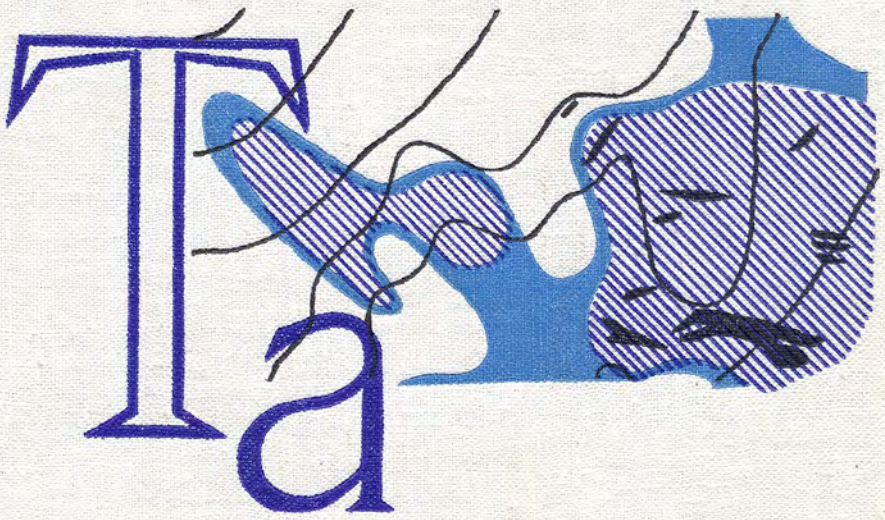
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ



А. А. БЕУС, В. В. БЕРЕНГИЛОВА, Л. И. ГРАБОВСКАЯ,
Г. Г. КОЧЕМАСОВ, Л. А. ЛЕОНТЬЕВА, А. А. СИТНИН

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

(на примере тантала)

Издательство «НЕДРА»
Москва 1968

УДК 550.84 : 553.466

Геохимические поиски эндогенных месторождений редких элементов (на примере тантала). А. А. Беус, В. В. Беренгилова, Л. И. Грабовская, Г. Г. Кочемасов, Л. А. Леонтьева, А. А. Ситнин, 1968 г., стр. 264

На основе большого количества аналитических данных (около 10 000 количественных и приближенно-количественных определений элементов-примесей в породах и минералах и более 200 полных силикатных анализов пород) с применением методов математической статистики выявлены закономерности распределения тантала и его спутников в гранитоидах потенциально-перспективных и безрудных на тантал, а также в эндогенных и экзогенных ореолах собственно танталовых месторождений пегматитового и апогранитового типа. Среднее содержание тантала в гранитоидах Советского Союза установлено 2,5 ± 0,2 *г/т*. Выявлены элементы-индикаторы (Li, Rb, Sn, V) и индикаторные отношения (Mg/Li и Zr/Sn), параметры распределения которых являются критерием оценки потенциальной танталоносности гранитоидных комплексов. Изучены закономерности поведения элементов-примесей в эндогенных ореолах апогранитовых месторождений и установлено, что элементами-индикаторами танталового оруденения являются Li, Rb, Be, Sn, F и Pb. В эндогенных ореолах пегматитовых месторождений тантала индикаторами являются Li, Rb, Cs, Be, Sn, B. Изучены закономерности распределения тантала и его спутников в экзогенных ореолах танталовых месторождений различных ландшафтных зон и выявлены элементы-индикаторы (Li, Rb, Be, Sn, Pb), параметры распределения которых в почвах и растениях являются критериями для поисков месторождений тантала.

В заключении даются конкретные рекомендации по комплексированию и условиям применения геохимических методов поисков эндогенных месторождений редких элементов на примере тантала.

Таблиц 134, иллюстраций 22, библиография — 66 названий.

Коллектив авторов

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ведущий редактор *Т. В. Колошина* Технический редактор *Т. М. Шмакова*
Корректор *Л. И. Окрогло*

Сдано в набор 22/XII 1967 г. Подписано к печати 11/III 1968 г.
Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Печатн. листов 16,5. Бум. № 2. Уч.-изд. л. 17,82.
Т-04359. Тираж 2100 экз. Цена 1 р. 25 к. Заказ № 1355/2583-4. Индекс 1-4-1.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский проспект, 91.

2—9—4
68—301

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая работа является первой попыткой составления монографического руководства, посвященного методам геохимических поисков месторождений редких элементов, в данном случае на примере месторождений собственно танталовых руд, дефицитность которых в мировом балансе руд редких металлов проявлена особенно резко.

Работа основывается на обширном фактическом материале, собранном в процессе исследований, проведенных в период 1963—1965 гг. Центральной лабораторией прикладной геохимии и Центральной геохимической экспедицией б. Геолого-геохимического треста Министерства геологии СССР.

В составлении работы принимал участие коллектив сотрудников упомянутых учреждений (авторы отдельных разделов указаны в оглавлении). Руководство исследованиями и составлением работы осуществлялось А. А. Беусом. Им же выполнена общая научная редакция книги. В процессе разработки отдельных разделов авторами были использованы материалы Ю. Н. Спомиора и Л. И. Агаповой по геохимии гранитоидов Калбы, Алтая и Туркестанского хребта, а также И. И. Мороз — по эндогенным геохимическим ореолам апогранитовых месторождений тантала.

Спектральные и химические определения, служившие основным первичным материалом для геохимических выводов и заключений, были выполнены в Центральной лаборатории прикладной геохимии под руководством А. П. Перфильева, Ю. Н. Пукарева, А. Н. Копаневой, Н. Н. Павловой и И. А. Блюма.

Большое количество аналитических данных позволили охарактеризовать геохимические особенности изученных объектов на достаточно строгой математической основе с использованием необходимых методов математической статистики.

Статистическое обоснование поисковых и оценочных геохимических критериев, рекомендуемых для поисков месторождений тантала, является одной из главных особенностей предлагаемой работы. С этой точки зрения она может рассматриваться как первый в нашей литературе опыт обобщения результатов геохимических исследований подобного рода.

Учитывая, что в последние годы в Советском Союзе опубликован ряд монографий и руководств, посвященных применению

математических методов в геологии (Родионов, 1964; Толстой, 1964; Беус, Григорян и др., 1965; Шарапов, 1965), нецелесообразно посвящать методике статистической обработки аналитических данных специальный раздел книги. Все эти вопросы с достаточной для целей геохимических поисков полнотой освещены в «Руководстве по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах», выпущенном Геолого-геохимическим трестом в 1965 г. (Беус, Григорян, Ойзерман, 1965).

Авторы рассматривают свой труд не только как работу, направленную на решение конкретных вопросов, связанных с поисками месторождений собственно танталовых руд, но и как опыт внедрения в практику поисковых работ геохимических методов, основанных на широком использовании математической обработки геохимической информации о распределении химических элементов в различных природных объектах. Следует иметь в виду, что обоснованные в работе методические приемы могут быть использованы при поисках эндогенных месторождений и других цветных и редких металлов.

Как каждый опыт, работа, естественно, не свободна от ряда недостатков. Сознавая это, авторы будут очень благодарны всем геологам и геохимикам за замечания и критику, которые предстоит учесть в последующей работе.

Часть I

ГЕОХИМИЯ ТАНТАЛА И ТИПЫ ЕГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ГЛАВА 1

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТАНТАЛА В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Несмотря на то что после открытия тантала прошло более 150 лет [1], закономерности распределения этого замечательного по ряду свойств элемента в различных типах пород земной коры до настоящего времени изучены очень слабо. Это объясняется сложностью определения низких содержаний тантала всеми известными химическими и физико-химическими методами, а также совершенно недостаточной чувствительностью имеющихся методов спектрального определения элемента. Разработанный в последние годы в применении к танталу метод нейтронной активации на нашел еще широкого применения. Таким образом, данные, характеризующие распределение тантала в различных типах пород земной коры, в настоящее время могут рассматриваться только как предварительные, что, в частности, объясняет наличие существенных расхождений в цифрах, приводимых различными авторами. Цифры, приводившиеся в литературе до 1948 г., были вычислены расчетным путем, они малодостоверны и в настоящее время имеют лишь историческое значение. Даже наиболее достоверные данные, полученные К. Ранкама в 1948 г., К. К. Турекяном и К. Х. Ведеполем в 1961 г. путем прямого определения содержания тантала в породах (а не каким-либо расчетным методом), требуют уточнения и соответствующей математической обработки.

По своим свойствам тантал, так же как и чрезвычайно близкий ему по геохимическим свойствам ниобий, является типичным литофильным элементом, что подчеркивается его четко проявленной связью с кислыми и щелочными породами верхней части литосферы. Единичные определения содержания тантала в метеоритах (Rankama, Sahama, 1950) также свидетельствуют о его преимущественном накоплении в силикатной части метеоритов (никель-железистая часть — Ta $<$ 0,06 *г/т*, Nb/Ta = 3,3, силикатная часть — Ta $<$ $<$ 0,38 *г/т*, Nb/Ta = 1,2).

[1] Тантал был открыт в 1802 г. шведским химиком Эксбергом при анализе танталита и иттротанталита из пегматитов Балтийского щита.

Среднее содержание тантала в изверженных породах земной коры по данным исследователей, использовавших результаты прямого определения тантала в различных типах горных пород, колеблется от 2,5 (Виноградов, 1956, Nb/Ta = 5) до 2,7 *г/т* (Mason, 1957, Nb/Ta = 7,5). Наиболее представительные данные по этому вопросу до настоящего времени были получены К. Ранкама (Rankama, 1944, 1950), оценившим среднее содержание тантала в изверженных породах земной коры цифрой 2,1 *г/т* при Nb/Ta = 11,4.

Обобщение обсуждаемых ниже новейших данных о распределении тантала в литосфере с учетом результатов подсчетов М. Флейшера и Э. К. Т. Чао (1964), характеризующих соотношение различных типов горных пород в земной коре, позволяют на данной стадии изученности оценить значение кларка тантала в магматических горных породах литосферы цифрой 2,3 *г/т*, что близко к значениям, выведенным К. Ранкама и А. П. Виноградовым.

Судя по имеющимся определениям, содержание тантала в ультраосновных и основных магматических породах колеблется в пределах 0,5—1 *г/т* (табл. 1).

Таблица 1

Среднее содержание тантала в ультраосновных и основных магматических породах

(в *г/т*)

Породы	По К. Ранкама (1950)		По А. П. Виноградову (1956)		По К. К. Турекяну и К. Х. Ведеполю (1961)	
	Ta	Nb/Ta	Ta	Nb/Ta	Ta	Nb/Ta
Ультраосновные мономинеральные	0,7	0,4	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Ультраосновные	1,0	16,0	0,75	20	1,0	16
Основные	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	1,1	17,3
Эклогиты	0,7	4,3	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Габбро	1,1	17,3	1,0	20	Не опр.	Не опр.
Диориты	0,7	5,1	0,7	5,0	Не опр.	Не опр.

По данным Е. Б. Знаменского и др. (1965), в траппах и базальтах Сибирской платформы содержится соответственно 0,46 и 0,48 *г/т* тантала, что соответствует содержанию его (0,47 *г/т*) в средней пробе базальта ($W = 1$), определенному методом нейтронной активации (Stevens, 1960).

Имеющиеся в литературе оценки ниобий-танталового отношения в основных и ультраосновных породах отличаются достаточно резко. В международной стандартной пробе базальта (Stevens, 1960) ниобий-танталовое отношение составляет 21; Е. Б. Знаменский и др. (1965), изучавшие траппы Сибирской платформы, дают для траппов и базальтов соответственно значения 7 и 4,6. Наконец, В. И. Герасимовский и В. А. Карпушина (1965), определившие

содержание тантала и ниобия в пяти пробах (перидотит, пироксенит, оливинит, базальт, габбро-диорит) из разных районов получили аналогичные данные, колеблющиеся в пределах от 9,8 до 11. Таким образом, вопрос о соотношении тантала и ниобия в основных и ультраосновных породах заслуживает дальнейшего изучения.

Значительно большее количество данных характеризует распределение тантала в гранитоидах, хотя и в этом случае между результатами различных исследователей имеются существенные расхождения (табл. 2). Как видно из таблицы, данные К. Ранкама характеризуются недостаточной точностью [1] (относительная ошибка среднего арифметического ±79%). Последнее определяется наличием трех проб гранитов с необычно высоким содержанием тантала (16,4—21 *г/т*), что сказывается на резком увеличении дисперсии распределения в исследованной выборке. В то же время к среднему значению, вычисленному К. Ранкама, близки результаты исследований В. И. Герасимовского (1965) и А. М. Подольского (1965). Средние содержания тантала, определенные этими авторами для некоторых районов Кольского полуострова, Киргизии и Казахстана, колеблются от 2,4 до 3,7 *г/т*. Существенно более низкое содержание тантала в гранитах получено Е. Б. Знаменским (1964). Наметившееся расхождение скорее всего определяется различием применявшихся методик определения тантала. С рассматриваемой точки зрения заслуживает внимания тот факт, что повторное определение тантала в гранитах Сусамырского батолита, ранее исследованных Е. Б. Знаменским (Герасимовский, Карпушина, 1965), дало в два раза бóльшую цифру (см. табл. 2).

В 1964 г. в Центральной лаборатории прикладной геохимии б. Геолого-геохимического треста Н. Н. Павловой (1966) был разработан колориметрический метод определения малых содержаний тантала с чувствительностью от 1 *г/т*. Проверка метода на международном эталоне гранита G-1 показала удовлетворительную сходимость результатов с данными, полученными Д. Аткинсом и А. Смэйлсом (Atkins, Smales, 1960) методом нейтронной активации. В табл. 3 приведены оценки параметров распределения тантала в гранитах СССР (Украина, Кавказ, Урал, Средняя Азия, Калба, Забайкалье, Дальний Восток) по данным анализа 180 проб, систематически отбираемых в процессе геохимического изучения магматических пород перечисленных регионов и сгруппированных в соответствии с площадной значимостью каждого региона.

При этом в пределах каждого региона была сделана попытка сохранить характерное для него естественное отношение между различными типами гранитоидов без резкого разграничения гранитов, в которых в какой-то мере проявлены или не проявлены процессы

[1] Из данных, приведенных К. Ранкама для Финляндии, в подсчет были включены все гранитоиды, за исключением гранит-порфира с аномально высоким (33 *г/т*) содержанием тантала.

Таблица 2

Содержание тантала в гранитах некоторых районов

(в *г/т*)

Регион	Количество проб	Среднее арифметическое содержание *	Nb/Ta	Автор
Финляндия		3,3±2,6	7,0	К. Ранкама (Rankama, 1944, 1950)
Международный стандарт гранита (G-1) . .		1,59	12	Atkins, Smales (1960)
СССР (среднее по 8 районам)	45	1,2±0,2	12,5	По данным Е. Б. Знаменского (1964)
Слюдянский р-н . .	9	0,8	—	То же
Мамско-Чуйский р-н	5	0,4	—	» »
Бодайбинский р-н	6	0,5	—	» »
Восточный Саян . .	4	0,8	>15	» »
Канбский массив .	20	1,1	14,5	» »
Коростенский массив	7	1,1	>10	» »
Сусамырский массив	116	1,1	13,5	» »
Калбинский массив	14	2,1	8,0	» »
СССР, Сусамырский массив (Тянь-Шань) . .	53	2,4	11	В. И. Герасимовский, В. А. Карпушина (1965)
СССР, Кольский полуостров, щелочные граниты	105	2,6	11,4	То же
СССР, Центральный Казахстан (восточная часть)	40	3,7	16	А. М. Подольский и др. (1965)
СССР, по 6 регионам — Украина, Урал, Средняя Азия, Калба, Забайкалье, Дальний Восток	180	2,5±0,2	14±4	Данная работа
Кларк для гранитов		3,5	5,7	А. П. Виноградов (1956)

* Здесь и в следующих таблицах точность среднего арифметического дается с вероятностью 0,95.

послемагматического изменения [1]. Естественно, что интенсивно измененные (альбитизированные или грейзенизированные) граниты не включались в геохимические выборки в связи с их ничтожной количественной ролью среди прочих разновидностей гранитов.

[1] Существование гранитоидов, в которых полностью отсутствовали бы явления послемагматического изменения, многими петрологами ставится под сомнение, таким образом, всякое разделение подобного рода будет носить субъективный характер (например, в большинстве массивов биотитовых гранитов, обычно считающихся неизмененными, проявлен ранний калиевый метасоматоз и т. д.).

Таблица 3

Оценки параметров распределения тантала в гранитах СССР

(закон распределения близок логнормальному)

Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
содержание, *г/т*	логарифмов содержаний				
2,5±0,2	0,325	0,044	0,209	40	0,7—6,6

Обобщение имеющихся материалов по распределению тантала в гранитоидах, несмотря на расхождение между результатами, полученными различными исследователями, позволяет оценить его среднее содержание в гранитах 2,5 *г/т*.

Еще более определенны данные о ниобий-танталовом отношении в гранитах. Лишь К. Ранкама (1944, 1950) и А. П. Виноградов (1962) дают цифру 7—5,7 (у А. П. Виноградова данные расчетные). Результаты оценки этого отношения в более поздних исследованиях колеблются в пределах 11—16 и в среднем близки 12 (Герасимовский и Карпушина, 1965; Знаменский, 1964; Подольский и др., 1965).

При этом следует отметить, что единичные значения ниобий-танталового отношения в гранитах варьируют достаточно широко, что, по-видимому, помимо естественных колебаний содержания этих элементов зависят и от отдельных случайных ошибок в определении малых содержаний ниобия и тантала, которые все еще имеют место в практике.

В табл. 4 приведены оценки параметров распределения ниобий-танталового отношения в гранитах в среднем по 7 регионам СССР, вычисленные на основе результатов анализов 180 проб, выполненных колориметрическим методом в Центральной лаборатории прикладной геохимии (ЦЛПГ) б. Геолого-геохимического треста.

Таблица 4

Оценки параметров распределения Nb/Ta отношения в гранитах СССР

(закон распределения нормальный)

Среднее арифметическое отношений	Дисперсия отношений	Среднее квадратическое отклонение отношений	Коэффициент вариации отношений, %	Пределы колебания отношений с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
14±4	9	3	21	1—28

Подобно титану и ниобию, тантал в гранитоидах в качестве изоморфной примеси входит в минералы, содержащие железо, магний и алюминий (в октаэдрической координации), а также замещает

титан и цирконий в акцессорных минералах этих элементов (табл. 5). Таким образом, минералами-концентраторами и носителями тантала в гранитоидах являются биотит, мусковит, ильменит, сфен и циркон.

Таблица 5

Содержание тантала в минералах гранитоидов

(в *г/т*)

Минерал	Количество проб	Местонахождение	Та	Nb/Ta	Автор
Биотит	38	СССР (среднее по 8 районам)	5±1	16	А. А. Ситнин (1966)
Мусковит	33	То же	21±5	5	То же
Ильменит	4	Калбинский массив	130—640	5,6—6,6	Е. Б. Знаменский (1957)
Сфен	6	Кавказ	370	6	Данная работа
Циркон	1	Калбинский массив	110	1	Е. Б. Знаменский (1957)

В табл. 6 на основе статистической обработки данных о содержании тантала в слюдах биотита из гранитов Украины, Кавказа, Урала, Казахстана, Забайкалья и Дальнего Востока, с которыми не связаны какие-либо месторождения, несущие концентрации этого элемента, оценены параметры распределения тантала в биотите и мусковите гранитоидов.

Таблица 6

Оценки параметров распределения тантала в биотитах и мусковитах из гранитов СССР

(закон распределения логнормальный)

Минерал	Количество проб	Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
		содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний				
Биотит	42	5±1	0,662	0,045	0,212	48	1—15
Мусковит	27	21±5	1,201	0,131	0,362	66	2—124

По данным исследований Е. Б. Знаменского (1957), в гранитоидах, содержащих ильменит, от 50 до 72% тантала, присутствующего в породе, связано с биотитом; 15—20% — с ильменитом и около 15% — с цикроном. В сфенсодержащих гранитоидах (Знаменский, Конусова, 1962) это соотношение существенно изменяется. В подобных гранитах только 20—50% тантала связано с биотитом, а 50—80% тантала находится в виде изоморфной примеси в сфене. В изученных примерах двуслюдяных гранитов Средней Азии (Ситнин, 1966), содержащих примерно равное количество биотита и мусковита (4,8 и 4,4% соответственно), тантал распределяется поровну между слюдами, не проявляя тенденции к накоплению в каком-либо из типов слюд. В то же время в мусковитах двуслюдяных и мусковитовых гранитов по сравнению с биотитами из неизмененных гранитов отмечается заметное накопление тантала (Ситнин, 1966). В среднем для мусковитов характерно трехкратное накопление тантала по сравнению с биотитами неизмененных гранитов, при некотором понижении среднего отношения ниобия к танталу (см. табл. 5).

Детальное изучение распределения тантала и ниобия в биотитах из гранитов СССР (Ситнин, 1966) показало, что по содержанию тантала и ниобий-танталовому отношению в биотитах можно различать две группы гранитоидов: с содержанием тантала в среднем 7—8 *г/т* и Nb/Ta отношением в среднем 10—12 (Кавказ, Урал, Забайкалье) и с содержанием тантала в среднем 3—6 *г/т* и Nb/Ta отношением 17—25 (Украина, Центр. Казахстан, Горный Алтай). Дальнейшее углубленное изучение этого вопроса представляет большой интерес.

Изучение биотитов из гранодиоритов и плагиогранитов различных районов (Ситнин, 1966) свидетельствует, что содержание в них тантала и ниобия в среднем ниже, чем в нормальных гранитах. В то же время в биотитах лейкократовых и двуслюдяных гранитов (табл. 7) имеет место отчетливая концентрация тантала (имеются в виду граниты, с которыми не известна связь каких-либо месторождений тантала).

Таблица 7

Содержание тантала в биотитах лейкократовых и двуслюдяных гранитов

(в *г/т*)

Район	Количество проб	Та	Nb/Ta
Украина (Лезниковский гранит)	1	27	5
Центр. Казахстан (4 массива)	7	13	18
Горный Алтай (3 массива) . .	4	18	9

Поскольку во всех изученных массивах двуслюдяных и лейкократовых гранитов в той или иной мере проявлены процессы послемагматического изменения (ранняя микроклинизация, мусковитизация), ранее высказывавшиеся суждения о связи концентрации тантала в гранитах с явлениями высокотемпературного послемагматического метасоматоза (Знаменский, 1964; Ситнин, 1966) представляются вполне обоснованными.

Изучение распределения тантала в щелочных породах проводилось К. Ранкама (Rankama, 1944, 1950), В. И. Герасимовским

(1957), Е. М. Еськовой (1959), К. А. Власовым (1959) и др. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о существовании весьма резких различий в содержании тантала и ниобия в щелочных породах разных геохимических провинций. С этой точки зрения все щелочные породы четко разделяются на две группы. В первой из них содержание тантала, как правило, не превышает 5 *г/т*. К этой группе относятся сиениты Финляндии, изученные К. Ранкама (Ta 0,8 *г/т*, Rankama, 1944), сиениты ряда районов Восточной Сибири (Ta $<$ 0,5 *г/т*, Знаменский, 1964), нефелиновые сиениты Португалии (Ta 0,8 *г/т*, Rankama, 1944), Индии (Ta 4,0 *г/т*, Герасимовский и др., 1965) и др. Щелочные комплексы второй группы специализированы на ниобий и тантал и отличаются заметно повышенным содержанием этих элементов (Ta обычно не ниже 8 *г/т*). Характерными представителями щелочных пород второй группы являются биотитовые сиениты (Ta 16 *г/т*) и миаскиты (Ta 22 *г/т*) Вишневых гор, нефелиновые сиениты Ильмен (Ta 8,2 *г/т*) и Мугоджар (Ta 20 *г/т*) на Урале (Еськова и др., 1959) и особенно нефелиновые сиениты (Ta 16—82 *г/т*) Кольского полуострова (Герасимовский и др., 1957; Власов и др., 1959).

Несмотря на столь существенные отличия в содержании тантала и ниобия в различных массивах, их отношение колеблется весьма незначительно (Nb/Ta = 10—12). Подчеркивая это явление, В. И. Герасимовский (1965) отмечает, что более высокие значения ниобий-танталового отношения характерны для щелочных пород, формировавшихся в завершающие этапы магматической деятельности. В качестве примеров он приводит порфировидные луявриты с мурманитом Ловозерского массива (Nb/Ta = 22) и эгирин-альбитовые нефелиновые сиениты нагорья Сангилен в Туве (Nb/Ta = 22). Последние заметно альбитизированы, что позволяет предполагать участие процессов послемагматического метасоматоза в разделении ниобия и тантала в щелочных породах.

Таким образом, полученные в последние годы материалы по распределению ниобия и тантала в магматических породах убедительно свидетельствуют об отсутствии существенного различия между средними значениями ниобий-танталового отношения для магматических пород различного состава. Последнее позволило В. И. Герасимовскому (1965) сделать обоснованный вывод, что в магматическую стадию формирования пород не происходит разделения ниобия и тантала, отношение между которыми в основных, кислых и щелочных магматических породах остается постоянным (Nb/Ta = 10—12).

Следовательно, разгадку явлений разделения ниобия и тантала, имеющих место в природе, следует, по-видимому, искать в особенностях послемагматической миграции этих элементов, зависящих от конкретных геохимических условий заключительных этапов эволюции соответствующих магматических комплексов.

Как известно, послемагматические концентрации ниобия и тантала образуются в связи с кислыми и щелочными интрузивными породами. Однако месторождения ниобий-танталовых руд, существенно

обогащенных танталом, а также собственно танталовых руд являются почти исключительно продуктами послемагматической деятельности кислых магматических комплексов [1]. Только в месторождениях, связанных с гранитоидами, известны руды с ниобий-танталовым отношением, равным и меньшим 1.

Таким образом, имеются основания связывать явления разделения тантала и ниобия в природных процессах, сопровождающихся концентрацией тантала в месторождениях, со специфическими особенностями послемагматического процесса, завершающего становление интрузивных комплексов кислого состава.

ГЛАВА 2

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОБСТВЕННО ТАНТАЛОВЫХ РУД

По характеру соотношения ниобия и тантала в рудах месторождения, имеющие практическое значение, могут быть разделены на две существенно отличные группы.

1. Собственно танталовые месторождения с отношением Nb/Ta $\leqslant$ $\leqslant$ 1. К этой группе месторождений, формирование которых сопровождалось геохимической дифференциацией тантала и ниобия, обычно относят также месторождения, характеризующиеся незначительным преобладанием ниобия над танталом (Nb/Ta = 2—5).

2. Месторождения ниобия, содержащие тантал, при соотношении Nb/Ta $\geqslant$ 10. Формирование месторождений этой группы, характеризующихся ниобий-танталовым отношением, близким среднему для магматических пород земной коры, не сопровождалось разделением ниобия и тантала, или же (при Nb/Ta $>$ 12—16) сопровождалось направленной концентрацией ниобия по отношению к танталу.

Концентрации тантала в рудах отмеченных групп месторождений по отношению к среднему кларку земной коры существенно не отличаются. Однако значительным преимуществом месторождений собственно танталовых руд, геохимическим методам поисков которых посвящена настоящая работа, с практической точки зрения является возможность непосредственного получения танталовых концентратов, содержащих от 30 до 70% Ta_2O_5. Характер распределения тантала в существенно ниобиевых месторождениях второй группы определяет возможность получения тантало-ниобиевых концентратов, содержащих лишь 3—6% Ta_2O_5, т. е. тантал в этом случае может быть получен лишь в процессе извлечения десятикратно большего количества ниобия.

Классификация месторождений тантала, имеющих практическое значение в настоящее время, приведена в табл. 8.

[1] В последние годы в некоторых карбонатитовых месторождениях были выявлены ниобиевые (гатчеттолитовые) руды, несколько обогащенные танталом по сравнению со средним значением отношения, характерным для магматических пород.

Таблица 8

Характеристика месторождений тантала

Тип месторождения	Среднее содержание Ta_2O_5, %	Nb/Ta	Минералы тантала и ниобия	Сопутствующие типоморфные редкие элементы	Масштабы месторождений, тыс. *т* Ta_2O_5
А. Собственно тантэловые месторождения, связанные с гранитоидами					
1. Формация редкометальных альбитовых апогранитов					
Лепидолит-микроклин (амазонит)-кварц-альбитовые апограниты	0,012—0,02	0,5—2	Колумбит-танталит, пирохлор-микролит, микролит	Li, Sn, Rb	2—15
Мусковит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты	0,012—0,02	0,5—2	Колумбит-танталит, танталовый рутил	Sn, Be, Li	2—5
2. Формация редкометальных гранитных пегматитов					
Блоковые мусковит-микроклиновые пегматиты	0,01—0,015	0,1—2	Колумбит-танталит, танталит	Be, Li, Sn	0,1—0,5
Замещенные мусковит-альбитовые и сподумен-альбитовые пегматиты	0,01—0,02	1—2	То же	Be	0,5—3,0
Замещенные лепидолит-альбитовые пегматиты	0,01—0,02	0,1—0,5	Танталит, микролит, бисмутотанталит	Li, Rb, Sn, Be	0,1—0,5
Б. Тантало-ниобиевые месторождения					
I. Связанные с гранитоидами					
1. Формация редкометальных альбитовых апогранитов					
Циннвальдит (криофиллит)-кварц-альбитовые апограниты	0,012—0,02	5—12	Колумбит	Zr, Th	5—20
Биотит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты	0,01—0,02	10	Колумбит	Zr, Th	5—20
Рибекит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты	0,01—0,03	8—12	Пирохлор, колумбит	Zr, TR_Y, Th	5—50
II. Связанные с нефелиновыми сиенитами					
1. Формация стратифицированных массивов нефелиновых сиенитов					
Лопаритовые малиньиты и уртиты	0,0n—0,n	10	Лопарит	Ti, TR_{Ce}	20
2. Формация редкометальных альбититов					
Альбититы, нефелиновые сиениты и мариуполиты	0,01—0,02	10	Пирохлор	Zr, Th	2—10

Продолжение табл. 8

Тип месторождения	Среднее содержание Ta_2O_5, %	Nb/Ta	Минералы тантала и ниобия	Сопутствующие типоморфные редкие элементы	Масштабы месторождений, тыс. *т* Ta_2O_5
III. Связанные со щелочно-ультраосновными породами					
1. Формация редкометальных карбонатитов					
Пирохлор-гатчеттолитовые карбонатиты	0,01—0,05	8	Гатчеттолит, пирохлор	Zr, TR_{Ce}	10

Задачей настоящей работы является рассмотрение геохимических особенностей месторождений собственно танталовых руд, которые на современном этапе изученности сырьевой базы редких элементов могут рассматриваться как наиболее дефицитный в мировом масштабе тип редкометальных месторождений. Характерные особенности рассмотренных месторождений будут в дальнейшем использованы для обоснования геохимических критериев поисков месторождений тантала, связанных с редкометальными альбитовыми апогранитами, а также с танталоносными гранитными пегматитами.

Месторождения тантала, связанные с альбитовыми апогранитами

Под термином «апограниты» в настоящее время объединяют группу метасоматических пород, образовавшихся в результате интенсивной послемагматической переработки гранитоидов высокотемпературными растворами, обусловившими глубокое изменение химического и минерального состава, а также структуры и текстуры первичной породы (Беус и др., 1962).

Среди многочисленных типов редкометальных альбитовых апогранитов с точки зрения наличия высоких концентраций тантала и повышенного тантал-ниобиевого отношения (от 1 : 2 в пользу ниобия до 2 : 1 в пользу тантала) интересны отдельные парагенетические типы: литионит-амазонит-альбитовые апограниты с колумбит-танталитом и пирохлор-микролитом; мусковит-альбитовые апограниты с колумбит-танталитом, которые представляют собой апограниты субщелочного и нормального ряда (Беус и др., 1962). Заметно повышенные концентрации тантала в некоторых случаях отмечаются также в массивах биотит- и рибекитсодержащих апогранитов, как правило, в связи в развитием литионитсодержащих метасоматических фаций. Однако в этих случаях отношение Nb : Ta в рудах обычно не поднимается выше 1 : 8 — 1 : 10.

Геологическое положение месторождений тантала, связанных с апогранитами

Месторождения тантала и ниобия апогранитового типа, являющиеся продуктами высокотемпературных этапов послемагматического становления интрузивных комплексов кислого состава, характерны для всех периодов развития верхних структурных ярусов литосферы от докембрия до кайнозоя, сопровождавшихся соответствующей интрузивной деятельностью. В настоящее время известны альбитовые апограниты с минералами тантала и ниобия докембрийского (Украина), верхнекаледонского (Тува), герцинского (Урал, Казахстан и др.) и киммерийского (Забайкалье) возраста.

Анализ геологических данных, характеризующих особенности геологического положения месторождений тантала рассматриваемого типа, показывает, что большинство интрузий гранитоидов, в апикальной части которых сформировались массивы альбитовых апогранитов, образовались на глубине 1,5—3, реже 3—4 *км* и, таким образом, принадлежат к интрузиям малых и средних глубин. Подобные глубины образования определяют более частую встречаемость месторождений апогранитового типа в пределах относительно более молодых, т. е. менее глубокоэродированных геохимических провинций.

В региональном плане могут быть выделены два типа структур, контролирующих положение интрузивных массивов, с которыми связаны апогранитовые месторождения.

1. Структуры древних платформенных областей.
2. Структуры областей завершенной складчатости.

В пределах древних платформенных областей альбитовые апограниты обнаруживаются преимущественно в связи с региональными разломами краевого типа (Украинский кристаллический массив).

