узлов. В процессе съемки особое внимание обращается на широкие экзоконтактные области массивов калиевых гранитов, прослеживаются ограничивающие их зоны гранитизированных и мигматизированных коровых разломов и системы диагональ-

ных тектонических разрывов в породах гранитоидного и гнейсового состава.

Зоны гранитизированных и мигматизированных коровых разломов достигают 20—25 км в ширину и отличаются сложным гетерогенным строением. Они сложены вытянутыми гранитными телами, чередующимися с участками гнейсов, мигматитов и пегматоидных образований. Менее мощными зонами диагональных тектонических разрывов часто контролируются дайковые пояса и трещинные интрузивы пород основного состава. Урановорудные узлы приурочены к блокам, ограниченными продольными коровыми разломами и диагональными трещинными разрывами. Их строение определяется особенностями пересечения или разветвления коровых разломов и сопряженных с ними тектонических нарушений, совокупностью которых контролируются закономерности пространственного размещения рибекит-эгириновых и эпидот-хлоритовых альбититов. Для выявления перечисленных прогнозных геологических критериев урановорудных узлов используются материалы космических и высотных аэрофотосъемок, проводятся водно-гелиевая, магнитометрическая и гравиметрическая съемки масштаба 1:200 000 и единичные сейсмические профили.

Материалы водно-гелиевой съемки обеспечивают дополнительные данные для изучения зон глубинных разломов и крупных тектонических нарушений, что способствует более уверенному выделению блоковых структур. Зоны разломов глубокого заложения, проходящие в областях развития калиевых гранитов, проявляются высокими градиентами силы тяжести, тяготеют к отрицательным аномалиям с амплитудами свыше 6 мГал и изменениями уровня отражающих границ. Блоки и участки гетерогенного строения характеризуются знакопеременными магнитными и гравитационными полями, ориентированными в направлениях зон глубинных разломов. Площади развития рибекит-эгириновых и эпидот-хлоритовых альбититов картируются по данным петрографического и петрофизического изучения пород.

Для выявления прогнозных признаков уранового оруденения в масштабах, урановорудных узлов на территории района проводится радиогеохимическая съемка масштаба 1:200 000. Для целей картирования урановорудных узлов наиболее эффективно использование ареалов общего и подвижного урана, радиогенных свинцов и торий-урановых отношений. Оптимальные условия геометризации ареалов достигаются с применением операций сглаживания исходных данных с помощью статистических окон, обеспечивающих достоверное выявление закономерных составляющих геометризуемых признаков. Наиболее благоприятными признаками считаются контрастные ареалы подвижного урана с пониженными торий-урановыми отношениями, а также контрастные ареалы радиогенных свин-

цов. При оценке перспектив потенциальных урановорудных узлов должны учитываться глубины эрозионных срезов рудоносных блоков. На малые глубины эрозионных срезов указывает преобладающее развитие альбититов хлорит-эпидотового типа, в то время как в глубокоэродированных блоках преобладают альбититы рибекит-эгиринового типа.

На площадях потенциальных урановорудных узлов проводятся специализированные геологические съемки масштаба 1:50 000 с применением гравиразведочных и магниторазведочных работ для оконтуривания и оценки потенциальных урановорудных полей. Основное внимание при этом обращается на обнаружение:

- участков региональных изгибов зон продольных гранитизированных разломов;

- участков пересечения зон гранитизированных разломов системами поперечных диагональных тектонических разрывов, осложненных разрывами других направлений;

- широких зон проявления альбитизации и более позднего хлорит-гематитового, кремнекислого и углекислого метасоматоза.

В закрытых районах для целей специализированной геологической съемки бурятся профили картировочных скважин, вскрывающих породы древнего фундамента (одна—две скважины на квадратный километр).

Для выявления прогнозных признаков урановорудных полей на всей территории рудного узла проводится радиогеохимическая съемка масштаба 1:50 000 (1:25 000), по данным которой оконтуриваются поля повышенных концентраций общего и подвижного урана, радиогенных свинцов и геометризуются значения торий-урановых отношений.

При оценке перспектив ураноносности выделяемых потенциальных рудных узлов и полей следует учитывать глубины их эрозионных срезов, используя для этих целей закономерности вертикальной зональности натровых метасоматитов, а также индикаторные отношения мультипликативных продуктивностей надрудных и подрудных элементов, рассчитанные как средневзвешенные для всей площади аномального поля.

Для подсчета прогнозных запасов потенциальных урановорудных узлов и полей могут быть использованы данные опробования полей повышенных концентраций подвижного урана, содержания радиогенного свинца и торий-урановых отношений.

При наличии в данном районе хорошо изученных урановорудных полей для оценки прогнозных запасов новых полей могут применяться методы распознавания их образов.

Помимо геологических, прогнозно-металлогенических, геофизических и радиогеохимических карт, по данным специального картирования составляются карты районирования территорий

по трудности их опознавания, карты достоверности проведенных ранее геологических и прогнозно-металлогенических работ, а также карты фактических материалов, послуживших основой для оценки перспектив изучаемых площадей.

§ 2. ПОИСКОВЫЕ РАБОТЫ

Поисковые работы проводятся в пределах потенциально рудоносных полей, выявленных и оцененных по результатам специализированных геологических съемок. Цель поисковых работ — обнаружение и прогнозная оценка ураноносных участков недр, сопоставимых по масштабам с месторождениями альбититов. В задачи поисковых работ входит:

- выявление поисковых критериев и признаков месторождений ураноносных альбититов и изучение особенностей их проявлений в данных природных условиях;

- выявление участков потенциальных месторождений с выборочной детализацией наблюдений на наиболее перспективных из них для оценки вероятных масштабов оруденения.

К числу наиболее распространенных поисковых критериев месторождений ураноносных альбититов относятся:

- участки урановорудных полей с локальными изгибами зон гранитизированных разломов;

- участки пересечения или разветвления тектонических нарушений, сопряженных с гранитизированными коровыми разломами, или связанные с ними серии ветвящихся и субпараллельных тектонических трещин;

- пачки пород гетерогенного строения, сложенные чередующимися гнейсами, мигматитами, пегматоидными гранитами и пегматитовыми дайками, обладающими резко различными физико-механическими свойствами;

- зоны натровых метасоматитов (альбититов и альбит-микроклиновых пород) с признаками постальбитового катаклаза и брекчирования;

- зоны окварцевания с пустотами выщелачивания и горным хрусталем, развитые в верхних частях натровых метасоматитов.

Для выявления поисковых критериев проводится специализированная геологическая съемка с последующим составлением геологической карты масштаба 1:10 000. Геологические исследования включают в себя детальное минералого-петрографическое изучение пород для оконтуривания зон натровых метасоматитов и выделения зон постальбитового катаклаза и брекчирования. Картированию разломов способствуют данные крупномасштабных магнитометрических съемок и профильной электроразведки, а выявлению зон окварцевания — данные геолого-геохимического картирования с использованием результатов термобарометрии газовой-жидких включений в кварце.

В условиях закрытых районов поиски проводятся в глубинном варианте с применением скважин поискового бурения, число которых достигает при масштабе 1:10 000 тридцати и более на один квадратный километр. В практике глубинных поисков месторождений ураноносных метасоматитов широко используются прямоугольные сети поисковых скважин с соотношением сторон 1:5, вытянутые в направлении простирания рудоносных зон метасоматитов. Поисковые скважины заглубляются на 4—6 м в породы кристаллического основания и подвергаются тщательному геолого-геохимическому и геофизическому изучению.

В каждой поисковой скважине отбираются образцы и пробы коренных пород для их минералого-петрографического изучения, анализов на содержание подвижного урана, молибдена и радиогенных свинцов. Проводятся гамма-каротаж и геохимическое опробование, а при наличии подземных вод отбираются пробы воды для определения в них концентраций радиоактивных элементов. Для выявления ореолов подвижного урана в коренных породах могут использоваться методы осколковой радиографии шлифов с помощью которых выявляются концентрации урана до $n \cdot 10^{-8} \%$. Анализы геохимических проб проводятся на элементы-спутники урана: молибден, скандий, титан, ванадий, свинец, цирконий, фосфор, олово и бериллий.

По совокупности перечисленных данных уточняются не только важнейшие поисковые критерии, но также и поисковые признаки месторождений ураноносных альбититов, а именно:

- первичные ореольные зоны подвижного урана, элементов-спутников и радиогенных свинцов;

- вторичные (остаточные) ореольные зоны урана, его спутников и продуктов радиоактивного распада в элювиальных образованиях;

- контрастные радиогидрогеохимические ореольные зоны с повышенными концентрациями урана, радия и радона.

Каждая скважина с аномальной радиоактивностью или другими поисковыми признаками углубляется в коренные породы до полного пересечения аномальной зоны метасоматитов. Обнаруженные проявления рудной минерализации или рудопоявления подвергаются геолого-минералогическому изучению, радиометрическому и геохимическому опробованию.

Наиболее перспективные участки исследуются комплексом детализационных поисково-оценочных работ, а результаты этих работ используются при оценке перспектив рудоносности в качестве эталонных.

Для оценки прогнозных запасов применяется совокупность геологических, геофизических и минералого-геохимических данных, а методика подсчета выбирается в зависимости от полноты и достоверности исходной информации.

Наиболее достоверны методы оценки прогнозных запасов потенциальных месторождений, основанные на данных продуктивности первичных ореольных зон подвижного урана с обязательным учетом информации о вертикальной зональности альбититов.

При наличии в данном районе хорошо изученных месторождений-аналогов для оценки прогнозных запасов урана могут быть использованы методы распознавания образа месторождения ураноносных альбититов.

§ 3. ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫЕ РАБОТЫ

Поисково-оценочные работы проводятся на участках выявленных потенциальных месторождений, получивших положительную геолого-прогностическую оценку по результатам поисковых работ. В отличие от всех других стадий объект изучения является одновременно и объектом оценки, в результате чего либо устанавливается вероятная промышленная ценность месторождения, либо оно относится к числу рудопроявлений.

С этой целью при поисково-оценочных работах проводятся не только геолого-минералогические, геофизические и геохимические исследования, но и комплекс наблюдений, обеспечивающий получение исходных технико-экономических данных, необходимых для прогностической геолого-экономической оценки изучаемого месторождения.

В условиях перекрытого или слепого оруденения задачи поисково-оценочных работ включают:

- картирование зон транзитизированных разломов; участков их разветвления или сопряжения с крупными тектоническими нарушениями, участков пород гетерогенного строения, зон натровых метасоматитов с признаками постальбитового катаклаза и брекчирования и других рудоконтролирующих структур;

- сбор и обобщение геолого-минералогических, геофизических и геохимических данных, подтверждающих принадлежность оцениваемого месторождения к формации ураноносных альбититов;

- оконтуривание площади месторождения в плане (под чехлом рыхлых отложений) и оценку продуктивности уранового оруденения до глубин порядка нескольких сотен метров;

- выборочную детализацию сведений об условиях залегания, морфологии и строении рудных образований;

- прогностическую оценку горно-геологических условий эксплуатации месторождения и технологических свойств урановых руд;

- сбор и обобщение исходных данных для определения браковочных кондиций к подсчету прогнозных запасов;

— подсчет прогнозных запасов урановых руд по всему месторождению и запасов категории C_2 по участкам детализационных работ.

Основные технические средства проведения поисково-оценочных работ — скважины колонкового бурения. В условиях заметного эрозийного среза месторождения, когда под покровом рыхлых отложений могут быть вскрыты хотя бы самые верхние горизонты рудных залежей, поисково-оценочные работы целесообразно начинать с бурения неглубоких поисково-картировочных скважин, а при малых эрозийных срезах — с бурения нескольких более глубоких скважин на наиболее перспективных участках. Стремление к созданию геометрически правильной сети поисково-оценочных скважин на данной стадии работ преждевременно. Наиболее рационально бурение скважин по профилям через несколько сотен метров друг от друга с расположением их по геологической целесообразности и с учетом всех данных, полученных по уже пробуренным скважинам. Общее число поисково-оценочных скважин зависит от масштаба месторождения и глубины его эрозийного среза. При средних масштабах и умеренном эрозийном срезе месторождения оно достигает одного-двух десятков. Детализационные работы целесообразно проводить на участках со средней продуктивностью оруденения, отражающих основные особенности строения и состава рудных залежей. С этой целью могут применяться способы многоствольного «кустового» бурения скважин, обеспечивающие высокую плотность разведочных пересечений в пределах ограниченных объемов недр.

При документации керна особое внимание уделяется изучению метасоматических изменений вмещающих пород, минерального состава и радиологических свойств руд. О технологических свойствах руд судят обычно по их вещественному составу с учетом опыта переработки аналогичных руд. Руды специфического состава подвергаются технологическому опробованию с последующими лабораторными технологическими испытаниями проб. Специальных работ для изучения горно-геологических условий эксплуатации месторождения обычно не проводят, за исключением определения физико-механических свойств пород и комплекса гидрогеологических наблюдений.

Для целей подсчета запасов обосновываются браковочные кондиции, представляющие собой общие ориентиры для определения минимальных требований промышленности к конкретному месторождению.

Подсчет прогнозных запасов по данным поисково-оценочных работ носит ряд отличительных черт:

- основные геологоразведочные параметры оцениваются не по косвенным данным, а по данным опробования разведочных пересечений, с учетом их пространственного положения и зон влияния;

— запасы подсчитываются в обобщенных контурах месторождения, установленных с применением приемов геометризации рудомещающих структур.

По участкам детализационных работ подсчитываются запасы категории C_2 .

По результатам поисково-оценочных работ составляется «техничко-экономическое обоснование» (ТЭО) вероятной целесообразности промышленного освоения месторождения, которое служит основанием для проектирования дальнейших геолого-разведочных работ.

§ 4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Предварительная разведка проводится на месторождениях, получивших положительную оценку по результатам поисково-оценочных работ и по данным ТЭО.

Объектами предварительной разведки являются месторождения в целом, а при неглубоких эрозионных срезях — их верхние части глубиной не менее 1 км. Объекты оценки — отдельные участки месторождений — продуктивные зоны, в пределах которых запасы оцениваются по отдельным подсчетным блокам (рис. 35).