В областях завершенной складчатости апогранитовые месторождения редких элементов (в том числе тантала) преимущественно связаны со средней стадией развития складчатых областей, пространственно располагаясь во внутренних зонах миогеосинклиналей (со срединными массивами) в пределах складчатых поясов полициклического развития. Характерна также приуроченность месторождений рассматриваемой формации к ослабленным участкам рамы палеозойско-мезозойских и мезозойских геосинклиналей. В этих участках в ряде случаев формируются геоантиклинальные поднятия, характеризующиеся широким развитием разрывных деформаций (Темников, Тунин, 1965) и активной интрузивной деятельностью. Именно с подобными структурными зонами связаны массивы альбититовых апогранитов Казахстана, Забайкалья и Дальнего Востока.

Особенно благоприятны условия для образования массивов альбитизированных и грейзенизированных гранитоидов (альбитовых апогранитов) в зонах сопряжения сравнительно молодых синклинальных прогибов и более древних палеозойских консолидированных глыб. Эти зоны характеризуются глубокими региональными разломами, отличающимися длительным периодом жизни и интенсивной

магматической деятельностью. Не менее перспективны с этой точки зрения также разломы, возникающие в пределах древних стабильных глыб, располагающихся в центральных и краевых частях более молодых миогеосинклиналей. Эти дизъюнктивные нарушения часто контролируют интрузии кислых и ультракислых гранитоидов, в апикальных частях которых широко развиты явления послемагматического метасоматоза, в том числе альбитизация и грейзенизация. Значительный интерес в отношении формирования метасоматических фаций гранитоидов, обогащенных редкими элементами, в частности и танталом, представляют области активизированных платформ, в пределах которых широко распространены гранитоидные комплексы, контролируемые мощными разломами, расчленяющими древнюю платформу на отдельные глыбовые блоки.

Максимально представлены процессы послемагматического метасоматоза в пределах куполовидных выступов и апофиз гранитных массивов. Последние обычно залегают в сводовых частях и на крыльях нарушенных антиклинальных складок, а также во флексурообразных изгибах складок II порядка, осложняющих крылья более крупных пликативных структур. Во всех случаях пространственное положение массивов апогранитов четко контролируется развитием дизъюнктивных структур различного типа. Среди последних выделяются участки пересечения дизъюнктивных структур разного порядка, трещинные зоны скалывания, а также разломы, оперяющие крупные разрывные структуры.

Характерной особенностью локализации редкометальных альбитовых апогранитов в пределах отдельных интрузивных комплексов, как уже отмечалось, является их приуроченность к апикальным участкам, апофизам или куполовидным выступам гранитных массивов. В плане эти образования обычно представлены мелкими (единицы квадратных километров) массивами или телами изометричной или вытянутой формы. Глубина распространения апогранитов всецело определяется структурными факторами. Обычно мощность альбитизированной эндоконтактовой части массивов, характеризующихся высокой концентрацией тантала, не превышает первых сотен метров. Однако известны массивы апогранитов, приуроченные к глубоким тектоническим зонам и отличающиеся отсутствием видимого уменьшения интенсивности метасоматических явлений до глубины более 600 *м*. Подобные массивы, переработанные потоком восходящих послемагматических растворов, могут содержать весьма значительные запасы редкометальных руд.

Таким образом, одним из ведущих геологических факторов, определяющих условия формирования кислых интрузивных комплексов, с которыми генетически связаны месторождения танталоносных альбитовых апогранитов, является их приуроченность к областям послескладчатого трещинного магматизма.

Что же касается пространственного положения различных метасоматических фаций в пределах массивов и тел танталоносных альбитовых апогранитов, в том числе фаций, несущих наиболее высокие

концентрации тантала, то могут быть выделены структурные факторы двух типов, контролирующие развитие процессов метасоматического изменения вмещающих магматических пород и накопление редких элементов в продуктах рассматриваемого процесса. Фактором первого типа является экранирующая роль кровли интрузивного массива. В массивах и телах редкометальных альбитизированных пород, эродированных в минимальной степени, этот фактор определяет локализацию обогащенных танталом метасоматических фаций в виде залежей, примыкающих к контакту или расположенных на некотором удалении от него и повторяющих все изгибы плоскости контакта. В этом случае наиболее перспективные участки продуктивной зоны формируются в участках пологих куполовидных перегибов плоскости контакта.

В более глубокоэродированных массивах альбитизированных пород, а также в случаях связи процессов послемагматического метасоматоза с трещинными зонами глубокого залегания, секущими апикальные участки интрузивных комплексов, ведущее значение с точки зрения пространственного положения метасоматических фаций и контроля редкометальной минерализации, приобретает внутриминерализационная трещиноватость, определяющая характер миграции послемагматических растворов в пределах интрузивного тела. Наиболее перспективными участками в этих случаях являются зоны пологой трещиноватости и участки пересечения трещинных зон различной ориентировки.

Геолого-петрографические и геохимические особенности материнских магматических формаций

Морфологически интрузивные массивы гранитоидов, с которыми связаны танталоносные альбитовые апограниты, в большинстве случаев представлены интрузиями трещинного типа, имеющими в плане сравнительно небольшие размеры (единицы, первые десятки квадратных километров). Геологическое положение подобных массивов свидетельствует, что они являются куполовидными выступами крупных интрузивных тел, залегающих на глубине нескольких километров.

По составу и петрографическим особенностям материнские гранитоиды апогранитовых месторождений тантала представлены тремя главными типами (Беус, Ситнин, 1965):

1) нормальными биотитовыми и двуслюдяными гранитами (реже адамеллитами) с четко проявленной ранней микроклинизацией;

2) калий-натриевыми лейкократовыми гранитами с заметным проявлением микроклинизации, грейзенизации и альбитизации;

3) калиевыми гранитами аляскитового типа (существенно микроклинизированными).

С последней разностью в ряде случаев связаны типичные щелочные разности гранитов, существенно измененные в результате проявления процессов послемагматического щелочного метасоматоза.

Таблица 9

Оценка параметров распределения петрогенных элементов в гранитах Забайкалья, являющихся материнскими для танталоносных амазонит-альбитовых апогранитов

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %
		Среднее арифметическое содержаний, %	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
SiO_2	23	73,9 ± 0,7	2,76	1,66	—	—	—	2,25	69,7—78,1
TiO_2	23	0,17 ± 0,04	0,008	0,087	—	—	—	51,3	0,01—0,39
Al_2O_3	23	13,6 ± 0,4	0,754	0,868	—	—	—	6,4	11,4—15,8
Fe_2O_3	23	0,39 ± 0,09	0,031	0,176	—0,470	0,039	0,198	51,3	0,11—1,10
FeO	23	1,78 ± 0,34	0,622	0,788	—	—	—	44,2	0,01—3,76
MnO	23	0,04 ± 0,01	0,0007	0,027	—1,540	0,085	0,292	74,4	0,005—0,16
MgO	23	0,24 ± 0,04	0,009	0,097	—	—	—	40,4	0,01—0,48
CaO	23	0,52 ± 0,10	0,053	0,231	—	—	—	44,1	0,01—1,10
Na_2O	23	3,65 ± 0,35	—	—	0,551	0,009	0,094	22,6	2,10—6,20
K_2O	23	4,69 ± 0,17	0,160	0,400	—	—	—	8,5	3,68—5,70
P_2O_5	19	0,08 ± 0,02	0,0023	0,048	—	—	—	60,4	0,01—0,20
F	21	0,15 ± 0,04	0,008	0,091	—0,902	0,076	0,275	60,0	0,20—0,63

Таблица 10

Оценки параметров распределения элементов-примесей в гранитах, материнских для танталоносных апогранитов
(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Ta	30	7,1 ± 1.6	0,768	0,076	0,275	61,7	1,2—28
Nb	30	61 ± 17 *	1,693	0,084	0,290	72,9	10—256
Li	28	132 ± 29 *	2,080	0,052	0,229	55,0	33—440
Rb	29	430 ± 34	2,558	0,012	0,112	20,7	190—684
Cs	28	17,5 ± 3,3 *	1,197	0,041	0,203	48,5	5—20
Be	27	5,8 ± 0,9 *	0,738	0,026	0,162	38,8	2—14
Sn	29	21,9 ± 9,8 *	1,166	0,171	0,414	118,0	1—150
Zr	28	175 ± 27	2,193	0,040	0,200	40,7	48—490
$\sum$ TR	29	281 ± 58 *	2,400	0,051	0,225	54,5	70—906
W	29	5,9 ± 1,4 *	0,644	0,113	0,336	88,0	0,6—30
Mo	29	<2	—	—	—	—	<2
V	29	6,0 ± 2,0	0,642	0,151	0,389	81,3	0,5—40
Cu	29	38 ± 15 *	1,284	0,274	0,523	101,0	1—376
Pb	29	56 ± 13 *	1,682	0,058	0,242	61,7	12—170
Zn	28	55 ± 16 *	1,650	0,081	0,285	73,0	9—227

* Максимально правдоподобная оценка.

Таблица 11

Оценки параметров распределения геохимических отношений в гранитах, материнских для танталоносных апогранитов

Отношения	Количество проб	Для нормального закона распределения: Среднее арифметическое отношений	Для нормального закона распределения: Дисперсия отношений	Для нормального закона распределения: Среднее квадратическое отклонение отношений	Для логнормального закона распределения: Среднее арифметическое логарифмов отношений	Для логнормального закона распределения: Дисперсия логарифмов отношений	Для логнормального закона распределения: Среднее квадратическое отклонение логарифмов отношений	Коэффициент вариации отношений, %
Nb/Ta	28	8,25 ± 2,15 *	30,63 *	5,535	0,830	0,0712	0,2668	68,3
Mg/Li	23	11,9 ± 2,6	44,70	6,69	—	—	—	56,2
K/Rb	23	96 ± 9,4	473	21,75	—	—	—	22,7
V/Nb	23	0,25 ± 0,09	0,0438	0,209	—	—	—	83,7
Zr/Sn	27	15,7 ± 3,9	97,59	9,88	—	—	—	62,9
Li/Cs	27	9,0 ± 1,29*	10,67 *	3,27	0,926	0,0256	0,16	36,3
$\frac{100Ca}{Ca+Na}$	23	8 ± 1	10,8	3,32	—	—	—	40,0
Na/K	23	1,20 ± 0,16	0,1443	0,38	—	—	—	31,6
Q	23	32,7 ± 2,2	22,18	4,17	—	—	—	16,0
Al′/Al	23	0,15 ± 0,04	0,0105	0,10	—	—	—	70,0
K_a	23	0,81 ± 0,03 *	0,0052 *	0,07	—	—	—	8,8

* Максимально правдоподобная оценка.

В табл. 9 обобщены химические анализы материнских гранитоидов Забайкалья, с которыми связаны танталоносные амазонит-альбитовые апограниты.

По сравнению с нормальными гранитами материнские гранитоиды танталоносных альбитовых апогранитов характеризуются более низкими содержаниями железа, магния и кальция и несколько повышенным содержанием натрия, приближаясь по среднему составу к лейкократовым калий-натриевым гранитам и аляскитам (Беус, Ситнин, 1965).

В табл. 10—11 приведена имеющаяся геохимическая информация о распределении в материнских гранитах двух различных массивов танталоносных апогранитов Забайкалья элементов-примесей, а также некоторых индикаторных отношений [1]. Помимо индикаторных отношений геохимически тесно связанных элементов (ниобий — тантал, калий — рубидий, натрий — калий) изучались индикаторные отношения элементов, обнаруживающих в процессе формирования месторождений тантала тенденцию к разнонаправленной миграции (магний — литий, ванадий — ниобий, цирконий — олово).

Парагенетические типы танталоносных альбитовых апогранитов

Классификация апогранитов, используемая в настоящей работе (табл. 12), охватывает альбитовые (натриевые) апограниты, отличающиеся повышенным содержанием тантала и тантал-ниобиевым отношением, бóльшим, чем 1 : 10.

Как известно, подобно материнским интрузивным гранитоидам, среди апогранитов по характеру отношения сильных оснований и алюминия могут быть условно выделены апограниты нормального, субщелочного и щелочного ряда. Показателем щелочности в этом случае в первую очередь может служить коэффициент агпаитности, хотя достаточно четкие границы в ряде случаев провести трудно. Наиболее объективным критерием для выделения отдельных типов апогранитов является парагенезис полевых шпатов, слюд и акцессорных редкометальных минералов в метасоматической породе. При этом, однако, следует иметь в виду четко выраженную вертикальную зональность массивов апогранитов, проявляющуюся в закономерной смене с глубиной парагенетических ассоциаций породообразующих и второстепенных минералов. В результате некоторые разновидности апогранитов, выделяемые в предложенной классификации как подтипы, в ряде случаев могут представлять собой различные эрозионные срезы одного и того же массива.

Местами некоторые из выделенных типов апогранитов отмечаются в пределах единого массива, обособляясь в виде метасоматических фаций, объединенных между собой постепенными переходами. В каждом массиве танталоносных апогранитов обычно присутствуют

[1] Все определения выполнялись в Центральной лаборатории прикладной геохимии.

Таблица 12

Парагенетические типы танталоносных апогранитов

Тип апогранитов	Содержание Ta_2O_5, %	Nb/Ta	Главные породообразующие минералы	Типоморфные второстепенные минералы	Характерные редкометальные акцессорные минералы
Апограниты нормального ряда					
Мусковит-микроклин-кварц-альбитовые с минералами бериллия, тантала и ниобия	До 0,015	0,5—2	Альбит, кварц, микроклин	Мусковит	Танталит-колумбит, стрюверит, берилл, бертрандит, вольфрамит, касситерит, молибденит
Апограниты субщелочного ряда					
Литионит-амазонит-кварц-альбитовые с минералами тантала и ниобия	До 0,05	0,5—2	Альбит, амазонит, кварц	Криофиллит, лепидолит, топаз	Колумбит-танталит, колумбит, пирохлор-микролит, микролит, касситерит
Биотит-амазонит-кварц-альбитовые с минералами ниобия	До 0,01	5—10	Амазонит, альбит, кварц	Литиевый биотит, протолитионит, цинвальдит	Колумбит, касситерит, пирохлор
Литионит-микроклин-кварц-альбитовые с минералами лития, тантала и ниобия	До 0,01	0,5—2	Альбит, микроклин, кварц	Лепидолит, криофиллит, топаз	Амблигонит, сподумен, касситерит, колумбит, пирохлор-микролит
Апограниты щелочного ряда					
Биотит-кварц-альбитовые с минералами ниобия и циркония	До 0,015	$\geqslant 10$	Альбит, микроклин, кварц	Биотит	Колумбит, фергусонит, циркон (малакон), циртолит
Рибекит-микроклин-кварц-альбитовые с минералами циркония и ниобия (с литионитсодержащими фациями)	До 0,03	$\geqslant 10$	То же	Рибекит, литиевый биотит, протолитионит, цинвальдит, криофиллит	Циркон (малакон), пирохлор (гатчеттолит), колумбит, торит, гематит

биминеральные продукты метасоматического преобразования гранитоидов — кварцевые альбититы и кварцевые микроклиниты, биотитовые альбититы и т. д., а также мономинеральные образования типа альбититов и микроклинитов (амазонититов).

Как видно из табл. 12, общей особенностью всех типов танталоносных апогранитов является ведущая роль альбита в составе метасоматической породы и четкие различия выделенных типов по характеру слюд или темноцветных минералов (мусковит-литиевые слюды, биотит — рибекит), а также парагенезиса акцессорных редкометальных минералов.

Все парагенетические типы танталоносных альбитовых апогранитов характеризуются единым парагенезисом главных породообразующих минералов: альбит — микроклин — кварц. При этом петрографические особенности апогранитов различных парагенетических типов имеют ряд общих черт, позволяющих дать рассматриваемым породам единую петрографическую характеристику.

Внешне все типы танталоносных альбитовых апогранитов представляют собой лейкократовые породы, в которых на фоне основной альбитовой мелкозернистой массы обычно выделяются округлые серые порфировидные вкрапленники кварца и идиоморфные порфиробласты микроклина, окрашенные в белый, серый или зеленовато-голубой цвет (амазонит). В некоторых случаях при отсутствии четко различимых вкрапленников порода имеет ярко выраженный аплитовидный облик. В зависимости от типа апогранита на фоне светлой основной массы выделяются пластинки светлой (мусковит, лепидолит, криофиллит) или темной (биотит, литиевый биотит, протолитионит, циннвальдит) слюды.

При ведущей роли альбита общим для всех типов является достаточно резко выраженная изменчивость количественных соотношений между главными породообразующими минералами, часто проявляющаяся на коротком расстоянии, что вообще характерно для метасоматических пород.

Большинство характеризуемых типов танталоносных апогранитов при микроскопическом изучении характеризуется аналогичной структурой и сходными соотношениями между главными породообразующими минералами, что свидетельствует о близких условиях формирования описываемых пород. Очень часто (в случае отсутствия в шлифе «типоморфных» второстепенных минералов) практически невозможно определить, какому из типов апогранитов принадлежит изучаемый шлиф. Таким образом, аналогия в составе и структурных взаимоотношениях главных минералов, слагающих основную массу породы, и четкие различия в составе второстепенных «типоморфных» и акцессорных редкометальных минералов являются ведущими признаками сходства и различия рассматриваемых метасоматических пород, позволяющими судить об условиях их образования.

Химический состав танталоносных апогранитов

В настоящее время в опубликованной литературе имеется обширная информация, характеризующая особенности химического состава редкометальных альбитовых апогранитов. Имеющиеся данные, основанные на результатах статистической обработки более ста полных химических анализов, позволяют дать достаточно полную геохимическую характеристику рассматриваемых продуктов глубокого метасоматического преобразования гранитов (табл. 13).

Главной геохимической особенностью редкометальных апогранитов общей для всех типов является, несомненно, ведущая роль натрия, обусловленная резким преобладанием альбита над калиевым полевым шпатом. Несмотря на то что в пределах каждого массива апогранитов развиты существенно калиевые метасоматические фации, обогащенные поздним микроклином, калий в рассматриваемых метасоматически измененных гранитоидах по сравнению с натрием играет подчиненную роль. Характерной геохимической особенностью, также общей для всех типов редкометальных альбитовых апогранитов, является низкое содержание кальция и магния. Указанные признаки позволяют достаточно четко отличать альбитовые апограниты от нормальных гранитоидов, для которых подобные соотношения щелочных и щелочноземельных элементов нехарактерны, а также от аляскитов (калиевых гранитов), которым свойственны совершенно иные отношения натрия к калию.

По содержанию кремнезема описываемые метасоматические породы принципиально не отличаются от наиболее кислых разностей нормальных гранитов, а также почти не различаются и между собой.

Наиболее характерными геохимическими особенностями редкометальных альбитовых апогранитов являются особенности распределения алюминия и железа. Так, например, четко различная количественная и качественная роль алюминия позволяет по аналогии с принятым разделением магматических гранитоидов выделить среди апогранитов нормальные, субщелочные и щелочные разности. Первые две группы, наиболее интересные с точки зрения танталоносности, характеризуются пересыщением алюминием, особенно резким у апогранитов нормального ряда, специфической чертой апогранитов щелочного ряда является недостаток алюминия.

Таким образом, наблюдается четкое уменьшение роли алюминия в ряду парагенетических типов апогранитов, содержащих в качестве типоморфных минералов мусковит, затем литионит, биотит и, наконец, рибекит.

Совершенно обратную тенденцию в апогранитах проявляет железо, роль которого закономерно увеличивается от танталоносных мусковит-альбитовых и литионит-альбитовых разностей к апогранитам, содержащим в качестве типоморфного минерала биотит и особенно рибекит. В этом же направлении существенно увеличивается роль трехвалентного железа, циркония и ниобия.

Таблица 13

Средний химический состав различных типов редкометальных альбитовых апогранитов (в %)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2	73,9 ± 2,1	72,8 ± 0,7	73,7 ± 2,0	74,1 ± 0,7	74,0 ± 0,4	72,0 ± 0,2	74,6 ± 0,5	73,30
TiO_2	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,09 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,15 ± 0,03	0,11 ± 0,02	—
Al_2O_3	15,4 ± 0,7	16,5 ± 0,7	14,4 ± 0,7	12,6 ± 0,4	14,3 ± 0,3	14,3 ± 0,1	13,4 ± 0,3	12.33
Fe_2O_3	0,5 ± 0,1	0,1 ± 0,03	1,2 ± 0,3	1,7 ± 0,2	1,08 ± 0,18	1,00 ± 0,07	0,85 ± 0,13	2,58
FeO	0,3 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,0 ± 0,3	0,94 ± 0,14	1,50 ± 0,08	0,99 ± 0,16	1,28
MgO	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,06	0,2 ± 0,06	0,3 ± 0,1	0,20 ± 0,02	0,66 ± 0,05	0,31 ± 0,06	0,26
CaO	0,8 ± 0,2	0,40 ± 0,5	0,4 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0,66 ± 0,04	1,45 ± 0,05	0,55 ± 0,05	0,46
Na_2O	3.5 ± 0,1	5,6 ± 0,5	5,3 ± 0,6	4,9 ± 0,3	5,0 ± 0,2	3,16 ± 0,05	2,90 ± 0,05	4,55
K_2O	3,5 ± 0,4	4,2 ± 0,4	3,9 ± 0,4	4,1 ± 0,2	3,9 ± 0,2	4,70 ± 0,08	5,41 ± 0,19	4,20
F	0,5 ± 0,2	0,3 ± 0,06	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.

1 — мусковит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты с минералами бериллия; 2 — литионит-амазонит-кварц-альбитовые апограниты с минералами тантала и ниобия; 3 — биотит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты с минералами циркония и ниобия; 4 — рибекит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты с минералами циркония и ниобия; 5 — среднее по альбитовым апогранитам; 6 — нормальный гранит (Беус, Ситнин, 1965); 7 — аляскит (Беус, Ситнин, 1965); 8 — щелочной гранит, по Дэли.

В отличие от нормальных гранитов для апогранитов весьма характерно такие резкое ослабление корреляционных связей между петрогенными компонентами, являющееся следствием метасоматического генезиса этих пород (табл. 14).

Таблица 14

Коэффициенты парной корреляции между петрогенными компонентами в нормальных гранитах и альбитовых апогранитах

		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
	$\bar{x}$, %	73,72	0,12	14,18	0,95	1,01	0,04	0,33	0,71	4,82	3,82
Нормальные граниты ($n = 70$)	71,95 SiO_2		−0,31	−0,67	−0,67	−0,55	0,48	0,48	−0,63	−0,64	0,37
	0,27 TiO_2	−0,67		−0,34	0,32	0,48	н. с.	н. с.	0,48	0,53	н. с.
	14,34 Al_2O_3	−0,73	0,32		н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	0,39	0,47	0,43
	1,09 Fe_2O_3	н. с.	н. с.	н. с.		н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.
	1,39 FeO	−0,55	0,48	н. с.	н. с.		0,25	0,39	н. с.	0,38	н. с.
	0,04 MnO	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	0,25		0,39	н. с.	н. с.	н. с.
	0,60 MgO	−0,63	0,48	0,39	н. с.	0,39	0,39		0,51	0,51	0,24
	1,42 CaO	−0,64	0,53	0,47	н. с.	0,38	н. с.	0,51		н. с.	0,37
	3,19 Na_2O	0,37	н. с.	0,43	н. с.	н. с.	н. с.	0,24	0,37		н. с.
	4,78 K_2O	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	−0,37	0,36	н. с.	
Альбитовые апограниты ($n = 43$)											

Примечание. Н. с. — корреляционная связь с вероятностью 0,95 не существенна, n — количество анализов.

Апограниты нормального ряда

Связующим звеном апогранитов нормального ряда с материнскими гранитоидами являются массивы биотитовых, двуслюдяных, реже мусковитовых гранитов, в апикальных частях которых развиваются участки и зоны альбитизации. Подобные массивы, известные в пределах позднегерцинских и киммерийских комплексов гранитоидов Сибири и Дальнего Востока, обычно сложены биотитовыми и двуслюдяными порфировидными гранитами, отличающимися широким развитием явлений ранней микроклинизации. Переход от неравномерно альбитизированных и грейзенизированных апикальных участков гранитных массивов к обогащенным микроклином биотитовым гранитам глубоких горизонтов осуществляется постепенно, что можно наблюдать в естественных вертикальных разрезах в таких районах, как Центральное Забайкалье и др. Наиболее интенсивная альбитизация

наблюдается в апикальных участках гранитных массивов характеризуемого типа в зонах повышенной трещиноватости.

Следует подчеркнуть, что неравномерно альбитизированные и грейзенизированные граниты рассматриваемого типа еще не могут быть названы апогранитами, поскольку основную массу породы здесь слагают минералы материнского гранита или их реликты. Однако отдельные участки и зоны в пределах массивов, сложенных подобными гранитами, изменены достаточно сильно и по особенностям состава (интенсивное развитие альбитизации), структуре и ярко выраженному лейкократовому облику резко отличаются от нормальных гранитов. С массивами гранитов, включающих участки и зоны альбитизации и грейзенизации, обычно генетически связаны грейзеновые, кварцевожильные или штокверковые месторождения вольфрама, молибдена или олова, а также бериллия, формирующиеся в пределах структурно благоприятных участков экзоконтактовой зоны массивов.

Особенно интересны с точки зрения танталоносности массивы апогранитов, залегающие среди карбонатных пород и окруженные мощными зонами флюоритизации, в пределах которых обычно обнаруживаются высокие концентрации бериллия, олова и лития.

Мусковит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты

Мусковит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты, сформировавшиеся в пределах материнской интрузии, обычно слагают апикальные участки, куполовидные выступы и апофизы гранитных массивов. В более глубокоэродированных куполовидных структурах апограниты в ряде случаев образуют эндоконтактовую фацию массива, сменяясь по направлению к центру массива слабо измененными микроклинизированными и окварцованными гранитами. Реже зоны и тела апогранитов располагаются в центральных частях крупных гранитных массивов, обнаруживая при этом тесную пространственную связь с зонами тектонических нарушений.

В трещинах, секущих танталоносные мусковит-микроклин-альбитовые апограниты, обычно развиваются зоны грейзенизации, грейзеновые тела или кварцевые жилы, в ряде случаев несущие промышленную бериллиевую или оловянную минерализацию. Месторождения этих металлов формируются также в экзоконтактовых зонах вмещающих пород, перекрывающих массивы подобных апогранитов.

По характеру проявления танталовой минерализации среди апогранитов рассматриваемого типа выделяются две основные группы.

1. Равномерно альбитизированные массивы, залегающие в алюмосиликатных породах. Бериллиевые минералы здесь представлены преимущественно бериллом, реже бертрандитом. Микроскопические (десятые — сотые доли миллиметра) кристаллы этих минералов относительно равномерно рассеяны в массе породы. Собственно танталовая минерализация в апогранитах практически не развивается, однако в характерном для подобных массивов вольфрамите обнаруживаются повышенные содержания тантала и ниобия.

Из акцессорных минералов апогранитов этой группы следует выделить флюорит, вольфрамит, молибденит и особенно берилл. Флюорит постоянно присутствует в апогранитах, тесно ассоциируя с мусковитом, однако отмечается в небольшом количестве. Вольфрамит, содержащий примесь тантала и ниобия, наиболее широко распространен в апикальных участках некоторых массивов подобных апогранитов и тесно связан с явлениями грейзенизации (высокотемпературного окварцевания). Количество вольфрамита резко уменьшается с глубиной, обычно он совершенно исчезает на глубине более 100 *м*. Следует отметить, что с точки зрения танталоносности рассмотренная группа апогранитов обычно самостоятельного интереса не представляет.

Более перспективны с точки зрения танталоносности бедные вольфрамом разности мусковит-кварц-альбитовых апогранитов, содержащие наряду с бериллом колумбит-танталит и пирохлор-микролит. Метасоматические кварц-альбитовые фации, отличающиеся максимальным накоплением тантала и заметным сдвигом ниобий-танталового отношения в пользу тантала, обычно слагают самые верхние горизонты массивов апогранитов. В пределах глубоких горизонтов подобных массивов во всех случаях интенсивное развитие получают явления высокотемпературного окварцевания. В известных рудопроявлениях характеризуемой группы содержание Ta_2O_5 обычно не превышает 80—150 *г/т*, однако не исключена возможность встречи в подобных образованиях и более высоких концентраций тантала.

2. Вторая группа апогранитов рассматриваемого типа включает интенсивно грейзенизированные массивы и купола метасоматически измененных гранитоидов, залегающие среди карбонатных пород. Наличие известняков в зоне экзоконтакта определяет широкое развитие флюоритизации, сопровождающееся формированием апокарбонатных грейзенов слюдисто-флюоритового состава. В зоне эндоконтакта массива апогранитов при этом образуется характерная метасоматическая зональность, отличающаяся повышенной щелочностью внешних зон, тяготеющих к контакту с известняками (развитие микроклинизации).

Метасоматическая колонка для этого случая в общих чертах может быть представлена следующим образом (Говоров, 1964).

1. Зона экзоконтактовых слюдисто-флюоритовых апокарбонатных грейзенов с минералами бериллия (фенакит, хризоберилл). На контакте с апогранитом — топаз-флюоритовый грейзен.
2. Кварц-микроклиновая приконтактовая оторочка.
3. Мусковит-(диаспор)-топаз-флюоритовый грейзен.
4. Кварц-топазовый грейзен.
5. Мусковит-кварц-микроклиновый апогранит с топазом.
6. Мусковит-кварц-микроклин-альбитовый апогранит с топазом.
7. Сильно грейзенизированный (окварцованный) гранит.

Танталовая минерализация приурочена к зоне мусковит-кварц-микроклиновых апогранитов с топазом и представлена преимущественно стрюверитом, содержащим около 25% Ta_2O_5. Наряду со стрюверитом присутствует колумбит (17% Ta_2O_5), отмечаются единичные находки микролита. Контур оруденения с содержанием 0,008—0,03% Ta_2O_5 (среднее 0,013%) представляет собой пологую залежь, кровля которой примерно параллельна плоскости контакта гранитов. Соотношение Ta : Nb в зоне близко к 1 : 1. Наряду с танталом и ниобием повышенные концентрации (0,06%) дает олово. С глубиной роль тантала уменьшается, что выражается в смене стрюверита колумбитом. Минимальным содержанием тантала характеризуются окварцованные (грейзенизированные) граниты тыловой зоны метасоматической колонки.

Таким образом, танталоносные апограниты мусковит-микроклин-кварц-альбитового состава в условиях высокой активности фтора формируются также в апикальных участках массивов метасоматически измененных (грейзенизированных) гранитоидов, экранированных карбонатными породами. Характерной особенностью месторождения в данном случае является появление в рудной зоне наряду с танталом концентраций титана, образованных вблизи карбонатного геохимического «барьера» в пределах эндоконтактовой зоны массива.

Апограниты субщелочного ряда

Литионит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты

Метасоматически измененные гранитоиды, характерными типоморфными минералами которых являются литиевые слюды, представляют собой наиболее интересную с точки зрения танталоносности группу апогранитов. В зависимости от особенностей парагенезиса среди них могут быть выделены три главных типа (см. табл. 12).

Литионитсодержащие апограниты, в которых калиевый полевой шпат представлен зеленым или голубовато-зеленым амазонитом, а литиевые слюды — лепидолитом или криофиллитом, в настоящее время должны рассматриваться как наиболее перспективный с точки зрения танталоносности тип апогранитов. Литионит-амазонит-альбитовые апограниты отличаются сложностью проявления метасоматических процессов и своеобразием свойственной им редкометальной минерализации.

Апограниты рассматриваемого типа приурочены к самым апикальным участкам массивов альбитизированных и грейзенизированных гранитоидов, размещение которых контролируется крупными нарушениями. Наиболее характерной особенностью массивов подобных апогранитов является четко выраженная метасоматическая зональность. Несмотря на некоторые отличия в характере парагенезиса отдельных зон, все изученные примеры метасоматических колонок имеют одну общую черту — развитие зон высокотемпературного окварцевания на глубоких горизонтах массивов литионит-амазонит-альбитовых апогранитов. Зоны, в которых развито окварцевание, могут быть представлены грейзенизированными двуслюдяными или мусковитовыми гранитами, мусковит-альбитовыми апогранитами или амазонит-альбитовыми метасоматическими породами с высоким содержанием кварца. В корнях апогранитовых массивов распространены биотитовые или двуслюдяные порфировидные граниты, отличающиеся широким развитием ранней микроклинизации.

В зависимости от тектонических условий, имевших место в период развития метасоматических процессов, вертикальная зональность апогранитов может быть представлена очень четко или же усложнена в результате широкого проявления внутриминерализационной трещиноватости. Лепидолит-амазонит-альбитовые танталоносные апограниты Забайкалья по химическому составу близки к среднему составу альбитовых апогранитов (Беус, Ситнин, 1965), но отличаются от них несколько повышенным содержанием алюминия, натрия и калия и относительно пониженным содержанием кремния, титана, железа, магния и кальция (табл. 15).

Пример 1. Характерным примером массивов литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с четко выраженной вертикальной метасоматической зональностью (рис. 1) может служить куполовидный выступ крупного интрузивного тела, сложенного биотитовыми и двуслюдяными порфировидными гранитами юрского возраста (Забайкалье). Интрузивный массив располагается в активизированной области стабильной палеозойской глыбы и контролируется дизъюнктивными нарушениями глубокого заложения. В пределах главного интрузива, особенно в зоне эндоконтакта, заметно проявлены процессы грейзенизации, выражающиеся главным образом в развитии высокотемпературного окварцевания гранитов, преимущественно связанного с микротрещиноватостью. Окварцованные мусковитовые и двуслюдяные граниты слагают также корневую часть куполовидного выступа интрузивного тела, апикальные горизонты которого представлены танталоносными литионит-амазонит-альбитовыми апогранитами. Последние с глубиной сменяются мусковит-микроклин-кварц-альбитовыми метасоматическими породами, сходными с мусковит-альбитовыми апогранитами. Их контакт с нижележащей зоной грейзенизированных, мусковитовых и двуслюдяных гранитов четко метасоматический, но довольно резкий.