В задачи предварительной разведки входит:

— изучение особенностей строения зон альбититов и выявление рудоконтролирующих структур — участков гетерогенного

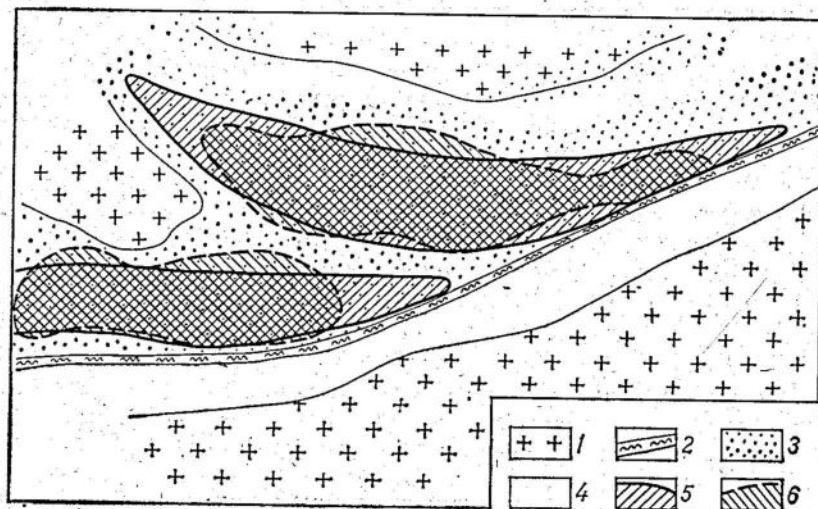


Рис. 35. План горизонта месторождения ураноносных альбититов по данным предварительной разведки (разведочные пересечения не показаны).

1 — граниты; 2 — зоны смятия, бластомилонитизация и катаклаза; 3 — альбититы; 4 — гнейсы, мигматиты и пегматоидные образования; 5 — контуры продуктивных урановорудных зон по данным предварительной разведки; 6 — контуры продуктивных зон, уточненные по данным детальной разведки (см. рис. 37)

строения клиновидных блоков, образованных сочленением тектонических нарушений, систем оперяющих субпараллельных тектонических нарушений с признаками диафтореза, катаклаза и брекчирования и других структур, определяющих закономерности размещения и условия залегания продуктивных зон;

— выявление общих контуров и строения продуктивных зон ураноносных альбититов;

— выборочная оценка условий залегания, морфологии и строения одной-двух наиболее типичных рудных залежей (в пределах эталонных участков);

— изучение вещественного состава урановых руд для предварительной оценки их технологических свойств и выделения вероятных технологических типов и сортов руд;

— оценка горнотехнических условий будущей эксплуатации месторождения с детальностью, обеспечивающей выбор способа вскрытия и вероятную систему его разработки;

— получение исходных данных для расчета временных условий к подсчету запасов и предварительных технико-экономических показателей для составления ТЭД;

— подсчет запасов категории C_2 (и запасов категории C_1 по участкам детализационных работ).

Предварительная разведка осуществляется системами вертикальных разрезов субпараллельными наклонными разведочными пересечениями с помощью скважин колонкового бурения по редкой сети. Буровые работы сопровождаются комплексом геофизических и геохимических исследований. Вначале, с учетом всех известных данных, пробуриваются единичные буровые скважины для получения приближенных представлений о возможных масштабах мощных рудоносных интервалов, хотя бы и низких по содержанию урана. В дальнейшем скважины бурятся по сети, гарантирующей от пропуска крупных рудных залежей, с таким расчетом, чтобы каждый подсчетный блок продуктивной ураноносной зоны был бы вскрыт не менее чем 10—12 пересечениями (не считая законтурных скважин). Разрезы располагаются друг от друга примерно через 200 м, а скважины — на профилях через 70—100 м.

На участках детализационных работ сеть скважин сгущается в два раза и более.

На стадии предварительной разведки к качеству буровых работ предъявляются повышенные требования. В первую очередь это относится к выходу керна и инклинометрии скважин. В каждой скважине проводятся комплексный магнитный, электро- и плотностный каротаж, геохимическое опробование, гамма-профилирование керна, гамма-каротаж, отбор образцов и проб для изучения состава и радиологических свойств руд и метасоматических изменений вмещающих пород. Особое внимание уделяется изучению первичной и вторичной минеральной зональности метасоматитов, выделению их фациальных

разновидностей, изменениям минерального состава метасоматитов и более поздних постальбитовых прожилковых образований с глубиной.

По данным геохимического опробования изучаются ореолы рассеяния урана и его спутников вокруг рудоносных (продуктивных) зон, а также закономерности размещения фосфора и углекислоты по вертикали.

Технологические свойства руд оцениваются по аналогии с рудами уже освоенных альбититовых месторождений, а в случаях проявления индивидуальных особенностей в минеральном или химическом составе, текстурах или структурах руд из керна скважин отбираются пробы для лабораторных технологических испытаний.

Руды ураноносных альбититов отличаются невысокой радиометрической контрастностью, однако изучение этого свойства на стадии предварительной разведки обязательно. Характеристики вероятных коэффициентов покусковой радиометрической контрастности руд в естественном залегании рассчитываются по данным дифференциальной интерпретации гамма-каротажа скважин, а оценка других технико-экономических показателей производится по методу аналогии.

Для изучения горнотехнических условий будущей эксплуатации месторождения используются данные, полученные по результатам буровых работ (включая гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения), а также производственный опыт разработки месторождений данной формации.

Для целей подсчета запасов к концу предварительной разведки обосновываются и утверждаются временные кондиции, включающие лишь главные требования к качеству руд и оконтуриванию продуктивных залежей:

- минимальное промышленное содержание урана в подсчетном блоке;

- бортовое содержание урана (для оконтуривания кондиционных и некондиционных интервалов по разведочным пересечениям);

- предельно допустимые мощности участков пустых пород, включаемые в интервалы с промышленным оруденением.

Кроме того, в кондициях желателен оговорить методику оконтуривания продуктивных зон. Оно может проводиться, например, по заведомо некондиционному содержанию урана, по комплексному модулю, характеризующему интенсивность альбитизации (или постальбитового изменения) вмещающих пород, по числовым характеристикам продуктивностей мультипликативных надрудных или подрудных ореолов или по совокупности качественных геологических критериев.

Подсчеты запасов по результатам предварительной разведки выполняются обычно способом вертикальных разрезов, чему способствуют применяемые системы разведочных работ

и значительные мощности продуктивных зон. Размеры подсчетных блоков кондициями не ограничиваются. Обычно отдельный подсчетный блок изучается в контурах продуктивной зоны смежными разведочными разрезами. Запасы оцениваются по категории C_2 , и лишь на участках детализационных работ, изученных по более густой разведочной сети с применением многостовольного бурения, запасы, подсчитанные в контурах отдельных рудных залежей, могут оцениваться по категории C_1 .

По результатам предварительной разведки составляется технико-экономический доклад (ТЭД), в котором приводится предварительная геолого-экономическая оценка месторождения с обоснованием целесообразности и очередности его промышленного освоения.

§ 5. ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Детальной разведке подлежат только те месторождения, которые представляют, по данным ТЭД, объекты первоочередного промышленного освоения.

Объектами детальной разведки часто являются наиболее перспективные и доступные участки месторождений (продуктивные зоны), суммарные запасы которых обеспечивают работу горного предприятия (рудника) на 8—10 ближайших лет, а объектами оценки — урановорудные залежи, запасы которых подсчитываются в контурах блоков, ограниченных по размерам величиной годовой производительности рудника.

Основная цель детальной разведки — не столько уточнение средних цифр запасов и содержаний урана в рудах, сколько детализация всех горно-геологических и технологических параметров отдельных рудных залежей по каждому подсчетному блоку, обеспечивающая данные для составления проекта строительства горного предприятия и отработки месторождения.

В задачи детальной разведки месторождений ураноносных альбититов входит:

- изучение особенностей строения продуктивных зон, контролирующих размещение урановорудных залежей и их морфологически обособленных участков в местах пересечения тектонических нарушений с оперяющими трещинами, приоткрывания и изгибов трещин, зон рассланцевания на контактах гетерогенных пород с признаками постальбитового катаклаза, микроскладчатости и милонитизации;

- оконтуривание отдельных урановорудных залежей и оценка показателей изменчивости их важнейших геологоразведочных параметров;

- выборочная оценка условий залегания, морфологии и строения наиболее типичных морфологически обособленных участков залежей;

— детальное изучение вещественного состава руд и их технологических свойств, а также горнотехнических условий эксплуатации месторождения по каждой рудной залежи;

— разработка и обоснование кондиций к подсчету запасов по рудным залежам;

— подсчет разведанных запасов по рудным залежам и отдельным подсчетным блокам по категории C_1 (на участках детализационных работ иногда по категории В).

Детальная разведка осуществляется бурением колонковых скважин в сочетании с подземными горными работами. Если оруденение труднодоступно для изучения поверхностными горными выработками, то из ствола разведочной шахты прохо-

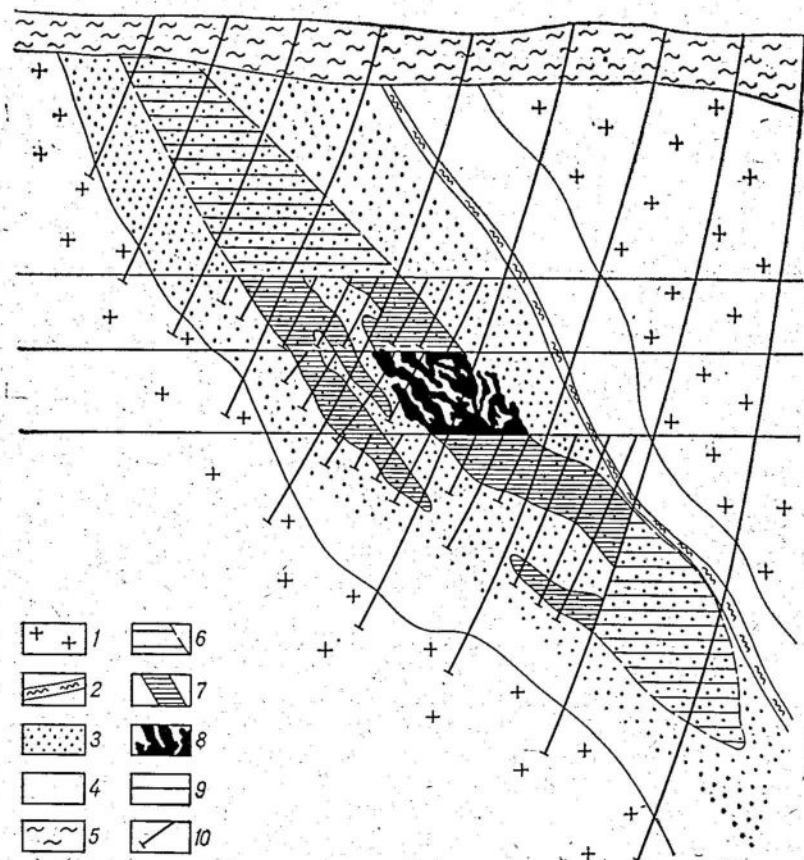


Рис. 36. Разрез месторождения ураноносных альбититов.

1 — граниты; 2 — зоны смектизации, бластомилонитизация и катаклаза; 3 — альбититы; 4 — гнейсы, мигматиты и пегматонидные образования; 5 — покров рыхлых отложений; 6 — контуры продуктивной зоны; 7 — контуры рудных залежей; 8 — контуры морфологически обособленных участков и локальных урановорудных обособлений по данным изучения эталонного участка; 9 — горизонты горных работ; 10 — разведочные скважины

дится не менее двух горизонтов горных работ с высотой этажа порядка 80—120 м по падению залежей.

В зависимости от глубины эрозионного среза месторождения верхний горизонт разведочных горных работ может располагаться на глубинах от 120 до 300 м и более от дневной поверхности.

Основными разведочными выработками на горизонтах являются квершлагги и орты в сочетании с горизонтальными скважинами подземного бурения. Однако главные разведочные разрезы по месторождению ориентируются вертикально, что обеспечивает наиболее полную увязку результатов разведки как в границах участка горных работ, так и за его пределами. Для детализации геологоразведочных данных в плоскостях вертикальных разрезов из квершлаггов бурятся системы наклонных скважин, вскрывающих рудные залежи в промежутках между горизонтами горных работ и на глубине (рис. 36).

Густота разведочной сети в плоскостях рудных залежей принимается от 100×50 до 50×50 м, а на горизонтах горных работ сгущается до 25 м и менее.

Результаты детализационных работ должны представлять характерно характеризовать все разведанные запасы. Поэтому размеры участков детализации должны быть достаточно велики — не менее 10—15 % от суммы всех детально разведанных запасов. Если по сложности строения месторождения относится ко второй группе классификации ГКЗ СССР, то это требование обеспечивается разведкой 20 % запасов по категории В. Для месторождений третьей группы все запасы могут быть отнесены к категории C_1 , однако это не исключает необходимости проведения детализационных работ в указанных объемах (рис. 37).

При проектировании разведочных горных выработок они должны рассчитываться с полным или частичным учетом требований последующей эксплуатации месторождения.

Повышению качества и информативности результатов детальной разведки существенно способствует применение методов фотодокументации горных выработок и скважин.

Изучение технологических свойств руд требует часто значительных затрат времени и труда в связи с их сложным минеральным составом. На стадии детальной разведки проводятся полупромышленные, а иногда и промышленные технологические испытания проб, экспериментальным путем уточняются показатели радиометрического обогащения и сортировки руд.

Горно-геологические условия эксплуатации месторождения изучаются в процессе проведения всех разведочных выработок и уточняются на участках детализации разведочных работ.

Для целей оптимизации условий геологоразведочных работ и оценок достоверности получаемых результатов на стадии детальной разведки месторождений рекомендуется широкое

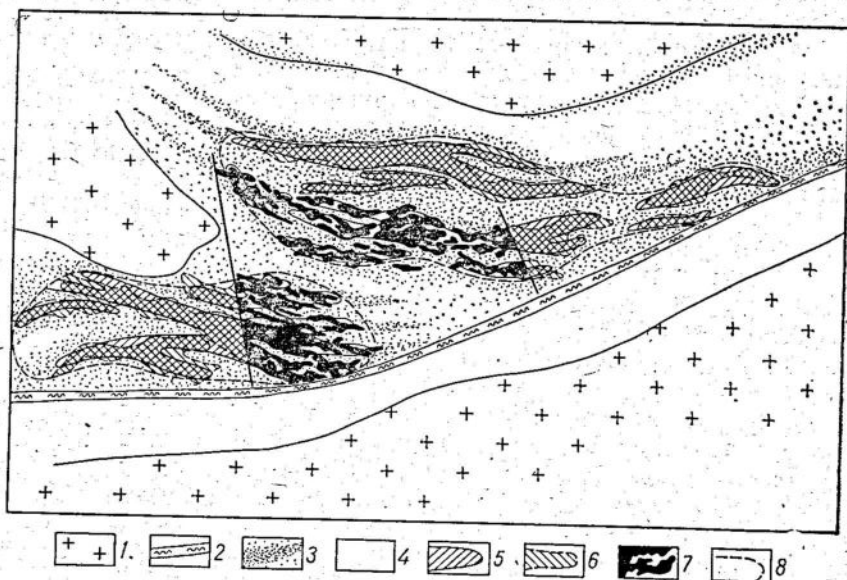


Рис. 37: План горизонта месторождения ураноносных альбититов по данным детальной разведки (разведочные пересечения не показаны).

1 — граниты; 2 — зоны смятия, бластомилонитизации и катаклаза; 3 — альбититы; 4 — гнейсы, мигматиты и пегматитные образования; 5 — контуры рудных залежей по данным детальной разведки; 6 — истинные контуры рудных залежей; 7 — контуры морфологически обособленных участков и локальных урановорудных скоплений по данным изучения эталонного участка; 8 — контуры продуктивных зон, уточненные по данным детальной разведки

применение методов геолого-математического моделирования изучаемых свойств урановорудных образований.

Подсчет запасов детально разведанных месторождений производится на основе утвержденных кондиций, разработка которых возможна в завершающий период детальной разведки.

Важнейший кондиционный параметр к подсчету запасов — минимальное промышленное содержание урана в подсчетном блоке, размеры которого лимитируются величиной годовой производительности горного предприятия (рудника). В качестве дополнительных кондиционных параметров устанавливаются:

- бортовые содержания для оконтуривания балансовых и забалансовых запасов по рудным залежам;
- максимально допустимые мощности участков пустых пород или некондиционных руд, включаемых в интервалы с кондиционным оруденением;
- рабочие мощности залежей и соответствующие им предельные линейные запасы по разведочному пересечению;
- предельные размеры подсчетных блоков;
- минимальные запасы руд в изолированных урановорудных скоплениях.

При наличии нескольких технологических типов руд или сложных горно-геологических условий эксплуатации месторождения могут устанавливаться соответствующие дополнительные кондиционные параметры.

Запасы детально разведанных участков месторождений оцениваются по категории C_1 , а недоразведанные запасы флангов и глубоких горизонтов — по категории C_2 . В пределах участков детализационных работ запасы могут быть оценены как по категории В, так и по категории C_1 в зависимости от степени сложности их строения.

Результаты детальной разведки подлежат обязательному рассмотрению в ГКЗ СССР для утверждения разведанных запасов и определения готовности месторождения к передаче в промышленное освоение.

§ 6. РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Эксплуатационная разведка месторождений проводится на всем протяжении срока существования горного предприятия для детализации состава и строения урановорудных залежей в пределах эксплуатационных участков и блоков, уточнения технологических свойств руд и горнотехнических условий эксплуатации разрабатываемых блоков. Технические средства разведки зависят от принятой системы вскрытия и разработки месторождения. Геологическая документация и опробование урановых руд сопровождают проведение всех капитальных, горноподготовительных, нарезных и очистных выработок. По мере необходимости из эксплуатационных выработок бурятся разведочные скважины и шпур, которые подвергаются геологической документации и гамма-каротажу.

Густота сети опережающей и сопровождающей эксплуатационной разведки определяется размерами объемов селекции при добыче. Поэтому гамма-каротажу подвергается каждая взрывная скважина или шпур, что часто позволяет проводить селективную отпалку рудной массы и пустой породы.

Селекция рудной массы по еще меньшим объемам осуществляется в вагонетках на РКС, а данные радиометрической сортировки используются в дальнейшем для проведения контрольных подсчетов добытых урановых руд.

По данным систематической геолого-геофизической документации очистных блоков создаются блокочные карточки, которые служат основой для составления сортовых планов отработываемых блоков. При проведении сопровождающей эксплуатационной разведки в задачи опробования входит не только оценка содержания урана в объемах селекции, но и определение потерь и степени разубоживания руд и данных для оценки полноты отработки блоков.

По мере отработки месторождения и продвижения выработок на далекие фланги и глубокие горизонты вероятно закономерное изменение состава урановых руд и, как следствие, изменение их технологических свойств. Так, с глубиной обычно уменьшается содержание карбонатов и увеличивается содержание фосфора в рудах. Развитые на верхних горизонтах существенно настурановые и коффинитовые руды сменяются с глубиной настуран-браннеритовыми, а на нижних горизонтах в их составе преобладают уже уранинит и браннерит. Поэтому в процессе эксплуатационной разведки продолжается изучение вещественного состава и технологических свойств руд, вплоть до отбора технологических проб и проведения полного комплекса исследований.

Главная особенность подсчета запасов заключается в необходимости составления их баланса и оперативного учета с разделением запасов по степени подготовленности. Оптимальные отношения вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов на месторождениях ураноносных альбититов составляют обычно 4 : 2 : 1.

Помимо эксплуатационной разведки на флангах действующих горных предприятий, а также на глубоких горизонтах разрабатываемых месторождений рекомендуется проведение поисковых и разведочных работ для выявления новых участков, обеспечивающих прирост запасов урановых руд и продление срока существования горного предприятия.

Глава XII

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ УРАНОНОСНЫХ ПЕСЧАНИКОВ

В качестве другого примера рассматриваются особенности поисков и разведки ураноносных песчаников собственно уранового фациального типа, залегающих в терригенных сероцветных формациях субплатформенного типа.

Ураноносные песчаники широко распространены в различных районах мира и чаще всего располагаются в пределах молодых эпиплатформенных орогенных поясов, в межгорных или предгорных впадинах, по соседству с областями интенсивных восходящих блоково-глыбовых движений.

В пределах одного ураноносного района часто встречаются ураноносные песчаники, имеющие черты, свойственные не только данному, но и другим фациальным типам, которые в основном проявляются в пределах одного месторождения. Однако несмотря на это все они обладают рядом общих характерных особенностей:

- приуроченностью к молодым мезо-кайнозойским отложениям верхних молассоидных или субплатформенных формаций, представленных аллювиальными, лимническими и дельтовыми фациями;

- отчетливым стратиграфическим контролем продуктивных толщ;

- связью оруденения с литологически благоприятными толщами переслаивающихся гравелитов, песчаников, алевролитов и глинистых сланцев (глин) и расположением рудных скоплений в наиболее проницаемых горизонтах (песчаниках и гравелитах), ограниченных горизонтами непроницаемых отложений;

- постоянным присутствием в составе песчаников органического вещества, растительных остатков различных стадий углефикации (от углефицированного детрита до погребенных стволов деревьев) или углеродистого вещества;

- тесной пространственной связью оруденения с границами выклинивания регионально развитых зон пластового окисления, часто с наложенными ореолами обеленных (аргиллизированных) пород;

- стратиформным типом рудных образований, имеющих пласто-, линзо- или роллообразную форму, нередко осложненную в результате переотложения руд;

- нечеткими, расплывчатыми контактами рудных залежей, вследствие чего представления об их морфологии и внутреннем строении сильно зависят от кондиций, положенных в основу их оконтуривания;

— существенно урановым составом руд, среди которых главная роль принадлежит настурановым, черниевым и коффиновым типам.

В строении ураноносных образований (от масштаба месторождения до масштаба объема селекции руд при добыче) выделяются четыре (а иногда и более) дискретных структурных уровня: продуктивная толща, продуктивный горизонт, продуктивная залежь и морфологически обособленный участок продуктивной залежи, а нередко и локального урановорудного обособления. Все эти структурные элементы залегают согласно (или почти согласно) с элементами слоистости вмещающих пород, а по своим морфологическим особенностям относятся к сложным пласто-, линзо- или роллообразным рудным скоплениям. В соответствии с разведочной классификацией (см. гл. IX, § 1) они относятся к третьей или к четвертой группе месторождений со сложным или весьма сложным прерывистым строением, но с согласным или почти согласным залеганием разномасштабных рудных скоплений преимущественно стратиформного типа. Некоторые месторождения ураноносных песчаников с проявлениями процессов не только окислительного, но и восстановительного рудогенеза обладают еще более сложным строением. Рудные скопления в них могут залежать несогласно по отношению к элементам слоистости вмещающих пород и, кроме стратиформных, часто встречаются трубо- и жилородные образования.

§ 1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Специализированная геологическая съемка масштаба 1:200 000 проводится на всей территории урановорудного района для выявления прогнозных критериев и признаков урановорудных поясов и оценки их потенциальной рудоносности. Наиболее перспективные площади тяготеют к зонам сопряжения депрессионных структур с блоками интенсивных восходящих глыбовых движений по долгоживущим региональным разломам, которые хорошо дешифрируются на космических и аэрофотоснимках различных масштабов, а также выявляются водно-гелиевыми съемками.

Ураноносны образования верхней молассоидной формации, развитые в осадочном чехле активизированных платформ в аллювиальных, лимнических и особенно прибрежно-дельтовых фациях. Среди них наиболее благоприятны серии переслаивающихся осадков с повышенной восстановительной емкостью, резко различные по степени проницаемости и сформированные в периоды аридизации палеоклимата.

В задачу специализированной геологической съемки входит выявление и оконтуривание поясов ураноносных отложений

в стратиграфически и литологически благоприятных породах, вытянутых вдоль границ бассейнов на расстояния от десятков до ста километров и более при ширине в первые десятки километров.

Эти пояса располагаются в пределах регионально развитых зон пластового окисления, нередко на участках пересечения с системами региональных сбросовых нарушений или другими тектоническими структурами, обуславливающими повышенную вертикальную проницаемость разреза.

В процессе специализированных съемок для выявления ураноносных поясов используется понсково-картировочное бурение по профилям через 12,8 или 25,6 км, ориентированным вкрест их предполагаемого протяжения, т. е. перпендикулярно к границам депрессионных структур. Расстояния между скважинами на профилях выбираются в зависимости от сложности строения и выдержанности литологического состава пород — от 800 до 6400 м. Каждая скважина подвергается гамма- и электрокартажу, геохимическому опробованию, а керн — тщательному литологическому изучению для выявления благоприятных фациально-литологических разновидностей и эпигенетических изменений вмещающих пород. На разрезах, сложенных разнородными аллювиальными лимническими или прибрежно-дельтовыми фациями, с признаками органического вещества, окислительных или восстановительных эпигенетических изменений и, тем более, с аномальными концентрациями урана и радия, пробуриваются дополнительные скважины, а расстояния между ними последовательно уменьшаются до 100, а иногда и до 50 м.

В обрамляющих депрессии блоках с интенсивными глыбовыми движениями, которые рассматриваются как области мобилизации и сноса подвижного урана, проводятся радиогеохимические съемки масштаба 1:200 000 и оконтуриваются области выноса подвижного урана. Результаты радиогеохимических съемок учитываются при оконтуривании перспективных участков потенциально ураноносных поясов в осадочных отложениях депрессий. Как правило, такие участки располагаются в непосредственной близости от мощных зон выноса подвижного урана из пород складчатого фундамента.

На территориях потенциально ураноносных поясов проводятся специализированные геологические съемки масштаба 1:50 000, имеющие своей целью оконтуривание и оценку потенциальных урановорудных полей, размеры которых достигают десяти и более километров в длину при ширине 2—5 км. Обычно они тяготеют к полосам выклинивания фронтальных частей региональных зон пластового окисления в горизонтах проницаемых пород, содержащих углефицированные растительные остатки, рассеянное углеродистое или окисленное битуминозное вещество. Они обладают отчетливо вытянутыми контурами и часто располагаются вдоль пологих крыльев грабен-

синклиналей, в пределах подцвет и пачек пород, сложенных литологически благоприятными отложениями, занимающими четкое положение в стратиграфическом разрезе.

Как было сказано выше, многие рудные поля находятся на участках пересечения зон пластового окисления системами поперечных тектонических нарушений или другими структурами, обеспечивающими повышенную вертикальную проницаемость рудных толщ. В таких случаях во вмещающих породах наряду с процессами эпигенетического окисления проявляются и процессы восстановления в виде участков обособленных пород.

Основные технические средства проведения специализированной съемки масштаба 1 : 50 000 — поисково-картировочное бурение в совокупности с поверхностными горными выработками и методами структурной геофизики, из которых наиболее широко используются магнитные и гравиметрические съемки, сейсмическое и электрическое профилирование.

Интерпретация результатов магнитных и гравиметрических съемок позволяет судить о строении подстилающего фундамента, выделять блоковые структуры, крупные разломы и тектонические нарушения. Сейсмическое профилирование обеспечивает данные о глубине залегания и рельефе фундамента и часто способствует прослеживанию маркирующих горизонтов. Детали строения рельефа фундамента и положения палеорусел выясняются по данным вертикального электроразведывания.

Профили поисково-картировочного бурения располагаются вкрест простирания урановорудного пояса на расстояниях 3,2 или 6,4 км друг от друга. Интервалы между скважинами на каждом профиле выбираются от 400 до 1600 м, а в аномальных пересечениях сгущаются до 100 и даже 50 м. Соответственно сгущается сеть скважин и на ранее пробуренных профилях. При описании керна особое внимание уделяется его геолого-литологической документации. Детально изучаются состав обломочного материала и цемента и их объемные соотношения, структуры и текстуры пород, аутигенные (образованные на месте нахождения) изменения пород, органические включения и цвет породы. При описании цвета важно четко различать первичные и вторичные окраски, выделяя среди вторичных лимонитово-окисленные, осветленные и вторично-восстановленные. К первичным (сингенетичным) окраскам относятся красноцветные (бордовые, лиловые, сиреневые), пестроцветные и сероцветные (зеленые, голубовато-серые, темно-серые) окраски водопроницаемых и водонепроницаемых пород, возникшие в процессе их седиментации и диагенеза. Вторичные окраски связаны с эпигенетичным лимонитовым окислением (обелением), обусловленным выносом железа или вторичным восстановлением пород. Выделение вторичных окрасок часто далеко не просто. Поэтому помимо цвета пород и включений необходимо описывать морфологию его распространения, указывать границы цветов, характеры их пе-

реходов, изменения окрасок в зависимости от положения описываемого участка по отношению к подошве и кровле пласта и т. д. Для объективных оценок цветов рекомендуется составлять эталонные коллекции, а для повышения информативности литологической документации — использовать цветные фотографии керна.

Помимо литологической документации керна производится его геохимическое опробование и отбор образцов для последующего микроскопического изучения. Каждая скважина подвергается гамма- и электрокаротажу, результаты которых применяются при увязках смежных пересечений, а также для целей оконтуривания и оценки перспектив рудных полей. Для оценок прогнозных запасов потенциальных рудных полей используются результаты геохимического опробования (по которым отстраиваются ореолы рассеяния урана и его элементов-спутников) с учетом данных гамма-каротажа скважин.