Мощность эндоконтактовой зоны куполовидного выступа, сложенной танталоносными литионит-амазонит-альбитовыми апогранитами, изменяется от 20 до 100 *м*. Максимальная мощность характерна для наиболее пологих участков контакта апогранитов с вмещающими песчано-сланцевыми породами. Последние в пределах экзоконтакта массива не несут следов заметной грейзенизации, хотя на расстоянии до сотни метров от контакта с апогранитами во вмещающих породах прослеживается эндогенный геохимический ореол массива апогранитов, который характеризуется повышенными содержаниями таких

Таблица 15

Оценки параметров распределения петрогенных элементов в лепидолит-амазонит-альбитовых танталоносных апогранитах (Забайкалье)

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %
		Среднее арифметическое содержаний, %	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое отклонение содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
SiO_2	24	70,7 ± 0,5	1,183	1,087	—	—	—	1,5	68,0—73,4
TiO_2	24	<0,01	—	—	—	—	—	—	<0,01
Al_2O_3	24	17,4 ± 0,4	1,065	1,032	—	—	—	5,9	14,8—20,0
Fe_2O_3	24	0,31 ± 0,24	—	—	0,210	0,234	0,549	111,4	0,01—0,80
FeO	24	0,55 ± 0,25	—	—	—0,414	0,149	0,386	108,6	0,04—3,59
MnO	24	0,08 ± 0,04	—	—	—1,270	0,161	0,401	92,5	0,005—0,54
MgO	24	0,15 ± 0,06	—	—	—0,674	0,051	0,226	99,3	0,06—0,79
CaO	24	0,51 ± 0,13	—	—	—0,354	0,059	0,244	62,0	0,11—1,81
Na_2O	24	6,00 ± 0,45	0,940	0,970	—	—	—	17,5	3,57—8,43
K_2O	24	3,60 ± 0,23	—	—	0,552	0,004	0,062	15,0	2,49—5,09
F	20	0,80 ± 0,21	—	—	—1,185	0,076	0,276	57,5	0,12—3,30

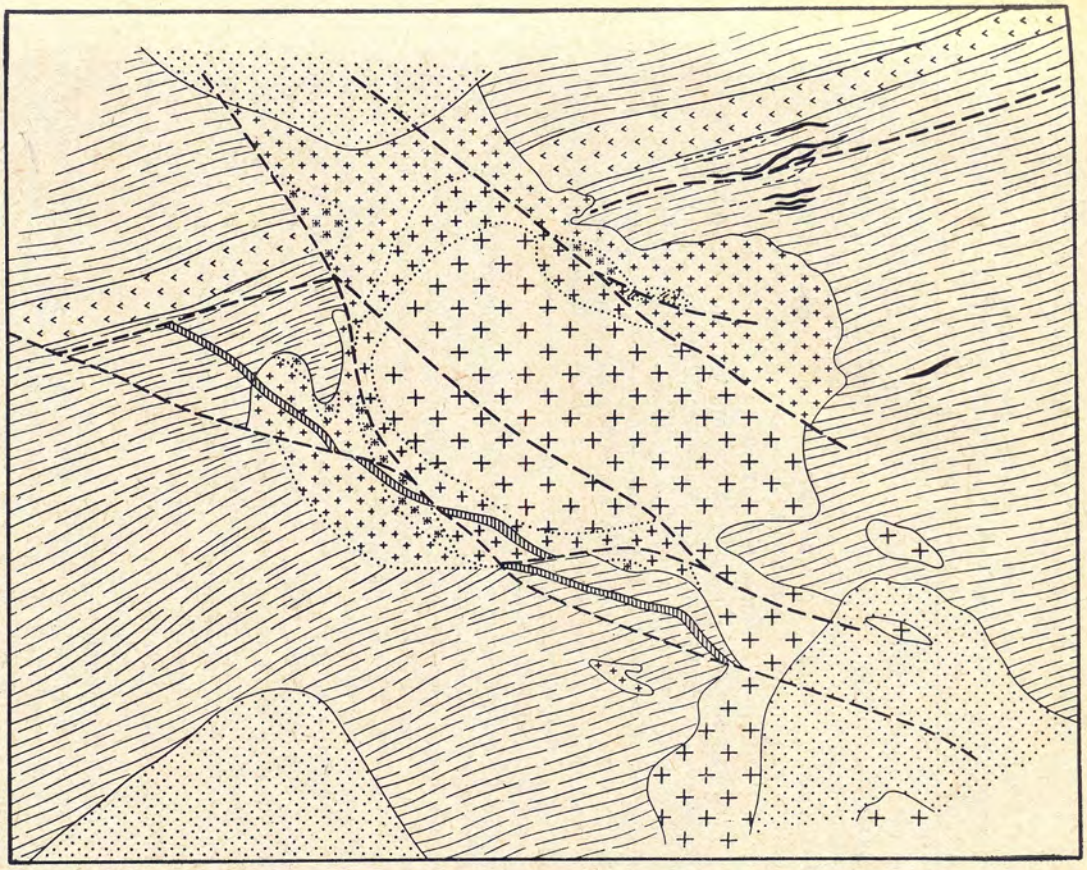


Рис. 1. Массив танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов. *По В. И. Белых, А. М. Гребенникову, Н. Е. Залашковой и Э. А. Северову*

1 — четвертичные отложения; *2* — метаморфические сланцы и песчаники; *3* — лампрофиры; *4* — двуслюдяные граниты (окварцованные); *5* — мусковит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты порфировидной структуры; *6* — амазонит-альбитовые апограниты с мусковитом и лепидолитом; *7* — амазонит-альбитовые апограниты с лепидолитом; *8* — лепидолит-топаз-кварцевые грейзены; *9* — кварц-альбитовые и кварц-амазонит-альбитовые жилы; *10* — дайки диабазов; *11* — разрывные нарушения

типоморфных элементов апогранитов, как литий, рубидий, бериллий и фтор.

На границе между вмещающими породами и верхней зоной альбитовых апогранитов, обогащенных лепидолитом, развивается кварц-амазонитовая оторочка мощностью до 50 *см*.

В пределах экзоконтактовой зоны вмещающие породы нередко секутся серией кварц-альбитовых, кварцевых или кварц-амазонитовых прожилков небольшой мощности (от единиц, реже до десятков сантиметров), содержащих вольфрамит, касситерит, берилл, топаз. В отдельных местах, обычно в участках неглубокого залегания апогранитов, подобные мелкие прожилки образуют в песчано-сланцевых породах кровли небольшие штокверки.

Главные породообразующие минералы апогранитов: альбит № 0—8 (от 20 до 75%), микроклин-амазонит (от 3 до 33%), кварц (от 8 до 50%) и литиевая слюда (от 0,5 до 25%). Характерной особенностью апогранитов является развитие нескольких генераций всех породообразующих минералов. Из акцессорных минералов в рассматриваемом массиве наряду с минералами тантала и ниобия распространены касситерит, монацит, циркон, самородный свинец, сульфиды, окислы и гидроокислы железа.

Ниобий-танталовая минерализация, представленная колумбит-танталитом, манган-танталитом и в значительно меньшей степени микролитом, развивается в эндоконтактовых участках куполовидного выступа в верхней части зоны литионит-амазонит-альбитовых апогранитов. Весьма характерно отсутствие накопления минералов тантала в нижней части литионитсодержащей зоны, которая с этой точки зрения не отличается от нижележащей зоны мусковит-альбитовых апогранитов. Содержание пятиокиси тантала, достигающее 0,03—0,04% в непосредственной близости к контакту со сланцами, с глубиной закономерно уменьшается и на глубине от 20 до 70 *м* от контакта приближается к 0,01%, уменьшаясь на глубоких горизонтах зоны литионит-амазонит-альбитовых апогранитов до 0,006—0,007%. Соответственно тантал-ниобиевое отношение изменяется от 2 : 1 в пользу тантала в апикальных участках массива до 1 : 1 на глубоких горизонтах зоны.

Уменьшение содержания тантала и тантал-ниобиевого отношения с глубиной в рассматриваемом случае зависит как от уменьшения абсолютного содержания ниобий-танталовых минералов на глубоких горизонтах массива апогранитов (особенно резко при удалении от контакта уменьшается содержание микролита и на глубине 20—30 *м* он полностью исчезает), так и от уменьшения тантал-ниобиевого отношения в минералах (Беус, Залашкова, 1965).

Элементы-примеси в лепидолит-амазонит-альбитовых апогранитах рассматриваемого массива характеризуются резко повышенным против среднего для гранитов содержанием тантала, ниобия, лития, рубидия, цезия, бериллия, олова, свинца и цинка и пониженным содержанием циркония (табл. 16).

Таблица 16

Оценки параметров распределения элементов-примесей в лепидолит-амазонит-альбитовых апогранитах, Забайкалье

(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
		содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний				
Ta	56	142 ± 29 *	2,07	0,0844	0,290	75	24—585
Nb	56	77 ± 12 *	1,823	0,060	0,244	58	17—257
Li	48	1280 ± 270 *	3,021	0,079	0,281	73	290—3780
Rb	45	1600 ± 400	3,182	0,019	0,137	75	711—3250
Cs	10	39 ± 15	1,502	0,109	0,330	53	3—310
Be	43	8 ± 2 *	0,838	0,065	0,256	65	2—30
Sn	30	28 ± 12 *	1,176	0,248	0,498	151	1—255
Zr	31	14 ± 4 *	1,065	0,080	0,282	61	2—58
Cu	31	25 ± 8	1,241	0,135	0,367	92	2—140
Pb	31	40 ± 11	1,380	0,198	0,445	77	2—300
Zn	31	400 ± 280	2,100	0,396	0,629	119	4—4400

* Максимально правдоподобная оценка.

Пример 2. Примером массивов танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, вертикальная метасоматическая зональность которых усложнена внутриминерализационной трещиноватостью, может служить небольшой по площади (около 1,5 *км*^{2}) массив, залегающий в песчано-сланцевой толще юрского возраста (Забайкалье). Массив приурочен к своду антиклинальной складки северо-восточного простирания и располагается на пересечении субширотной и субмеридиональной тектонических зон. Основная часть поверхности массива сложена литионит-амазонит-альбитовыми апогранитами порфировидной текстуры (рис. 2).

Лишь в эндоконтактовой зоне и останцах апикальной части массива распространены мелкозернистые разности аналогичного состава, развивающиеся по порфировидным апогранитам. Отличительной чертой метасоматических пород, слагающих основную часть массива апогранитов, является развитие довольно крупных (до 5—8 *см* в поперечнике) округлых порфиробласт кварца и относительно идиоморфных кристаллов амазонита, рассеянных в мелкозернистой массе альбита. Среди порфировидных апогранитов различают танталоносные лепидолит-амазонит-альбитовые разности с пирохлор-микролитом и танталит-колумбитом, слагающие эндоконтактовые и апикальные участки массива, и криофиллит-амазонит-альбитовые апограниты с колумбитом, слагающие основную часть массива на горизонте эрозионного среза и его глубокие горизонты.

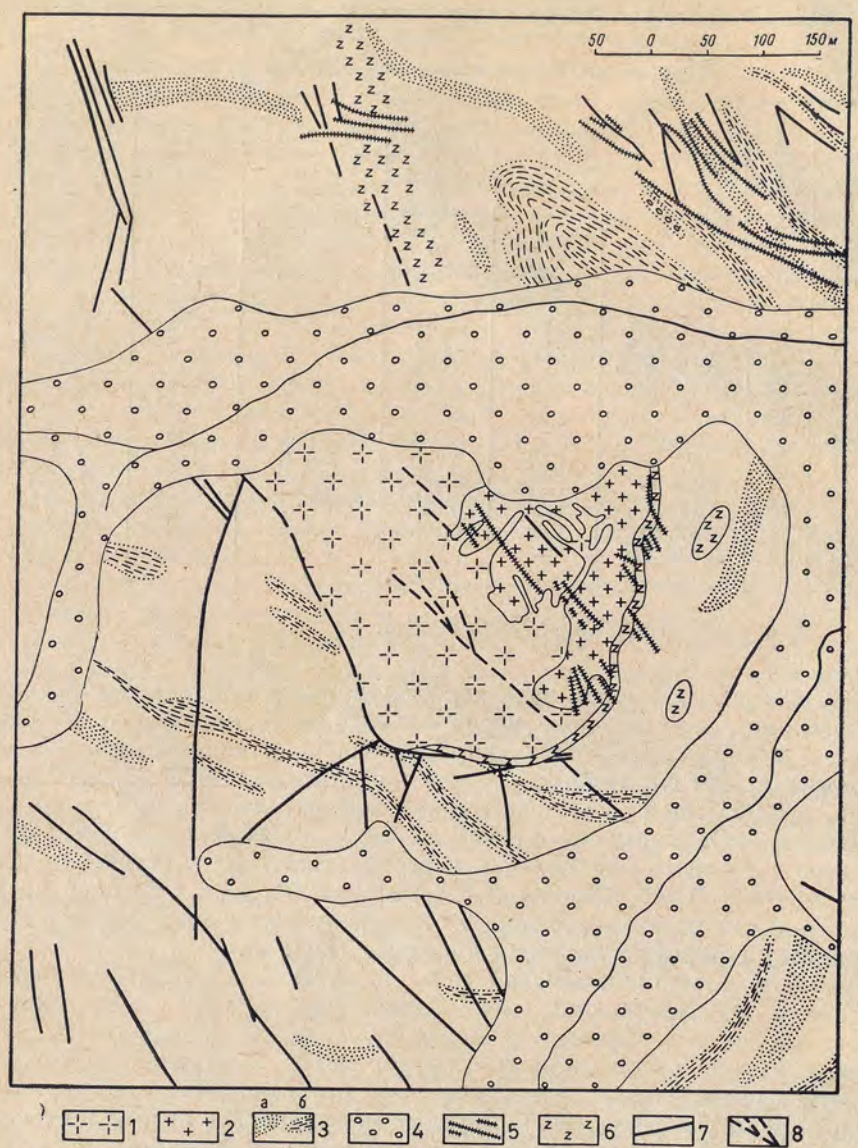


Рис. 2. Массив танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с экзоконтактовой зоной литионит-топаз-кварцевых грейзенов. По материалам *А. В. Дружинина, Н. В. Сункинзяна и др.*

1 — криофиллит-амазонит-альбитовые апограниты с убогим содержанием тантала; *2* — лепидолит-амазонит-альбитовые апограниты танталоносные; *3* — прослои песчаников (*а*) и алевролитов (*б*) среди аргиллитов; *4* — четвертичные отложения; *5* — амазонит-и топаз-кварцевые жилы; *6* — литионит-топаз-кварцевые грейзены; *7* — тектонические нарушения; *8* — зоны трещиноватости

В апогранитах эндоконтактовой зоны массива значительно интенсивнее проявлены процессы поздней альбитизации и микроклинизации. Особо заметное развитие эти процессы получают в участках и зонах развития трещиноватости, где происходит формирование мелкозернистых разностей апогранитов, также являющихся танталоносными (за исключением заметно окварцованных фаций). Эндоконтактовые фации апогранитов преимущественно развиты в восточной части массива, отличающейся более пологим падением и сложностью конфигурации плоскости контакта.

Танталоносные лепидолит-амазонит-альбитовые апограниты, обнажающиеся в зоне восточного эндоконтакта, на глубине 100—150 *м* сменяются порфировидными криофиллит-амазонит-альбитовыми апогранитами, характерной чертой которых является такситовая текстура, обусловленная наличием тонких прожилков и «струй», сложенных альбитом или амазонитом и кварцем. Подобные породы распространены до глубины 300—400 *м*, где их сменяют сильно окварцованные биотит-амазонит-альбитовые апограниты с темной слюдой типа литиевого биотита (Ситнин, Сункинзян, 1966).

Главными породообразующими минералами литионит-амазонит-альбитовых апогранитов являются альбит № 6—8 (40—50%), микроклин (амазонит, 20—40%), кварц (20—40%) и литиевые слюды (до 5%). Соотношения между породообразующими минералами апогранитов очень изменчивые. Характерным второстепенным минералом, кроме литиевых слюд, является топаз, содержание которого колеблется от 2% в эндоконтактовых разностях танталоносных апогранитов до 0,5% и менее в криофиллит-амазонит-альбитовых апогранитах центральной части массива.

Из акцессорных минералов для рассматриваемого массива апогранитов наиболее характерны пирохлор-микролит и колумбит, довольно широко распространен касситерит, обычен циртолит, в меньшей степени монацит и торит, редко вольфрамит. Вблизи контакта с вмещающими породами очень редко встречается лопарит.

Литиевые слюды рассматриваемых апогранитов, как уже отмечалось, представлены лепидолитом и криофиллитом. При этом в эндоконтактовых участках восточной части массива, отличающихся повышенными концентрациями тантала, преобладает лепидолит, образующий псевдоморфозы по идиоморфным пластинкам криофиллита, а также проникающий в виде чешуек по трещинкам в зернах микроклина и альбита.

Криофиллит характерен для порфировидных апогранитов, слагающих центральную часть массива и его глубокие горизонты. На глубине 300—400 *м* по данным структурного бурения отмечена смена маложелезистых слюд типа криофиллита литиевым биотитом.

Повышенные концентрации тантала в эндоконтактовых участках рассматриваемого массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов связаны с присутствием в этих участках пирохлор-микролита. Этим рассматриваемый массив отличается от ранее описанного примера, где высокие концентрации тантала в апогранитах аналогичного

состава обусловлены колумбит-танталом при весьма подчиненном значении микролита. За пределами эндоконтактовых фаций апогранитов пирохлор-микролит практически исчезает, сменяясь колумбитом. Таким образом, в рассматриваемом массиве танталоносных апогранитов промышленные концентрации тантала в основном связаны с широким распространением пирохлор-микролита.

Наиболее высокие содержания пятиокиси тантала (0,012—0,035%) отмечаются в порфировидных и мелкозернистых лепидолит-амазонит-альбитовых апогранитах эндоконтактовой зоны восточной части массива. В порфировидных криофиллит-амазонит-альбитовых апогранитах центральной части массива содержание тантала снижается до 0,003—0,009%, а в окварцованных биотит-альбитовых апогранитах, слагающих глубокие горизонты массива (глубже 350 *м*), оно падает до 0,003%. Соответственно изменяется и тантал-ниобиевое отношение: от 1 : 1 в породах эндоконтактовой части массива до 1 : 3 в породах центральной части и до 1 : 10 в окварцованных породах, слагающих глубокие горизонты. Оценки параметров распределения редких элементов, свинца, меди и фтора, являющихся спутниками тантала в апогранитах, приведены в табл. 17.

В участках относительно пологого восточного контакта массива характерно развитие зоны интенсивной грейзенизации вмещающих песчано-сланцевых пород вплоть до образования экзоконтактовых криофиллит-топаз-кварцевых грейзенов с танталовым рутилом и касситеритом. Мощность грейзенов достигает нескольких метров. В зоне экзоконтакта массива танталоносных апогранитов развиты также кварц-топазовые и кварц-амазонитовые жилы значительной (до 1—2 *м*) мощности с касситеритом и литиевыми слюдами.

Слабые следы грейзенизации вмещающих пород прослеживаются на десятки и даже сотни метров от контакта с массивом и вокруг жильных тел. В связи с этим в экзоконтакте массива танталоносных апогранитов наблюдается эндогенный геохимический ореол, характеризующийся повышенным содержанием лития, рубидия, бериллия, тантала, ниобия, олова, фтора, кальция и других элементов, выносимых из пород массива в процессе метасоматической переработки.

Амазонит-кварц-альбитовые апограниты, типоморфным минералом которых является литиевый биотит, описанные выше в качестве тыловой зоны метасоматической колонки литионитсодержащих апогранитов, в ряде случаев слагают верхние (головные) метасоматические зоны массивов интенсивно альбитизированных биотитовых гранитов.

В отличие от танталоносных литионит-амазонит-кварц-альбитовых апогранитов рассматриваемые метасоматические породы характеризуются значительно меньшим распространением поздних генераций альбита и микроклина. Слюда в них обычно представлена литиевым биотитом или протолитионитом, реже циннвальдитом. Из акцессорных минералов характерны колумбит, циркон (циртолит

Таблица 17

Оценка параметров распределения элементов-примесей и фтора в массиве танталоносных литионит-амазонит-кварц-альбитовых апогранитов
(Забайкалье)

Элемент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01% для граничных значений, *г/т*
		Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
Ta	170	80 ± 4	—	—	1,780	0,096	0,311	70	11—325
Nb	170	204 ± 8*	—	—	2,340	0,027	0,164	33	60—790
Li	130	525 ± 10*	—	—	2,650	0,057	0,240	12	120—1640
Rb	27	1590 ± 192	—	—	3,183	0,018	0,135	24	700—3290
Cs	15	30 ± 10*	—	—	1,349	0,024	0,156	39	9—54
Be	40	5,6 ± 0,9	4,14	2,03	—	—	—	36	1—10
Sn	46	66 ± 14*	—	—	1,640	0,221	0,470	74	3—590
Cu	38	11 ± 4*	—	—	0,889	0,109	0,330	122	1—50
Pb	15	164 ± 43*	—	—	2,163	0,047	0,217	51	40—580
F, %	8	0,47 ± 0,26	—	—	—0,300	0,054	0,232	77	0,1—2,4

* Максимально правдоподобная оценка.

Таблица 18

Оценки параметров распределения петрогенных элементов в биотит-амазонит-альбитовых апогранитах Майкульского массива
(16 проб)

Компонент	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %
	Среднее арифметическое содержаний, %	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
SiO_2	75,3 ± 0,7	2,02	1,42	—	—	—	1,9	71,6—79,0
TiO_2	0,03 ± 0,01	—	—	—1,760	0,126	0,355	83,9	0,002—0,16
Al_2O_3	12,9 ± 0,2	0,143	0,378	—	—	—	2,9	12,2—13,6
Fe_2O_3	0,30 ± 0,17	—	—	—0,591	0,104	0,322	104,0	0,04—1,82
FeO	1,1 ± 0,17	—	—	0,016	0,111	0,105	27,9	0,5—2,0
MnO	0,05 ± 0,004	0,00005	0,0073	—	—	—	29,2	0,03—0,08
MgO	0,20 ± 0,04	—	—	—0,718	0,023	0,152	35,0	0,08—0,48
CaO	0,59 ± 0,12	—	—	—0,272	0,039	0,197	41,5	0,16—1,77
Na_2O	4,80 ± 0,24	0,239	0,489	—	—	—	10,2	3,5—6,1
K_2O	3,90 ± 0,43	0,751	0,867	—	—	—	2,2	1,6—6,2
P_2O_5	0,05 ± 0,01	—	—	1.342	0,023	0,152	3,1	0,02—0,11
F	0,22 ± 0,01	—	—	—0,673	0,029	0,169	8,6	0,08—0,68

Таблица 19

Оценки параметров распределения элементов-примесей в биотит-амазонит-альбитовых апогранитах Майкульского массива
(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Ta	16	9 ± 3	0,905	0,043	0,208	60,0	2—28
Nb	16	46 ± 5	1,650	0,009	0,095	21,0	25—80
Li	16	188 ± 60	2,160	0,143	0,378	59,3	14—1445
Rb	16	686 ± 151	2,796	0,041	0,202	41,3	182—2143
Cs	16	26 ± 7	1,352	0,075	0,274	48,8	4—119
Be	16	6,4 ± 0,9	0,795	0,015	0,122	25,1	3—13
Sn	15	21 ± 7	1,243	0,066	0,257	63,2	4—86
Zr	16	229 ± 62	2,311	0,045	0,211	51,5	57—730
Th	16	35 ± 5	1,527	0,016	0,127	28,5	16—73
$\sum$ TR	16	406 ± 63	2,589	0,020	0,141	30,0	164—897
V	15	2,2 ± 0,7	0,275	0,056	0,236	55,5	0,4—8
Cu	16	18 ± 3	1,232	0,016	0,127	31,2	8—40
Pb	16	70 ± 13	1,820	0,025	0,158	35,6	25—175

Таблица 20

Оценки параметров распределения петрогенных элементов в биотит-амазонит-альбитовых апогранитах Тургинского массива, Забайкалье
(15 проб)

Компонент	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %
	Среднее арифметическое содержаний, %	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
SiO_2	75,4 ± 0,4	0,688	0,830	—	—	—	1,1	73,2—77,6
TiO_2	0,04 ± 0,01	—	—	—1,424	0,037	0,192	37,2	0,01—0,12
Al_2O_3	13,4 ± 0,3	0,307	0,554	—	—	—	4,1	11,9—14,9
Fe_2O_3	0,20 ± 0,07	—	—	—0,839	0,160	0,400	67,8	0,01—1,70
FeO	1,10 ± 0,12	—	—	0,030	0,008	0,087	20,5	0,63—1,84
MnO	0,03 ± 0,01	—	—	—1,485	0,015	0,122	35,6	0,02—0,07
MgO	0,31 ± 0,07	—	—	—0,556	0,055	0,234	45,4	0,05—1,18
CaO	0,17 ± 0,05	—	—	—0,808	0,041	0,202	52,0	0,04—0,54
Na_2O	4,80 ± 0,47	0,837	0,915	—	—	—	19,1	2,3—7,3
K_2O	4,10 ± 0,51	0,989	0,994	—	—	—	24,2	1,4—6,8
P_2O_5	0,02 ± 0,01	—	—	—1,728	0,056	0,237	58,8	0,004—0,081
F	0,22 ± 0,06	—	—	—0,694	0,040	0,200	55,8	0,06—0,69

Таблица 21

Оценки параметров распределения элементов-примесей в биотит-амазонит-альбитовых апогранитах Тургинского массива, Забайкалье
(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
		содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний				
Ta	13	9,7 ± 2,5	0,927	0,065	0,255	47	2—41
Nb	16	44 ± 5	1,637	0,012	0,108	24	23—83
Li	12	288 ± 93	2,424	0,030	0,173	50	100—950
Rb	12	812 ± 135	2,894	0,016	0,127	26	340—1820
Cs	13	25 ± 4	1,380	0,017	0,129	30	10—53
Be	12	10 ± 4	0,954	0,041	0,203	63	2—33
Sn	14	40 ± 32	1,282	0,324	0,578	133	1—680
Zr	16	140 ± 40	2,044	0,120	0,340	57	14—880
Th	15	31 ± 7	1,446	0,048	0,220	42	6—105
$\sum$TR	16	200 ± 42	2,281	0,022	0,148	38	78—470
W	11	2 ± 0,6	0,278	0,419	0,205	48	1—7
Cu	16	17 ± 12	1,018	0,216	0,464	132	1—170
Pb	16	70 ± 10	1,820	0,026	0,161	30	20—190
Zn	16	100 ± 32	1,946	0,044	0,211	50	25—320

или малакон), монацит, реже касситерит, флюорит, сульфиды. Содержание колумбита обычно не превышает первых сотен граммов на тонну при отношении тантала к ниобию в минерале от 1 : 15 до 1 : 5. С точки зрения тантала подобные образования обычно интереса не представляют.

С глубиной биотит-амазонит-кварц-альбитовые апограниты сменяются альбитизированными биотитовыми гранитами с заметным проявлением более ранней микроклинизации.

Оценки параметров распределения тантала и сопутствующих ему элементов в биотит-амазонит-альбитовых апогранитах Майкульского массива (Центральный Казахстан) и Тургинского массива (Восточное Забайкалье), являющихся характерными примерами [1] подобного рода, приведены в табл. 18—21.

Следует отметить характерную разновидность литионитсодержащих альбитовых апогранитов, отличающуюся широким распространением фосфатов (в том числе амблигонита), количество которых достигает 1—3%, и заметной ролью лепидолита (5—10%). Среди акцессорных минералов в этих случаях появляются касситерит, колумбит, пирохлор-микролит, циркон, ксенотим, монацит, сульфиды, вольфрамит, флюорит и турмалин. По внешнему виду и особенностям взаимоотношения между породообразующими минералами рассматриваемая разновидность апогранитов очень сходна с описанными выше литионит-амазонит-кварц-альбитовыми апогранитами, отличаясь от них лишь отсутствием амазонита.

Апограниты щелочного ряда

Биотит-альбитовые апограниты с минералами ниобия и циркония

Биотит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты с минералами ниобия и циркония распространены достаточно широко. Они известны в виде отдельных небольших массивов и дайкообразных тел, а также в качестве характерных метасоматических фаций в массивах литионит-микроклин-кварц-альбитовых и рибекит-микроклин-кварц-альбитовых апогранитов.

Самостоятельные массивы биотит-микроклин-кварц-альбитовых апогранитов обнаружены в Центральном и Восточном Казахстане, на Урале, в некоторых районах Восточной Сибири и Дальнего Востока. В большинстве случаев апограниты этого типа характеризуются убогим содержанием редких элементов и промышленного интереса не представляют, являясь, однако, ценным поисковым признаком на более перспективные типы альбитизированных гранитоидов. В отдельных случаях массивы и тела подобных апогранитов отличаются относительно высоким содержанием ниобия (первые

[1] Поражает удивительная аналогия составов метасоматических пород, характеризующих массивы однотипных апогранитов из двух столь удаленных геохимических провинций.

десятые доли процента Nb_2O_5) при отношении ниобия к танталу 10 : 1, что уже представляет известный практический интерес.

Массивы и тела биотит-микроклин-кварц-альбитовых апогранитов, как правило, располагаются в апикальных частях относительно крупных гранитных интрузий, сложенных лейкократовыми порфировидными биотитовыми гранитами с заметным проявлением ранней микроклинизации. Пространственное положение и морфологические особенности тел апогранитов, как и в ранее рассмотренных случаях, контролируются зонами разломов и повышенной трещиноватости в пределах материнской интрузии и пород кровли.

Типоморфный минерал характеризуемых апогранитов — биотит — представлен мелкими (0,3—0,7 *мм*) хорошо заметными на светлом фоне породы листочками, обычно частично мусковитизированными и хлоритизированными.

Среди акцессорных минералов биотитсодержащих апогранитов обычны малакон, колумбит, гатчеттолит, достаточно широко распространены гематит, магнетит и флюорит.

Рибекит-микроклин-кварц-альбитовые апограниты с минералами циркония, ниобия и редких земель

Апограниты рибекит-микроклин-кварц-альбитового состава представляют собой практически интересный тип метасоматически измененных гранитоидов, отличающийся относительно высокими концентрациями циркония, ниобия и редких земель.

В настоящее время эти ниобийсодержащие апограниты известны в Казахстане, Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, а также в Центральной Африке, Юго-Восточной Азии и в некоторых других районах земного шара.

Они встречаются в весьма различной геологической обстановке и прорывают как песчано-сланцевые, так и карбонатные породы различного возраста или же развиваются среди слабо измененных биотитовых гранитов. Однако во всех изученных примерах положение массивов и тел метасоматически измененных рибекитовых гранитоидов в пространстве определяется крупными разрывными структурами, особенно участками их пересечения, реже трещинами оперения крупных разломов.

Необходимо подчеркнуть тесную генетическую связь рибекит-микроклин-кварц-альбитовых и биотитсодержащих апогранитов, повсеместно проявляющуюся в совместном развитии этих разновидностей в качестве обособленных метасоматических фаций в пределах одних и тех же массивов метасоматически измененных гранитоидов.

В отдельных случаях в массивах рибекитсодержащих альбитовых апогранитов, наиболее обогащенных ниобием и танталом, присутствуют литионитсодержащие фации апогранитов, что подчеркивает генетическую общность и этих разновидностей метасоматически измененных гранитоидов. Именно эти полифациальные массивы

рибекитсодержащих апогранитов могут представлять интерес с точки зрения танталоносности (Кудрин, Кудрина, 1965).

Акцессорные минералы апогранитов рассматриваемого типа достаточно разнообразны. Широко распространены гематит, магнетит, циркон (малакон), колумбит, торит, пирохлор и флюорит; более редки монацит, ксенотим, гагаринит, фергусонит, эвксенит, лопарит. Весьма характерна колумбитизация пирохлора, интенсивность которой заметно увеличивается с глубиной.

В отличие от малакона, распределенного в метасоматических фациях более или менее равномерно, распределение ниобиевых минералов четко определяется составом апогранитов.

Пирохлор преимущественно встречается в рибекит-микроклин-кварц-альбитовых апогранитах, слагающих периферические части массивов. При наложении на рибекитсодержащие фации апогранитов фаций, несущих литиевые слюды, происходит колумбитизация пирохлора. Таким образом, колумбит генетически связан с фациями апогранитов, содержащими циннвальдит или криофиллит. В процессе колумбитизации пирохлора имеет место некоторое увеличение содержания Ta_2O_5 в минерале (с 5,0 до 6,5—6,7%), а также увеличение тантал-ниобиевого отношения (с 1 : 9,5 до 1 : 8).

Следует подчеркнуть, что апограниты щелочного ряда, в том числе отличающиеся максимальным содержанием тантала (среднее содержание Ta_2O_5 в отдельных массивах колумбитсодержащих апогранитов щелочного ряда достигает 0,016%) во всех случаях отличаются резким преобладанием ниобия над танталом, так что отношение между танталом и ниобием в рудах, как правило, не поднимается выше 1 : 8.

Как следует из приведенных материалов, характерной геохимической особенностью апогранитовых месторождений тантала является накопление наряду с танталом и ниобием целого ряда акцессорных элементов (литий, рубидий, цезий, бериллий, олово, свинец, уран, торий и др.), являющихся характерными спутниками танталового оруденения. Некоторые перечисленные элементы (тантал, ниобий, торий и др.) преимущественно концентрируются в массивах апогранитов, другие накапливаются как в апогранитах, так и в измененных породах экзоконтактовой зоны (редкие щелочи, свинец, фтор и др.) и, наконец, третьи (характерный пример — бериллий) в условиях высокой активности фтора преимущественно выносятся за пределы массива, концентрируясь в зоне экзоконтакта.

Обогащение пород, вмещающих массивы танталоносных апогранитов, рядом химических элементов-спутников тантала, отмечаемое в пределах мощных (сотни метров) экзоконтактовых зон, является объективной предпосылкой для использования особенностей распределения этих элементов в качестве геохимического критерия при поисках месторождений танталовых руд, связанных с апогранитами, в том числе массивов танталоносных апогранитов, не выходящих на современную поверхность.

Пегматитовые месторождения тантала [1]

До конца 50-х годов танталоносные гранитные пегматиты считались единственным генетическим типом месторождений собственно танталовых руд, дававшим 100% мировой добычи танталовых концентратов. За рубежом они полностью сохранили свое значение и до настоящего времени, а в нашей стране наряду с танталоносными апогранитами являются важным источником тантала.

Танталоносные пегматиты, как и редкометальные пегматиты вообще, обычно встречаются в пределах более или менее крупных пегматитовых полей, включающих десятки, сотни, а иногда и тысячи пегматитовых образований, представляющих собой различные парагенетические типы гранитных пегматитов. Как правило, в пределах крупного поля редкометальных танталоносных пегматитов лишь доли процента от общего количества пегматитовых тел содержат повышенные концентрации тантала, могущие иметь практическое значение. Это было отмечено А. И. Гинзбургом (1954) и для пегматитов, содержащих практически интересные концентрации редких элементов вообще.

Отдельные поля танталоносных пегматитов в ряде случаев являются составными частями еще более крупных единиц — пегматитовых поясов, положение которых в пределах региона определяется крупными пликативными структурами I порядка, нарушенными региональными зонами разломов. В свою очередь, структурами, контролирующими положение пегматитовых полей, являются складчатые и разрывные структуры II и III порядков.

Рассматривая геологическое положение редкометальных пегматитовых полей, А. И. Гинзбург и Г. Г. Родионов (1961) отмечают следующее.

«1. Пегматитовые пояса встречаются в пределах древних щитов, а также в более молодых подвижных зонах, обрамляющих платформы. Они часто приурочены к краевым разломам, располагаясь на стыках разновозрастных структур, и могут встречаться среди геосинклинальных зон любого возраста.

2. Пегматиты залегают, как правило, в структурно-фациальных зонах геосинклиналей, характеризующихся накоплением наиболее мощных толщ терригенных отложений флишевой формации, измененных в процессе метаморфизма.

3. Редкометальные пегматиты формируются в интервалах глубин 4—6 *км* и закономерно связаны с комплексами пород кордиерит-антофиллитовой субфации метаморфизма, представленных андалузитовыми, антофиллитовыми, кордиеритовыми, биотитовыми, двуслюдяными и амфиболовыми сланцами» (стр. 88).

Материнскими гранитами танталоносных пегматитов являются биотитовые, двуслюдяные, реже роговообманково-биотитовые разности гранитов, характерной особенностью которых является широкое

[1] Раздел составлен при участии Г. Г. Кочемасова.

развитие явлений ранней микроклинизации (Беус, Залашкова, 1962). Последняя выражается в повсеместном распространении порфиробласт микроклин-пертита, придающих пегматитоносным гранитам характерный порфировидный облик.

В табл. 22—24 обобщены данные, характеризующие особенности химического состава гранитов Казахстана (по материалам Ю. Н. Спомиора) и Забайкалья, с которыми связаны танталоносные пегматиты.

Гранитные пегматиты, несущие тантало-ниобиевую минерализацию, отчетливо делятся на две большие группы: 1) незамещенные и слабо замещенные пегматиты; 2) замещенные пегматиты. Обе группы отличаются по структурно-минералогическим особенностям, связанным, как это видно из названия, с различной интенсивностью проявления метасоматических процессов, и, что особенно важно, по степени относительной концентрации тантала и ниобия. Характерно, что пегматиты обеих групп часто находятся в пределах одних и тех же пегматитовых полей, занимая в них различное геологическое положение. В ряде случаев незамещенные пегматиты тяготеют к лежачим бокам пегматитовых полей, расположенным вблизи материнских интрузий, замещенные — к висячим.

Внутри двух больших групп по структурно-минералогическим особенностям выделяются несколько типов пегматитов (табл. 25), которые часто связаны друг с другом взаимопереходами.

Поля танталоносных пегматитов обычно располагаются в эндо- и экзоконтактовых частях массивов пегматитоносных гранитов.

Структура полей определяется особенностями тектоники кровли гранитного интрузива, а также характером рельефа его апикальной части. Для пегматитовых тел, занимающих секущее положение по отношению к вмещающим породам, главным фактором, контролирующим структуру полей, является характер трещиноватости. Для межпластовых согласных пегматитов главными факторами, определяющими структуру полей, являются условия залегания сланцевых вмещающих пород.

Для крупных пегматитовых полей характерна неравномерность распределения в них пегматитовых тел. Участки значительной концентрации пегматитов (свиты пегматитов) сменяются участками, почти лишенными их.

Незамещенные или слабо замещенные пегматиты

Блоковые и полнодифференцированные мусковит-микроклиновые пегматиты (с бериллом и колумбитом)

Пегматиты этого типа (часто называемые еще колумбит-берилловыми) залегают обычно в осадочно-метаморфических породах кровли пегматитоносных гранитных интрузивов или в апикальных частях этих интрузивов. Представлены они пластовыми или линзовидными телами мощностью до первых десятков метров и длиной по простиранию и падению 500—1000 *м*.

Таблица 22

Оценки параметров распределения петрогенных элементов в гранитах, являющихся материнскими для танталоносных пегматитов
(Казахстан, Забайкалье)

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %
		Среднее арифметическое содержаний, %	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
SiO_2	59	71 ± 0,6	4,7	2,17	—	—	—	3,1	65,8—76,2
TiO_2	59	0,27 ± 0,05	0,036	0,189	—	—	—	70,0	<0,01—0,72
Al_2O_3	59	15,0 ± 0,1	0,211	0,459	—	—	—	3,1	13,8—16,2
Fe_2O_3	59	0,45 ± 0,12 *	0,148 *	0,385 *	—0,355	0,079	0,281	85,5	0,09—2,1
FeO	59	1,8 ± 0,22	0,730	0,854	—	—	—	47,4	0,01—3,80
MnO	59	0,07 ± 0,01 *	0,0014 *	0,034 *	—1,231	0,044	0,210	54,3	0,02—0,19
MgO	31	0,8 ± 0,1	0,047	0,217	—	—	—	27,0	0,3—1,3
CaO	59	1,15 ± 0,14 *	0,344 *	0,586 *	0,009	0,043	0,208	48,5	0,3—3,2
Na_2O	31	3,9 ± 0,2 *	0,437 *	0,661 *	0,582	0,004	0,062	15,5	3,0—5,8
K_2O	59	4,4 ± 0,2	0,645	0,803	—	—	—	18,2	2,5—6,3
P_2O_5	58	0,20 ± 0,01 *	0,003 *	0,055 *	—0,712	0,013	0,115	27,5	0,10—0,37
F	56	0,09 ± 0,01 *	0,0007 *	0,026 *	—1,184	0,026	0,162	38,0	0,03—0,16

* Максимально правдоподобная оценка.

Таблица 23

Оценки параметров распределения элементов-примесей в гранитах, являющихся материнскими для танталоносных пегматитов, Казахстан, Забайкалье
(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
		содержаний, г/т	логарифмов содержаний				
Ta	63	4,9 ± 0,6 *	0,651	0,036	0,190	47,2	1,6—12,7
Nb	62	25 ± 3	1,364	0,034	0,184	40,4	8—64
Li	60	99 ± 12 *	1,946	0,049	0,221	43,9	25—300
Rb	56	241 ± 14	2,370	0,011	0,103	22,3	133—414
Cs	45	16 ± 3 *	1,135	0,068	0,260	68,0	3—68
Be	60	8,0 ± 1,8 *	0,825	0,063	0,251	62,5	2—27
Sn	31	16 ± 2	1,148	0,058	0,241	50,5	1—52
Zr	52	159 ± 33 *	2,107	0,083	0,288	73,4	26—630
Th	46	15 ± 3	1,068	0,113	0,336	66,5	2—76
$\sum$TR	35	146 ± 30	2,069	0,095	0,308	60,5	21—650
Mo	31	<2	—	—	—	—	<2
V	56	15 ± 3	0,984	0,218	0,467	79,7	1—127
Cu	52	17 ± 4 *	1,030	0,184	0,429	120,5	1—123
Pb	49	32 ± 6 *	1,390	0,098	0,313	80,8	4—139
Zn	50	47 ± 6 *	1,619	0,042	0,205	49,3	13—130
B	72	20 ± 5 *	1,124	0,145	0,381	105,0	2—105

* Максимально правдоподобная оценка.

Таблица 24

Оценки параметров распределения геохимических отношений в гранитах, являющихся материнскими для танталоносных пегматитов

Отношения	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации отношений, %	Пределы колебания отношений с вероятностью 0,01% для граничных значений
		Среднее арифметическое отношений	Дисперсия отношений	Среднее квадратическое отклонение отношений	Среднее арифметическое логарифмов отношений	Дисперсия логарифмов отношений	Среднее квадратическое отклонение логарифмов отношений		
Nb/Ta	62	6,0 ± 0,9 *	12,0 *	3,4 *	0,710	0,057	0,239	58,0	1—19
Mg/Li	58	42 ± 6	487,2	22,08	—	—	—	52,6	1—95
K/Rb	57	157 ± 14	2790,0	52,9	—	—	—	33,7	31—283
V/Nb	56	0,81 ± 0,3 *	1,835 *	1,355 *	—0,389	0,269	0,519	125,0	0,02—7
Zr/Sn	48	12,0 ± 3,4 *	140,6 *	11,85 *	0,924	0,137	0,370	99,8	1—65
Li/Cs	45	6,9 ± 1,1 *	11,3 *	3,36 *	0,792	0,041	0,201	48,5	2—19
$\frac{100Ca}{Na+Ca}$	59	14 ± 2	38,4	6,18	—	—	—	44,0	1—29
Na/K	59	1,4 ± 0,2	0,593 *	0,770 *	0,123	0,022	0,147	42,2	1—3
Q	59	27 ± 0,8	9,6	3,1	—	—	—	11,5	19—34
Al′/Al	59	0,12 ± 0,01	0,0023	0,048	—	—	—	42,0	0,01—0,23
K_a	31	0,75 ± 0,01	0,0020	0,045	—	—	—	6,0	0,6—0,9

* Максимально правдоподобная оценка.

Таблица 25

Генетические типы месторождений тантала, связанных с формацией редкометальных пегматитов

Типы пегматитов	Типы месторождений	Вмещающие породы	Минералы тантала		Характерный парагенезис		Промышленное значение
			Главные	Второстепенные	Главные минералы	Сопутствующие редкометальные минералы	
Незамещенные или слабозамещенные	Блоковые и полнодифференцированные мусковит-микроклиновые гранитные пегматиты	Граниты эндоконтактовой части интрузивов, разнообразные осадочно-метаморфогенные породы кровли интрузивов	Колумбит-танталит		Микроклин, кварц, мусковит, альбит, черный турмалин, фосфаты железа и марганца	Берилл, трифилин	Широко распространенный тип. В ряде случаев имеет промышленное значение как объект для мелкомасштабной добычи
Замещенные	Мусковит-альбитовые гранитные пегматиты	То же	Колумбит-танталит, танталит		Альбит, кварц, мусковит, микроклин, спессартин, зеленый или синий турмалин и др.	Берилл, касситерит, трифилин и др.	Широко распространенный тип. В ряде случаев имеет важное промышленное значение
	Сподумен-альбитовые и лепидолит-альбитовые пегматиты	То же	Манган-танталит, манган-колумбит	Микролит, тантал-гатчеттолит, бисмуто-колумбит, бисмуто-танталит	Альбит, кварц, мусковит, микроклин, спессартин, полихромные турмалины	Берилл, сподумен, лепидолит, поллуцит, амблигонит, петалит, литиофиллит, касситерит	Важный промышленный тип, эксплуатируемый на комплекс редких элементов

Строение тел зональное. От зальбандов к центру выделяются аплитовидная оторочка, зона графического и среднезернистого пегматита, зона блокового пегматита, кварцевое или реже микроклин-пертитовое ядро. В зависимости от степени дифференцированности пегматитового тела некоторые зоны могут отсутствовать. Кварц-мусковитовые и кварц-альбит-мусковитовые замещающие комплексы обычно развиваются вокруг кварцевого ядра.

Главные минералы пегматитов представлены микроклином, кварцем, мусковитом, альбитом. Часто в больших количествах присутствует крупнокристаллический шерл. Редкометальные минералы представлены бериллом, колумбитом, танталитом, трифилином, касситеритом, реже встречаются самарскит, циртолит, фенакит.

Колумбит-танталит и берилл встречаются обычно в виде крупных хорошо образованных кристаллов. Характерной особенностью пегматитов является весьма неравномерное, гнездовое распределение редкометальных минералов. Располагаются они обычно в полевом шпате вблизи границы с кварцевым ядром. Наблюдается связь колумбит-танталита с участками развития мусковитового или мусковит-альбитового замещающего комплекса.

Характерной геохимической особенностью пегматитов рассматриваемого типа является преобладание ниобия над танталом (Nb/Ta отношение в колумбите обычно колеблется от 3 до 5) и убогое (0,00n%) содержание Ta_2O_5 в пегматитовых телах. Содержание колумбита в ряде случаев увеличивается по мере развития явлений альбитизации, однако во всех известных месторождениях запасы ниобия и тантала небольшие. Добыча ниобий-танталовых концентратов производится за рубежом попутно с добычей берилла и керамического сырья.

Замещенные редкометальные пегматиты

Эта группа включает ряд типов, характеризующихся специфическим составом замещающих комплексов и особенностями редкометального оруденения.

Мусковит-альбитовые пегматиты (с бериллом и колумбит-танталитом)

Пегматиты этого типа тесно связаны постепенными переходами с блоковыми мусковит-микроклиновыми пегматитами. Для них характерно интенсивное развитие альбитизации, наложенной на зоны блокового и среднезернистого пегматита.

Строение жил этих пегматитов часто сложное, нечетко зональное. Среди альбитового замещающего комплекса наблюдаются реликты участков блокового и среднезернистого строения. Альбитизация развивается как вокруг кварцевых ядер, так и в эндоконтактовых частях пегматитовых тел. Иногда отмечается частичная грейзенизация пегматитов.

Главные минералы пегматитов представлены альбитом (пластинчатым и сахаровидным), кварцем, мусковитом, микроклином,

турмалином, спессартином. Из редкометальных минералов присутствуют колумбит-танталит, танталит, берилл, касситерит, трифилин-литиофиллит, иногда гельвин, фенакит и некоторые более редкие минералы.

Колумбит-танталит обычно присутствует в виде мелкой вкрапленности в альбитизированных и грейзенизированных участках жил. Распределение его более равномерное, чем в блоковых мусковит-микроклиновых пегматитах.

В пределах танталоносных геохимических провинций мусковит-альбитовые пегматиты в некоторых случаях характеризуются преобладанием тантала над ниобием. По сравнению с блоковыми пегматитами в мусковит-альбитовых заметно возрастает содержание олова (0,0n%), бериллия (0,0n%), лития и цезия (редкие щелочи концентрируются в мусковите) и уменьшается количество железа и бора. Турмалин, как правило, распространен меньше, чем в блоковых пегматитах, и обычно представлен цветными разновидностями.

Месторождения мусковит-альбитовых пегматитов в ряде случаев имеют важное промышленное значение как источник тантала и бериллия. Содержание Ta_2O_5 в пегматитовых телах колеблется от тысячных долей процента до 0,01—0,02% (при Ta/Nb отношении от 3 до 0,4), что уже представляет существенный практический интерес.

Сподумен-альбитовые и лепидолит-альбитовые пегматиты (с колумбит-танталитом, микролитом и бериллом)

Пегматиты этого типа связаны с мусковит-альбитовыми постепенными переходами. Характерной особенностью их являются широко развитые процессы альбитизации, сподуменизации, лепидолитизации, грейзенизации. В ряде случаев хорошо выражена зональность (Солодов, 1962).

Форма тел плитообразная, линзовидная, реже встречаются небольшие штоки. Размеры тел по простиранию колеблются от нескольких десятков до нескольких сотен метров (редко 1—2 *км*), а по мощности — от нескольких метров до первых десятков метров.

В зональных пегматитах вокруг центрального кварц-сподуменового ядра обычно располагается альбитовая зона, часто сложенная клевеландитом. В этой зоне иногда присутствуют реликты блоковых структур. Внешние зоны пегматитов обычно представлены мелко- и среднезернистой альбитизированной породой.

Во многих зональных сподумен-альбитовых пегматитах присутствуют зачаточные образования лепидолитового и грейзенового замещающих комплексов, значение которых обычно увеличивается по восстанию пегматитовых тел. В отдельных случаях по восстанию в подобных телах наблюдается переход к лепидолит-альбитовым пегматитам. Кварц-лепидолитовые и альбит-лепидолитовые замещающие комплексы обычно обособляются в центральной части пегматитового тела. При этом сподуменсодержащие зоны или отсутствуют или находятся в подчиненном положении.

Главные породообразующие минералы сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов представлены альбитом, кварцем, сподуменом, мусковитом, микроклином, лепидолитом, полихромными турмалинами. Из редкометальных минералов, общее количество которых может достигать нескольких десятков, наиболее часто встречаются сподумен (до 20—30% объема породы), лепидолит, петалит, амблигонит, литиофиллит, поллуцит, колумбит, танталит, микролит, стрюверит, симпсонит, берилл, касситерит.

Тантало-ниобаты в различных зонах пегматитов обычно распределяются следующим образом. В клевеландитовой и мусковитовой зонах находится пластинчатый танталит или колумбит, с участками мелкозернистого альбита связан мелкокристаллический танталит или колумбит (наиболее перспективная на тантал зона), в лепидолитовой зоне находятся манган-танталит, микролит, в грейзеновой зоне — пластинчатый танталит-колумбит (Беус и др., 1957).

Характерной особенностью сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов, располагающихся в пределах танталоносных геохимических провинций, является часто наблюдаемое преобладание тантала над ниобием и резкое возрастание по сравнению с мусковит-альбитовыми пегматитами роли лития и цезия, минералы которых слагают значительные объемы пегматитовых тел, а также бериллия и олова.

Месторождения сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов являются наиболе перспективными в отношении танталоносности типами гранитных пегматитов, представляя собой важный промышленный тип, эксплуатируемый на комплекс редких элементов.

Представление о содержании редких элементов-спутников тантала в редкометальных пегматитах различных типов дает табл. 26.

Для большинства минералов танталоносных пегматитов характерно содержание примеси тантала и ниобия (табл. 27), что может быть успешно использовано в качестве критерия при поисках месторождений тантала, связанных с редкометальными пегматитами.

Таблица 26

Содержание редких элементов в различных типах редкометальных гранитных пегматитов

(в %)

Элемент	Мусковит-микроклиновые	Мусковит-альбитовые	Сподумен-альбитовые и лепидолит-альбитовые
Li	0,00n	0,04—0,1	0,25—0,75
Rb	0,015—0,020	0,015—0,040	0,010—0,6 (в лепидолит-альбитовых)
Cs	0,002—0,003	0,002—0,010	0,004—0,40 (в лепидолит-альбитовых)
Be	0,001—0,004	0,04—0,03	0,004—0,01
Nb	$<$0,005	$<$0,005—0,005	$<$0,005—0,008
Ta	$<$0,001	$<$0,01—0,012	0,003—0,02
Sn	$<$0,001	0,00n—0,01	0,00n—0,08

Таблица 27

Содержание тантала и ниобия в минералах редкометальных пегматитов

(в *г/т*)

Минерал	Количество проб	Тантал		Ниобий		Nb/Ta
		от—до	среднее	от—до	среднее	
Мусковит . . .	58	6—190	36 ± 5	40—800	220 ± 34	4—10
Жильбертит . .	2	20—46	33	33—240	137	4
Биотит	3	110—800	403	300—1850	880	2
Лепидолит . . .	5	80—170	114	140—230	160	1,5
Турмалин . . .	5	10—40	12	10—130	40	3
Гранат	8	57—400	162	10—100	47	0,3
Касситерит . . .	6	7000—19 000	9900	9400—18 200	10 400	1

Примечание. Для мусковита приведены статистически обработанные данные, остальные данные заимствованы из работы Н. А. Солодова (1962).

ГЛАВА 3

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ ТАНТАЛА В ПОСЛЕМАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Представления о тантале и ниобии, как химических элементах, не характерных для пневматолито-гидротермального процесса, были пересмотрены в конце 50-х годов на основе богатого фактического материала, характеризующего распределение этих элементов в метасоматически измененных гранитоидах и редкометальных пегматитах (Беус, Ситнин, 1961). В настоящее время геохимические особенности миграции тантала и ниобия в высокотемпературных послемагматических растворах могут обоснованно рассматриваться как ведущий фактор разделения тантала и ниобия и последующей концентрации тантала в природных процессах.

С этой точки зрения интересны данные, характеризующие особенности распределения тантала и ниобия в слюдах гранитоидов (Ситнин, 1966). Как следует из анализа имеющегося материала, концентрация ниобия и тантала в гранитоидах начинается в стадию формирования лейкократовых и двуслюдяных гранитов и достаточно четко связывается с начальными этапами высокотемпературного послемагматического преобразования этих пород. В биотитах из лейкократовых и двуслюдяных гранитов имеет место заметное увеличение содержания тантала и ниобия по сравнению с биотитами из нормальных гранитов того же интрузивного комплекса (табл. 28).

Судя по имеющимся данным, в процессе начавшегося калиевого метасоматоза биотитовых гранитов разделения тантала и ниобия, по-видимому, не происходит. В то же время процесс мусковитизации гранитов сопровождается четким накоплением тантала по отношению к ниобию, что отражается в резком снижении ниобий-танта-

Таблица 28

Содержание тантала и ниобия в биотитах гранитов

(в *г/т*)

Район	Тип гранитов	Количество проб	Ta	Nb	Nb/Ta
Центральный Казахстан	Неизмененные	10	3	70	23
То же	Лейкократовые	7	13	225	17
Горный Алтай	Неизмененные	2	4	100	25
То же	Двуслюдяные	4	18	160	9
Забайкалье	Неизмененные	5	8	84	10
То же	Двуслюдяные	22	33	360	11

лового отношения в мусковитах из двуслюдяных и мусковитовых гранитов (среднее Nb/Ta отношение по 27 пробам мусковитов из гранитов составляет 6,6).

Особенно заметная концентрация тантала и ниобия наблюдается в сидерофиллитах и литиевых биотитах из гранитоидов, в которых в значительной степени проявились процессы микроклинизации и альбитизации — в апикальных выступах интрузивных тел подобных гранитов часто формируются массивы апогранитов (табл. 29). Формирование биотитов, обогащенных ниобием и танталом, в подобных гранитах сопровождается явлениями растворения сфена и ильменита, содержащих тантал и ниобий.

Таблица 29

Содержание тантала и ниобия в литиевых биотитах из массивов микроклинизированных и частично альбитизированных гранитов

(в *г/т*)

Регион и массив	Количество проб	Ta	Nb	Nb/Ta
Украина (массивы Екатериновский и Каменные Могилы)	27	76	775	10
Забайкалье (Тургинский, Хангилай-Шилинский массивы)	10	33	447	13

В процессе последующего метасоматического изменения гранитов при замещении литиевого биотита мусковитом или литиевыми слюдами ряда циннвальдит — криофиллит — лепидолит наблюдается вынос тантала и ниобия из слюд. В слабо измененных гранитах эти элементы переотлагаются в твердую фазу здесь же, образуя такие характерные для микроклинизированных или мусковитизированных гранитов акцессории, как поликраз-эвксенит, фергусонит, колумбит, танталовый рутил и др. При этом валовая концентрация тантала и ниобия в граните почти не увеличивается. Таким образом,

появление собственных минералов тантала и ниобия в метасоматически измененных гранитах сопровождается уменьшением содержания этих элементов в слюдах.

В качестве примера могут быть приведены колумбитсодержащие мусковит-альбитовые апограниты Каменных Могил (Украина), мусковит которых содержит 30 *г/т* тантала и 60 *г/т* ниобия, что значительно ниже, чем содержание этих элементов в биотитах первичного гранита (см. табл. 29). При этом содержание тантала в слюде уменьшилось в два раза, а ниобия более чем в десять раз. О выносе тантала и ниобия в процессе замещения биотита криофиллитом и лепидолитом, сопровождающемся образованием колумбита и пирохлор-микролита, уже сообщалось в литературе (Ситнин, Разина, 1963).

В случаях более интенсивного преобразования гранитов, особенно при развитии процессов высокотемпературного окварцевания (выщелачивания), наблюдается растворение акцессорных минералов тантала и ниобия и вынос этих элементов кислыми растворами (при этом характерен преимущественный вынос тантала по сравнению с ниобием).

Исходя из предполагаемого состава послемагматических растворов, в характеризуемом процессе наиболее вероятен перенос тантала и ниобия в форме сложных фторкомплексных, в том числе фторокси комплексных соединений. При этом следует иметь в виду большую подвижность фторкомплексов и фтороксикомплексов тантала по сравнению с ниобием, что определяет возможность дифференциации этих сходных элементов в послемагматических образованиях. Таким образом, развитие процессов высокотемпературного кислотного метасоматоза в породах, содержащих тантал и ниобий, создает объективные предпосылки для образования послемагматических концентраций тантала в наиболее поздних метасоматических фациях апогранитов.

Характерно, что в пределах метасоматических колонок апогранитов ниобий, связанный с колумбитом или пирохлором (в наиболее щелочных фациях), как правило, распределен более или менее равномерно. Минимальные содержания тантала наблюдаются в зонах развития высокотемпературного окварцевания. По направлению к верхним горизонтам колонки в танталоносных апогранитах содержание тантала закономерно увеличивается, достигая максимума в экранированных пологих участках эндоконтакта массивов апогранитов. При этом закономерно увеличивается тантало-ниобиевое отношение, которое в зонах концентрации тантала местами достигает 2—3 в пользу тантала.

В пегматитах концентрация тантала также тесно связана с процессом послемагматического метасоматоза — мусковитизацией, альбитизацией, лепидолитизацией. При этом особенности распределения минералов тантала и ниобия в гранитных пегматитах всецело отвечают представлениям о связи концентраций тантала и ниобия с изменением режима кислотности — щелочности минералообразующих растворов в процессах метасоматоза (Беус, 1961). Наиболее ранняя генерация колумбита образуется в пегматитах на передовом фронте кислотного выщелачивания в процессе формирования мусковитового (кварц-мусковитового) замещающего комплекса. Даже в пегматитах, обогащенных танталом, эта генерация колумбита всегда отличается преобладанием ниобия над танталом.

Кристаллы таблитчатого колумбита рассматриваемой генерации характеризуются зональным строением (Гинзбург, 1956). Периферические зоны кристаллов по сравнению с внутренними обычно обогащены танталом, в ряде случаев кристаллы колумбита окаймляются или пронизываются вдоль трещин танталитом. Таким образом, уже на ранних стадиях метасоматоза в пегматитах проявляется большая подвижность мобильных соединений тантала и их большая устойчивость по отношению к увеличению щелочности минералообразующих растворов. Основная масса минералов тантала и ниобия в пегматитах выпадает, как известно, в процессе альбитизации, геохимическая роль которой с точки зрения концентрации редких элементов была рассмотрена ранее (Беус, 1961). Весьма характерной тенденцией этого процесса в пегматитах, отмечаемой рядом исследователей (Goldshmidt, 1954; Гинзбург, 1956, 1960 и др.), является накопление тантала на поздних стадиях метасоматического процесса. Наиболее поздние замещающие комплексы в пегматитах — грейзеновые и особенно лепидолитовые, как правило, резко обогащены танталом. Таким образом, подобно апогранитам, в замещенных пегматитах распределение ниобия и тантала подчиняется аналогичным закономерностям, определяемым характером изменений режима кислотности — щелочности минералообразующих растворов.

Поведение тантала и ниобия в процессах грейзенизации изучено еще совершенно недостаточно. Грейзенизирующие фторсодержащие растворы в ряде случаев выносят тантал и ниобий за пределы гранитных массивов, отличающихся повышенным содержанием тантала. В результате в грейзеновых образованиях, а также в высокотемпературных кварцевых и кварц-полевошпатовых жилах широко распространены касситерит и вольфрамит, содержащие изоморфную примесь тантала и ниобия. Известны грейзены, содержащие стрюверит (Забайкалье), колумбит (Горный Алтай), а также колумбитоносные кварцевые жилы (Нигерия, Тиман, Забайкалье). Широкие пределы колебания ниобий-танталового отношения в подобных образованиях свидетельствуют о разнообразии геохимических условий формирования концентраций тантала в месторождениях грейзеновой формации. Продолжение исследований в этом направлении позволит, вероятно, выявить новые геохимические типы концентраций тантала, неизвестные или слабо изученные в настоящее время.

Часть II

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА

ГЛАВА 1

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТАНТАЛОНОСНОСТИ ГРАНИТОИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

С целью оценки потенциальной танталоносности гранитоидов при проведении поисков танталовых месторождений могут быть использованы геохимические критерии, базирующиеся на особенностях геохимической специализации гранитоидных комплексов, которые являются материнскими для танталоносных апогранитов и пегматитов. В отдельных случаях критериями могут служить также особенности химического состава некоторых минералов — геохимических индикаторов в послемагматических месторождениях, связанных с танталоносными интрузивными комплексами.

Выделяются следующие главные типы геохимических критериев, используемых для поисков месторождений тантала:

1) основанные на особенностях распределения в горных породах петрогенных элементов;

2) основанные на особенностях распределения в горных породах тантала и редких элементов-спутников тантала, которые могут рассматриваться в качестве элементов-индикаторов потенциальной танталоносности материнских гранитоидов;

3) основанные на характере распределения некоторых индикаторных отношений и особенностях их изменения в различных геохимических условиях;

4) основанные на особенностях распределения тантала и ниобия в отдельных минералах — геохимических индикаторах.

Геохимические критерии танталоносности, основанные на особенностях распределения петрогенных элементов в материнских гранитоидах танталовых месторождений

Геохимические критерии рассматриваемого типа в связи с относительно высокой стоимостью силикатных анализов могут быть использованы в основном при обработке литературных данных для выбора региона, наиболее перспективного с точки зрения поисков месторождений тантала. В подавляющем большинстве случаев критерии, основанные на особенностях распределения в горных породах петрогенных элементов, имеют лишь общий характер и не могут служить в качестве прямых индикаторов рудоносности.

С целью выявления достаточно четких критериев, позволяющих по результатам общего силикатного анализа судить о вероятной потенциальной танталоносности оцениваемого гранитного массива или комплекса, помимо материнских гранитов танталоносных апогранитов и пегматитов (см. табл. 9, 22) были оценены параметры распределения петрогенных элементов и модального номера плагиоклаза в следующих группах гранитоидов: 1) безрудные на редкие элементы гранитоидные комплексы (Украина, Урал, Забайкалье); 2) безрудные на тантал пегматитоносные гранитоидные комплексы (Забайкалье, Средняя Азия); 3) гранитоидные комплексы, с которыми связаны грейзеновые месторождения без промышленной танталовой и ниобиевой минерализации (Казахстан, Алтай, Забайкалье).

Статистическое сравнение, проведенное с помощью критериев Фишера и Стьюдента (Беус, Григорян и др., 1965), показало отсутствие существенных различий в распределении большинства петрогенных элементов в продуктивных и непродуктивных на тантал гранитоидных комплексах. Исключением в данном случае являются лишь окислы магния и модальный номер плагиоклаза (табл. 30).

В рассматриваемом случае в качестве критерия может быть использовано содержание окиси магния, равное 0,5%. Вероятность появления таких содержаний в гранитоидах, являющихся материнскими по отношению к апогранитовым месторождениям тантала, составляет всего 0,01 (один случай на сто). Во всех прочих группах гранитов эта вероятность колеблется от 0,21 до 0,81 (табл. 31).

Однако низкое содержание магния и низкий модальный номер плагиоклаза нельзя считать однозначными признаками для положительной оценки танталоносности гранитоидов, поскольку эти признаки могут быть свойственны и безрудным лейкократовым гранитам (Беус, Ситнин, 1965). В то же время при выборе района для поисков месторождений тантала апогранитового типа отмеченные критерии должны учитываться в качестве положительного признака, для уточнения которого в процессе дальнейших исследований целесообразно привлечь дополнительные данные, характеризующие распределение в подобных породах элементов-примесей, являющихся более четкими индикаторами рудоносности.

Для более четкого разделения продуктивных и непродуктивных на тантал гранитоидов, по-видимому, могут быть использованы более сложные методы математической обработки с применением множественной корреляции и алгоритмов распознавания образцов, требующие использования электронно-решающих устройств.

В Центральной лаборатории прикладной геохимии б. Геолого-геохимического треста была произведена попытка использования программы распознавания образов — «Кора-3» (Губерман и др., 1964) для разделения по результатам общего силикатного анализа гранитоидов, являющихся материнскими для апогранитовых и пегматитовых месторождений тантала, и безрудных гранитов, с которыми не связаны какие-либо месторождения или рудопроявления тантала.