§ 2. ПОИСКОВЫЕ РАБОТЫ

Поисковые работы проводятся в пределах выявленных потенциальных рудных полей для обнаружения и прогнозной оценки ураноносных участков, сопоставимых по масштабам с месторождениями ураноносных песчаников. В практике геологоразведочных и горно-добычных работ к числу месторождений относятся участки обычно вытянутой формы, достигающие в длину 10 км, а в ширину около 2 км. Оруденение характеризуется многоярусным строением — в контурах месторождений часто выделяется несколько продуктивных толщ, которые в свою очередь состоят из нескольких продуктивных горизонтов, сложенных прерывистыми по строению и вытянутыми по форме залежами.

В процессе поисков на территории потенциального рудного поля сеть ранее пробуренных скважин сгущается до 1,6 или 3,2 км между смежными профилями при расстояниях между скважинами от 400 до 800 м. В пределах перспективных участков интервалы между скважинами уменьшаются до 100 или 50 м. В задачи поисковых работ входит также выявление поисковых критериев месторождений ураноносных песчаников:

— пачек пород благоприятного литологического состава, обогащенных рассеянными органическим или углеродистым веществом и ограниченных сверху и снизу водоупорами;

— крупных языков во фронтальных частях зон пластового окисления, развитых в благоприятных породах, или других участков с повышенной вертикальной проницаемостью (трещинные воды, системы мелких тектонических нарушений и др.);

— пластовых и секущих зон (участков) обеления красно- и пестроцветных пород;

— ореолов природных газов (водорода или углеводородов). Поисковые скважины бурятся на всю мощность перспективной пачки потенциально рудоносных пород, а отдельные скважины перебуриваются на всю мощность чехла молодых осадочных отложений с углублением на несколько метров в породы складчатого фундамента.

Выявленные аномальные концентрации урана (радия) подтверждаются анализами керновых проб с учетом состояния радиоактивного равновесия руд. Ореолы урана и его спутников (молибдена, селена, ванадия и др.) оконтуриваются по данным геохимического опробования керна скважин. По совокупности этих данных устанавливаются и оцениваются поисковые признаки месторождений ураноносных песчаников:

— ореольные зоны подвижного урана, его спутников (молибдена, селена, ванадия) и радиогенных свинцов в эпигенетически измененных песчано-глинистых отложениях;

— контрастные ореольные зоны (или потоки) радиоэлементов (урана, радия и радона) в подземных водах.

Наиболее перспективные участки подвергаются выборочной детализации с густотой сети, соответствующей поисково-оценочной стадии работ, а результаты наблюдений используются в дальнейшем в качестве эталонных. Если в процессе детализационных работ подтверждаются значительные перспективы оруденения, то поисково-оценочные работы распространяются на весь оцениваемый объем.

Для оценки прогнозных запасов предполагаемых месторождений ураноносных песчаников используется совокупность геологических, геохимических и геофизических данных. Примерные объемы месторождения могут быть оценены методами геологоструктурной геометризации, с учетом площадных продуктивностей ореольных зон рассеяния урана.

§ 3. ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫЕ РАБОТЫ

Поисково-оценочные работы проводятся в пределах выявленных потенциальных месторождений, получивших положительную геологическую оценку по данным поисковых работ. Помимо очередного сгущения поисково-оценочной сети скважинами до 800—1600 м между разрезами и 200—400 м между скважинами на разрезах (с последующей детализацией буровых работ в пределах наиболее перспективных и типичных участков), а также комплекса связанных с ними геологических, геофизических и геохимических работ, проводятся специальные наблюдения, обеспечивающие прогнозную геолого-экономическую оценку месторождения.

По данным поисково-оценочного бурения составляются геологическая карта и литологические схемы продуктивных горизонтов с оконтуриванием площади месторождения в плане и на

вертикальных разрезах. На участках детализационных работ выясняются условия залегания, морфологические черты и главные особенности строения урановорудных образований в масштабах продуктивной толщи и продуктивного горизонта, и выборочно — в масштабе продуктивных залежей, для чего сеть разведочных скважин сгущается до необходимых размеров.

Для прогноза технологических свойств руд и вероятных горнотехнологических условий разработки месторождения проводится специальный комплекс исследований, в задачу которого входит решение вопроса о возможности и целесообразности отработки месторождения способом подземного выщелачивания (ПВ). Поскольку многие месторождения ураноносных песчаников пригодны к отработке способами ПВ, методика и содержание дальнейших геологоразведочных работ рассматриваются применительно к этому случаю.

Принципиальная возможность и целесообразность отработки месторождения способом ПВ определяются следующими факторами:

— степенью растворимости содержащихся в рудах урановых минералов в слабоконцентрированных кислотах;

— свойствами геологического разреза, обеспечивающими возможность проникновения растворов в недра месторождения и непосредственно в толщу рудовмещающих пород;

— зависимостью извлечения урана в раствор от вещественного состава руд, литологического состава и текстурных особенностей рудовмещающих пород.

Для выяснения перечисленных факторов и оценки их влияния на принципиальную возможность применения способов ПВ в процессе геолого-геофизической документации поисково-оценочных скважин особое внимание обращается на изучение фильтрационных свойств разреза, литологического и гранулометрического состава руд и вмещающих пород, а также вещественного состава руд с оценкой степени растворимости урановых минералов в серной кислоте, наличие в них карбонатов, повышающих расход серной кислоты, и других свойств, определяющих литолого-фильтрационные типы руд. С этой целью помимо гамма-профилирования, геохимического и рядового опробования из керна скважин отбираются монолиты (пробы с ненарушенной структурой) для лабораторного изучения фильтрационных свойств вмещающих пород.

При обосновании браковочных кондиций к подсчету прогнозных запасов бортовые содержания урана снижаются до одной сотой процента и ниже, а представления о рудных телах заменяются представлениями о зонах циркуляции выщелачивающих растворов, которые пространственно совпадают с объемами проницаемых рудовмещающих пачек или горизонтов. К балансовым относятся запасы в непроницаемых породах с любым содержанием урана в рудах.

При подсчете прогнозных запасов в объеме всего месторождения основные геологоразведочные параметры оцениваются по данным опробования поисково-оценочных скважин, а запасы подсчитываются в объеме всего месторождения по совокупности геологических, гидрогеологических, геофизических и геохимических данных. Запасы приповерхностных участков месторождений часто оцениваются по категории C_2 .

Прогнозная геолого-экономическая оценка месторождения приводится в ТЭО вероятной целесообразности его промышленного освоения способом ПВ.

§ 4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Предварительная разведка проводится на всей территории месторождения, получившего положительную оценку по результатам поисково-оценочных работ и по данным ТЭО, а объектами оценки являются отдельные его участки.

В задачи предварительной разведки входит:

- изучение особенностей строения, литолого-фациального состава и эпигенетических изменений всей пачки рудовмещающих пород для выявления продуктивных толщ (горизонтов) и главных водоупоров;

- оконтуривание и изучение фильтрационных свойств продуктивных толщ и важнейших продуктивных горизонтов с оценкой характеристик изменчивости их геологоразведочных параметров;

- выборочная оценка условий залегания, морфологии и строения нескольких типичных урановорудных залежей на эталонных участках в пределах продуктивных горизонтов;

- изучение химического, минерального и гранулометрического состава урановых руд с количественной оценкой содержания растворимых и нерастворимых минералов, карбонатов и органического вещества для выяснения геотехнологических свойств руд;

- приближенная оценка вероятных объемов закисления и скоростей фильтрации растворов;

- сбор исходных данных для расчета временных кондиций к подсчету запасов;

- подсчет запасов по категории C_2 по всем продуктивным толщам и горизонтам и по категории C_1 в пределах участков детализационных и опытных работ.

Предварительная разведка осуществляется системами вертикальных разрезов. Несмотря на сложность строения продуктивных толщ, горизонтов и отдельных рудных залежей, разведку можно проводить по редкой сети скважин колонкового бурения, так как объектами оконтуривания и оценки являются выдержанные по морфологии зоны циркуляции растворов, ограниченные, как правило, слоями водоупорных пород (рис. 38).

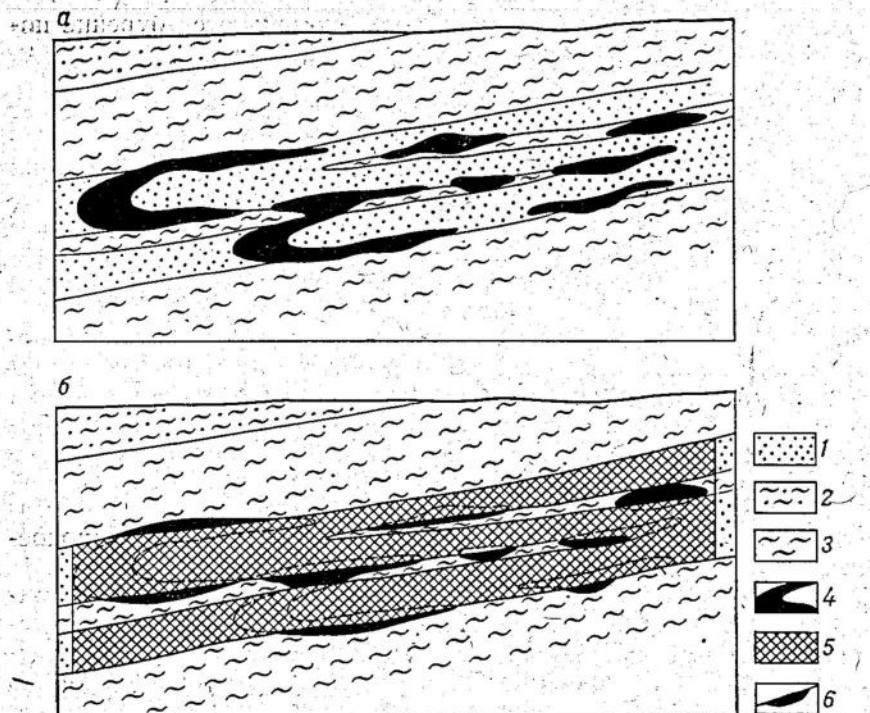


Рис. 38. Трансформация представлений о морфологии рудных залежей при изменении способа их разработки.

a — при подземной или открытой добыче горными работами; *b* — при разработке способом подземного выщелачивания; 1 — проницаемые породы (песчаники); 2 — алевролиты; 3 — водоупорные породы (глины); 4 — рудные залежи с балансовыми запасами, предназначенные для добычи горными работами; 5 — объекты разработки способом подземного выщелачивания (проницаемые рудоносные зоны); 6 — рудные залежи с забалансовыми запасами при разработке месторождения способом ПВ (*b*).

Применению редких разведочных сетей способствуют и технологические особенности добычи урановых руд методом ПВ: возможность эффективного использования не только крупных, но и весьма мелких рудных участков, небольшие капитальные вложения и низкая себестоимость добычи урана. В таких условиях можно приступать к эксплуатации месторождения при наличии минимальных сведений о нем, доизучая детали строения рудных залежей в процессе подготовки отдельных участков к эксплуатационным работам.

В стадию предварительной разведки профили буровых скважин сгущаются до 400—800 м, а скважины на профилях — до 100—200 м. Детализация буровых работ с двойным сгущением сети скважин (через 50—100 м по разрезам и через 200—400 м между разрезами) производится выборочно на эталонных участках месторождения. Для получения сведений о деталях строения и морфологии рудных залежей в пределах одного

или нескольких эталонных участков рекомендуется бурение поперечного и продольного разрезов с расстояниями между смежными скважинами 6,25—12,5 м.

Геолого-геофизическая документация скважин включает в себя комплекс исследований по детальному изучению литолого-фациальных и фильтрационных свойств пород и руд, их минерального, химического и гранулометрического состава, радиологических свойств руд, гидрогеологических и инженерно-геологических особенностей разреза рудовмещающих пород.

На стадии предварительной разведки скважины должны буриться с получением не менее 90—95 % полноценного керна по рудоносным интервалам, так как даже незначительные потери керна часто приводят к систематическим погрешностям оценок средних содержаний за счет избирательного истирания рудного материала. Требование к максимальной полноте выхода керна диктуется и необходимостью использования результатов кернового опробования для расчета поправочных коэффициентов на смещение радиоактивного равновесия в рудах, что весьма типично для многих месторождений ураноносных песчаников.

Каждая скважина подвергается комплексному гамма- и электрическому каротажу (ГК, ГГК, ПС, КС и МЗТ) для детализации литологофациальных особенностей разреза, определения пористости, проницаемости и водоносности пород.

Для определения пористости пород могут применяться методы нейтрон-нейтронного или нейтронного гамма-каротажа, а для уточнения сведений о пересеченных водоносных горизонтах — методы резистивиметрии скважин.

По данным геохимического опробования скважин изучаются ореолы рассеяния урана и его элементов-спутников (молибдена, ванадия, селена и др.) в контурах месторождения оценивается возможное промышленное значение сопутствующих элементов и обосновывается методика опробования керна на сопутствующие компоненты.

Помимо отбора геохимических и рядовых проб, из керна скважин отбираются монолиты для лабораторного изучения фильтрационных свойств пород.

При изучении состава руд слагающие их минералы разделяются по степени устойчивости в серной кислоте на три группы:

- устойчивые (кварц, акцессорные минералы);
- неустойчивые (полевые шпаты, сульфиды, мусковит, глинистые и другие минералы);
- растворимые (карбонаты, фосфаты, гидроокислы, биотит, глауконит и др.).

За период выщелачивания урана растворимые минералы полностью растворяются, а содержания неустойчивых минералов в рудах уменьшаются примерно на 30—35 %.

По степени устойчивости минералов, гранулометрическому составу, коэффициентам фильтрации и пределам изменения эффективной пористости руды разделяются на два литолого-фильтрационных типа: проницаемые и непроницаемые. К числу проницаемых относятся руды с содержанием:

- устойчивых минералов не менее 50 %;
- глинистых минералов не более 12 %;
- минералов монтмориллонитовой группы не более 3 %;
- карбонатов не более 5,5 %;
- глинистых и алевролитовых минералов суммарно не более 25 %.

Для определения основных геотехнологических показателей в условиях естественного залегания проводится опытное геотехнологическое опробование, по данным которого определяются:

- состав продуктивных растворов и концентрация в них урана;
- степень извлечения урана из недр;
- отношение массы рабочего раствора к массе обрабатываемой руды ($J: T$), необходимое для достижения максимальной степени извлечения урана;
- характеристики расхода реагентов.

Наиболее эффективной схемой опытного опробования является предложенная В. А. Грабовниковым двухскважинная схема [11]. Она представляет собой опытную ячейку из двух технологических скважин — закачной и откачной (рис. 39). Процесс опробования заключается в подаче растворителя в закачную скважину (1) с дебитом Q_n и откачке его из откачной скважины (2) с дебитом Q_o . Для гидродинамической изоляции объема выщелачивания от окружающего объема месторождения создается неравенство дебитов откачной и закачной скважин:

$$Q_o = \alpha Q_n, \quad (12.1)$$

где α — коэффициент дебаланса ($\alpha > 2$).