Таблица 30

Оценки параметров распределения окиси магния и модального номера плагиоклаза mN_p в танталоносных и безрудных гранитоидных комплексах

Гранитоиды	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, %		Среднее квадратическое отклонение содержаний		Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %	
		MgO	mN_p	MgO	mN_p	MgO	mN_p
Безрудные на тантал и ниобий гранитоидные комплексы (Украина, Урал, Забайкалье)	45	1,0 ± 0,3 (—0,064)	21 ± 2	0,88 (0,311)	5,7	0,1—4,8	7—35
Безрудные на тантал пегматитоносные гранитоидные комплексы (Забайкалье, Средняя Азия) . . .	35	0,8 ± 0,1 (—0,138)	20 ± 3	0,37 (0,187)	8,0	0,2—2,1	0—40
Гранитоиды материнские для танталоносных пегматитов (Забайкалье, Восточный Казахстан) . .	59	0,6 ± 0,1 (—0,289)	14 ± 2	0,32 (0,268)	6,2	0,1—2,4	0—29
Гранитоидные комплексы, с которыми связаны грейзеновые месторождения без тантало-ниобиевой минерализации (Казахстан, Алтай, Забайкалье)	39	0,36 ± 0,01 (—0,536)	15 ± 2	0,28 (0,298)	6,9	0,0—1,5	0—32
Гранитоидные комплексы, материнские для танталоносных апогранитов (Забайкалье)	23	0,2 ± 0,04	8 ± 1	0,1	3,3	0,0—0,5	0—16

Примечание. В скобках приведены соответствующие логарифмические оценки для распределений, подчиняющихся логарифмически нормальному закону.

Однако разделение подобных гранитоидов при помощи петрохимических приемов и обычных статистических методов оказалось практически невозможным. Обучение машины было проведено на выборках силикатных анализов гранитов Забайкалья и Восточного Казахстана, которые являются материнскими для танталоносных

Таблица 31

Оценка вероятности появления содержаний MgO, равных и больших 0,5%, в материнских гранитах месторождений тантала и безрудных гранитоидных комплексах *

Гранитоиды	$P \geqslant 0{,}5\%$ MgO	Минимальное количество членов геохимической выборки, включающее не менее трех критических значений (0,5% и выше) содержания MgO (с вероятностью 0,98)
Безрудные на тантал и ниобий гранитоидные комплексы	0,78	6
Безрудные на тантал пегматитоносные комплексы гранитоидов	0,81	6
Гранитоиды, с которыми связаны танталоносные пегматиты	0,52	11
Гранитоидные комплексы, с которыми связаны грейзеновые образования, не несущие тантала	0,21	32
Гранитоидные комплексы, материнские для танталоносных пегматитов	0,01	720

* Оценка произведена по таблицам вероятности (Черницкий, 1957).

апогранитов или пегматитов. В качестве безрудных гранитов для обучения были использованы представительные выборки, характеризующие граниты Украины, Кавказа, Урала, Казахстана, Забайкалья и Дальнего Востока, неперспективные с точки зрения танталоносности.

Проверка программы, произведенная путем введения в машину представительного количества данных о химическом составе продуктивных и непродуктивных гранитов, подтвердила принципиальную возможность использования программ распознавания образов для оценки потенциальной танталоносности гранитов по результатам общего силикатного анализа. В описанном случае машина дала более 50% правильных ответов.

Таблица 32

Пределы колебания содержаний (в %) некоторых компонентов в танталоносных апогранитах Забайкалья в сравнении с гранитами Украины и Забайкалья

(с вероятностью 0,01 для граничных значений)

Окислы	Танталоносные апограниты Забайкалья	Граниты	
		Забайкалья	Украины
Fe_2O_3	0,0—0,8	0,2—1,6	0,0—4,5
FeO	0,0—0,8	0,2—2,4	0,1—3,2
CaO	0,1—1,8	0,8—2,9	0,6—2,9

Таблица 33

Оценки параметров распределения некоторых петрогенных компонентов в амазонитсодержащих апогранитах

Апограниты	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний (логарифмов содержаний), %				Среднее квадратическое отклонение содержаний (логарифмов содержаний)				Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, %			
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO
Танталоносные лепидолит-амазонит-альбитовые (Забайкалье)	24	70,7	<0,01	17,4	0,53 (—0,41)	1,09	—	1,03	0,535 (0,386)	68,0—73,4	<0,01	14,8—20,0	0,04—3,59
Криофиллит-амазонит-альбитовые с содержанием Ta_2O_5 менее 0,01% (Забайкалье)	17	72,1	0,03	15,8	0,66	0,69	0,02	0,48	0,18	70,3—73,9	0,004—0,13	14,6—17,0	0,21—1,11
Циннвальдит (протолитионит)-амазонит-альбитовые с содержанием Ta_2O_5 менее 0,005% (Забайкалье, Казахстан, Средняя Азия)	34	75,6	0,03	13,1	0,89 (—0,063)	0,89	0,018	0,48	0,23 (0,12)	73,4—77,8	<0,01—0,07	11,9—14,3	0,45—1,66

Таким образом, использование метода распознавания образцов открывает широкие перспективы для выявления и уточнения геохимических критериев прогнозирования и поисков месторождений тантала.

Выше рассматривались случаи, характеризующие возможность косвенной оценки потенциальной танталоносности гранитоидов, являющихся материнскими для апогранитовых и пегматитовых месторождений тантала.

В качестве примера, характеризующего возможность однозначной оценки танталоносности по характеру распределения петрогенных элементов, могут быть приведены метасоматически измененные граниты (апограниты), некоторые особенности химического состава которых позволяют уверенно выделять перспективные на тантал массивы по результатам силикатных химических анализов (табл. 32).

Как видно из табл. 32, колебания содержаний перечисленных элементов в апогранитах и нормальных гранитах Забайкалья и Украины различаются достаточно резко. Вероятности имеющих место перекрытий могут быть легко определены, исходя из оценок статистических параметров распределения этих элементов (Беус, 1966_1).

Не меньшее значение имеет задача выявления танталоносных разностей амазонит-альбитовых апогранитов среди амазонитсодержащих апогранитов, отличающихся убогими непромышленными содержаниями тантала. Судя по имеющимся геохимическим выборкам, характеризующим распределение петрогенных элементов (см. табл. 16, 18, 20, 33), наиболее четкими критериями для разделения танталоносных и непродуктивных с точки зрения тантала фаций амазонитсодержащих апогранитов могут служить SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, FeO.

Особенности распределения этих компонентов позволяют выбрать в качестве критериев танталоносности амазонитсодержащих апогранитов содержания SiO_2 71%; Al_2O_3 17%; TiO_2 0,01%; FeO 0,3% (табл. 34). Как видно из табл. 34, перспективы танталоносности

Таблица 34

Оценка вероятности появления критических содержаний некоторых петрогенных компонентов в амазонитсодержащих апогранитах

Апограниты	SiO_2 71% и менее	TiO_2 0,01% и более	Al_2O_3 17% и более	FeO	
				0,3% и более	0,2% и менее
Танталоносные лепидолит-амазонит-альбитовые	0,61	<0,01	0,65	0,61	0,50
Криофиллит-амазонит-альбитовые с содержанием Ta_2O_5 менее 0,01%	0,06	0,84	<0,01	0,98	0,01
Циннвальдит (протолитионит)-амазонит-альбитовые с содержанием Ta_2O_5 менее 0,005%	<0,001	0,86	<0,01	1,00	<0,01

амазонитсодержащих апогранитов могут быть надежно оценены даже по единичным силикатным анализам. В данном случае характерна связь повышенных концентраций тантала с обедненными кремнеземом и обогащенными алюминием метасоматическими фациями апогранитов. Следует иметь в виду, что отрицательная характеристика танталоносности данной фации не может служить основанием для оценки всего массива, поскольку в пределах зональных массивов могут быть встречены фации иного состава, обогащенные танталом.

Геохимические критерии танталоносности, основанные на особенностях распределения элементов-примесей в материнских гранитоидах танталовых месторождений

Критерии геохимических поисков материнских гранитоидов, с которыми связаны апогранитовые и пегматитовые месторождения тантала, основанные на особенностях распределения ряда редких элементов-индикаторов, имеют важное значение в связи с четкостью подобных критериев, а также достаточной легкостью и небольшой стоимостью определения большинства элементов-индикаторов.

Оценки параметров распределения элементов-примесей и их отношений в гранитоидах, являющихся материнскими для танталоносных апогранитов и пегматитов, представлены в табл. 10 и 24. Для сравнения при выявлении критериев использовались специально составленные выборки, включающие различные группы гранитоидов (см. табл. 30), представляющих разные районы СССР.

Следует отметить, что тантал, несмотря на известное различие его распределения, в выделенных группах гранитоидов (см. табл. 3, 10, 23) не может быть рекомендован в качестве элемента-индикатора потенциальной танталоносности гранитов прежде всего в связи с трудностью и высокой стоимостью определения его малых содержаний.

Анализ особенностей распределения элементов-примесей в рассматриваемых группах гранитов позволяет рекомендовать для использования в качестве элементов-индикаторов танталоносности продуктивных гранитоидов литий, рубидий, олово и ванадий (см. табл. 10, 23).

В табл. 35 приведены индикаторные значения содержания этих элементов в гранитах, вероятность появления которых может быть использована для разделения продуктивных и непродуктивных на тантал гранитоидов. Наиболее четкими критериями могут служить содержания лития менее 25 *г/т* и рубидия — менее 150 *г/т*. В этих случаях продуктивные гранитоиды отличаются от безрудных достаточно контрастно. Менее четкими критериями являются содержания лития более 100 *г/т*, олова более 20 *г/т* и ванадия более 40 *г/т*. По этим критериям танталоносные гранитоиды могут быть выделены среди преобладающей массы гранитов, непродуктивных с точки зрения редких элементов. Однако разделение потенциально танталоносных материнских гранитов от материнских гранитов пегматитовых и грейзеновых месторождений, не несущих практически интересных концентраций тантала, в этом случае затруднительно.

Таблица 35

Оценка вероятности появления индикаторных значений содержания лития, рубидия, олова и ванадия в различных группах гранитоидов

Гранитоиды	Количество проб	Li		Rb	Sn	V
		25 *г/т* и менее	100 *г/т* и более	150 *г/т* и менее	20 *г/т* и более	40 *г/т* и более
Материнские для танталоносных апогранитов	29	<0,01	0,64	<0,01	0.28	0,01
Материнские для танталоносных пегматитов	50	<0,01	0,41	0,05	0,26	0,01
Материнские для пегматитов с убогой танталовой минерализацией	32	0,26	0,27	0,24	0,16	0,01
Материнские для грейзеновых месторождений без танталовой минерализации	45	0,26	0,23	0,30	0,21	0,14
Непродуктивные с точки зрения редких элементов комплексы гранитоидов	50	0,54	0,02	0,43	0,01	0,30

Геохимические критерии танталоносности, основанные на особенностях распределения индикаторных отношений в материнских гранитоидах

В качестве критериев потенциальной танталоносности при геохимических поисках подобного рода в ряде случаев могут использоваться некоторые характерные индикаторные отношения. Из большого числа проанализированных отношений — Nb/Ta, Zr/Sn, K/Rb, Li/Cs, Nb/V, Mg/Li (см. табл. 11, 24) — наиболее эффективно для разделения продуктивных и непродуктивных на тантал гранитоидов могут быть применены только два: Mg/Li и Zr/Sn.

В табл. 36 приведены оценки вероятности появления значений индикаторных отношений этих элементов в продуктивных и непродуктивных на тантал гранитоидах. Наиболее четким критерием может служить отношение магния к литию, превышающее 100. Отношение циркония к олову менее 30 и более 50, а также магний-литиевое отношение, не превышающее 30, являются менее четкими индикаторами. При помощи последних критериев потенциально танталоносные граниты могут быть выявлены среди непродуктивных с точки зрения редких элементов гранитоидных комплексов. Однако от гранитоидов, материнских для пегматитов с убогой танталовой минерализацией

Таблица 36

Оценки вероятности появления индикаторных значений отношений Mg/Li и Zr/Sn в различных группах гранитоидов

Гранитоиды	Mg/Li		Zr/Sn	
	30 и менее	100 и более	30 и менее	50 и более
Материнские для танталоносных апогранитов	1,00	<0,001	0,83	<0,001
Материнские для танталоносных пегматитов	0,39	0,004	0,93	0,014
Материнские для пегматитов с убогой танталовой минерализацией	0,27	0,30	0,87	0,05
Материнские для грейзеновых месторождений без танталовой минерализации	0,44	0,12	0,46	0,70
Непродуктивные с точки зрения редких элементов комплексы гранитоидов	≪ 0,001	0,98	0,07	0,48

и грейзеновых месторождений, не несущих концентраций тантала, они однозначно отличаются только при наличии большого количества проанализированных проб.

Геохимические критерии танталоносности, основанные на особенностях распределения элементов-примесей в отдельных минералах — геохимических индикаторах

В настоящее время по химическому составу минералов, которые могут служить геохимическими индикаторами на тантал, нет исчерпывающей геохимической информации. Однако уже сейчас можно наметить три группы минералов, характер распределения тантала в которых позволяет использовать их в качестве индикаторов, свидетельствующих о возможности нахождения практически интересных концентраций тантала: 1) слюды гранитов и пегматитов, являющиеся характерными концентраторами тантала и ниобия; 2) различные акцессорные минералы гранитов и апогранитов (циркон, касситерит, ильменит); 3) рудные минералы грейзеновых и кварцевожильных месторождений (касситерит, вольфрамит), генетически связанных с танталоносными комплексами гранитов.

Как видно из табл. 37, распределение элементов-индикаторов в биотитах из непродуктивных с точки зрения рудных элементов гранитоидов резко отличаются от прочих групп гранитов. Однако биотиты из гранитоидов, продуктивных на тантал, вообще не отличаются, по-видимому, от биотитов пегматитоносных и грейзеноносных гранитов, хотя наиболее высокие концентрации тантала в биотитах (до 300—1500 *г/т*) отмечены именно в литиевых биотитах из гранитов, являющихся материнскими для танталоносных апогранитов. В этом направлении требуется проведение дополнительных исследований.

Значительный эффект может принести использование особенностей распределения тантала и ниобия в мусковитах при поисках танталоносных пегматитов, так как при проведении мелко- и среднемасштабных поисков обычно не удается детально обследовать встреченное пегматитовое поле, и геолог ограничивается отбором небольшого количества образцов из единичных пегматитовых жил. При этом учитывая, что по подсчетам А. И. Гинзбурга (1948) в пределах крупных пегматитовых полей только доли процента от общего числа пегматитовых жил несут практически интересное редкометальное оруденение, оценка пегматитового поля на тантал по небольшому количеству несистематически отобранных при поисках образцов или проб, без использования специальных геохимических критериев, обычно является затруднительной. В качестве минерала — геохимического индикатора в данном случае может быть использован наиболее характерный и широко распространенный минерал пегматитовых образований — мусковит. Статистически обработанные данные о распределении тантала в мусковитах из различных пегматитовых полей СССР приведены в табл. 38 (Беус, 1966$_2$).

Как можно судить по данным, приведенным в табл. 38, оценки параметров распределения тантала в мусковитах редкометальных пегматитов, содержащих минералы группы танталита — колумбита, и в мусковитах керамических и слюдяных пегматитов, для которых минералы тантала и ниобия нехарактерны, различаются достаточно резко. Если принять в качестве критерия различия рассматриваемых двух групп пегматитовых полей содержание тантала в мусковите, равное 20 *г/т*, то вероятность появления содержаний тантала 20 *г/т* и выше в мусковитах слюдяных и керамических пегматитов, оцененная при помощи таблиц интегральной функции Лапласа, составляет всего 0,0007, т. е. встреча таких содержаний в процессе исследований является маловероятной. В то же время в редкометальных пегматитовых полях вероятность появления подобных содержаний составляет 0,51—0,98, т. е. в каждых пяти проанализированных образцах мусковита из пегматитов в пределах редкометальных пегматитовых полей с высокой вероятностью следует ожидать появления двух-трех значений содержания тантала, равных или превышающих 20 *г/т*.

Анализ особенностей распределения тантала в мусковитах редкометальных пегматитов, содержащих колумбит, колумбит-танталит или танталит, также свидетельствует о принципиальной возможности разделения подобных пегматитов по характеру распределения тантала в слюдах, хотя в этом направлении необходимо провести дополнительные детальные исследования. Наиболее достоверные данные, характеризующие поля редкометальных пегматитов Забайкалья, позволяют судить о существенном различии в распределении тантала в мусковитах из альбитизированных пегматитов в пределах пегматитовых полей, отличающихся присутствием колумбит-танталита с отношением Nb : Ta = 2 : 1 — 1 : 1 и относительно низким средним содержанием Ta_2O_5 (50—100 *г/т*), и полей танталитсодержащих пегматитов со средним содержанием Ta_2O_5 более 100 *г/т*.

Оценки параметров распределения некоторых

Минерал	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний (логарифмов содержаний), г/т				
		Ta	Nb	Li	Rb	Cs
Биотит из гранитоидов, непродуктивных с точки зрения редких элементов . .	35	5 ± 1 (0,662)	79 ± 13 (1,641)	493 ± 110 (2,558)	845 ± 126 (2,896)	33 ± 8 (1,397)
Биотит из гранитоидов, материнских для пегматитовых и гидротермально-пневматолитовых месторождений с убогой танталовой минерализацией или не содержащих минералов тантала	27	18 ± 5 (1,178)	197 ± 48 (2,214)	1483 ± 300 (3,105)	1542 ± 230 (3,151)	162 ± 41 (2,095)
Биотит из гранитоидов, материнских для танталоносных пегматитов	5	20 ± 8	200 ± 50	1600 ± 400	1240 ± 300	180 ± 60
Биотит из гранитоидов, материнских для танталоносных апогранитов	10	28 ± 12 (1,415)	266 ± 100 (2,367)	1759 ± 300 (3,234)	1696 ± 630 (3,205)	131 ± 18 (2,110)

В первом случае (пегматиты с танталит-колумбитом) пределы колебания содержаний тантала в мусковитах, вычисленные с вероятностью 0,01 для граничных значений, составляют 6—95 *г/т*; во втором же случае (поля танталитсодержащих пегматитов) пределы колебания существенно сдвинуты в сторону более высоких содержаний и составляют 16—180 *г/т*. Если в качестве критерия танталоносности пегматитового поля взять содержание тантала в мусковите 50 *г/т* и более, то вероятность появления подобных содержаний в пределах пегматитовых полей, относительно бедных танталом (первый случай), составит лишь 0,11 *г/т*, в то время как в поле танталитсодержащих пегматитов (Забайкалье) эта вероятность увеличивается до 0,58 *г/т*. Правда, в аналогичном поле танталоносных пегматитов Восточного Казахстана вероятность появления в мусковитах содержаний тантала 50 *г/т* и более снижается до 0,17 *г/т*, однако количество данных для этого пегматитового поля нельзя признать достаточным для однозначного заключения.

Материалы, характеризующие распределение тантала и ниобия в акцессорных минералах продуктивных на тантал гранитоидов, ограниченны. Однако они убедительно свидетельствуют о наличии

Таблица 37

элементов-примесей в биотитах гранитоидов

Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний					Пределы колебаний содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т				
Ta	Nb	Li	Rb	Cs	Ta	Nb	Li	Rb	Cs
0,212	0,237	0,430	0,162	0,367	1—15	18—260	30—4130	315—1970	3—200
0,272	0,290	0,259	0,188	0,364	3—72	30—870	310—5550	310—4130	16—990
0,186	0,250	0,124	0,144	0,082	8—90	46—1180	750—3910	612—4200	74—224

достаточно четко выраженной геохимической специализации продуктивных комплексов, отражающейся, в частности, в наличии заметно повышенных содержаний тантала и низкого ниобий-танталового отношения в таких характерных акцессорных минералах гранитов, как циркон и, по-видимому, ильменит. Отмечается также повышенное содержание тантала и ниобия в сфенах и магнетитах гранитов, с которыми связаны апогранитовые месторождения с цирконий-ниобиевой минерализацией (табл. 39).

Дальнейшее изучение распределения тантала и ниобия в акцессорных минералах продуктивных на тантал гранитоидов представляет значительный интерес с точки зрения возможности использования этих данных для перспективной оценки районов при обработке результатов шлихового опробования.

Повышенные содержания тантала и ниобия характерны также для ряда рудных минералов грейзеновых и кварцевожильных месторождений, генетически связанных с танталоносными гранитоидными комплексами. Наиболее детальные исследования в этом направлении были проведены И. И. Четырбоцкой, Л. З. Быховским, И. И. Гетманским и другими, исследовавшими проблему связи между

Таблица 38

Распределение тантала в мусковитах гранитных пегматитов

(закон распределения логнормальный)

Пегматитовые поля	Количество проб	Среднее арифметическое: содержаний, г/т	Среднее арифметическое: логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %
Слюдяные и керамические пегматиты (Карелия, Мамский р-н, Бирюса, Урал, Украина, Прибайкалье)	20	3,5 ± 0,8	0,490	0,255	50
Редкометальные пегматитовые поля Восточного Забайкалья	48	38 ± 5	1,523	0,314	50
Поле редкометальных пегматитов с танталит-колумбитом, содержащим 50—100 г/т Ta_2O_5 при Nb : Ta = 2 : 1 — 1 : 1 (Забайкалье)	80	28 ± 4	1,373	0,257	65
Поле редкометальных пегматитов с танталитом, содержащих 100—150 г/т Ta_2O_5 при Nb : Ta = 1 : 1 — 1 : 2 (Забайкалье)	20	29 ± 10	1,728	0,198	46
Поле редкометальных пегматитов с колумбитом и танталитом, содержащих 50—300 г/т Ta_2O_5 при Nb : Ta = = 2 : 1 — 1 : 3 (Восточный Казахстан)	10	26 ± 8	1,421	0,296	49
Поля редкометальных пегматитов с колумбитом, содержащих менее 50 г/т Ta_2O_5 при Nb : Ta = 5 : 1 — 10 : 1 (Средняя Азия — Туркестанский хр., Кара-Тюбе, Султан-Уиздаг)	10	35 ± 8	1,420	0,230	54

распределением тантала и ниобия в касситеритах и вольфрамитах послемагматических месторождений и танталоносностью гранитоидов (Четырбоцкая, 1966)).

Наличие оловянных месторождений грейзеновой и касситерит-кварцевой формации является характерным косвенным признаком, указывающим на возможность обнаружения в пределах данного региона концентраций тантала, связанных с процессами метасоматического изменения гранитов. Правда, в настоящее время можно говорить только об односторонней связи, поскольку все апогранитовые месторождения собственно танталовых руд расположены в пределах оловоносных провинций, но не во всех районах развития грейзеновых и кварцевожильных месторождений олова выявлены месторождения тантала. В силу этих причин возможность использования

Таблица 39

Содержание тантала и ниобия в акцессорных минералах гранитоидов

(в г/т)

Минерал	Количество проб	Район	Порода	Ta	Nb	Nb/Ta	Автор
Ильменит	4	Калба	Биотитовые и двуслюдяные граниты, продуктивные на тантал	130—640	650	5,6—6,6	Е. Б. Знаменский (1957) Ю. М. Спомиор
			То же	116		6	
Ильменит	8	Калба					
Сфен	5	Кавказ	Биотитовые граниты и гранодиориты, непродуктивные на тантал	236	1300	5,5	А. А. Беус, А. А. Ситнин
Сфен	1	Восточный Саян	То же	115	1550	13,5	Э. И. Пополитов и др. (1965)
	2	Тува	Биотит-роговообманковые граниты с цирконий-ниобиевой минерализацией	450	5950	12,4	В. С. Кудрин, М. А. Кудрина (1965)
Циркон	5	Кавказ	Биотитовые граниты и гранодиориты, непродуктивные на тантал	24	20	1	А. А. Беус, А. А. Ситнин
Циркон	1	Калба	Граниты, продуктивные на тантал	110	70	0,6	Е. Б. Знаменский (1957)
Циркон (малакон)	2	Тува	Биотит-роговообманковый гранит с цирконий-ниобиевой минерализацией	82—245	1260—5470	15—22	В. С. Кудрин, М. А. Кудрина (1965)
Циркон (циртолит) Магнетит	1	Забайкалье	Танталоносный апогранит	500	1100	2,2	А. А. Беус, А. А. Ситнин
	1	Тува	Биотит-роговообманковый гранит с цирконий-ниобиевой минерализацией	202	1620	8,0	В. С. Кудрин, М. А. Кудрина (1965)
Магнетит	1	Забайкалье	Биотитовый гранит, непродуктивный на тантал	3	20	6,7	А. А. Беус, А. А. Ситнин

в качестве дополнительного критерия особенностей химического состава касситерита представляется весьма заманчивой. В еще большей степени подобное заключение относится к вольфрамиту, поскольку намечающаяся связь его месторождений с апогранитовыми месторождениями тантала проявлена значительно слабее по сравнению с касситеритом.

Результаты проведенных исследований (Четырбоцкая, 1966) свидетельствуют о наличии резко повышенных содержаний тантала и, соответственно, низкого ниобий-танталового отношения в касситеритах и вольфрамитах из грейзеновых и жильных образований, расположенных вблизи массивов танталоносных апогранитов. В то же время характерным является довольно резкое снижение содержания тантала в касситеритах и вольфрамитах из жильных образований, расположенных на значительном (более 1 *км*) удалении от материнского танталоносного массива. По мнению И. И. Четырбоцкой (1966), при наличии в районе одновозрастного оловянного и вольфрамового оруденения содержание тантала в вольфрамитах является, по-видимому, более надежным критерием для оценки потенциальной танталоносности материнского массива. При прочих равных условиях имеет место уменьшение содержания тантала в вольфрамитах и касситеритах из рудных тел, залегающих соответственно в гранитах, сланцах и карбонатных породах. Практически содержания тантала в этих минералах, превышающие 0,03%, уже могут рассматриваться в качестве положительного признака при опробовании месторождений, расположенных в зоне экзоконтакта (табл. 40).

Таблица 40

Содержание тантала в вольфрамитах и касситеритах
(в %). *По И. И. Четырбоцкой* (1966)

Перспективы материнского массива на тантал *	Месторождения, залегающие в гранитах	Месторождения, залегающие в породах зоны экзоконтакта
Весьма перспективные	0,5	0,2
Перспективные	0,1—0,5	0,03—0,2
Малоперспективные	0,02—0,1	0,01—0,03
Неперспективные	0,02	0,01

* При значительном удалении от материнского массива и в случае залегания в карбонатных породах низкое содержание тантала в касситеритах и вольфрамитах не может служить отрицательным признаком танталоносности.

Рассмотренные выше геохимические критерии оценки потенциальной танталоносности гранитоидных комплексов могут успешно использоваться при проведении мелко- и среднемасштабных поисковых работ на редкие элементы. Дальнейшие исследования несомненно позволят собрать дополнительный материал по новым практически

интересным объектам, который еще более повысит достоверность разработанных критериев. Задача непрерывного накопления геохимической информации, характеризующей особенности распределения элементов-индикаторов в новых практически интересных объектах, останется всегда актуальной, поскольку каждое новое месторождение может обладать некоторыми специфическими геохимическими особенностями, которые должны быть обязательно учтены при обосновании поисковых критериев.

ГЛАВА 2

ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА

Эндогенные геохимические ореолы апогранитовых месторождений тантала

Эндогенные геохимические ореолы месторождений тантала, связанных с апогранитами, являются продуктами деятельности послемагматических растворов, возникающих в результате сложных процессов формирования танталоносных метасоматически измененных гранитоидов.

Растворы, мигрировавшие в толщу вмещающих пород, были обогащены рядом химических элементов, накапливающихся в апогранитах, а также вынесенных из метасоматически измененных гранитоидов в процессе их послемагматической переработки (см. часть I, гл. 2).

С целью характеристики геохимических ореолов, окружающих массивы танталоносных апогранитов, могут быть рассмотрены типичные месторождения характеризуемого типа, связанные с метасоматически измененными мезозойскими гранитами, прорывающими толщу песчано-сланцевых пород различного возраста. Петрографическая и минералого-геохимическая характеристика этих месторождений была рассмотрена выше в разделе: «Типы промышленных месторождений собственно танталовых руд».

Один из весьма типичных массивов (Забайкалье), сложенных апогранитами литионит-амазонит-кварц-альбитового состава (см. выше пример 2), приурочен к своду антиклинальной складки северо-западного простирания и располагается на пересечении субширотных и субмеридиональных тектонических зон, секущих мезозойские песчано-сланцевые породы. Он представляет собой вытянутое в плане крутопадающее тело размером 1,5 × 1 *км*. Восточный и западный контакты массива имеют субмеридиональное направление и падают под углом 50—70° к востоку и западу в сторону осадочных пород. Южный контакт круто (до 75—80°) падает на юг. Вдоль него проходит зона догранитных брекчий (сцементированных апогранитами), связанная с субширотной зоной нарушений. Северный контакт полого погружается к северо-западу. Предполагаемая глубина эрозионного среза массива апогранитов 50—150 *м*.

Внутреннее строение массива крайне неоднородно, что связано с широким развитием в пределах массива внутриминерализационной трещиноватости, контролирующей развитие и пространственное положение различных метасоматических фаций апогранитов. Наличие тектонических брекчий в самом массиве, зон дробления и рассланцевание пород на контакте массива с вмещающими породами — все это говорит о сложной тектонической обстановке, существовавшей при формировании массива и после его становления.

Вмещающие массив песчано-сланцевые породы характеризуются чередованием алевролитов, аргиллитов и песчаников с прослоями и линзами мелкогалечных конгломератов и гравелитов.

А р г и л л и т ы — тонкозернистые, тонкослоистые плотные массивные породы, темного, почти черного, цвета с хорошо выраженной отдельностью, которая, как правило, совпадает с первичной слоистостью. Под микроскопом аргиллиты представляют собой агрегат слюдисто-кремнистого состава с обломками кварца, полевых шпатов и апатита. Структура аргиллитов бластопелитовая или алевритовая.

А л е в р о л и т ы — тонкозернистые породы с плитчатой отдельностью, более светлые, чем аргиллиты, с различимой на глаз зернистостью.

Под микроскопом порода состоит в основном из угловатых обломков полевых шпатов, слюды (биотита и мусковита) и апатита, сцементированных кремнисто-слюдистым материалом.

Структура породы алевролито-пелитовая, массивная. Темно-серая окраска аргиллитов и алевролитов связана с примесью углистого материала.

П е с ч а н и к и. Среди песчаников выделяются две разновидности: темно-серые тонкозернистые алевропесчаники с хорошо выраженной плитчатой отдельностью и более светлые мелко- и среднезернистые песчаники. Мелкогалечные конгломераты и гравелиты встречаются в виде отдельных горизонтов и линз среди сланцевой толщи и относятся к внутриформационным. Осадочные породы в районе месторождения местами претерпели сильные изменения. Ниже приводится краткая характеристика метаморфических и метасоматических изменений в осадочных породах, развитых в районе месторождения.

О р о г о в и к о в а н и е и о к в а р ц е в а н и е наиболее широко проявились в породах кровли при неглубоком залегании интрузий. В частности, значительная по площади полоса роговиков и ороговикованных пород расположена к юго-востоку от массива. Небольшие участки ороговикования отмечаются в породах зон дробления и брекчирования.

Роговики — плотные породы афанитовой текстуры с раковистым изломом. Под микроскопом породы представляют собой мелкочешуйчатый кварц-слюдистый агрегат с более крупными чешуйками биотита. В цементе преобладает кварц в виде неравномерно распределенных скоплений.

Г р е й з е н и з а ц и я отмечается в породах восточного экзоконтакта массива апогранитов. Здесь полоса грейзенов мощностью 15—20 *м* протягивается на 500 *м*; по мере удаления от массива грейзенизация пород ослабевает. В южном экзоконтакте массива грейзенизация выражена слабее, в западном — она не отмечается совсем.

Незначительная грейзенизация осадочных пород отмечается вокруг кварц-топазовых и кварц-касситеритовых жил, развитых к северу от массива, а также вокруг кварц-полевошпатовых прожилков с молибденитом и бериллом, образующих подобие штокверка к востоку от массива апогранитов.

Грейзенизация выражается в осветлении пород, появлении в них литиево-железистых слюд, топаза, флюорита, берилла. В незначительных количествах в грейзенах присутствуют касситерит, смирновскит, стрюверит, сфен и сульфиды.

Установлено, что песчаники и гравелиты грейзенизируются более интенсивно, чем алевролиты и аргиллиты. В районе массива апогранитов широко развиты изменения осадочных пород, связанные с разрывными нарушениями и проявлением в них гидротермальной деятельности. Эти нарушения, в основном северо-западного и субширотного направлений, привели, в частности, к образованию серии кварц-амазонитовых и кварц-топазовых жил с касситеритом, развитых к северу от массива апогранитов. Минеральный состав жил — кварц, топаз, циннвальдит, клевеландит, амазонит, из рудных — касситерит, колумбит, танталит и пирохлор-микролит.

В пределах массива апогранитов широко развиты метасоматические процессы, изменившие первоначальный облик и состав магматических пород.

В соответствии с данными, изложенными при характеристике апогранитовых месторождений тантала, в породах массива проявилось пять стадий послемагматического метасоматоза.

1. Ранняя микроклинизация (высокотемпературный калиевый метасоматоз).
2. Ранняя альбитизация (высокотемпературный натриевый метасоматоз).
3. Грейзенизация (высокотемпературное окварцевание, топазизация, лепидолитизация).
4. Поздняя альбитизация (поздний натриевый метасоматоз).
5. Поздняя микроклинизация (поздний калиевый метасоматоз).

Наиболее широко проявлены, особенно в апикальной части массива, процессы поздней альбитизации и грейзенизации. Ранняя микроклинизация и альбитизация характерны для более глубоких зон массива апогранитов, на горизонте эрозионного среза они фиксируются в породах в меньшей степени. Наиболее глубоким метасоматическим изменениям подверглись породы апикальных частей массива, что объясняется, по-видимому, экранирующим влиянием осадочных пород кровли.

Апограниты массива по сравнению с нормальными гранитами характеризуются повышенными концентрациями тантала, ниобия,

лития, рубидия, цезия, олова, свинца и некоторых других редких элементов (см. табл. 17). Максимальными концентрациями большинства редких элементов, в том числе тантала, характеризуется эндоконтактовая зона восточной части массива, тяготеющая к области более пологого погружения массива под породы кровли.

Изучение особенностей распределения некоторых химических элементов (в той или иной мере накапливающихся в апогранитах) в юрских песчано-сланцевых породах вмещающей толщи вдали от массива танталоносных апогранитов (геохимический фон) показало, что содержания этих элементов в песчаниках и сланцах близки между собой и очень слабо отличаются от цифр, характеризующих кларковые содержания этих элементов (табл. 41).

При анализе статистических оценок параметров фонового распределения элементов и сравнении их с весовыми кларками для осадочных пород по А. П. Виноградову (1962) выявились некоторые геохимические особенности осадочных пород, развитых в районе месторождения. Средние содержания лития, рубидия, олова и фтора в них значительно ниже кларковых. Для лития оно составляет 0,6 кларка, причем содержания его в песчаниках несколько выше, чем в сланцах. Интересно отметить, что среднее содержание лития в осадочных породах в изученном случае однозначно кларку гранитов (Беус, 1964). Для рубидия среднее содержание равно 0,5 кларка при незначительном повышении содержания его в сланцах по сравнению с песчаниками. Для олова средние содержания составляют 0,6 кларка, для фтора — 0,2 кларка.

Средние содержания цезия и калия примерно равны кларковым; сланцы характеризуются несколько повышенными содержаниями этих элементов по сравнению с песчаниками.

Оценки параметров фонового распределения элементов

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			
		Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Асимметрия
Li	82	35 ± 3	241,2	15,53	0,656
Rb	57	102 ± 23	730	27,0	0,100
Be	30	6 ± 1,4	14,6	3,82	0,993
Sn	21	6 ± 1,0	5,3	2,30	0,303
Pb	24	40 ± 7,8	365	19,0	0,036
Cs	33	11,2 ± 1,3	13,5	3,67	—0,014
F, %	48	0,09 ± 0,01	0,00177	0,0421	1,121
Na_2O, %	35	1,7 ± 0,1	0 0929	0,305	0,509
K_2O, %	38	2,7 ± 0,1	0,1950	0,442	—0 760
Ta	39	1,65 ± 0,06	0,04	0,2	0,960
Nb	39	21,4 ± 1,5	23,08	4,804	0,932

Низкие коэффициенты вариации для калия, лития, рубидия, олова, цезия и фтора свидетельствуют о равномерном распределении этих элементов в породах.

Средние содержания бериллия, свинца и натрия для песчано-сланцевой толщи превышают кларковые в два и более (для натрия) раза. Содержание бериллия в песчаниках в три раза выше кларкового, в сланцах — в 1,6 раза. Средние содержания свинца и фтора одинаковы как для песчаников, так и для сланцев.

Распределение фоновых содержаний для всех элементов согласуется как с нормальным, так и с логарифмически нормальным законом (см. табл. 41). В то же время необходимо отметить, что для лития, бериллия и фтора асимметрия распределения логарифмов содержаний выражена значительно слабее, чем асимметрия распределения содержаний. Противоположное явление характерно для рубидия, цезия, свинца, калия и натрия, распределение которых в большей степени отвечает нормальному закону.

Распределение химических элементов, в той или иной мере накапливающихся в танталоносных апогранитах, было изучено раздельно для восточной, западной и северной частей экзоконтакта массива апогранитов. При этом имелось в виду выявление различия в распределении элементов-спутников тантала в участках экзоконтактовой зоны, характеризующих висячий бок массива апогранитов. Последний отличается развитием метасоматических фаций апогранитов, несущих максимально повышенные концентрации тантала (восточный экзоконтакт). Как уже отмечалось выше, лишь в висячем боку массива в зоне восточного экзоконтакта развиты апогранитовые руды с заметно повышенным содержанием тантала и тантал-ниобиевым отношением 1 : 1. Все прочие участки эндоконтактовой зоны

Таблица 41

в осадочных породах вдали от массива апогранитов

Для логнормального закона распределения				Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Асимметрия логарифмов		
1,500	0,0399	0,1998	—0,227	44,4	11—93
1,992	0,0148	0,1219	—0,509	84,0	37—166
0,7	0,0755	0,2750	—0,186	66,7	1—26
0,723	0,0322	0,1790	—0,314	38,3	0,2—12
—	—	—	0,817	50,0	<1—87
1,023	0,0252	0,1589	—0,392	32,8	2—20
—1,110	0,0336	0,183	0,691	44,4	0,03—0,2
—	—	—	—0,616	17,9	1—2,4
0,423	0,00627	0,0792	—1,058	16,4	1,6—3,3
0,214	0,0019	0,0436	0,202	12,0	1,17—2,13
1,318	0,0047	0,0686	0,164	23,0	9,8—33,0

массива отличаются развитием метасоматических фаций апогранитов с относительно низким содержанием тантала и отношением тантала к ниобию, равным 1 : 3 — 1 : 5.

Результаты исследований позволяют оконтурить в песчано-сланцевых породах, окружающих массив апогранитов, сплошную зону, характеризующуюся аномальными особенностями распределения ряда химических элементов, связанных с танталоносными апогранитами, по сравнению с геохимическим фоном.

Мощность эндогенных геохимических ореолов, оконтуренных с вероятностью 99% и выше, колеблется для различных элементов от 0,3 до 1,5 *км*. Для лития она составляет более 1,5 *км*, для рубидия, цезия и бериллия — до 300—400 *м*, для олова, свинца и фтора — не более 200—300 *м*.

Наиболее широким оказался эндогенный геохимический ореол аномальных концентраций лития, распространяющийся на расстояние более 1 *км* от контакта с массивом апогранитов. Существенного различия в мощности эндогенного ореола в висячем и лежачем боку массива апогранитов не отмечено. Однако характер распределения химических элементов, которые могут рассматриваться в качестве индикаторов апогранитовых месторождений тантала, в этих частях ореола различается достаточно резко (табл. 42, 43).

Особенно четко различие в распределении изученных элементов в различных частях ореола проявляется при сравнении коэффициентов аномальности [1] (табл. 44).

Следовательно, максимальным коэффициентом аномальности (от 7 до 15) характеризуются бериллий, литий, цезий, фтор, олово и рубидий. При этом характерно, что в пределах восточного экзоконтакта коэффициент аномальности этих элементов-индикаторов ореолов в 1,5—4 раза больше, чем в зоне западного и северного экзоконтактов.

Таким образом, максимальная концентрация элементов-индикаторов наблюдается в экзоконтактовой зоне висячего бока массива апогранитов, к которому тяготеют танталовые руды с промышленными концентрациями тантала.

В связи с тем что промышленные концентрации тантала в рудах являются продуктом наиболее интенсивной послемагматической переработки гранитоидов в пределах апикальной части массива и его висячего бока, связь между явлениями концентрации тантала и максимальным изменением вмещающих пород в зоне восточного экзоконтакта является закономерной. Характер изменения вмещающих пород, слагающих эндогенный ореол массива, в подобных случаях может быть использован в качестве критерия для оценки вероятной танталоносности апогранитов.

Из анализа фактического материала следует, что в пределах эндогенного геохимического ореола зоны восточного экзоконтакта,

[1] Коэффициент аномальности — отношение среднего содержания элемента в ореоле к среднему значению геохимического фона.

Таблица 42

Распределение элементов-индикаторов в пределах зоны восточного экзоконтакта массива танталоносных апогранитов

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
		Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
Ta	30	2,9 ± 0,8	—	—	0,393	0,053	0,228	76,4	0,7—8,9
Nb	30	23 ± 3	—	—	1,335	0,017	0,130	33,2	10—50
Li	112	819 ± 197	—	—	2,680	0,164	0,405	12,8	55—4300
Rb	85	896 ± 124	—	—	2,860	0,09	0,300	63,6	140—3760
Cs	32	95 ± 16	2160	46,5	—	—	—	48,9	0—209
Be	77	62 ± 14	—	—	1,560	0,240	0,489	100,6	5—1240
Sn	37	56 ± 13	—	—	1,646	0,104	0,321	68,6	7—268
Pb	39	140 ± 50	—	—	1,889	0,229	0,474	118,0	6—1000
Na_2O, %	39	2,9 ± 0,15	0,219	0,468	—	—	—	16,1	1,8—4,0
K_2O, %	39	3,4 ± 0,2	0,350	0,592	0,527	0,0055	0,074	17,4	2,2—5,1
F, %.	39	1,40 ± 0,3	—	—	0,034	0,4072	0,327	71,0	0,2—6,9

Таблица 43

Распределение элементов-индикаторов в пределах зоны западного и северного экзоконтакта массива танталоносных апогранитов

Компонент	Количество проб	Для нормального закона распределения			Для логнормального закона распределения			Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
		Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний		
Западный экзоконтакт									
Li	48	200 ± 66	—	—	2,088	0,178	0,422	114,9	11—1270
Rb	16	374 ± 192	—	—	2,438	0,101	0,318	102,0	41—1850
Cs	10	60 ± 25	1560	39,5	1,66	0,143	0,378	65,7	0—171
Be	39	37 ± 12	—	—	1,347	0,220	0,469	100,5	2—304
Sn	44	38 ± 10	—	—	1,464	0,098	0,313	81,8	5—166
Pb	45	100 ± 30	—	—	1,877	0,123	0,351	108,0	11—581
Na_2O, %	8	2,6 ± 0,7	0,927	0,963	0,348	0,125	0,354	37,0	0,2—23
K_2O, %	8	3,2 ± 0,5	0,171	0,414	—	—	—	13,0	2—4
F, %	44	0,45 ± 0,13	0,172	0,415	—0,451	0,120	0,346	85,0	0,1—2
Северный экзоконтакт									
Rb	12	537 ± 220	146 000	382,0	2,619	0,116	0,341	71,1	51—3420
Be	22	64 ± 25	—	—	1,636	0,166	0,407	91,2	4—459
Pb	28	62 ± 40	—	—	1,516	0,178	0,422	171,0	3—360
Na_2O, %	14	2,7 ± 0,7	1,888	1,37	0,35	0,127	0,356	50,9	0—6
K_2O, %	14	3,0 ± 0,4	0,590	0,768	0,455	0,014	0,118	25,6	0,4—5
F, %	27	0,83 ± 0,28	0,524	0,724	—0,279	0,209	0,457	87,0	0,1—7

Таблица 44

Коэффициенты аномальности распределения редких элементов в различных частях эндогенного ореола массива танталоносных апогранитов

Эндогенный геохимический ореол	Ta	Nb	Li	Rb	Cs	Be	Sn	Pb	F	K_2O	Na_2O
Восточный экзоконтакт	1,8	1,0	23,4	8,8	8,5	10,3	9,3	3,5	15,6	1,3	1,7
Западный экзоконтакт	Не опр.	Не опр.	5,7	3,7	5,4	6,2	6,3	2,5	5,4	1,2	1,5
Северный экзоконтакт	Не опр.	Не опр.	Не опр.	5,3	Не опр.	10,7	Не опр.	1,5	9,2	1,1	1,8
В среднем в пределах ореола	1,8	1,0	9 6	7,1	8,1	10,8	7.2	2,5	8,0	1,2	1,8

характеризующего висячий бок массива, обогащенный танталом, обнаруживаются максимальные содержания таких характерных элементов-индикаторов, как литий, рубидий, цезий, бериллий, олово, свинец и фтор.

Литий. На площади эндогенного геохимического ореола лития (рис. 3), оконтуренного с вероятностью 99%, установлено несколько зон, различающихся по содержанию лития: 80—460 и 460—2500 *г/т* и более.

На расстоянии более 1,5 *км* от контакта висячего бока массива располагается зона с содержанием от 80 до 460 *г/т* лития. В западном эндоконтакте массива эта зона прослеживается лишь на расстоянии до 400 *м*. Зона с максимальными содержаниями лития (460—2500 *г/т*) в пределах восточного экзоконтакта висячего бока прослеживается на расстоянии до 1,0 *км*. В западном экзоконтакте массива высокие содержания лития (460 *г/т*) практически отсутствуют. Следует отметить, что распределение высоких содержаний лития в экзоконтактовой зоне массива контролируется не только морфологией массива, но также и разрывными структурами, развитыми в кровле массива, что всегда необходимо учитывать при интерпретации данных геохимической съемки.

Трещинный контроль распределения элементов-индикаторов в части лития является характерной особенностью рассматриваемого месторождения, определившей, в частности, локализацию в пределах экзоконтакта восточной части массива топаз-циннвальдитовых грейзенов, отличающихся максимальными концентрациями лития и других редких щелочей в пределах месторождения. С четко выраженной зоной трещиноватости, развитой в северной части месторождения, связана также серия кварц-амазонитовых жил, секущих вмещающие породы и в значительной степени обогащенных литием.

Характерно, что песчаники по сравнению со сланцами в зоне экзоконтактово измененных осадочных пород обладают значительно более высокими содержаниями лития (табл. 45).

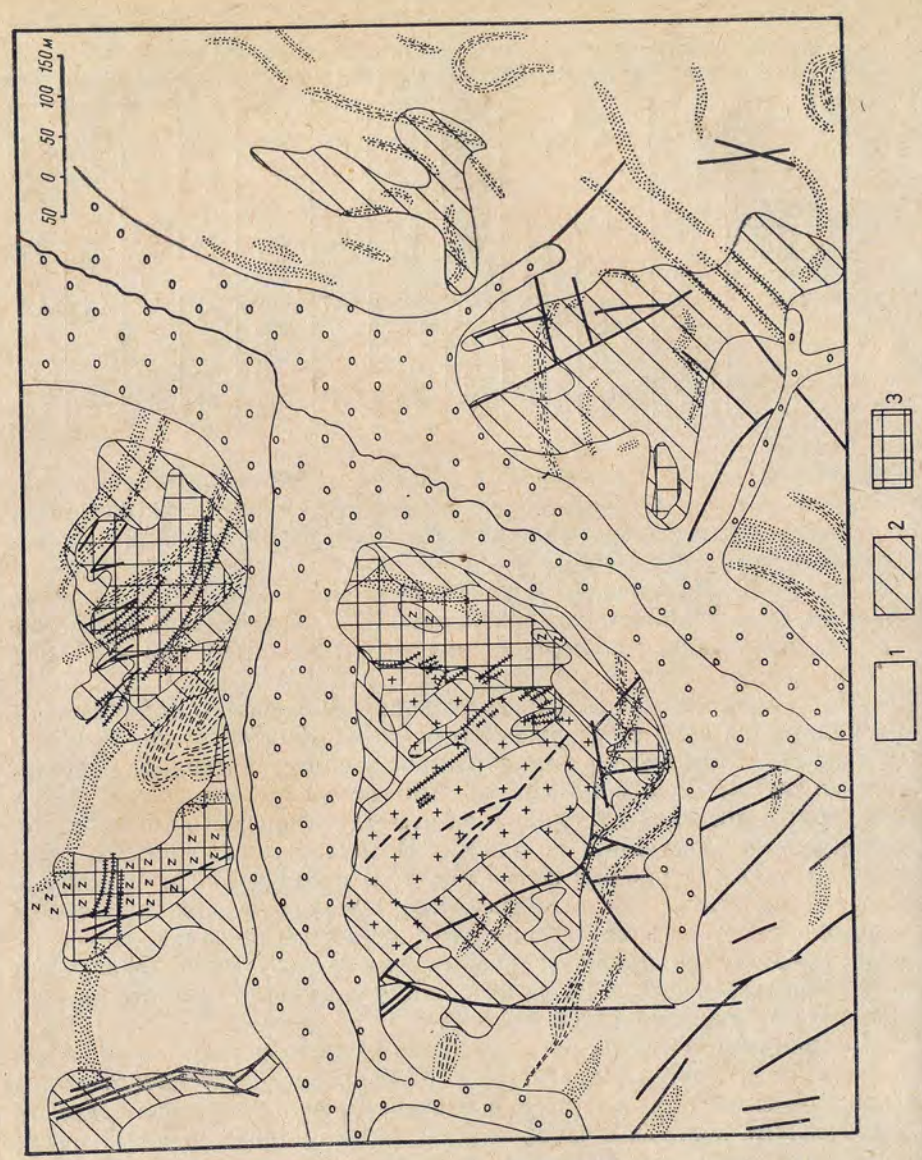


Рис. 3. Эндогенные геохимические ореолы лития вокруг массива танталоносных апогранитов

Содержание лития: *1* — 60—80 *г/т*; *2* — 80—460 *г/т*; *3* — 460—2500 *г/т*. Остальные условные обозначения см. на рис. 2

Таблица 45

Среднее содержание некоторых элементов-индикаторов в песчаниках и сланцах в различных частях эндогенного геохимического ореола массива танталоносных апогранитов

Компонент	В целом по геохимическому ореолу		Восточный экзоконтакт		Западный экзоконтакт	
	Песчаники	Сланцы	Песчаники	Сланцы	Песчаники	Сланцы
Li, *г/т*	438 ± 113	213 ± 51	1075 ± 313	545 ± 211	246 ± 115	140 ± 53
Rb, *г/т*	807 ± 154	628 ± 115	1009 ± 181	—	—	—
Cs, *г/т*	94 ± 14	91 ± 23	90 ± 17	90 ± 23	—	—
Be, *г/т*	74 ± 15	56 ± 13	71 ± 18	46 ± 18	47 ± 17	23 ± 13
Sn, *г/т*	49 ± 10	34 ± 8	66 ± 18	44 ± 16	42 ± 15	33 ± 12
Pb, *г/т*	104 ± 29	97 ± 24	140 ± 60	140 ± 100	80 ± 30	110 ± 50
F, %	0,86 ± 0,17	0,69 ± 0,07	1,37 ± 0,039	1,38 ± 0,49	0,54 ± 0,18	0,42 ± 0,14
K_2O, %	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	3,2 ± 0,2	3,7 ± 0,3	—	—
Na_2O, %	2,8 ± 0,2	3,06 ± 1,85	2,9 ± 0,2	2,9 ± 0,3	—	—

Р у б и д и й. Эндогенный геохимический ореол рубидия, связанный с массивом танталоносных апогранитов, подобно ореолу лития, распространяется на расстояние более 1 *км* от восточного контакта массива. Однако границы ореола, определенные с вероятностью 99% в случае рубидия, располагаются ближе к массиву (до 500 *м*). Еще ближе к массиву располагается ореол с максимальным содержанием рубидия (больше 450 *г/т*). В западном экзоконтакте эта зона имеет мощность не более 50 *м*.

Песчаники в пределах эндогенного ореола обладают более высоким содержанием рубидия по сравнению со сланцами (см. табл. 45). Таким образом, рубидий образует менее широкие, чем литий, но более четкие геохимические ореолы в осадочных породах. При этом наблюдается постепенное (без резких колебаний) уменьшение содержаний по направлению от контакта массива.

Распределение рубидия в породах эндогенного ореола согласуется с логнормальным законом распределения.

Ц е з и й подобно литию и рубидию образует четкий, хотя значительно более узкий геохимический ореол вокруг массива апогранитов, отличающийся высокой контрастностью. Наиболее высокие содержания цезия (см. табл. 45) отмечаются в породах зоны восточного экзоконтакта (90 *г/т*), в западном экзоконтакте содержания значительно ниже.

В отличие от первых двух редких щелочных металлов отмечается низкое содержание цезия в массиве апогранитов и резкое увеличение его содержания в осадочных породах экзоконтактов. Ширина геохимического ореола цезия в восточном контакте 200 *м*, в западном — 100 *м*.

В пределах эндогенного геохимического ореола распределение цезия ближе согласуется с нормальным законом, что также отличает этот элемент от лития и рубидия (см. табл. 43).

Бериллий в отличие от лития и рубидия практически не накапливается в танталоносных апогранитах по сравнению с нормальными гранитами Забайкалья. Однако вокруг массива прослеживается четкий ореол обогащения бериллием как сланцев, так и песчаников, вмещающих массив апогранитов. При этом зона максимальных содержаний бериллия, тяготеющая к контакту висячего бока (восточная часть массива), характеризуется увеличением содержания на некотором расстоянии от контакта (рис. 4). В этих участках в измененных песчаниках и сланцах наблюдаются микроскопические (десятые и сотые доли миллиметра) кристаллы берилла, переполненные пойкилитовыми включениями вмещающей породы.

В пределах западной эндоконтактовой зоны эндогенный геохимический ореол бериллия прослеживается на очень небольшом расстоянии. При этом он отделен от массива апогранитов зоной вмещающих пород, отличающихся низким содержанием бериллия.

Распределение бериллия в пределах ореола в большинстве случаев хорошо согласуется с логарифмически нормальным законом. Подобно литию и рубидию, песчаники в 1,3 раза более обогащены бериллием, чем сланцы (см. табл. 45). В пределах вмещающих пород кровли массива апогранитов намечается достаточно четкая связь участков, обогащенных бериллием, с трещиноватостью в сланцах и песчаниках. В ряде случаев в трещинах отмечаются тонкие прожилки, содержащие минералы бериллия.

Олово образует очень четкий, хотя и незначительный по площади эндогенный ореол, распространяющийся примерно симметрично вокруг массива апогранитов. Наиболее интенсивный ореол в северной части месторождения связан с серией кварц-амазонитовых и топазовых жил, содержащих касситерит (рис. 5). В случае олова песчаники также характеризуются более высокими содержаниями по сравнению со сланцами (см. табл. 45). Распределение олова в породах эндогенного ореола близко согласуется с логнормальным законом (см. табл. 43).

При рассмотрении распределения содержаний олова в направлении от массива апогранитов к вмещающим породам отмечается повышенное содержание олова в апогранитах (более 100 *г/т*) и постепенное понижение содержаний олова в осадочных породах полосы экзоконтактов.

Свинец, подобно олову, образует достаточно четкий, хотя и маломощный ореол вокруг массива танталоносных апогранитов. В отличие от ранее охарактеризованных элементов-индикаторов, литологический состав пород почти не влияет на распределение содержаний свинца в пределах ореола (см. табл. 45), которое хорошо согласуется с логнормальным законом (см. табл. 43—44).

Фтор является характерным элементом-индикатором эндогенного геохимического ореола массива танталоносных апогранитов и только высокая цена химического анализа ограничивает возможность его практического использования. Наиболее обогащены фтором породы восточной зоны экзоконтакта (см. табл. 42). При

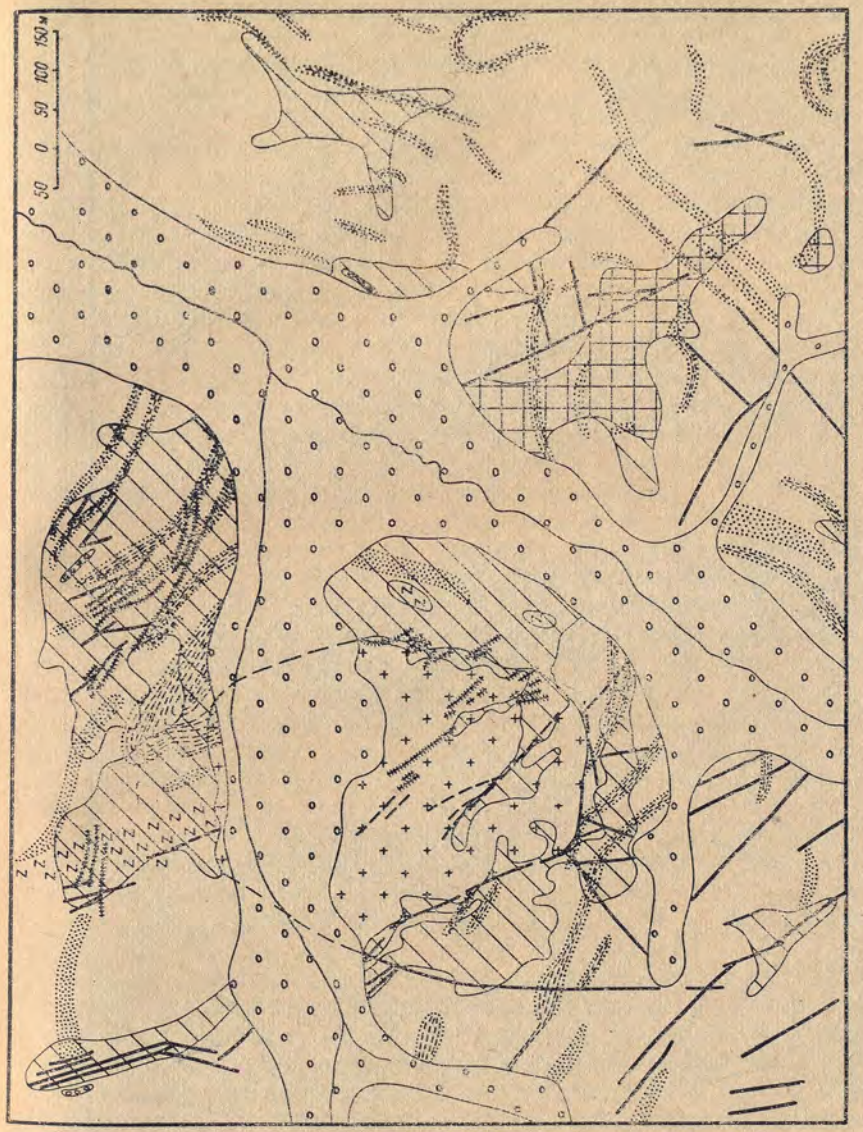


Рис. 4. Эндогенные геохимические ореолы бериллия вокруг массива танталоносных апогранитов

Содержание бериллия: *1* — 6—12 *г/т* (геохимический фон); *2* — 12—100 *г/т*; *3* — >100 *г/т*. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

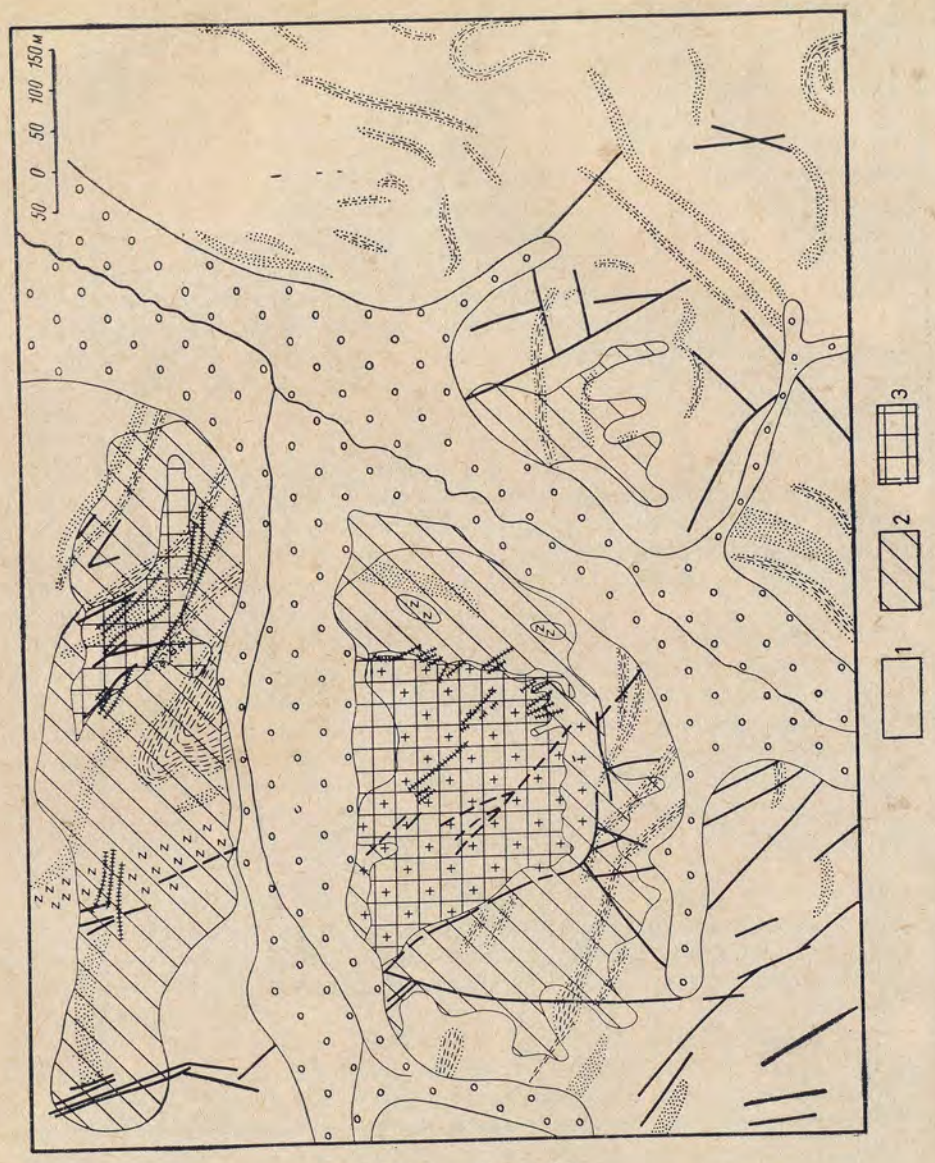


Рис. 5. Эндогенные геохимические ореолы олова вокруг массива апогранитов

Содержание олова: *1* — 6—10 *г/т* (геохимический фон); *2* — 10—100 *г/т*; *3* — 100—500 *г/т*. Остальные условные обозначения см. на рис. 2

этом содержание фтора в песчаниках, подобно всем другим элементам-индикаторам, кроме свинца, заметно выше, чем в сланцах (см. табл. 45). Распределение фтора в пределах эндогенного ореола хорошо согласуется с логнормальным законом.

К а л и й и н а т р и й. В пределах эндогенного геохимического ореола танталоносных апогранитов имеет место очень слабое увеличение содержания калия по сравнению с фоном. При этом распределение калия характеризуется весьма малым коэффициентом вариации и обычно хорошо согласуется с нормальным и логнормальным законом. В отличие от калия натрий заметно накапливается в пределах ореола, где его распределение в большинстве случаев согласуется с нормальным законом (см. табл. 43—44).

Геохимическая зональность эндогенного ореола проявляется в достаточно резком увеличении относительной роли лития по сравнению с бериллием, цезием и оловом (рис. 6) во внешней части ореола, что характеризует значительно более высокую миграционную способность этого наиболее яркого элемента-индикатора массивов танталоносных апогранитов. Значительно слабее эта особенность лития проявляется по сравнению с рубидием, хотя и в этом случае кривая, иллюстрирующая литиево-рубидиевое отношение, постепенно поднимается по мере удаления от контакта с массивом апогранитов. При этом следует иметь в виду, что наличие циннвальдитсодержащего грейзена вблизи контакта с гранитным массивом усложняет намеченную схему, что хорошо показано на рис. 7. Высокое содержание лития в грейзене определяет появление максимума на графиках отношений Li/Rb, Li/Be и Li/Sn, сменяющегося депрессией на некотором удалении от контакта, где во внешней зоне циннвальдит-топазового грейзена имеют место наиболее высокие концентрации бериллия и олова.

С целью уточнения закономерностей распределения редких элементов в осадочных породах (в полосе 300—500 *м* от контактов массива апогранитов) было проведено определение их корреляционных связей для отдельных литологических пачек — песчаников и сланцев (табл. 46).