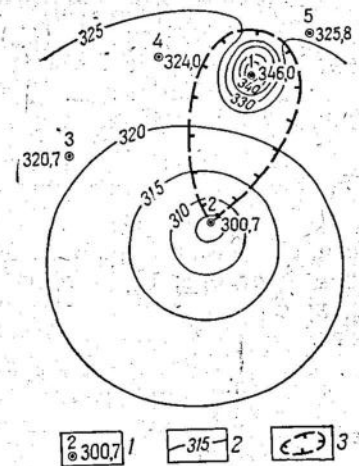


Рис. 39. Пример определения контуров опробования при геотехнологических испытаниях двухскважинным способом [11].

1 — скважина и абсолютная отметка уровня подземных вод при опробовании; 2 — гидронизопеда; 3 — контур циркуляции раствора от закачной скв. 1 к откачной скв. 2 ($\alpha = 5$)

Состав продуктивных растворов прежде всего определяется концентрацией урана (C_{Π}) в растворе. Для этого его концентрация в откачиваемой жидкости ($C_{\text{набл}}$) умножается на коэффициент дебаланса α . Концентрации других компонентов определяются по уравнению:

$$C_{\Pi} = \frac{C_{\text{набл}} Q_0 - C_{\Phi} (Q_0 - Q_{\Pi})}{Q_{\Pi}}, \quad (12.2)$$

где C_{Π} — концентрация оцениваемого компонента в продуктивном растворе; C_{Φ} — концентрация компонента в пластовых водах; $C_{\text{набл}}$ — концентрация компонента в откачиваемой жидкости.

Степень извлечения урана оценивается по его балансу:

$$\varepsilon = \frac{2 \sum C_{\Pi} Q_0 \Delta t}{\gamma [(mc)_0 + (mc)_{\Pi}] F}, \quad (12.3)$$

где $\sum C_{\Pi} Q_0 \Delta t$ — извлеченное количество урана, мг; Δt — время между соседними замерами; γ — объемная масса руд и рудовмещающих пород, т; mc — линейный запас урана по скважинам (откачной и закачной), метропроцент; F — площадь обрабатываемого объема в зависимости от α (см. рис. 39).

Отношение $J : T$ рассчитывается по формуле

$$f = \frac{\sum Q_{\Pi} \Delta t}{\gamma F M}, \quad (12.4)$$

где M — действующая мощность перерабатываемого объема.

Характеристики расхода реагента — удельные затраты растворителя (p) и кислотоёмкость пород (k) подсчитываются по формулам

$$p = \frac{\sum C_0 Q_{\Pi} \Delta t - \sum C_p Q_0 \Delta t}{\sum C_{\Pi} Q_0 \Delta t}, \quad (12.5)$$

$$k = \frac{\sum C_0 Q_{\Pi} \Delta t - \sum C_p Q_0 \Delta t}{\gamma F M} \cdot 100, \quad (12.6)$$

где C_0 — подаваемая в пласт концентрация растворителя; C_p — текущая концентрация растворителя в откачиваемой жидкости.

По результатам опытного опробования рекомендуется оценить бортовые показатели изучаемого объекта. Для этого в формуле

$$C_{\text{ср}} = \frac{10 \varepsilon mc}{M f} \quad (12.7)$$

значение $C_{\text{ср}}$ (средней концентрации урана в продуктивном растворе) заменяется предельной «непромышленной» его кон-

центрацией C_{min} , что позволяет оценить бортовое значение $\frac{mc}{M}$ в зависимости от полученных значений ε и f (табл. 21).

Таблица 21

Значения $\frac{mc}{M}$ в зависимости от величины f при $\varepsilon = 80\%$ и $C_{\text{min}} = 20$ мг/л

f	1	2	3	4
$\frac{mc}{M}$	0,0025	0,005	0,01	0,02

Таким образом бортовые величины mc и C должны рассчитываться с учетом мощностей пластов.

По совокупности данных, полученных к концу предварительной разведки, обосновываются и утверждаются временные кондиции к подсчету запасов, включающие:

— бортовое содержание для выделения рудных интервалов по скважине в пределах всей мощности продуктивной толщи (фильтрующего слоя);

— минимальную линейную продуктивность (приведенное содержание) урана по скважине.

Значение бортового содержания обычно принимается минимальным, близким к 0,01 %. Величина предельной линейной продуктивности для подсчета балансовых запасов относится только к проницаемым рудам. Ее оптимальное значение рассчитывается с учетом минимально допустимой концентрации урана в растворе и предельно допустимых удельного расхода кислоты и коэффициента извлечения урана в готовый продукт. Если в скважине вскрывается несколько подзон проницаемых руд, разделенных интервалами водоупорных пород или непроницаемых руд, минимальная линейная продуктивность относится к каждой из подзон, а приведенное содержание по всей зоне определяется по сумме частных приведенных содержаний:

$$C_{\text{пр}} = \frac{\sum m_1 c_1}{M_1} + \frac{\sum m_2 c_2}{M_2} + \dots + \frac{\sum m_n c_n}{M_n}, \quad (12.8)$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенное содержание урана по скважине; $m_1, m_2, \dots, m_n$ — мощности частных рудных интервалов в каждой подзоне; $c_1, c_2, \dots, c_n$ — содержания урана по частным рудным интервалам; $M_1, M_2, \dots, M_n$ — мощности подзон проницаемых пород (между двумя водоупорами или прослоями непроницаемых руд).

Оценка забалансовых запасов производится путем суммирования интервалов непроницаемых руд, независимо от содержания урана в них.

В отличие от месторождений намечаемых к разработке горными способами, при подсчете запасов оцениваются не только геологические, но и извлекаемые запасы, для чего используются значения экспериментально полученных коэффициентов извлечения урана из недр.

Подсчет запасов выполняется способом вертикальных разрезов (или блоков). Запасы оцениваются в контурах «фильтрующих слоев», не ограниченных по простиранию. По степени разведанности запасы квалифицируются по категории C_2 , а в пределах детализационных участков — по категории C_1 .

По результатам предварительной разведки составляется ТЭД, в котором обосновываются целесообразность и очередность промышленного освоения месторождения способом ПВ.

§ 5. ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Детальная разведка проводится лишь на тех месторождениях, которые по данным ТЭД представляют собой первоочередные объекты промышленного освоения. Как правило, детальная разведка осуществляется не на всем месторождении, а лишь на участках первоочередного освоения для обеспечения фронта работ на несколько ближайших лет. Ограничение объемов и масштабов разведочных работ целесообразно в связи с малыми размерами капитальных вложений в освоение месторождений и отсутствием риска их неэффективного использования. При наличии достоверных общих цифр запасов урановых руд, обладающих благоприятными технологическими свойствами для их разработки способом ПВ, детали строения отдельных участков и блоков всегда могут быть доразведаны в процессе эксплуатации месторождения. Поэтому большие объемы детальных разведочных работ приводят к нежелательному замораживанию средств на длительные сроки.

Основная цель детальной разведки — получение достоверных сведений для разделения балансовых запасов по технологическим (литолого-фильтрационным) типам, исходных данных для проектирования систем выщелачивания урана из недр месторождения, выбора схем размещения технологических скважин и гидродинамических расчетов их эксплуатации.

В задачи детальной разведки входит:

- изучение строения, литолого-фациальных особенностей, эпигенетических изменений пластов и пропластков благоприятного литологического состава, включающих отдельные залежи ураноносных песчаников;

- выявление условий залегания и фильтрационных свойств продуктивных пластов и пропластков с оконтуриванием ограничивающих их локальных водоупоров и зон циркуляции растворов, и выборочное изучение деталей строения этих зон;

- изучение вещественного и гранулометрического состава рудных залежей для разделения урановых руд по геотехнологическим типам и сортам;

- уточнение главных и выявление второстепенных факторов, определяющих выбор систем технических средств выщелачивания урана из руд;

- выявление основных геотехнологических показателей для прогноза процесса формирования продуктивных растворов, определения объемов закисления и выщелачивания по участкам, сложенным рудами различных технологических типов;

- получение исходных данных для обоснования и расчета кондиций к подсчету запасов, оценки коэффициентов извлечения урана и соответствующих им расходов серной кислоты;

- подсчет запасов по категории C_1 отдельно для руд различных геотехнологических типов.

Для целей детальной разведки сеть буровых скважин сгущается до 100—200 м между разрезами и до 50—100 м между смежными скважинами, с детализацией наблюдений на эталонных участках и участках натурального моделирования. По всем скважинам проводится полный комплекс перечисленных выше геологических, геофизических и геохимических наблюдений, отбираются рядовые пробы для определения содержаний урана, радия и элементов-спутников, а также пробы-монолиты для изучения фильтрационных и физико-механических свойств пород и руд, проводятся гидрогеологические и инженерно-геологические наблюдения.

Если при изучении радиологических свойств руд будут выявлены отчетливые закономерности в пространственном размещении руд с различными значениями коэффициента радиоактивного равновесия, то часть скважин может опробоваться только с помощью количественного гамма-каротажа, а для расчета поправок по данным опробования керна должны составляться планы и разрезы зонального размещения K_{pp} .

При разделении ураноносных залежей на технологические типы учитываются значения эффективной пористости пород и руд, степень их литологической однородности, состав и соотношения устойчивых, неустойчивых и растворимых минералов, продуктивность и проницаемость руд. При значениях коэффициента фильтрации менее 0,5 м/сут руды относят к практически непроницаемым, а их запасы — в группу забалансовых. В группу балансовых запасов относят проницаемые руды, среди которых выделяются три геотехнологические сорта:

I. Слабопроницаемые с K_f от 0,5 до 2,5 м/сут.

II. Проницаемые с K_f от 2,5 до 10 м/сут.

III. Хорошо проницаемые с K_f более 10 м/сут.

Для целей подземного выщелачивания в естественном залегании наиболее благоприятны руды II и, тем более, III сортов.

Для получения достоверных сведений о гидрогеологических условиях и геотехнологических свойствах руд, помимо специальных гидрогеологических исследований, на типичных участках месторождения проводятся опытные работы по подземному выщелачиванию урана. Основные задачи этих работ сводятся к получению уточненных геотехнологических показателей в условиях естественного залегания руд и показателей технологического передела продуктивных растворов для оценки запасов урана и проектирования промышленной эксплуатации месторождения. В связи с этим испытания включают полный цикл работ по технологическому переделу продуктивных растворов. Обычно эти работы проводятся совместно с горнодобывающими предприятиями. По их результатам прогнозируется процесс формирования продуктивных растворов в поровом пространстве пород и руд в зависимости от проектируемой схемы расположения нагнетательных и откачных скважин.

Схемы размещения технологических скважин зависят от геологического строения участка, его гидрогеологических условий и геотехнологических свойств руд. Для изометричных в плане рудных залежей с низкими фильтрационными свойствами (K_f от 0,5 до 2,5 м/сут) скважины располагаются равномерно, по квадратной сети. При этом число нагнетательных скважин равно числу откачных (рис. 40, а). Вытянутые в плане залежи с хорошими фильтрационными свойствами (K_f больше 2,5 м/сут) вскрываются чередующимися рядами равномерно расположенных нагнетательных и откачных скважин (рис. 40, б). Для выщелачивания урана из залежей неправильной формы с низкими и анизотропными фильтрационными свойствами используются площадные системы расположения скважин с ячейками квадратной или гексагональной формы (рис. 40, в). В центре таких ячеек располагаются нагнетательные скважины, а по углам откачные (или наоборот). Кроме откачных и нагнетательных скважин для контроля процесса выщелачивания на опытных участках пробуривается система наблюдательных скважин. Расстояния между нагнетательными и откачными скважинами выбираются в зависимости от проектируемой интенсивности отработки месторождения и могут изменяться от нескольких до десятков метров.

Кондиции к подсчету запасов включают следующие главные параметры:

— минимальное промышленное приведенное содержание урана по блоку $C_{min}^{np} = \frac{mc}{M}$;

— предельный размер подсчетного блока;

— бортовое содержание урана (C_b) для выделения рудных интервалов по скважине;

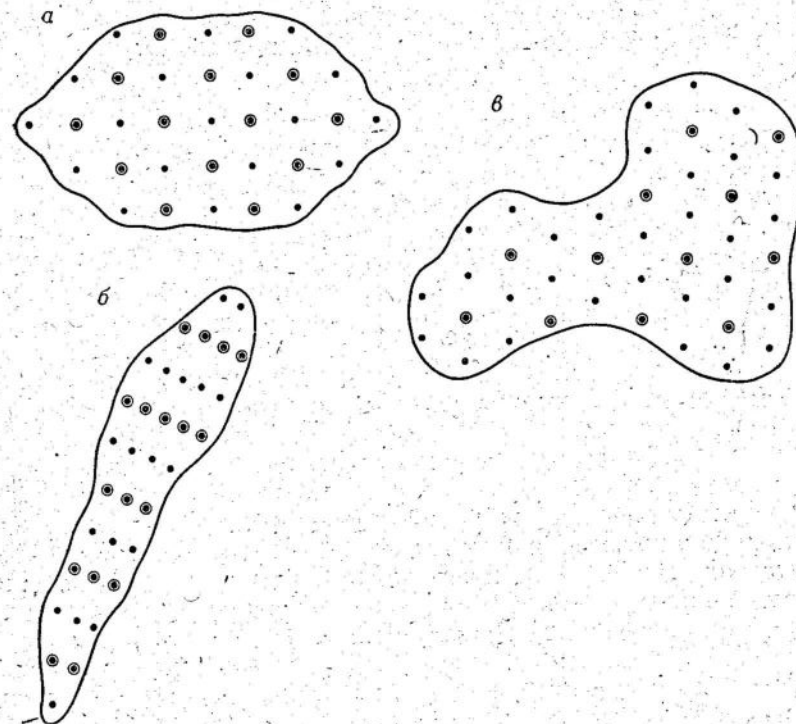


Рис. 40. Основные схемы размещения технологических скважин при бесшахтном выщелачивании металлов [26].

а — равномерная квадратная сетка равнодебитных скважин; б — чередующиеся ряды равномерно расположенных равнодебитных скважин; в — гексагональная сетка скважин

— бортовое приведенное содержание по скважине (C_b^{np}) для оконтуривания блоков;

— максимальный размер пустого прослоя;

— параметры для выделения геотехнологических типов руд.

Расчет минимального промышленного приведенного содержания урана по блоку проводится с учетом минимально допустимой концентрации урана в растворе C_p , коэффициента извлечения урана ε и величины f , обеспечивающей заданное извлечение урана. Величина f выражается отношением массы выщелачивающего раствора (заданной концентрации C_0) к массе выщелачиваемого объема ураноносных пород ($Ж:Т$).