Полученные данные свидетельствуют о существовании ярко выраженной корреляционной связи между литием — рубидием — фтором как в сланцах, так и в песчаниках в пределах геохимического ореола. Кроме того, существенную корреляционную связь с фтором в сланцах проявляют бериллий и олово, несколько слабее выражена корреляционная связь калий — фтор, корреляционная связь между фтором и бериллием проявлена и в песчаниках. Однако здесь она выражена заметно слабее. Связи между фтором и калием, фтором и оловом в песчаниках не существенны. В то же время в песчаниках возникает существенная корреляционная связь между фтором и рубидием. В песчаниках корреляционная связь между элементами-индикаторами ореола вообще проявлена значительно слабее, чем в сланцах. Так, например, в песчаниках исчезают четко выраженные в сланцах корреляционные связи между бериллием — литием,

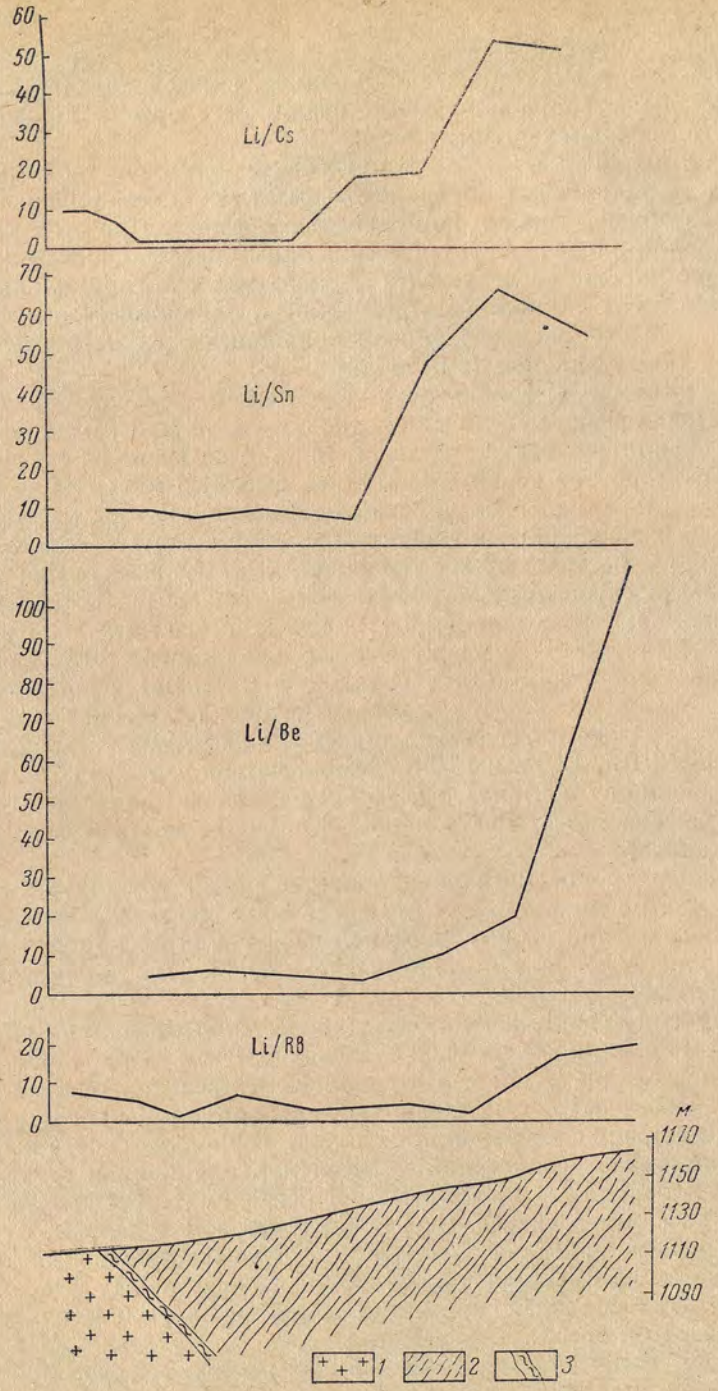


Рис. 6. График изменения значений некоторых индикаторных отношений в разрезе через эндогенный геохимический ореол массива танталоносных апогранитов

1 — апограниты танталоносные; *2* — аргиллиты и песчаники; *3* — грейзены литионит-топаз-кварцевые

оловом — литием, оловом — бериллием, рубидием — бериллием, рубидием — оловом, а также корреляционные связи калия с литием, бериллия с оловом и натрием.

Нарушение корреляционных связей между элементами-индикаторами в песчаниках, обладающих повышенной пористостью, связано, вероятно, с более поздними явлениями гидротермального метаморфизма этих пород.

Четкая корреляционная зависимость между фтором, литием, бериллием, оловом, свинцом и калием свидетельствует о значительной роли, которую играли фтористые соединения в процессе выноса и последующей концентрации элементов-индикаторов в период образования эндогенных геохимических ореолов массива апогранитов.

В качестве примера эндогенного ореола массива танталоносных апогранитов, формировавшихся в более спокойной тектонической обстановке, могут быть приведены данные, характеризующие массив апогранитов, краткое описание которого было приведено в общей части (см. часть I, глава 2, пример 1).

Как уже отмечалось, куполовидный выступ гранитного массива, в апикальной части которого получили развитие танталоносные лепидолит-альбитовые апограниты, прорывают осадочно-метаморфические породы палеозоя (см. рис. 1).

Апограниты обнажаются на поверхности в виде изометрического

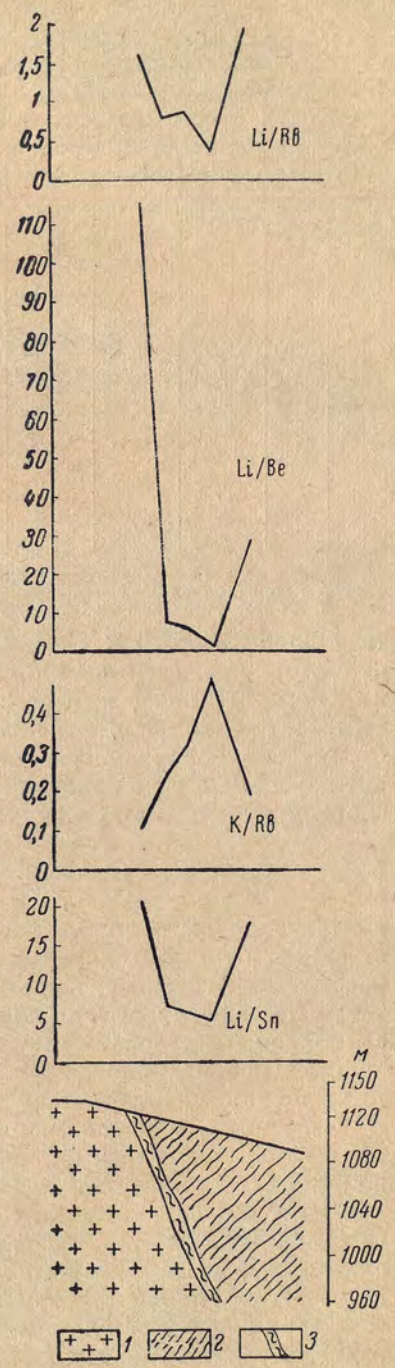


Рис. 7. График изменения значений некоторых индикаторных отношений в приконтактовой части эндогенного геохимического ореола массива танталоносных апогранитов

1 — апограниты танталоносные; *2* — аргиллиты и песчаники; *3* — грейзены литионит-топаз-кварцевые

Таблица 46

Коэффициенты парной корреляции в грейзенизированных песчаниках и сланцах в пределах геохимического ореола массива апогранитов

		Грейзенизированные песчаники								
		Li	Pb	Be	Sn	Mo	Rb	Na	K	F
Сланцы	Li		0,50	0,00	0,12	0,04	0,94	−0,32	0,07	0,80
	Pb	0,01		0,00	0,00	0,23	0,38	−0,18	0,07	0,44
	Be	0,90	0,02		0,07	−0,11	0,00	0,20	0,18	0,29
	Sn	0,57	0,24	0,68		0,00	0,20	0,04	0,04	0,22
	Mo	0,00	0,00	0,00	0,00		0,13	−0,11	−0,06	0,05
	Rb	0,91	0,10	0,88	0,72	0,00		−0,25	0,12	0,77
	Na	−0,14	0,11	−0,07	−0,06	0,00	−0,09		−0,24	−0,20
	K	0,48	−0,05	0,52	0,49	0,00	0,52	−0,44		0,25
	F	0,72	0,09	0,84	0,75	0,00	0,79	0,07	0,43	

Примечание. Здесь и далее подчеркнуты коэффициенты, указывающие на существенные корреляционные связи значимые с вероятностью 0,95 и выше.

тела площадью 1,6 × 1 *км*. Западный контакт куполовидного тела полого погружается под сланцы под углом 5—20°; южный и восточный контакты более крутые (20—50°). Северный контакт характеризуется максимальной крутизной (до 70°).

Танталоносные апограниты с практически интересным содержанием тантала в виде пологой залежи тяготеют к западному контакту, слагая эндоконтактовую зону мощностью от 20 до 100 *м*.

Эндоконтактовая зона в южной части массива характеризуется более глубоким эрозионным срезом и не имеет практически интересных содержаний тантала. В пределах северного и восточного эндоконтактов перспективные разности апогранитов не развиты. Существенным отличием характеризуемого месторождения от примера, рассмотренного ранее, является отсутствие грейзенов в экзоконтактовой зоне массива и гораздо более слабое развитие внутриминерализационной трещиноватости.

Вмещающими породами массива апогранитов являются песчаники и сланцы, содержащие прослои алевролитов и кислых пород.

Песчаники, алевропесчаники и алевролиты представляют собой мелкозернистые породы с размером обломков 0,01—0,05 *мм*, реже до 0,4 *мм*, состоящие в основном из кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата, которые составляют в сумме 60—70% породы. Обломки полуокатанные, неправильной формы. Цемент кварц-слюдистый, реже кварц-полевошпатовый. Кроме того, в цементе встречаются лейкоксен, рутил, флюорит, хлорит, турмалин и др.

Кварц-слюдяные сланцы представляют собой темно-серую, нередко черную полосчатую породу сланцеватой текстуры, лепидогранобластовой структуры, состоящую главным образом из кварца (60—70%). Кварц представлен мелкими гранулированными агрегатами с мозаичным угасанием. Биотит и мусковит встречаются в мелких листочках, составляющих в среднем 30% породы. В незначительном количестве отмечаются: циркон, сфен, эпидот, пирит, флюорит.

Углисто-глинистые сланцы встречаются значительно реже перечисленных разновидностей пород и характеризуются хорошо выраженной сланцеватостью. В составе сланцев отмечаются кварц, плагиоклаз, слюда, а также непрозрачное углисто-глинистое вещество в виде микропрослоев и линзовидных скоплений. Залегание пород моноклинальное с падением на запад — юго-запад под углами 45—70°.

Перечисленные породы экзоконтактовой зоны массива апогранитов смяты в мелкие изоклинальные, нередко опрокинутые складки. Простирание складчатых структур северо-западное и север-северо-западное. Разрывные нарушения в районе месторождения подразделяются на до- и послегранитные. К первым относят глубинные разломы, к участкам сопряжения которых и приурочены выходы штоковидных тел апогранитов. Вторая группа нарушений север-северо-западного направления представлена зонами повышенной трещиноватости, к которым местами приурочены кварц-амазонитовые жилы и лепидолит-топазовые грейзены. Масштабы развития трещинных образований этой группы (особенно грейзенов) проявлены значительно слабее, чем в предыдущем примере.

Оценки параметров фонового распределения элементов-примесей в осадочных породах, вмещающих массив апогранитов, в общем близки к оценкам, указанным выше для другого района (табл. 47). Некоторым отличием являются только более низкие содержания бериллия и значительно резче проявленная неравномерность распределения олова.

Результаты исследований особенностей распределения химических элементов, характерных для танталоносных апогранитов, в пределах экзоконтактовой зоны массива позволяют выделить четкий эндогенный ореол, отличающийся аномальным (по сравнению с геохимическим фоном) распределением лития, рубидия, бериллия, олова, ниобия, рубидия, т. е. тех же элементов, которые были описаны в качестве индикаторов для танталоносных апогранитов предыдущего месторождения. Так же, как и в рассмотренном выше случае, наиболее контрастные и мощные ореолы тяготеют к пологому (западному) контакту купола апогранитов с вмещающими породами, характеризующемуся максимальной концентрацией тантала в лепидолитсодержащих апогранитах зоны эндоконтакта (табл. 48).

Как видно из табл. 48, процессы, происходившие в массиве танталоносных апогранитов, оказали гораздо более слабое влияние на состав пород, вмещающих метасоматически измененные гранитоиды. Несмотря на аналогичный качественный состав элементов-индикаторов, геохимический ореол массива танталоносных

Таблица 47

Оценки параметров фонового распределения элементов-примесей в осадочно-метаморфических породах палеозоя, вмещающих массив танталоносных апогранитов, Забайкалье

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое		Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
		содержаний, г/т	логарифмов содержаний			
Li	40	37 ± 4	1,538	0,118	30,0	12—95
Rb*	26	110 ± 7	—	—	38,5	30—210
Be	48	3 ± 0,2	0,357	0,217	34,0	0,7—7,5
Ta	20	< 2,0	—	—	—	—
Nb	10	13,0	—	—	—	—
Sn	55	8 ± 3	0,714	0,339	141,0	1—33
F	24	800 ± 47	2,871	0,166	26,0	290—1900
Cu	48	60 ± 24	1,615	0,383	141,0	4—340
Pb	20	35 ± 9	1,510	0,308	50,0	8—200
Zn	46	110 ± 18	1,988	0,179	56,7	36—260
Ni	50	23 ± 5	1,230	0,220	85,2	5—56
V	49	66 ± 19	1,662	0,399	101,0	5—419

* Распределение содержаний рубидия подчиняется нормальному закону, среднее квадратическое отклонение содержаний — 36.

апогранитов заметно менее контрастен, чем в предыдущем массиве, формировавшемся в более сложной тектонической обстановке. Отмечается также резкое снижение содержаний элементов-индикаторов в ореоле с глубиной. Опробование керна скважин, вскрывших зону экзоконтакта в висячем боку массива апогранитов, дает существенно более низкие содержания редких элементов, чем опробование пород, слагающих поверхность на горизонте эрозионного среза. Последнее объясняется, вероятно, резким уменьшением с глубиной по мере погружения контакта мощности зоны метасоматически измененных гранитов (апогранитов), несущих наиболее высокие концентрации редких элементов (Беус, Залашкова, 1965).

В табл. 49 и 50 приведены (по данным И. И. Мороз) коэффициенты парной корреляции элементов-примесей в породах восточного и западного экзоконтактов, а также для околоконтактовой части зоны западного экзоконтакта.

Лучше всего корреляционная зависимость между элементами проявилась в околоконтактовой части зоны западного экзоконтакта, вследствие совместной миграции элементов-примесей вблизи контакта с массивом апогранитов. Не обнаруживает корреляционных связей ни с одним элементом лишь свинец. Кроме того, не выявлена корреляционная зависимость между бериллием и рядом элементов (Ta, Cs, Pb), а также между танталом и ниобием.

В пределах аномальной зоны западного экзоконтакта в целом характер корреляционных связей между элементами-примесями

Таблица 48

Оценки параметров распределения элементов-примесей в осадочных породах в пределах эндогенного геохимического ореола массива танталоносных апогранитов, Забайкалье

(Пример 1)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Поверхность							
Be	100	34 ± 16	1,037	0,373	0,611	117	0,4—30
Li	67	335 ± 80	2,390	0,215	0,465	80	20—3140
Rb	64	510 ± 77	2,484	0,138	0,372	61	42—2230
Sn	100	33 ± 18	1,031	0,333	0,577	107	0,5—247
Nb	65	26 ± 5	1,271	0,174	0,417	70	2,0—184
Pb	60	31 ± 9	1,360	0,104	0,323	53	4,0—135
F	57	0,50 ± 0,11	—0,426	0,099	0,315	51	0,07—2,1
Вертикальный разрез (по скважинам)							
Be	210	4,2 ± 0,5	0,545	0,047	0,216	33	1,1—11
Li	140	330 ± 20	2,262	0,171	0,413	69	20—1700
Sn	70	8 ± 2	0,731	0,107	0,327	53	1,1—32
Nb	72	15 ± 3	1,109	0,121	0,348	57	2—86
Pb	78	40 ± 5	1,274	0,068	0,261	41	4,0—73
F	66	0,17 ± 0,02	—0,846	0,058	0,241	38	0,04—0,42

Примечание. По бериллию, литию, рубидию и фтору использованы данные Н. Е. Залашковой.

Таблица 49

Коэффициенты парной корреляции элементов-примесей во вмещающих породах западного экзоконтакта в пределах геохимического ореола

Околоконтактовая часть зоны западного эндоконтакта	Зона западного экзоконтакта								
	Ta	Nb	Li	Rb	Cs	F	Pb	Sn	Be
Ta	—	0,03	—0,11	0,24	—0,12	0,05	0,09	—0,14	0,30
Nb	0,25	—	0,05	—0,08	0,14	0,17	—0,42	0,00	—0,01
Li	0,79	0,31	—	0,73	0,40	0,77	—0,08	0,30	0,33
Rb	0,93	0,30	0,99	—	0,54	0,66	0,29	0,26	0,43
Cs	0,82	0,30	0,95	1,00	—	0,46	0,00	0,20	0,29
F	0,83	0,32	0,99	0,99	0,98	—	0,00	0,55	0,66
Pb	—0,07	0,01	—0,05	—0,15	—0,03	—0,05	—	0,43	0,52
Sn	0,96	0,31	0,69	0,82	0,79	0,72	0,00	—	0,40
Be	0,16	0,52	0,43	0,31	0,17	0,44	—0,02	0,66	—

Таблица 50

Коэффициент парной корреляции элементов-примесей во вмещающих породах восточного экзоконтакта в пределах геохимического ореола

	Li	Rb	Cs	F	Pb	Sn	Be
Nb	—0,55	0,35	0,06	0,16	—0,51	—0,35	—0,22
	Li	0,43	0,50	0,62	0,48	0,82	0,82
		Rb	0,22	0,20	0,21	0,47	0,34
			Cs	0,68	0,37	0,55	0,72
				F	0,26	0,57	0,82
					Pb	0,52	0,57
						Be	0,82

существенно изменяется. Связи тантала и ниобия с сопутствующими элементами становятся незначимыми (появляется лишь весьма слабая связь бериллия с танталом и слабая отрицательная связь ниобий — свинец). Связи лития, рубидия и цезия с другими элементами заметно ослабевают (за исключением пары рубидий — бериллий) и т. д. Все же для всей зоны западного экзоконтакта характерна четкая корреляция между щелочными элементами (Li, Rb, Cs), фтором, оловом и бериллием, отражающая совместную миграцию элементов и концентрацию их в слюдах. Характерным является также появление положительной корреляционной зависимости в паре олово — свинец.

В породах восточного экзоконтакта (см. табл. 50) сохраняется положительная корреляционная зависимость между литием, цезием, бериллием и фтором, отрицательная зависимость между ниобием и свинцом и т. д. В то же время в отличие от западного экзоконтакта возникает отрицательная связь литий — ниобий, положительная — цезий — олово, цезий — бериллий.

Различный характер связи ряда элементов в пределах западного и восточного экзоконтактов отражает разный характер миграции элементов. Пологий западный и крутой восточный контакт с апогранитами создавали различные условия для миграции и концентрации элементов в пределах экзоконтактов.

Изучение геохимических особенностей распределения элементов-индикаторов танталовой минерализации в пределах эндогенных геохимических ореолов массивов апогранитов, не несущих заметно повышенных концентраций тантала, свидетельствует о наличии достаточно ярко выраженных различий, позволяющих по характеру распределения таких элементов, как литий, рубидий, бериллий и олово, отличать эндогенные геохимические ореолы танталоносных апогранитов от ореолов массивов апогранитов, не несущих практически интересной танталовой минерализации. Характерным примером подобного рода может служить Майкульский массив биотит-амазонит-альбитовых апогранитов (Центральный Казахстан), отличающийся убогим содержанием акцессорного колумбита.

Майкульский гранитный массив расположен в юго-восточной части крупного Бурунтауского поднятия. В строении этого района принимают участие протерозойские, архейские и главным образом палеозойские осадочно-метаморфические образования. Наиболее распространены интрузивные образования, слагающие крупный Майкульский массив герцинского тектоно-магматического цикла. Протерозойские отложения, развитые в северо-западной и юго-восточной частях Майкульской интрузии, представлены многократно переслаивающимися метаморфизованными песчаниками и зелеными сланцами. Рифейские образования распространены у южного обрамления Майкульского массива и слагают толщу переслаивающихся эффузивно-яшмовых пород и песчаников. Палеозойские породы представлены отложениями кембрийского возраста, развиты на обширной площади к западу от Майкульской интрузии и состоят из сложно переслаивающихся грубозернистых песчаников и песчанистых сланцев.

Майкульский интрузив представляет собой широтно вытянутое тело площадью около 320 $км^2$. Контакты его с вмещающими породами пологие. Наличие большого количества останцов кровли на периферии массива и пород краевой фации в центральных частях свидетельствует о неглубоком эрозионном срезе и относительно ровной первоначальной поверхности.

Среди пород, слагающих Майкульский массив, наиболее распространены среднезернистые, слегка порфировидные биотитовые граниты главной фации. Породы фации эндоконтактов представлены в основном среднезернистыми порфировидными биотитовыми и лейкократовыми гранитами западной и северо-западной части массива. Переходы гранитов главной фации к гранитам фации эндоконтактов постепенные. Минеральный состав гранитов фации эндоконтактов аналогичен составу гранитов главной фации. Структура и минеральный состав этих гранитов несколько усложнены наложением поздних процессов (мусковитизации, окварцевания, флюоритизации, эпидотизации, хлоритизации).

Дополнительные интрузии в виде пологих штоко- и дайкообразных тел расположены в эндоконтактах массива, имея четкие секущие контакты с породами главной интрузивной фазы.

Граниты фазы дополнительных интрузивов и жильные граниты отличаются от гранитов главной интрузивной фазы значительным развитием пегматоидных участков и зон амазонитизации.

Амазонитсодержащие апограниты наиболее хорошо развиты в западной части Майкульского массива, где они в пределах дополнительной интрузии образуют серию пластообразных тел различных размеров. Залегание апогранитов определяется общим падением плоскости контакта массива.

Оценки параметров распределения ряда редких элементов, образующих в апогранитах повышенные концентрации, приведены в табл. 19.

В результате изучения характера распределения элементов-примесей в пределах экзоконтактовой зоны массива биотит-амазонит-альбитовых апогранитов устанавливается наличие эндогенного ореола, отличающегося повышенными содержаниями ряда редких элементов, характерных для апогранитов.

Оценки параметров распределения наиболее характерных элементов-индикаторов приведены в табл. 51, где для сравнения даны также параметры фонового распределения этих элементов.

Таблица 51

Оценки параметров распределения лития, рубидия, бериллия и олова в осадочных породах вдали от Майкульского массива апогранитов (Центральный Казахстан) и в пределах эндогенного геохимического ореола массива

(закон распределения логнормальный)

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое		Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
		содержаний, г/т	логарифмов содержаний				
Геохимический фон							
Li	15	51,7 ± 6,3	1,692	0,020	0,141	33	22—115
Rb	15	96 ± 14	1,962	0,015	0,122	29	44—190
Be	15	1,9 ± 0,4	0,228	0,042	0,205	44	0,5—6,0
Sn *	15 *	2,0 ± 0,4	—	0,696 *	0,834 *	29	0,7—5,1
Эндогенный геохимический ореол							
Li	65	74 ± 16	1,820	0,045	0,212	47	21—210
Rb	61	170 ± 33	2,145	0,068	0,261	76	33—590
Be	65	3,0 ± 0,6	0,371	0,072	0,268	78	0,5—10
Sn	65	6,0 ± 1,2	0,713	0,081	0,284	81	1,1—24

* Олово в пределах геохимического фона распределено нормально, поэтому в таблице даны оценки параметров распределения содержаний.

Наиболее четко в экзоконтакте массива проявлен геохимический ореол олова. Геохимический ореол в метаморфических породах прослеживается непрерывно вдоль контакта гранитной интрузии. Ширина ореола в различных его частях резко колеблется. На контакте песчано-сланцевых образований с биотит-амазонит-альбитовыми апогранитами ширина ореола повышенных концентраций олова возрастает до 800—900 *м*. В южном направлении, на контакте с лейкократовыми гранитами фации эндоконтакта она резко уменьшается до 50—200 *м* при одновременном снижении абсолютных содержаний олова в породах.

Геохимические ореолы рубидия, лития и бериллия в сравнении с ореолом олова проявлены менее контрастно и имеют значительно меньшие размеры в плане. Они развиты преимущественно в экзоконтакте амазонитсодержащих апогранитов, причем наиболее проявлен ореол рубидия. Ширина его на участке колеблется от 120 до 500 *м*, в то время как ореолы лития и бериллия прослеживаются в экзоконтакте массива всего на 20—50 *м*.

Коэффициенты аномальности в пределах ореола составляют для лития — 1,4, для рубидия — 1,7, для бериллия — 1,5 и для олова — 2, являясь значительно более низким, чем коэффициенты аномальности элементов-индикаторов в ореолах танталоносных апогранитов.

Значительно более высокие содержания лития и бериллия в ореолах танталоносных апогранитов позволяют при помощи оценок параметров распределения этих элементов уверенно отличать эти ореолы от ореолов непродуктивных на тантал апогранитовых массивов. Данные о среднем содержании лития в эндогенных ореолах берилленосных апогранитов, не несущих танталовой минерализации (59—94 *г/т*), также подтверждают этот вывод.

Выше рассматривались только эндогенные геохимические ореолы массивов апогранитов, залегающих в алюмосиликатных породах. Для массивов, прорывающих карбонатные толщи, главным поисковым критерием является интенсивная флюоритизация вмещающих пород, идущая вплоть до образования флюоритовых и слюдисто-флюоритовых метасоматитов. Последние часто содержат практически интересные концентрации бериллия, связанные с бертрандитом, фенакитом, хризобериллом, реже бериллом. Повышенное содержание в зонах флюоритизации лития, обусловленное присутствием литиевых слюд, может служить положительным критерием, указывающим на возможность появления интересных концентраций тантала в эндоконтактовой зоне метасоматически измененных гранитов.

Эндогенные геохимические ореолы пегматитовых месторождений тантала

Характеристика эндогенных геохимических ореолов танталоносных пегматитов приводится в сравнении с ореолами аплитовых даек и безрудных пегматитов, берилл-колумбитовых пегматитов и касситерит-кварцевых жил, т. е. тех типов жильных образований, которые обычно наиболее часто встречаются в районах поисков месторождений танталоносных пегматитов. Совместное нахождение перечисленных типов месторождений неслучайно. Многочисленные примеры свидетельствуют о том, что танталоносные пегматиты являются частью сложных полей редкометальных пегматитов, в которых по мере удаления от магматического очага наблюдается закономерная смена безрудных пегматитов слабо замещенными берилл-колумбитовыми, а затем интенсивно замещенными танталоносными. В ряде случаев на еще большем удалении от очага появляются высокотемпературные касситерит-кварцевые жилы.

В связи с тем что особенности структуры полей редкометальных пегматитов и характер вмещающих пород непосредственно влияют

на морфологию и размеры эндогенных геохимических ореолов, характеристика последних приводится на примерах полей разного структурного положения, залегающих в различных вмещающих породах. В Казахстане характеризуются ореолы полей согласных и поперечно секущих пегматитовых тел в песчано-сланцевых толщах и гранитах, в Забайкалье — ореолы поля диагонально секущих тел в песчано-сланцевой толще.

Ниже приводится краткая геолого-структурная характеристика основных месторождений, послуживших в качестве примеров для описания эндогенных геохимических ореолов редкометальных пегматитов. Работы проводились на семи месторождениях. Всего отобрано около 1600 проб.

Поле пологопадающих поперечно секущих редкометальных пегматитов (Казахстан) расположено в эндо- и экзоконтактовой зоне крупного массива биотитовых гранитов. Контур контакта гранитов с вмещающими ороговикованными песчано-сланцевыми породами сложный, наблюдаются многочисленные апофизы (рис. 8). Особенностью структурного положения поля является его приуроченность к сводовой части крутой антиклинальной складки (почти изоклинали) в сланцах, шарнир которой протягивается примерно параллельно основному направлению контакта гранитного массива.

Породы песчано-сланцевой толщи в районе экзоконтакта интенсивно метаморфизованы, ороговикованы. Среди них выделяются биотитовые, андалузит-биотитовые, кордиерит-андалузитовые, пироксен-гранатовые, окварцованные, фельдшпатизированные, мигматизированные разности.

В гранитах и осадочно-метаморфических породах наблюдается устойчивая система пологопадающих трещин, к которым приурочены пегматитовые тела. Простирание трещин перпендикулярно простиранию складчатости. Слоистость сланцев плоскостями трещин пересекается почти под прямым углом.

Общая протяженность пегматитового поля около 5 *км* при ширине 0,7—1,5 *км*. Вытянуто оно вкрест простирания составляющих его пегматитовых жил. Жилы в пределах поля распределены неравномерно и группируются в пять свит, разобщенных участками со значительно меньшей концентрацией жил. Пегматитоносные свиты и отдельные слагающие их жилы в плане представляют собой полосы, вытянутые согласно с общим удлинением поля. Протяженность жил по падению значительно превышает длину их по простиранию.

Преобладающая форма жил плитообразная. Максимальные мощности (до 10 *м*) приурочены к срединным частям жил.

В пегматитовом поле наблюдается зональность (впервые установленная Ю. А. Садовским), характерная для всех пегматитовых полей данного района. Максимальное развитие процессов замещения и наиболее интенсивное редкометальное оруденение приурочено к висячему боку поля (максимальное удаление от магматического очага). Менее замещенные и блоковые берилл-колумбитовые пегматиты приходятся на срединную часть поля, а в его лежачем боку

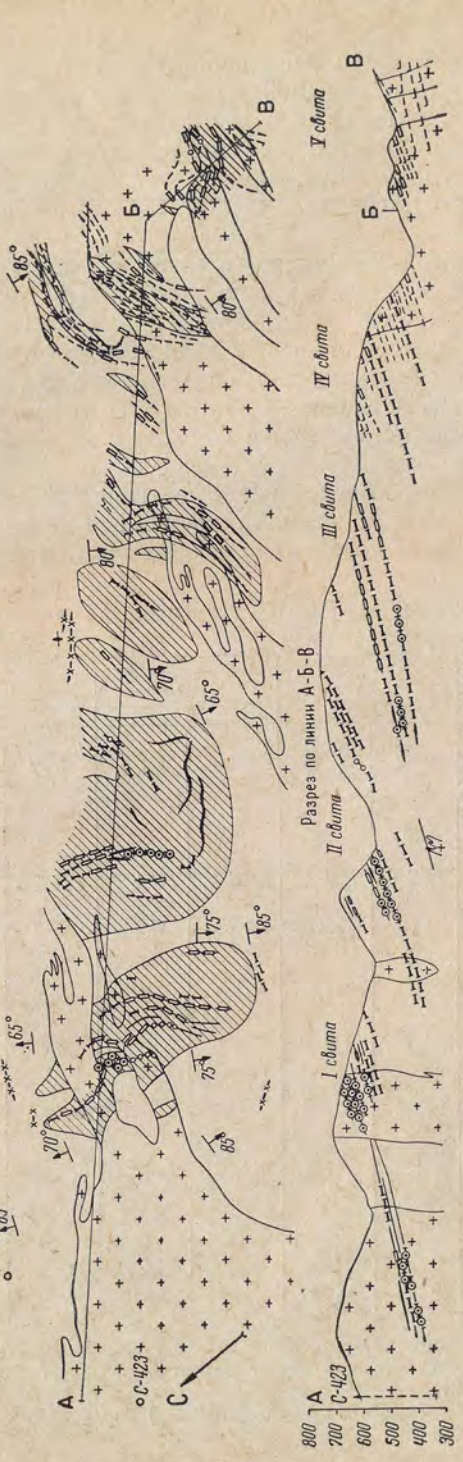


Рис. 8. Эндогенные геохимические ореолы лития вокруг свит пологопадающих поперечно секущих редкометальных пегматитов

1 — ороговикованные сланцы; *2* — граниты; *3* — аплиты, аплит-пегматиты, гранит-аплиты; *4—10* — пегматиты: *4* — мелкозернистые с участками разнозернистых, кварц-микроклиновые слабо замещенные, *5* — разнозернистые кварц-микроклиновые с мелкими участками блоковых текстур, *6* — блоковые слабо замещенные, *7* — реликто-блоковые до интенсивно замещенных, альбитизированные, *8* — нацело замещенные, альбитизированные, *9* — грейзенизированные, *10* — сподуменизированные местами с лепидолитом, амблигонитом, полихромными турмалинами; *11* — содержание лития выше минимально-аномальных с вероятностью 0,99; *12* — элементы залегания напластования сланцев; *13* — скважины, оконтуривающие свиту I пегматитов по падению

(уже в пределах материнской интрузии) располагаются разнозернистые, частично блоковые слабо замещенные безрудные пегматиты.

В направлении висячего бока поля в пегматитах увеличивается количество альбита, грейзеновых слюд, сподумена, касситерита, появляются амблигонит, лепидолит, поллуцит. Интенсивность турмалиновой минерализации, наоборот, увеличивается в обратном направлении.

Тантал и ниобий, характерные для всего поля, в пределах разных его частей связаны с различными минералами. Для блоковых пегматитов характерен крупнокристаллический колумбит-танталит, в интенсивно замещенных — основная масса тантало-ниобатов представлена мелкокристаллическим танталит-колумбитом, танталитом, манган-танталитом, микролитом. Отношение тантала к ниобию изменяется от 0,6 : 1 в блоковых пегматитах и до 1,3 : 1 в интенсивно замещенных.

Околожильные изменения, представленные главным образом грейзенизацией, альбитизацией и турмалинизацией, имеют значительное развитие только вокруг интенсивно замещенных пегматитов.

Оценки параметров распределения содержаний элементов в биотитовых гра пегматитов

Параметры	Li		Cs		Rb	
	Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт
Количество проб	29	25	25	23	25	24
Среднее арифметическое содержаний	60±6	72±12	6,0±1,5	7,3±2,0	152±9	154±15
Среднее квадратическое отклонение содержаний	17,2	29,7	3,73	4,92	22,7	35,9
Дисперсия содержаний	300	880	13,9	24,2	517	1290
Коэффициент вариации содержаний, %	28,8	41,1	61,8	67,7	14,9	23,2
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	1,76	1,829	—	—	2,173	2,178
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,114	0,158	—	—	0,064	0,096
Дисперсия логарифмов содержаний	0,0129	0,025	—	—	0,0041	0,0092
Закон распределения	Л+Н	Л+Н	Не опр.	Не опр.	Л+Н	Л+Н
Минимальные аномальные содержания						
1%		167		19,6		262
5%		126		15,7		220
10%		109		13,8		202

Примечания: 1. Под контактом имеется в виду эндоконтактовая по
2. Здесь и далее Л — удовлетворяет логнормальной модели, Н — нормаль деление с меньшей асимметрией).
3. Минимальные аномальные (максимальные фоновые) содержания опреде

Поле крутопадающих согласных редкометальных пегматитов (Казахстан) расположено в другом участке экзоконтактовой зоны того же массива биотитовых гранитов. Вмещающие ороговикованные песчано-глинистые сланцы имеют северо-западное простирание и крутые углы падения (70—90°). Предполагается, что они слагают крыло крупной антиклинальной складки, в ядре которой залегает гранитный массив. В сланцах согласно сланцеватости залегают многочисленные дайки гранит-аплитов и пегматитов. Среди пегматитов различают преобладающие слабо замещенные разности с шерлом и единичными кристаллами берилла и колумбита и интенсивно замещенные пегматиты натро-литиевого типа с танталитом, касситеритом и сподуменом.