Значение C_{min}^{np} рассчитывается по формуле

$$C_{min}^{np} = \frac{C_p \cdot f}{\varepsilon \cdot 10^4} \quad (12.9)$$

В случаях заметной изменчивости линейных продуктивностей по скважинам устанавливается бортовое приведенное содержание C_6^p на мощность зоны фильтрации раствора (M).

В качестве параметров для выделения геотехнологических типов руд, подлежащих самостоятельной отработке, могут устанавливаться предельные соотношения устойчивых, неустойчивых и растворимых минералов, предельные содержания карбонатов или органического углерода, граничные значения коэффициентов фильтрации руд и другие специфические показатели.

Подсчет запасов выполняется способом блоков или вертикальных разрезов, отдельно по каждому геотехнологическому типу руд. Запасы квалифицируются по категории C_1 . В группу забалансовых запасов относят непроницаемые руды ($K_f < 0,5$ м/сут) независимо от содержания в них урана. Забалансовые запасы оцениваются статистически как в контурах, так и за контурами зоны фильтрации раствора без их геометризации в недрах. Помимо балансовых геологических запасов с учетом результатов опытных работ оцениваются извлекаемые запасы, рекомендуются рациональные схемы размещения технологических скважин и прогнозируется динамика изменения фильтрационных свойств продуктивных пород в процессе подземного выщелачивания урана [26].

Результаты детальной разведки участков месторождений ураноносных песчаников используются для проектирования работ по освоению методом ПВ.

§ 6. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА

Эксплуатационная разведка проводится в процессе подготовки и проведения работ по добыче урана способом ПВ для детализации представлений о размещении оруденения в пределах эксплуатационных участков и уточнения динамики продуктивных растворов в зависимости от анизотропии строения рудоносных блоков.

В задачи эксплуатационной разведки входит:

- детализация сведений о влиянии состава пород и руд на концентрацию урана в растворах и на динамику изменения окислительно-восстановительных условий в зоне фильтрации;

- уточнение схем размещения технологических скважин и режима их работы;

- выяснение особенностей влияния локальных структур и тектонических нарушений на гидродинамический режим работы эксплуатационных блоков;

- уточнение всех геотехнологических параметров выщелачивания, размеров и типов фильтров скважин, их расположения в зависимости от технических характеристик насосов и др.

Особое внимание в процессе эксплуатационной разведки уделяется мерам по охране среды, предупреждению возможностей загрязнения поверхностных и питьевых вод, потерь кислоты в скважинах и другим мероприятиям по охране недр и окружающей природы.

В задачу эксплуатационной разведки входит также проведение работ по оценке полноты выщелачивания для расчета коэффициентов извлечения урана из недр. С этой целью отрабатанные блоки подвергаются систематическому опробованию на уран с последующим подсчетом оставшихся в недрах запасов. Существенную помощь при проведении этих операций оказывают геофизические методы исследования скважин — гамма-картаж и различные методы электрического каротажа.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ КАРБОНАТИТОВ

Редкометальные карбонаты являются одним из важнейших промышленных типов месторождений ниобия, из которых возможно попутное извлечение редких земель цериновой группы, тантала, фосфора, циркона, меди, железа, реже урана и тория, а также флогопита и флюорита. Собственно карбонаты сложены породами, состоящими в основном из кальцита, доломита, анкерита и сидерита. Они приурочены к краевым частям платформ, к зонам глубинных разломов, рассекающих платформы или консолидированные складчатые области, обрамляющие платформенные сооружения [7].

Отличительные особенности редкометальных карбонатов: — широкие возрастные пределы карбонатов от средне-протерозойских до мезо-кайнозойских. Самый древний возраст составляет 2 млрд. лет;

— тесная пространственная связь месторождений с ультра-основными — щелочными интрузивами центрального типа, ядра (реже периферийные участки в случае обратной зональности) которых сложены карбонатами;

— многостадийность процесса образования, причем с карбонатами поздних стадий ассоциируют редкоземельная, флюоритовая и полиметаллическая минерализации. С ранними стадиями связано железорудное, тантало-ниобиевое ниобиевое, циркониевое и фосфорное оруденение;

— неравномерное размещение рудных концентраций в контурах промышленного оруденения;

— разнообразие форм и крупные размеры рудных тел, среди которых преобладают трубо- и воронкообразные залежи, жилы и штокверки;

— сложный состав карбонатитовых руд, среди которых преобладают пироксеновые, кальцитовые, кальцит-доломитовые и редкоземельные анкерит-сидеритовые карбонаты;

— нечеткие контакты рудных тел и зависимость морфологии от кондиций, принятых в основу их оконтуривания.

В пределах карбонатитовых массивов кроме собственно коренных месторождений встречаются площадные и линейные коры выветривания, а также аллювиальные, аллювиально-делювиальные и озерные россыпи. Поэтому при поисках и разведке необходимо предвидеть возможность выявления наиболее богатых экзогенных образований, которые развиваются по коренным карбонатам. Кроме этого, наряду с округлыми массивами центрального типа могут быть встречены и линзо-

видные, а также линейно-вытянутые тела, существенно отличные от первых.

В пределах коренных карбонатитовых месторождений различают несколько типов редкометального оруденения:

- 1) пироксеновый (или броданит)-апатитовый (ниобий-фосфорный);
- 2) гатчеттолит-апатитовый (тантало-ниобиево-фосфорный);
- 3) магнетит-апатит-бадделейт-гатчеттолитовый (железо-фосфорно-цирконовый);
- 4) магнетит-апатит-бадделейт-гатчеттолитовый (железо-фосфорно-цирконий-тантало-ниобиевый);
- 5) бастнезитовый в анкеритовых карбонатах (редкоземельный);
- 6) флюоритовый в анкеритовых карбонатах.

Пространственно эти типы оруденения обычно разобщены, но иногда совмещаются.

В качестве примера рассматривается методика поисков и разведки редкометальных карбонатов, расположенных в краевой части древней платформы.

В соответствии с разведочной классификацией месторождений (гл. IX, § 1) редкометальные карбонаты относятся ко второй или к третьей группам (по классификации ГКЗ) со сложным строением и согласным залеганием рудных образований.

§ 1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Поискам редкометальных карбонатов предшествует специализированное геологическое картирование масштабов 1:50 000 и 1:200 000.

Методика специализированного картирования, поисков и разведки месторождений редкометальных карбонатов рассматривается на примере района, расположенного в песчано-сланцевых породах верхнего протерозоя. Район приурочен к периферии крупного выступа архейских пород, прорванных многочисленными интрузивами различного состава и возраста. Он представляет собой блок земной коры, ограниченный продольными разломами первого порядка и системами долгоживущих поперечных разломов второго и третьего порядков.

Прогнозные и поисковые работы должны проектироваться на основе геологической, прогнозно-металлогенической и геохимической карт, составленных с учетом данных региональных геофизических, геохимических и шлиховых съемок.

Специализированная геологическая съемка масштаба 1:200 000 проводится на всей территории рудного района для выявления и оценки потенциальных рудных узлов. В процессе съемки особое внимание обращается на массивы ультра-

основных — щелочных пород центрального типа в пределах грабеновых структур, прослеживаются ограничивающие их продольные разломы и системы поперечных и диагональных разломов.

Массивы ультраосновных — щелочных пород центрального типа наиболее надежно выявляются с помощью аэрометодов по магнитным и радиометрическим аномалиям, иногда они дешифрируются и на аэрофотоснимках. Эти массивы и связанные с ними карбонатиты проявляются при аэромагнитной съемке отчетливыми магнитными аномалиями, причем ультраосновные породы характеризуются положительными аномалиями, а щелочные — отрицательными. Карбонатиты фиксируются аэрогамма-спектрометрической съемкой как радиоактивные аномалии со смешанной урано-ториевой природой активности, так как в них постоянно присутствуют радиоактивные минералы — пироксид, гатчеттолит и монацит (рис. 41). При дешифрировании аэрофотоснимков в рельефе четко выделяются округлая и эллипсовидная формы выходов массивов щелочных и ультраосновных пород.

По данным шлихового опробования, особую ценность представляют сведения об ассоциациях шлиховых минералов. О появлении ультраосновных — щелочных пород и карбонатитов можно судить по резкому увеличению в шлихах магнетита в магнитной фракции, шерломита, ильменита, циркелита, бадделита и колумбитизированного пироксидов — в электромагнитной, апатита, пироксидов и карбонатов редких земель (бастнезита, паризита) — в немагнитной фракции шлихов.

На площадях прогнозируемых рудных узлов проводятся специализированные геологические съемки масштаба 1:50 000 (1:25 000) с целью оконтуривания и оценки перспективных редкометаллических полей.

При специализированных геологических съемках следует иметь в виду, что магматические образования и ранние кальцитовые карбонатиты обычно образуют кольцевые структуры, более поздние анкеритовые карбонатиты слагают полукольцевые или линейные

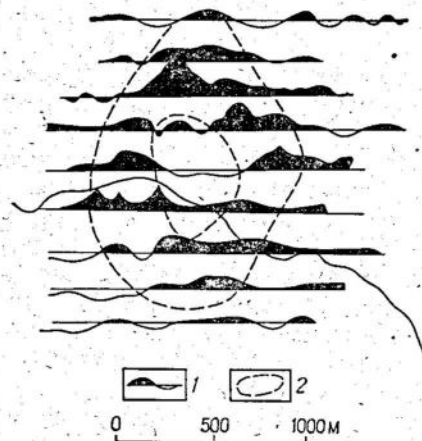


Рис. 41. Кольцевое строение аэрогамма-аномалий над одним из массивов карбонатитов (по Г. А. Поротовой и др.).

1 — кривые интенсивности гамма-излучения (1 Ом = $7,2 \cdot 10^{-14}$ А/кг); 2 — контуры зон различной радиоактивности

структуры, приуроченные к тектоническим нарушениям, причем вмещающие карбонатизированные породы нередко содержат повышенные концентрации ниобия.

Помимо геологических, прогнозно-металлогенических, геофизических карт и карт наземной радиометрии, по данным специального картирования составляются карты районирования территории по трудности их опосредования, карты достоверности проведенных ранее геологических и геофизических работ, а также карты фактических материалов, послуживших основой для оценок перспектив изучаемых площадей.

§ 2. ПОИСКОВЫЕ РАБОТЫ

Поисковые работы проводятся в пределах перспективных рудоносных полей, выявленных и оцененных по результатам специализированных геологических съемок. Цель поисковых работ — обнаружение и прогнозная оценка рудоносных участков. В задачи поисковых работ входят:

— выявление поисковых критериев и признаков редкометаллических карбонатитов и изучение особенностей их проявления в данной геологической обстановке;

— изучение перспективных участков потенциальных месторождений с детализацией одного из них для получения сведений, позволяющих судить о вероятной промышленной ценности месторождения.

Для выявления рудных тел проводится специализированная геологическая съемка масштаба 1:10 000, включающая детальное минералогическое-петрографическое изучение пород. В результате съемки выявляется характер зонального строения массива и оконтуриваются тела карбонатитов различного состава. По данным литохимической съемки определяются общие контуры ореольных полей элементов-индикаторов: ниобия, циркония, стронция, редких земель, фосфора и марганца и оцениваются их площадные продуктивности.

Поиски рудоносных участков целесообразно начинать с наземных геофизических работ, включая магнитометрическую, гамма- и литохимическую съемки масштаба 1:10 000 (1:5000). По данным магнитометрической съемки выделяют сидеритовые и анкеритовые карбонатиты, а по результатам радиометрической и гамма-спектрометрической съемки — участки карбонатитов, наиболее богатые урансодержащими гатчеттолитом и пироксидом. Литохимической съемкой устанавливаются ореолы рассеяния ниобия, циркония, редких земель, стронция, фосфора и марганца. Повышенные содержания марганца и редких земель тяготеют к площадям развития сидеритовых и анкеритовых редкоземельных карбонатитов, а ниобия, стронция и фосфора — к площадям развития кальцитовых карбонатитов.

с применением приемов и методов геометризации рудовмещающих структур.

Запасы категории C_2 подсчитываются по участкам детализационных работ, как правило, способами геологических блоков и модификации «среднего арифметического».

По результатам поисково-оценочных работ составляется ТЭО, необходимое для проведения предварительной разведки и проектирования дальнейших геологоразведочных работ.

§ 4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Предварительная разведка проводится на месторождениях редкометальных карбонатитов, получивших положительную оценку по результатам поисково-оценочных работ.

Объектами предварительной разведки являются месторождения, а объектами оценки — отдельные участки месторождений (продуктивные зоны), в пределах которых запасы оцениваются по отдельным подсчетным блокам.

Основные задачи предварительной разведки:

- изучение особенностей строения карбонатитовых тел и их оконтуривание;

- выявление условий залегания и строения продуктивных зон редкометальных карбонатитов с оценками характеристик изменчивости;

- выборочная оценка условий залегания, морфологии и строения одной-двух залежей в пределах эталонных участков продуктивной зоны;

- изучение вещественного состава и текстурно-структурных особенностей природных типов руд, выделение вероятных технологических типов и сортов руд;

- оценка горно-технических условий будущей эксплуатации;

- получение исходных данных для расчета временных кондиций к подсчету запасов и предварительных технико-экономических показателей для составления ТЭД;

- подсчет запасов категории C_2 по всем блокам продуктивных зон и запасов категории C_1 по участкам детализационных работ. Карбонатитовые месторождения обычно относят ко II группе по классификации запасов (ГКЗ).

Предварительная разведка осуществляется скважинами колонкового бурения системами вертикальных разрезов. Ранее пройденная сеть магистральных канав сгущается до расстояний порядка 200 м между профилями. Бурение колонковых скважин проводится для прослеживания оруденения на глубины от 100 до 500 м. Скважины бурятся по квадратной сети 200×200 м или по профилям с расстояниями между профилями 400 м, а между скважинами 200 м. Буровые работы сопровождаются комплексом геофизических и геохимических исследований. Сеть скважин выбирается с таким расчетом, чтобы не пропустить

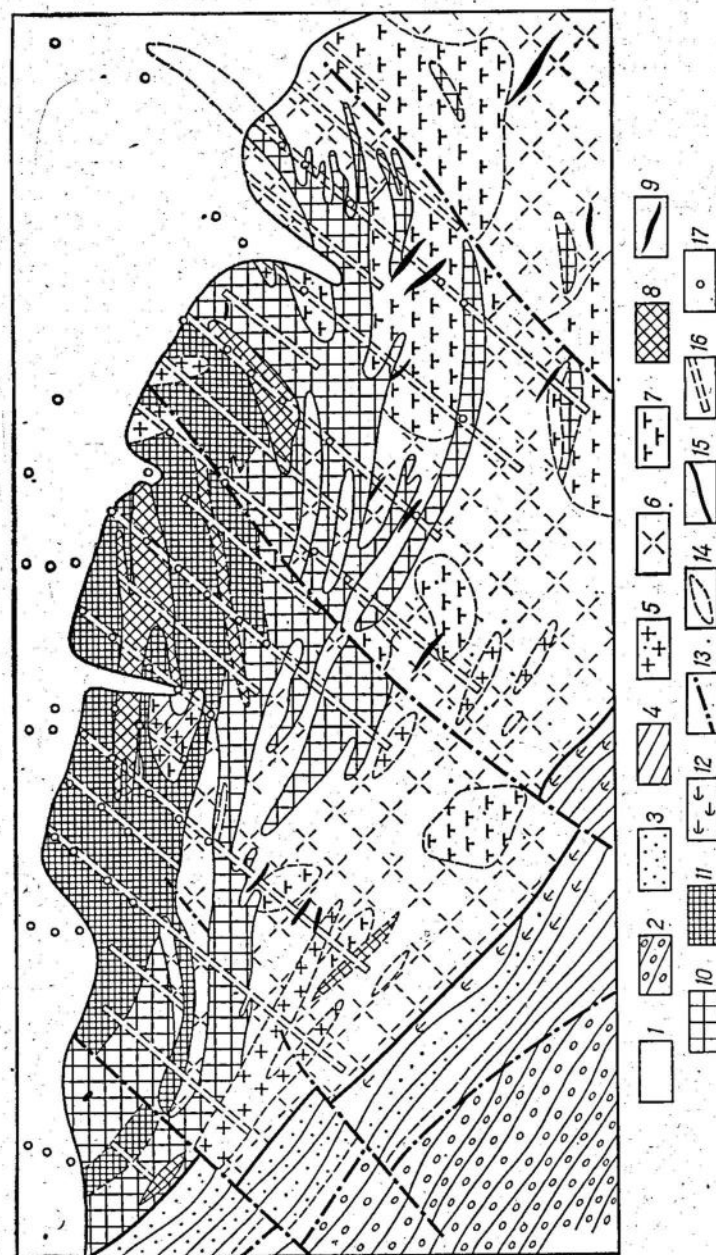


Рис. 43. Схема предварительной разведки пироклоровых карбонатитов (по И. Егорову).

1 — участок элювиально-аллювиальной россыпи; 2 — древние конгломераты; 3 — песчаники; 4 — сланцы филлитовидные и песчано-глинистые; 5 — нефелиновые сиениты; 6 — ибидиты и ургиты; 7 — мельчайшие и нефелиновые пироксениты; 8 — анкеритовые карбонатиты мелкосерпентинистые; 9 — жилы анкеритовых карбонатитов; 10 — кальцитовые карбонатиты крупнозернистые; 11 — кальцитовые карбонатиты мелкосерпентинистые; 12 — фенитизация; 13 — тектонические нарушения; 14—15 — контакты пород предполагаемые (14) и установленные (15); 16 — разведочные канавы; 17 — разведочные скважины.

крупных рудных тел и чтобы каждый подсчетный блок продуктивной зоны был бы вскрыт не менее чем 10—12 пересечениями. На участках детализационных работ сеть скважин сгущается в два раза и более (рис. 43).

По данным картировочных шурфов, канав и отдельных скважин поисково-разведочного бурения с использованием методов структурной геофизики составляется геологическая карта поверхности месторождения в масштабах 1 : 5000—1 : 2000 (рис. 44).

Изучение минерального состава руд проводится по канавам и кернам скважин с применением микроскопических и физико-химических методов. Для изучения химического состава руд проводятся спектральные и химические анализы их проб. Тех-

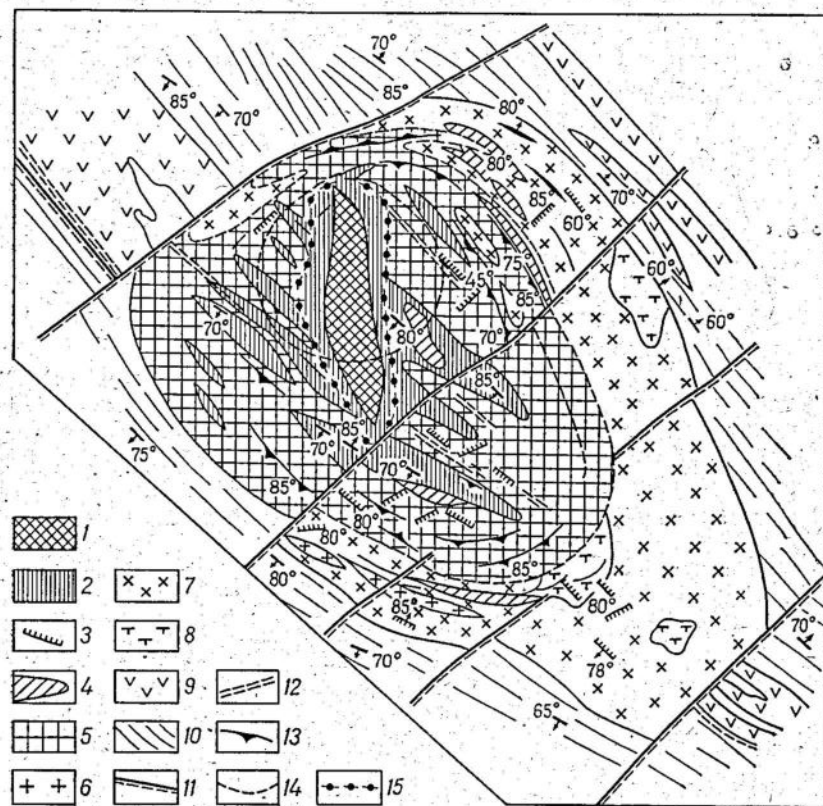


Рис. 44. Схема геологического строения (по А. А. Фролову).

1 — анкеритовые и анкерит-доломитовые карбонаты; 2 — мелкозернистые кальцитовые карбонаты; 3 — жильные кальцитовые карбонаты; 4 — пегматонидные кальцитовые карбонаты; 5 — крупнозернистые кальцитовые карбонаты; 6 — нефелиновые и щелочные сиениты; 7 — ийолиты; 8 — мельтейгиты; 9 — габбро-диабазы; 10 — сланцы и песчаники; 11 — тектонические нарушения; 12 — зоны рассланцевания; 13 — полостчатость карбонатов; 14 — границы распространения останцов пикритовых порфиров и их брекчий; 15 — ореол анкеритизации кальцитовых карбонатов

нологические свойства руд предварительно оцениваются по лабораторным пробам и по аналогии с рудами уже освоенных месторождений редкометальных карбонатитов. Для исследования особенностей руд из шурфов, канав и керна скважин отбираются технологические лабораторные пробы массой 1,5—2,5 т. Эти пробы должны отражать по составу руды месторождения различных технологических типов и сортов. Задача технологических испытаний — определение возможности и способов обогащения руд.

Подсчет запасов выполняется способом вертикальных разрезов без ограничения размеров подсчетных блоков. Запасы оцениваются по категории C_2 , а на участках детализационных работ по категории C_1 .

Кроме подсчета запасов по категориям C_2 и C_1 оцениваются и уточняются прогнозные запасы на далеких флангах и глубоких горизонтах месторождения с учетом выявленных геологических, геофизических и геохимических закономерностей.

По результатам предварительной разведки составляется ТЭД, в котором приводится предварительная геолого-экономическая характеристика месторождения, обосновывается целесообразность и очередность его промышленного освоения.

§ 5. ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Если по данным ТЭД месторождение признается объектом первоочередного промышленного освоения, то на нем ставится детальная разведка, которая начинается на наиболее перспективном и доступном участке, суммарные запасы которого обеспечивают работу горного предприятия не менее чем на 25 лет.

Цель детальной разведки — уточнение запасов и средних содержаний ниобия и редких земель в рудах по каждому подсчетному блоку, а также детализация всех горно-геологических и технологических параметров отдельных рудных залежей. Задачами детальной разведки являются:

- изучение геологических особенностей строения карбонатитов, определяющих размеры и морфологию залежей в пределах продуктивных зон, а также закономерностей размещения в них полезных компонентов;

- выявление контуров, условий залегания, внутреннего строения отдельных залежей и характеристик изменчивости важнейших геологоразведочных параметров;

- выборочная оценка условий залегания и строения наиболее типичных морфологически обособленных участков залежей;

- проведение дополнительных работ для оценки запасов редкометальных руд на глубоких горизонтах;

- детальное изучение минерального состава, текстурно-структурных особенностей руд и их технологических свойств для разделения природных типов и сортов с выявлением сравнительных характеристик качества руд различных залежей;

— детальное изучение площадных и линейных кор выветривания с целью выявления вторично обогащенных участков;

— детальное, поблочное изучение технологических свойств руд и горнотехнических условий будущей эксплуатации;

— разработка и обоснование кондиций к подсчету запасов по рудным залежам;

— подсчет запасов по рудным залежам и отдельным подсчетным блокам по категории В — на участках детализации, по категории С₂ — на флангах и глубоких горизонтах месторождения; С₁ — на остальных участках месторождения.

Детальная разведка месторождения редкометальных карбонатитов осуществляется бурением колонковых скважин, часто наклонных под углом 70—75° к горизонту. Скважины бурятся по квадратной сетке 100×100 м по профилям с прямоугольной ячейкой 200×100 м. При проведении детализационных работ размеры, формы и ориентировка ячеек разведочных сетей корректируются с учетом анизотропии, формы и углов склонения конкретных залежей. Размеры участков детализации должны быть настолько велики, чтобы их суммарные запасы достигали не менее 20 % от суммы всех детально разведанных запасов.

Изучение технологических свойств руд для составления наиболее эффективных схем обогащения требует значительных затрат времени и труда в связи с их сложным минеральным составом. Для каждого типа руд и по отдельным залежам отбираются самостоятельные технологические пробы массой 1,5—2 т. После изучения технологических свойств на отдельных технологических пробах схемы обогащения уточняются в полужавоцких условиях. Для полужавоцких испытаний отбирается проба массой около 500 т с участка первоочередной отработки. Отбор технологической пробы для полупромысловых испытаний производится из горных выработок, в которых руда не подвергнута поверхностным изменениям.

Горно-геологические условия эксплуатации месторождения изучаются в процессе проведения всех разведочных выработок и уточняются на участках детализации разведочных работ. Карбонатиты характеризуются сложным геологическим строением и рядом структурных и минералогических особенностей, что отличает их от других месторождений и определяет специфику методики их изучения.

Подсчет запасов производится на основе утвержденных кондиций, которые разрабатываются и утверждаются в ГКЗ в завершающий период детальной разведки. Главный кондиционный показатель к подсчету запасов — минимальное промышленное содержание ниобия, фосфора и редких земель в подсчетном блоке. Обычно минимальное промышленное содержание устанавливается для условного ниобия с помощью пересчетных коэффициентов. Значения минимального промышленного содержания зависят от величины годовой производи-

тельности горного предприятия. Устанавливаются и другие кондиционные показатели: бортовое содержание условного ниобия для оконтуривания балансовых и забалансовых запасов по рудным залежам, минимальные рабочие мощности рудных тел и максимальные мощности участков пустых пород, включаемых в контур подсчета запасов, предельные размеры подсчетных блоков. При наличии нескольких типов руд для каждого определяются соответствующие кондиционные показатели.

Подсчет запасов осуществляется способом вертикальных разрезов. Запасы детально разведанных участков месторождения оцениваются по категории С₁, в пределах участков — по категории В, а предварительно оцененные запасы на флангах и глубоких горизонтах — по категории С₂.

Результаты детальной разведки рассматриваются в ГКЗ СССР, которая утверждает разведанные запасы и определяет степень готовности месторождения для промышленного освоения. Финансирование работ по проектированию и строительству горного предприятия производится только после утверждения запасов в ГКЗ СССР.

§ 6. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА

Эксплуатационная разведка проводится во все время существования горнорудного предприятия с целью детализации строения и состава редкометальных карбонатитов, уточнения технологических свойств руд и горнотехнических условий эксплуатации разрабатываемых блоков. Все капитальные, горно-подготовительные, нарезные и очистные выработки документируются и опробуются. Технические средства разведки зависят от принятой системы вскрытия и разработки месторождения. Густота сети сопровождающей и опережающей разведок определяется размерами объемов селекции при добыче.

По данным геолого-геофизической документации очистных блоков создаются блокочные карточки, которые служат основой для составления сортовых планов отрабатываемых блоков. При проведении опробования одна из основных задач — определение потерь и степени разубоживания руд. В процессе эксплуатационной разведки продолжается изучение вещественного состава и технологических свойств руд, вплоть до отбора технологических проб и проведения полного комплекса исследований.

Особенность подсчета запасов заключается в необходимости составления балансов и оперативного учета с разделением запасов по степени подготовленности. Наиболее благоприятные отношения вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов на месторождении составляют 4:2:1. Для выявления новых участков, обеспечивающих прирост запасов редких металлов и продление срока существования горного предприятия, на флангах и на глубоких горизонтах месторождения нужно проводить поисковые и поисково-разведочные работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР/Под ред. А. П. Виноградова.— М.: Наука, 1967—1969 гг., 241 карта.
2. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений: Методическое руководство/В. П. Воробьев, А. В. Ефимов, М. И. Альтшулер и др. Под ред. В. П. Воробьева.— Л.: Недра, 1977.— 216 с.
3. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков слабопроявленных месторождений урана: Методическое руководство/А. И. Краснов, А. В. Матвеев, Г. С. Смирнов и др.— Л.: Недра, 1975.— 160 с.
4. Беус А. А., Григорян С. В. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых.— М.: Недра, 1975.
5. Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия.— М.: Недра, 1975.— 247 с.
6. Типы месторождений редких элементов и их поисковые критерии.— В кн.: Геология месторождений редких элементов. Вып. 14/Под ред. А. И. Гинзбурга и Е. М. Эпштейна.— М.: Госгеолтехиздат, 1961.— 148 с.
7. Геологическое строение и минералого-геохимические особенности редкометаллических карбонатитов.— В кн.: Геология месторождений редких элементов. Вып. 17/Под ред. А. И. Гинзбурга и Е. М. Эпштейна.— М.: Госгеолтехиздат, 1962.— 154 с.
8. Генетические типы месторождений редких элементов.— В кн.: Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов.— М.: Недра, т. 3, 1966.— 860 с.
9. Гидротермальные месторождения урана/Под ред. Ф. И. Вольфсона.— М.: Недра, 1978.— 448 с.
10. Гинзбург А. И. Современное состояние учения о пегматитах.— В кн.: Проблемы минерального сырья.— М.: Наука, 1975, с. 144—162.
11. Грабовников В. А. Геотехнологические расчеты и исследования при разведке месторождений металлов для подземного выщелачивания: Обзор/ОЦНТИ.— М.: ВИЭМС, 1978.— 43 с.
12. Григорян С. В., Янишевский Е. М. Эндогенные геохимические ореолы рудных месторождений.— М.: Недра, 1968.— 197 с.
13. Евсеева Л. С., Перельман А. И., Иванов К. Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза.— 2-е изд., доп.— М.: Атомиздат, 1974.— 280 с.
14. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений/Мингео СССР.— М., 1974.— 108 с.
15. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений.— М.: Недра, 1965.— 227 с.
16. Каждан А. Б., Бойцов В. Е., Зимин Д. Ф. Геология и методы поисков урановых месторождений.— М.: Недра, 1971.— 192 с.
17. Каждан А. Б., Гуськов О. И., Шаманский А. А. Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых.— М.: Недра, 1979.— 168 с.
18. Каждан А. Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов.— М.: Высшая школа, 1966.— 280 с.
19. Каждан А. Б. Разведка месторождений полезных ископаемых.— М.: Недра, 1977.— 328 с.
20. Ковалевский А. Л., Ковалевская О. М. Биогеохимические поиски бериллиевых месторождений.— Новосибирск: Наука, 1979.— 192 с.
21. Ковалевский А. Л. Особенности формирования рудных биогеохимических ореолов.— Новосибирск: Наука, 1975.— 116 с. с илл.
22. Количественная оценка прогнозных запасов и перспективных ресурсов минерального сырья при региональных металлогенических исследованиях (тезисы докладов Всесоюзного семинара).— Л.: ВСЕГЕИ, 1978.— 176 с.
23. Красников В. И. Геологические предпосылки поисков месторождений урана.— М.: Атомиздат, 1962.— 188 с.

24. Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые/Под ред. Д. В. Рундквиста.— Л.: Недра, 1978.— 608 с.
25. Курс рудных месторождений/В. И. Смирнов, А. И. Гинзбург, В. М. Григорьев и др.— М.: Недра, 1980.
26. Лунев В. А., Грабовников Б. Л., Толкунов Б. Л. Инженерные расчеты подземного выщелачивания металлов/МГРИ.— М., 1977.— 98 с.
27. Месторождения радиоактивных и редких металлов/В. Н. Котляр, И. М. Баюшкин, В. И. Данчев и др.— М.: Атомиздат, 1973.— 336 с.
28. Месторождения урана и редких металлов (практикум)/Под ред. Н. П. Лаврова.— М.: Атомиздат, 1976.— 288 с.
29. Методы поисков урановых месторождений/Под ред. Д. Я. Суражского.— М.: Недра, 1969.— 392 с.
30. Овчинников Л. Н., Солодов Н. А. Формационная парагенетическая классификация промышленных месторождений литофильных редких металлов.— В кн.: Проблемы минерального сырья.— М.: Недра, 1975, с. 71—109.
31. Основные принципы и методика радиохимического картирования горных пород/Труды ВСЕГЕИ.— Л., т. 164, 1968.— 138 с. с илл.
32. Пахомов М. И., Пахомов В. И. Новый способ выделения зон гидротермально-метасоматических изменений по петрофизическим данным при поисковых и прогнозных работах.— Сер. общая и региональная геол. и геол. картирование.— М.: ОНТИ ВИЭМС, № 8, 1980.— 48 с.
33. Пухальский Л. Ч., Шумилин М. В. Разведка и опробование урановых месторождений.— М.: Недра, 1977.— 248 с.
34. Радиогидрологический метод поисков месторождений урана/Токарев А. Н., Кунель Е. Н., Попова Т. П. и др.— М.: Недра, 1975.— 255 с.
35. Рудные месторождения СССР/Под ред. В. И. Смирнова.— М.: Недра, 1974, т. 2, с. 319—387.
36. Рудные месторождения СССР/Под ред. В. И. Смирнова.— М.: Недра, 1974, т. 3.— 472 с.
37. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре.— Л.: Недра, 1974.— 231 с.
38. Соловов А. П. Современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений.— Вестник МГУ, № 2, 1978, с. 3—10.
39. Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана.— М.: Атомиздат, 1960.— 240 с.
40. Суражский Д. Я. К вопросу о стадийности разведки и классификации запасов твердых полезных ископаемых.— Советская геология, 1974, № 2, с. 3—8.

Автомобильные гамма-поиски 150
 Автохтонные отложения 96
 Актинон 85
 Альбититы редкометалльные 35
 Альбититы ураноносные 45
 Аргиллизиты ураноносные:
 — в вулканитах 51
 — в углеродисто-кремнистых отложениях 50
 Аргиллизиты флюорит-берtrandитовые 37
 Ареалы рудных элементов 87
 Аэрогамма-спектрометрия 146
 Аэрорадиометрические съемки 146
 Барьеры поглощения 93
 Березиты ураноносные 48
 Бериллий 8
 Благоприятные критерии 56
 Выходы руд 76
 Вычисление средних 204
 Гамма-поиски 152
 Гамма-спектрометрия 154
 Геологическая съемка специализированная 209
 Геолого-математическое моделирование 226
 Геолого-экономическая оценка 196
 Горизонт представительный 96
 Глубинные методы 155
 Граниты колумбитоносные 33
 Дальнеприносные отложения 94, 155
 Дефекты радиационные 77
 Дистанционные методы 207
 Дифференциальная интерпретация 121
 Жильные урановые месторождения 49
 «Замыкающие» затраты 218
 Запасы прогнозные 211, 215, 218
 Запасы разведанные 222
 Запасы руд 15, 25
 Зональность ореолов 163
 Зоны выноса 64, 88, 144
 Зоны привноса 64, 88, 144
 Иерархия структурных уровней 58
 Индикаторное отношение 166
 Интегральная интерпретация 119
 Калиевые ураноносные метасоматиты 50
 Карбонатно-магнезиальные ураноносные метасоматиты 46

Карбонатиты редкометалльные 38
 Качество руд 15, 23
 Кларк 207
 Кларковые концентрации 78
 «Ключевой» участок 108
 Кондиции:
 — к качеству руд 197
 — к оконтуриванию 197
 Контуры:
 — блоковые 203
 — сортовые 203
 Компоненты ландшафта 96
 Коры выветривания 106
 Коэффициент контрастности 163
 — рудоносности 206
 Крайгинг 205
 Критерии:
 — поисков 66
 — поисково-разведочные 69
 — прогноза 63
 Ландшафты 96
 — аридные 99
 — географические 96
 — геохимические 97
 — горные 105
 — гумидные 102
 — лесные 102
 — простые 109
 — сложные 109
 — тундр 105
 Ландшафтно-структурные блоки 109
 — зоны 109
 Линейный эквивалент пробы 113
 Литий 7
 Лопаритоносные луювриты 40
 Методы поисков:
 — геолого-минералогические 144
 — геохимические 141, 159
 — радиометрические 141, 145
 Ниобий 12
 Наземные методы поисков 150
 Область:
 — аридная 98
 — гумидная 98
 Обогащение руд 18
 Обработка проб 129
 Объемные массы 126
 Оконтуривание 200
 Опробование:
 — геохимическое 111, 116
 — радиометрическое 112
 — рядовое 111, 118
 — техническое 112, 126

— технологическое 111, 125
 — ядерно-физическое 124
 Оптимизация условий геологоразведочных работ 184
 Осколковая радиография 214
 Ореолы:
 — биогеохимические 92
 — водные 171
 — вторичные 81, 89
 — литогеохимические 159
 — наложенные 89
 — остаточные 80
 — первичные 78
 — радиационные 83
 — эманационные 85
 Ореольные зоны 78, 85, 89
 — поля 87
 Палеоландшафты 106
 Палеогеографические карты 106
 Пегматиты редкометалльные 31
 Подсчет запасов 197
 Поиски 140, 141, 213
 Поисково-оценочные работы 216
 Показатель зональности 164
 Поправочные коэффициенты 206
 Признаки оруденения:
 — прогнозные 87
 — поисковые 83
 — поисково-оценочные 76
 Природные условия 95
 Прогнозно-металлогенические исследования 207
 Промышленные типы месторождений 30
 Продуктивные залежи 58
 — зоны 58
 Равновесие радиоактивное 114
 Радий 22
 Радиометрические методы 145
 Радон 157
 Разведка:
 — в пределах горного отвода 226
 — детальная 177, 221
 — предварительная 177, 218
 — эксплуатационная 177, 224
 Редкие земли 8
 Россия редкометалльные 41

Рудная зона 70
 — провинция 58
 Рудное месторождение 56
 — локальное обособление 57
 — поле 57, 64
 — тело (залежь) 57
 Рудный район 58, 61
 — узел 58, 63
 Ряды водной миграции 90
 Свинец аномальный 82
 — радиогенный 82, 173
 Содержание:
 — бортовое 197
 — минимальное промышленное 196
 Статистический способ подсчета запасов 197
 Съемки:
 — пешеходные 152
 — плужные 156
 Тантал 12
 Технологические свойства руд 18, 27
 Типы радиоактивных вод 91
 Торий 21
 Торий-урановое отношение 228
 Торон 157
 Уран 21
 — подвижный 87
 Ураганные пробы 205
 Участок рудной залежи 58
 Фациальные типы 31
 Формации месторождений 30
 Цирконий 13
 Шлихи 84
 Шлиховой метод 144
 Шпуровая съемка 156
 Эйситы ураноносные 47
 Элементы-спутники 78
 Элементы-индикаторы:
 — надрудные 80
 — подрудные 80
 Эманационный метод поисков 157
 Эффективный атомный номер 120
 Ядерно-физические методы 194

Предисловие	3	§ 3. Рядовое, технологическое и техническое опробование в естественном залегании	118
Введение	4	§ 4. Опробование руд редких и радиоактивных элементов в рыхлом перемешанном состоянии	128
Глава I. Требования промышленности к месторождениям редких металлов	6	§ 5. Методы обработки и анализ проб	129
§ 1. Свойства и распространенность редких металлов	7	§ 6. Контроль процесса опробования	134
§ 2. Требования промышленности к качеству руд	15	Глава VIII. Методы поисков урановых и редкометалльных месторождений	139
§ 3. Требования промышленности к запасам редких металлов	15	§ 1. Геологическая основа поисков	139
§ 4. Условия разработки месторождений и технологические свойства руд	18	§ 2. Геолого-минералогические методы поисков	144
Глава II. Требования промышленности к месторождениям урана	21	§ 3. Радиометрические методы поисков	145
§ 1. Свойства и распространенность радиоактивных металлов	21	§ 4. Геохимические методы поисков	159
§ 2. Требования промышленности к качеству руд	23	§ 5. Использование данных по изотопному составу свинцов и определению радиационных дефектов кристаллов для оценки ураноносности изучаемых площадей	173
§ 3. Требования промышленности к запасам урановых руд	25	Глава IX. Методика разведки месторождений редких и радиоактивных металлов	177
§ 4. Условия разработки урановых месторождений и технологические свойства руд	25	§ 1. Разведочная классификация месторождений	177
§ 5. Обеспеченность запасами и перспективы потребления урана и тория	28	§ 2. Оптимизация условий геологоразведочных работ	184
Глава III. Промышленные типы урановых и редкометалльных месторождений	30	§ 3. Изучение месторождений в процессе разведочных работ	186
§ 1. Промышленные типы месторождений редких металлов	31	§ 4. Геолого-экономическая оценка месторождений и кондиции к подсчету запасов	196
§ 2. Промышленные типы урановых месторождений	43	§ 5. Подсчет запасов	197
Глава IV. Благоприятные геологические критерии уранового и редкометалльного оруденения	56	Глава X. Особенности проведения геологоразведочных работ на разных стадиях	207
§ 1. Критерии рудных районов и провинций	59	§ 1. Региональные прогнозно-металлогенические исследования	207
§ 2. Прогнозные критерии рудных узлов и полей	63	§ 2. Специализированные геологические съемки	209
§ 3. Поисковые критерии рудных месторождений	66	§ 3. Поисковые работы	213
§ 4. Поисково-разведочные критерии рудоносных зон и рудных залежей	69	§ 4. Поисково-оценочные работы	216
Глава V. Признаки уранового и редкометалльного оруденения	74	§ 5. Предварительная разведка	218
§ 1. Поисково-оценочные признаки рудоносных зон и рудных залежей	76	§ 6. Детальная разведка	221
§ 2. Поисковые признаки месторождений	83	§ 7. Разведочные работы в условиях действующего горного предприятия	223
§ 3. Прогнозные признаки рудных полей и узлов	87	Глава XI. Особенности методики поисков и разведки ураноносных альбититов	227
Глава VI. Природные условия ведения геологоразведочных работ	95	§ 1. Специализированное геологическое картирование	227
§ 1. Принципы ландшафтного районирования	96	§ 2. Поисковые работы	230
§ 2. Ландшафты аридных и полупустынных областей	99	§ 3. Поисково-оценочные работы	232
§ 3. Ландшафты гумидных областей	102	§ 4. Предварительная разведка	234
§ 4. Влияния палеоландшафтных обстановок на проявления признаков уранового и редкометалльного оруденения	106	§ 5. Детальная разведка	237
§ 5. Методика составления ландшафтных карт	107	§ 6. Разведочные работы в условиях действующего горного предприятия	241
Глава VII. Опробование пород и руд	111	Глава XII. Особенности методики поисков и разведки ураноносных песчаников	243
§ 1. Общие положения	111	§ 1. Специализированное геологическое картирование	244
§ 2. Геохимическое опробование при проведении геологосъемочных, поисковых и разведочных работ	116	§ 2. Поисковые работы	247
		§ 3. Поисково-оценочные работы	248
		§ 4. Предварительная разведка	250
		§ 5. Детальная разведка	256
		§ 6. Эксплуатационная разведка	260
			279

Глава XIII. Особенности методики поисков и разведки редкометалльных карбонатитов	262
§ 1. Специализированное геологическое картирование	263
§ 2. Поисковые работы	265
§ 3. Поисково-оценочные работы	266
§ 4. Предварительная разведка	268
§ 5. Детальная разведка	271
§ 6. Эксплуатационная разведка	273
Список литературы	274
Предметный указатель	276

Алексей Борисович Каждан
Николай Николаевич Соловьев

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ
И РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

Редактор издательства Н. И. Мартьянов
Переплет художника Е. Г. Капустянского
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технические редакторы В. В. Соколова, Л. Н. Шиманова
Корректор В. И. Ионкина

ИБ № 3724

Сдано в набор 17.09.81. Подписано в печать 10.12.81. Т-29178. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 17,5. Усл. кр.-отт. 17,5. Уч.-изд. л. 17,84. Тираж 5000 экз. Заказ 287/7971-2. Цена 95 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19
Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.