Форма тел танталоносных пегматитов плитообразная, реже линзовидная. Мощность жил колеблется от 0,5 до 7 *м*.

В пределах поля по мере удаления от гранитного массива наблюдается закономерная смена гранит-аплитов и слабо замещенных пегматитов (лежачий бок поля) интенсивно замещенными танталоносными разностями (висячий бок поля).

Таблица 52

нитах массива, с которым пространственно связано поле редкометальных (в *г/т*)

Sn		Be		B		Cu	
Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт
29	31	39	31	37	36	39	40
4,7±0,4	4,3±0,6	4,0±0,7	4,0±0,6	11±2	11±3	40±8	47±8
1,16	1,62	2,31	1,69	6	9	23,8	25,5
1,35	2,63	5,34	2,87	36	81	566	652
24,7	37,7	57,8	42,2	54,0	87,0	59,5	54,2
0,662	0,579	0,569	0,536	—	—	1,515	1,608
0,107	0,217	0,243	0,208	—	—	0,308	0,261
0,0114	0,047	0,0591	0,0431	—	—	0,095	0,068
Л+Н	Н+Л	Л+Н	Н+Л	Не опр.	Не опр.	Н+Л	Л+Н
	8,3		8,2		33		174
	7,0		6,9		26		112
	6,4		6,2		23		89

лоса гранитного массива шириной 500 *м*.
ной модели, Л+Н и Н+Л — обеим моделям (на первом месте стоит распре-

лены в выборках на односторонних уровнях значимости 1, 5 и 10%.

Поле пологопадающих диагонально секущих редкометальных пегматитов (Забайкалье) площадью около 1,5 $км^2$ расположено в песчано-глинистых сланцах, претерпевших частичное ороговикование и биотитизацию под влиянием контактового метаморфизма гранитной интрузии, не вскрытой эрозией. Сланцы в пределах поля меняют свое простирание с северного на северо-западное и падают на восток — северо-восток под углами в основном 15—40°. Пегматитовые жилы в большинстве случаев являются диагонально секущими по отношению к слоистости вмещающих сланцев. Они имеют северо-западное простирание и падение на юго-запад под углами 35—40°.

Жилы сгруппированы в пологопадающие субпараллельные свиты, в каждой из которых находится значительное количество жил различной мощности, часто сближенных и соединяющихся между собой. Большинство пегматитовых тел имеют плитообразную форму; мощность варьирует от долей метра до 20 *м*; длина по простиранию и падению достигает нескольких сотен метров.

Основными породообразующими минералами пегматитов являются альбит, микроклин, кварц, сподумен, мусковит. Главные рудные минералы представлены колумбит-танталитом, бериллом, касситеритом.

Оценки параметров распределения содержаний элементов в осадочно-мета биотитовых

Параметры	Li		Cs		Rb	
	Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт
Количество проб	38	48	34	41	36	42
Среднее арифметическое содержаний	42±3	69±6	4±1	7±1	121±9	130±12
Среднее квадратическое отклонение содержаний	9,7	22,2	3,22	4,49	27,7	40,5
Дисперсия содержаний	94	492	10,4	20,2	771	1640
Коэффициент вариации содержаний, %	22,9	32,2	77,8	63,1	22,9	31,2
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	—	1,818	—	—	—	2,090
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	—	0,134	—	—	—	0,154
Дисперсия логарифмов содержаний	—	0,018	—	—	—	0,0238
Закон распределения	Н	Л+Н	Не опр.	Не опр.	Н	Н+Л
Минимальные аномальные содержания						
1%		138		18,0		228
5%		110		14,7		198
10%		98		13,0		183

Примечания: 1. Под контактом имеется в виду экзоконтактовая по
2. Для меди фон и контакт I относятся к полю пологопадающих секу

Пегматиты поля относятся к интенсивно замещенным с широко развитыми процессами альбитизации и грейзенизации, сопровождающимися привносом тантала, ниобия, бериллия и олова.

В табл. 52 и 53 приводится характеристика фонового распределения элементов-индикаторов в сланцах и гранитах соответствующего района Казахстана. Поля редкометальных пегматитов обычно приурочены к эндо- и экзоконтактовым зонам гранитных массивов, поэтому фоновые выборки должны характеризовать эти зоны в участках, удаленных от пегматитовых полей. Ореолы пегматитов накладываются на более ранние ореолы массивов биотитовых гранитов или на эндоконтактовые части массивов, распределение элементов в которых отлично от распределений в породах, удаленных на значительные расстояния в обе стороны от контактов. Это означает также, что при геохимических поисках можно встретить ореолы, связанные не с жильными образованиями, а с эндо- и экзоконтактовыми частями массивов биотитовых гранитов.

В табл. 52 приводятся оценки параметров распределения элементов в гранитах, удаленных от контактов на расстояние не менее

Таблица 53

морфических породах в пределах фона и экзоконтактовой полосы массивов гранитов (в *г/т*)

Sn		Be		B		Cu		
Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт	Фон	Контакт I	Контакт II
59	53	59	55	49	45	53	36	24
3,3±0,5	3,4±0,6	2,2±0,5	2,0±0,4	44±8	47±9	65±16	42±8	158±34
1,85	2,29	1,75	1,34	28,2	29,6	—	24,9	82
3,42	5,27	3,07	1,79	797	878	—	619	6700
56,1	67,3	72,5	61,0	64,1	63,0	91,1	59,3	52,0
0,443	0,412	0,270	0,253	1,518	1,535	1,618	1,502	2,12
0,290	0,336	0,324	0,290	0,376	0,406	0,445	0,433	0,281
0,0842	0,113	0,105	0,0841	0,142	0,165	0,198	0,187	0,079
Н+Л	Л+Н	Л+Н	Л+Н	Н+Л	Н+Л	Л	Н	Н+Л
	16,5		8,9		118		103	362
	9,4		5,5		97		84	298
	7,0		4,3		86		74	266

лоса гранитов шириной 500 *м*.
щих пегматитов, контакт II — к полю крутопадающих согласных пегматитов.

0,5 *км* (фон) и в гранитах эндоконтактовой полосы шириной 0,5 *км* (контакт). В табл. 53 те же данные приводятся для осадочно-метаморфических пород, удаленных от массива гранитов более чем на 0,5 *км* (фон) и находящихся в экзоконтактовой полосе этого массива шириной 0,5 *км* (контакт).

Гранитный массив, для которого приводятся оценки параметров распределения элементов-примесей, характеризуется явлениями контаминации. В гранитах наблюдаются многочисленные ксенолиты песчано-сланцевых пород, находящихся в различной стадии переработки. Граниты часто имеют гнейсовидную текстуру, содержат непостоянное, обычно повышенное количество биотита и плагиоклаза. Минеральный состав их следующий: кварц 15—30%, плагиоклаз 30—45%, микроклин 20—35%, биотит 5—15%, мусковит — знаки—1%. Структура средне- крупнозернистая, порфировидная.

Эндоконтактовые зоны массива насыщены ксенолитами больше, чем его внутренние части. Часто в результате их переработки в гранитах остаются меланократовые шлиры, к которым приурочены пленки сульфидов (пирит) и скопления графита.

Как видно из табл. 52, эндоконтактовая зона массива в отличие от внутренней характеризуется несколько повышенными содержаниями лития, цезия и меди. Бериллий, бор, олово и рубидий в обеих зонах присутствуют примерно в равных количествах.

Среди песчано-сланцевых пород по составу преобладают биотит-кварцевые и кварц-биотитовые разновидности, содержащие различное количество плагиоклаза и микроклина. В отдельных прослоях в больших количествах присутствуют углисто-глинистый материал, мусковит, хлорит, андалузит, кордиерит, карбонатный материал, гранат. Вблизи интрузивных пород появляются ороговикованные разности сланцев, вплоть до роговиков.

Вокруг гранитов (см. табл. 53) образуются ореолы с несколько повышенными содержаниями лития, цезия, рубидия и пониженными содержаниями меди. Олово, бериллий и бор практически не образуют ореолов.

В дальнейшем вся характеристика ореолов вокруг пегматитов дается в сравнении с распределением элементов в эндо-, экзоконтактовых частях гранитных массивов, которые, следовательно, рассматриваются как фон для интересующих нас ореолов.

Особенности эндогенных геохимических ореолов танталоносных пегматитов

Одной из основных особенностей ореолов танталоносных пегматитов, имеющей принципиальное значение, является практическое отсутствие ореолов основного рудного элемента — тантала, которые могут быть выявлены при помощи существующих аналитических методов. Эндогенные ореолы вокруг танталоносных пегматитов образуют литий, цезий, рубидий, олово, бериллий, бор, ниобий, медь, цинк, свинец, калий и, вероятно, никель, кобальт и хром.

Перечисленные элементы в ореолах танталоносных пегматитов имеют различное происхождение. Литий, цезий, рубидий, олово, бериллий и ниобий привносятся в пегматитовые тела преимущественно в процессе натро-литиевого метасоматоза, с которым связано и танталовое оруденение, и одновременно обогащают вмещающие породы, образуя геохимические ореолы. Основным источником бора, свинца и калия в ореолах являются первичные минералы пегматитовых жил, подвергшиеся интенсивной альбитизации (замещение микроклина с выносом калия и свинца и шерла с выносом бора). Медь, цинк, никель, кобальт и хром, а частично также и свинец образуют ореолы благодаря перераспределению этих элементов во вмещающих породах под влиянием факторов, связанных с пегматитообразованием. Высокая температура и активная проработка растворами вмещающих пород вблизи редкометальных пегматитов благоприятствуют выносу этих элементов из окружающих пегматиты пород, в результате чего образуются отрицательные аномалии, окруженные зонами относительно повышенных концентраций.

Наиболее мощные и интенсивные ореолы образуют литий, цезий, бор, олово, бериллий, которые и являются основными элементами-индикаторами пегматитовых месторождений тантала. Рубидий также является весьма характерным элементом ореолов танталоносных пегматитов несмотря на то, что мощность и интенсивность его аномалий обычно невелики. Перечисленные элементы являются индикаторами, потому что их максимальная активность в минералообразующих растворах непосредственно связана с процессом альбитизации, который является ведущим фактором образования танталоносных пегматитов.

Элементный состав ореолов не зависит от вмещающих пород (граниты или осадочные породы) и условий залегания пегматитовых жил в них (крутопадающие или пологозалегающие жилы, секущие слоистость вмещающих пород или согласные с ней).

Вмещающие породы и условия залегания влияют на размер и морфологию ореолов (табл. 54). Ореолы в гранитах, как правило, несколько менее мощные, чем в сланцах, вмещающих поперечно секущие пегматитовые жилы. Ореолы в сланцах для поперечно секущих пологозалегающих жил более мощные, чем для согласных крутопадающих жил, но менее протяженные по простиранию и падению жил. Для первых мощность ореолов в висячих боках свит жил может превышать 300 *м*, для вторых — не превышает 100—150 *м*. Размер ореолов по простиранию пегматитовых тел в первом случае равен 100—200 *м*, во втором — может превышать 500 *м*.

Литий. Как в гранитах, так и в осадочных породах литий образует наиболее широкие и весьма контрастные геохимические ореолы вокруг танталоносных пегматитов (см. рис. 8). Мощность ореолов в висячих боках свит танталоносных пегматитов может превышать 300 *м* для пологозалегающих секущих тел в сланцах и достигать 250 *м* для этих же жил в гранитах. Размер ореола в направлении простирания свиты крутопадающих согласных жил в сланцах может превышать 500 *м*.

Таблица 54

Истинные мощности ореолов (в *м*) в висячих боках свит даек, пегматитов и гидротермальных жил
(для ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%)

Элемент	Дайки аплитов	Бериллколумбитовые пегматиты			Танталоносные пегматиты				Гидротермальные месторождения касситериткварцевой формации
		Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы				Осадочные породы
	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Крутопадающие согласные дайки	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Li	20	70	20	75	250	50	>300	300	630
Cs	10	10	5	20	120	100	150	200	460
Rb	<1	3	Не опр.	5	25	Не опр.	40	70	10
Sn	<1	15	20	30	120	60	100	150	280
Be	<1	30	<1	30	80	25	45	110	600
B	150	30	Не опр.	25	200	100	25	150	370

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,89—1,0.

Закон распределения содержаний в пределах ореолов удовлетворяет логнормальной модели. Среднее арифметическое содержание лития в осадочных породах выше, чем в гранитах (табл. 55). Коэффициент вариации содержаний также выше в осадочных породах (72,9—127,6%), чем в гранитах (69,9%).

Среднее арифметическое в аномалиях превосходит среднее фоновое содержание (коэффициент аномальности) в 4,2—5,3 раза в сланцах и в 3,6 раза в гранитах.

В ореолах литий связан главным образом со слюдами. Наибольшие концентрации его приурочены к грейзенам, грейзенизированным гранитам, роговикам, богатым биотитом или насыщенным кварц-полевошпатовыми прожилками.

Цезий также образует мощные и интенсивные ореолы вокруг танталоносных пегматитов.

Мощность ореолов в висячих боках свит пегматитов достигает 200 *м* для пологозалегающих поперечно секущих жил в сланцах и 120 *м* для этих же жил в гранитах. Размер ореола в направлении простирания свиты крутопадающих согласных жил в сланцах достигает 500 *м*.

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,87—0,92.

Закон распределения содержаний в пределах ореолов удовлетворяет логнормальной модели. Среднее арифметическое содержание цезия в ореолах превосходит среднее фоновое в 4,4—10,4 раза. Коэффициент вариации содержаний цезия высокий — до 105,9—165,2% (табл. 56).

В ореолах цезий концентрируется главным образом в слюдах. Максимальные содержания его отмечаются в грейзенах.

Рубидий. Геохимические ореолы рубидия по сравнению с ореолами лития и цезия значительно менее мощные и интенсивные. Характерно, что аномалии рубидия окружают отдельные пегматитовые тела в виде сравнительно узких зон, которые почти не сливаются вместе. Реже наблюдается слияние ореолов с образованием единой аномальной зоны вокруг свиты жил.

Мощность ореолов в висячих боках пегматитовых жил достигает 70 *м* для пологозалегающих поперечно секущих жил в сланцах и 25 *м* для этих же жил в гранитах.

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,61—0,76.

Закон распределения содержаний удовлетворяет логнормальной модели. Среднее арифметическое содержание рубидия в ореолах превосходит среднее фоновое в 1,6—2,2 раза. Коэффициент вариации содержаний 48,8—65,3% (табл. 57).

В пределах аномалий рубидий концентрируется в микроклине и слюдах. Максимальные его содержания отмечаются в грейзенах.

Таблица 55

Оценки параметров распределения лития в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в г/т)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты							Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Берилл-колумбитовые			Танталоносные				
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Количество проб	12	17	32	7	31	44	13	136	121	18
Среднее арифметическое содержаний	97±39	88±13	188±25	159±67	184±59	258±54	367±260	155±24	300±40	293±101
Среднее квадратическое отклонение содержаний	68,1	26,6	70,1	90	—	—	—	—	—	—
Дисперсия содержаний	4640	706	4920	8080	—	—	—	—	—	—
Асимметрия	1,33	1,41	0,23	1,17	2,24	2,56	2,20	3,68	1,53	2,11
Коэффициент вариации содержаний, %	70,4	30,2	37,3	56,6	89,2	69,9	127,6	94,5	72,9	73,0
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	1,910	1,930	2,242	2,15	2,159	2,338	2,378	2,033	2,377	2,388
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,250	0,113	0,174	0,21	0,283	0,245	0,373	0,350	0,295	0,258
Дисперсия логарифмов содержаний	0,0623	0,0127	0,0303	0,0423	0,0801	0,0602	0,139	0,123	0,0881	0,0667
Асимметрия	0,78	1,10	—0,57	0,55	0,86	0,45	0,96	0,60	0,05	0,24
Закон распределения	Л+Н	Л+Н	Н+Л	Л+Н	Л	Л	Л	Л	Л	Л
Коэффициент аномальности	1,3	1,3	2,6	2,3	2,7	3,6	5,3	4,2	4,3	4,2

Таблица 56

Оценки параметров распределения цезия в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в г/т)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты							Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Берилл-колумбитовые			Танталоносные				
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Количество проб	5	10	6	11	9	38	15	12	71	15
Среднее арифметическое содержаний	5,4±2,9	11±2	31±18	10±9	35±29	61±29	69±56	44±27	73±29	126±46
Среднее квадратическое отклонение содержаний	3,3	3,5	22,8	15,7	43,3	—	—	46,6	—	89,1
Дисперсия содержаний	10,9	12,3	524	240,7	1867	—	—	2172	—	7930
Асимметрия	0,32	0,11	1,12	2,15	2,07	2,61	2,17	1,98	3,45	0,41
Коэффициент вариации содержаний, %	61,0	30,0	74,0	157,0	123,1	149,7	150,6	105,9	165,2	70,9
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	0,668	1,039	1,405	0,767	1,334	1,505	1,480	1,496	1,540	1,956
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,26	0,144	0,293	0,416	0,410	0,445	0,602	0,356	0,489	0,405
Дисперсия логарифмов содержаний	0,068	0,0203	0,086	0,173	0,168	0,198	0,362	0,127	0,239	0,164
Асимметрия	0,3	0,45	0,53	1,13	0,80	1,00	—0,04	0,51	0,70	—0,47
Закон распределения	Л+Н	Н+Л	Л+Н	Л+Н	Л+Н	Л	Л	Л+Н	Л	Н+Л
Коэффициент аномальности	0,7	1,6	4,2	1,4	5,0	8,4	9,9	4,4	10,4	18

Таблица 57

Оценки параметров распределения рубидия в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в *г/т*)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты								Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Бериллий-колумбитовые		Танталоносные						
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы	Граниты		Осадочные породы		Крутопадающие согласные жилы	Осадочные породы
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы		Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы		
Количество проб	6	12	23	25	12		40	37	11	
Среднее арифметическое содержаний	166±24	145±20	150±14	149±21	277±76		344±70	209±37	245±74	
Среднее квадратическое отклонение	30,1	35	—	—	135		—	—	122,3	
Дисперсия содержаний	916	1251	—	—	18 350		—	—	14 960	
Асимметрия	0,68	0,50	2,1	1,83	1,43		1,45	2,35	1,15	
Коэффициент вариации содержаний, %	18,0	24,0	23,0	35,3	48,8		65,3	54,2	49,9	
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	2,214	2,150	2,168	2,149	2,406		2,455	2,278	2,349	
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,075	0,33	0,085	0,142	0,172		0,248	0,176	0,185	
Дисперсия логарифмов содержаний	0,0057	0,011	0,0073	0,020	0,030		0,062	0,031	0,034	
Асимметрия	1,07	0,04	1,51	0,25	1,06		0,70	1,22	0,78	
Закон распределения	Н+Л	Л+Н	Л	Л	Л+Н		Л	Л	Л+Н	
Коэффициент аномальности	1,1	1,1	1,0	1,1	1,8		2,2	1,6	1,9	

Олово. Мощность ореолов олова в висячих боках свит танталоносных пегматитов достигает 150 *м* для пологозалегающих поперечно секущих жил в сланцах и 120 *м* для этих же жил в гранитах. Размер ореола в направлении простирания свиты крутопадающих согласных жил в сланцах достигает 400 *м*.

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,57—0,71.

Закон распределения содержаний в пределах ореолов удовлетворяет логнормальной модели. Среднее арифметическое содержание олова в ореолах превосходит среднее фоновое в 2,6—5,9 раза. Коэффициент вариации содержаний олова выше, чем других элементов, — до 132,8—197,5% (табл. 58). Высокие коэффициенты вариации являются отражением значительных скачков содержаний олова в пределах аномалий (от 0,5 до 300 *г/т*). Если для олова отношение крайних содержаний в аномалиях достигает 400—600, то для лития не превышает 40—50.

В ореолах олово связано главным образом со слюдами, а в интенсивно измененных породах — грейзенах появляется заметное количество касситерита.

Бериллий. Мощность ореолов бериллия в висячих боках свит танталоносных пегматитов редко превышает 100—110 *м* для пологозалегающих поперечно секущих жил в сланцах и 80 *м* для этих же жил в гранитах. Размер ореола в направлении простирания свиты крутопадающих согласных жил в сланцах не превышает 300 *м* (рис. 9).

Особенностью поведения бериллия, сближающей его с оловом, является крайне неравномерное распределение его в ореолах. В пределах свит танталоносных пегматитов наблюдаются участки вмещающих пород, примыкающие к промышленным жилам и не содержащие сколько-нибудь повышенных концентраций металла. Не всегда аномальные содержания приурочены непосредственно к контактам пегматитов, иногда они удалены от последних на несколько десятков метров в сторону висячего или лежачего боков.

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,61—0,79.

Закон распределения содержаний бериллия в пределах ореолов удовлетворяет логнормальной модели, иногда одновременно и нормальной модели. Среднее арифметическое в ореолах превосходит среднее фоновое в 1,8—3,3 раза. Коэффициент вариации содержаний бериллия 31,6—131,3% (табл. 59).

В ореолах бериллий связан главным образом с полевыми шпатами и слюдами, редко в наиболее измененных (грейзенизированных) участках отмечается мелко вкрапленный берилл.

Бор. Мощность ореолов бора в висячих боках свит танталоносных пегматитов равна примерно 150 *м* для пологозалегающих поперечно секущих жил в сланцах и 200 *м* для этих же жил в гранитах. Размер ореола в направлении простирания свиты крутопадающих согласных жил в сланцах около 500 *м*.

8 Заказ 1355.

Таблица 58

Оценки параметров распределения олова в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в г/т)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты								Гидротермальные месторождения кассеритит-кварцевой формации	
			Бериллий-колумбитовые				Танталоносные					
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы			Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы	
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы		Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы		Крутопадающие согласные жилы	Крутопадающие согласные жилы
Количество проб	12	28	7	16	27		38	25	104		25	
Среднее арифметическое содержаний	2,4±0,8	2,8±0,8	10±4	15±13	18±8		11±5	18±10	20±8		21±9	
Среднее квадратическое отклонение содержаний	1,37	—	5,26	—	—		—	—	—		23,4	
Дисперсия содержаний	1,87	—	27,7	—	—		—	—	—		550	
Асимметрия	0,82	1,77	0,58	2,49	2,19		3,17	1,79	4,43		1,38	
Коэффициент вариации содержаний, %	57,1	74,1	52,6	168,7	112,5		136,4	132,8	197,5		111,4	
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	0,307	0,358	0,930	0,883	1,056		0,883	0,871	0,961		1,071	
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,270	0,283	0,253	0,452	0,412		0,321	0,645	0,478		0,497	
Дисперсия логарифмов содержаний	0,073	0,080	0,064	0,204	0,170		0,103	0,416	0,228		0,247	
Асимметрия	—0,54	0,26	—0,38	1,1	—0,09		1,75	0,06	1,05		—0,06	
Закон распределения	Л+Н	Л	Л+Н	Л	Л		Л	Л	Л		Л+Н	
Коэффициент аномальности	0,6	0,8	2,3	4,4	5,3		2,6	5,3	5,9		6,2	

Вероятность встречи аномальных содержаний в пределах ореолов, оконтуренных на уровне значимости 10%, равна 0,73—0,95.

Закон распределения содержаний бора в пределах ореолов удовлетворяет логнормальной модели. Среднее арифметическое в ореолах

Рис. 9. Эндогенные геохимические ореолы бериллия вокруг свиты крутопадающих согласных редкометальных пегматитов (*А*) и график распределения бериллия по профилю I—II (*Б*)

1 — сланцы; *2* — граниты; *3—5* — интенсивно замещенные пегматиты: *3* — сподумен-альбитовые с интенсивной неравномерной альбитизацией, *4* — сподумен-альбитовые с интенсивной альбитизацией и с участками нацело альбитизированного пегматита, *5* — мусковит-альбитовые с интенсивной неравномерной альбитизацией; *6* — слабо замещенные мусковит-микроклиновые пегматиты; *7* — тектонические нарушения; *8* — содержания бериллия выше минимально-аномальных с вероятностью 0,90; *9* — элементы залегания напластования сланцев

превосходит среднее фоновое в 4—18 раз. Коэффициенты вариации содержаний бора высокие — 107—175%, что является отражением значительных колебаний содержаний — от 5 до 1000 *г/т* (табл. 60).

Бо́льшая часть бора в геохимических ореолах связана с шерлом, присутствующим в виде скоплений игольчатых кристаллов разной величины.

Таблица 59

Оценки параметров распределения бериллия в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в г/т)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты							Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Берилл-колумбитовые			Танталоносные				
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопздающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Количество проб	12	28	9	16	24	19	19	89	100	27
Среднее арифметическое содержаний	2,4±0,5	1,8±0,4	7,0±1,2	1,8±0,6	5,3±1,4	7,0±1,0	6,4±2,4	8,7±2,4	5,4±0,9	10,0±3,8
Среднее квадратическое отклонение содержаний	0,96	1,12	1,8	1,16	—	2,21	5,52	—	—	9,84
Дисперсия содержаний	0,92	1,245	3,25	1,33	—	4,9	30,5	—	—	96,8
Асимметрия	0,57	0,91	0,84	1,19	2,22	—0,73	1,446	2,52	2,91	1,20
Коэффициент вариации содержаний, %	40,0	62,0	25,7	64,0	73,8	31,6	86,2	131,3	80,6	98,4
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	0,330	0,185	0,847	0,18	0,640	0,809	0,670	0,745	0,635	0,848
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,232	0,262	0,104	0,23	0,270	0,181	0,354	0,366	0,286	0,387
Дисперсия логарифмов содержаний	0,054	0,0688	0,0108	0,0525	0,073	0,0327	0,125	0,134	0,082	0,150
Асимметрия	—2,0	0,09	0,31	0,81	0,08	—1,37	—0,11	1,00	0,07	0,40
Закон распределения	Н+Л	Л+Н	Л+Н	Л+Н	Л	Н+Л	Л+Н	Л	Л	Л+Н
Коэффициент аномальности	0,6	0,8	1,8	0,8	2,4	1,8	2,9	3,3	2,5	4,6

Таблица 60

Оценки параметров распределения бора в эндогенных геохимических ореолах различного типа (в г/т)

Параметры	Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты							Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Берилл-колумбитовые			Танталоносные				
	Граниты	Осадочные породы	Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Пологопадающие жилы недифференцированных пегматитов	Крутопадающие согласные дайки аплитовидных гранитов	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Количество проб	12	31	23	12	29	52	28	22	124	27
Среднее арифметическое содержаний	28±12	105±22	44±25	230±130	218±93	62±26	840±340	800±560	182±46	680±290
Среднее квадратическое отклонение содержаний	20	—	—	224	—	—	899	—	—	760
Дисперсия содержаний	398	—	—	50 170	—	—	808 200	—	—	578 000
Асимметрия	2,0	2,21	3,40	1,36	1,42	4,09	0,46	2,4	3,82	0,95
Коэффициент вариации содержаний, %	71,2	58,4	135,9	97,3	114,4	152,9	107,0	175,0	142,3	111,8
Среднее арифметическое логарифмов содержаний	1,386	1,974	1,476	2,200	2,065	1,583	2,477	2,523	1,996	2,427
Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	0,205	0,188	0,382	0,338	0,540	0,392	0,755	0,502	0,485	0,733
Дисперсия логарифмов содержаний	0,042	0,0354	0,110	0,151	0,292	0,154	0,570	0,252	0,235	0,537
Асимметрия	1,79	1,16	1,19	0,28	—0,44	0,60	—0,22	1,16	—0,18	—0,52
Закон распределения	Л+Н	Л	Л	Л+Н	Л	Л	Л+Н	Л	Л	Л+Н
Коэффициент аномальности	2,5	2,2	4,0	4,9	4,6	5,6	17,9	7,3	3,9	14,5

Важной особенностью эндогенных геохимических ореолов в гранитах является их неустойчивость к влиянию последующей интенсивной хлоритизации. При этом процессе основная масса ореолообразующих элементов, которые связаны главным образом с биотитом, выносится из породы и ореолы как бы стираются. Исключение могут составлять элементы, связанные в породе в основном с плагиоклазами (например, бериллий), которые более устойчивы к влиянию низкотемпературных послемагматических процессов, чем биотит.

Танталоносные пегматиты и их ореолы являются частью сложных пегматитовых полей, в которых наблюдается закономерное изменение состава пегматитов и их ореолов в направлении от лежачего к висячему боку поля, т. е. в направлении удаления от магматического очага. Безрудные пегматиты в этом направлении сменяются слабо замещенными берилл-колумбитовыми и далее интенсивно замещенными танталоносными пегматитами, что и характеризует вертикальную зональность пегматитового поля.

Высокотемпературные кварцевые жилы с оловянно-вольфрамовой минерализацией в этой последовательности часто занимают еще более высокое положение несмотря на то, что генетически они обычно связываются с гранитами более молодой фазы, чем материнские граниты пегматитов.

Ниже в соответствии с особенностями вертикальной зональности эндогенного геохимического ореола поля редкометальных пегматитов, в котором танталоносные пегматиты занимают вполне определенное место, рассматриваются отличительные особенности эндогенных ореолов безрудных и колумбит-берилловых пегматитов, а также высокотемпературных касситерит-кварцевых жил в сравнении с ореолами танталоносных пегматитов.

Знание этих особенностей требуется для выработки критериев разделения аномалий, связанных с танталоносными пегматитами, и аномалий, не связанных с ними, но выявление которых возможно в районе поиска.

Эндогенные ореолы безрудных пегматитов и аплитовых даек резко отличаются от ореолов всех рассмотренных рудных тел, в том числе и от ореолов танталоносных пегматитов своими малыми продуктивностями для основной массы элементов-индикаторов. Вокруг них отмечаются незначительные по мощности (до 10—20 *м*) слабо контрастные ореолы лития, цезия, бериллия. Бор является единственным элементом, образующим широкие сравнительно контрастные ореолы.

Закон распределения содержаний большинства изученных элементов в районах развития безрудных пегматитов и аплитовых даек удовлетворяет одновременно нормальной и логнормальной моделям. Коэффициенты вариации содержаний, как правило, близки к фоновым (18%—74,1%).

Мощность ореолов бора в висячих боках свит согласных крутопадающих даек аплитов в сланцах достигает 150 *м*. Вероятность

встречи аномальных содержаний равна 0,84—1,0. Среднее арифметическое в ореолах превышает среднее фоновое в 2,2—2,5 раза.

Берилл-колумбитовым пегматитам в отличие от безрудных свойственны уже более интенсивные ореолы, но от ореолов танталоносных пегматитов они отличаются значительно меньшей продуктивностью, зависящей главным образом от мощности аномальных зон (табл. 61). Мощность ореолов большинства элементов в висячих боках пологозалегающих свит берилл-колумбитовых пегматитов не превышает 30 *м*.

Элементный состав ореолов танталоносных и берилл-колумбитовых пегматитов близок, несмотря на то, что для последних нехарактерны цезий и рубидий; общими являются литий, бериллий, олово, бор и ниобий. Это вызвано тем, что оба типа пегматитов тесно связаны в пределах пегматитового поля, которому свойственны одни и те же метасоматические процессы, но проявленные с разной интенсивностью в разных частях поля. Наиболее интенсивные ореолы вокруг берилл-колумбитовых пегматитов образуют литий, олово, бор, иногда бериллий.

Закон распределения содержаний этих элементов в ореолах обычно удовлетворяет логнормальной и нормальной моделям (лучше соответствует первой) или только логнормальной модели. Средние арифметические содержания в ореолах берилл-колумбитовых и танталоносных пегматитов для олова, бериллия и бора примерно равны, но иногда значительно больше в ореолах пегматитов, продуктивных на тантал. Среднее арифметическое содержание лития всегда выше вокруг танталоносных пегматитов (в 1,4—2,3 раза).

Цезий образует незначительные по мощности ореолы (до 20 *м* в сланцах и до 10 *м* в гранитах в висячих боках пологозалегающих жил), среднее арифметическое содержание в которых ниже такового в более мощных ореолах вокруг танталоносных пегматитов в 2,0—6,9 раза.

Рубидий образует еще менее значительные ореолы — до 3—5 *м* мощностью.

Коэффициенты вариации содержаний элементов вокруг берилл-колумбитовых пегматитов значительно выше, чем вокруг безрудных, но в большинстве случаев ниже, чем вокруг танталоносных.

Вокруг высокотемпературных гидротермальных касситерит-кварцевых месторождений, как и вокруг танталоносных пегматитов, образуются ореолы лития, цезия, олова, бериллия, бора, а также интенсивные ореолы фтора, вольфрама, мышьяка. Последние три элемента нехарактерны для ореолов танталоносных пегматитов.

Ореолы касситерит-кварцевых месторождений, кроме того, более продуктивны, чем ореолы танталоносных пегматитов, главным образом за счет более значительных мощностей. Мощности ореолов серии согласных касситерит-кварцевых жил в сланцах превосходят мощности ореолов серии согласных пегматитовых жил более чем в 5 раз, а поперечно секущих пегматитовых жил — в 2—3 раза (см. табл. 54).

Таблица 61

Условная продуктивность ореолов различных типов в сланцах

Тип месторождения	Условия залегания жил	Условная продуктивность							
		<50	50—100	100—200	200—500	500—1000	1000—2000	2000—3000	>3000
Касситерит-кварцевые жилы	Крутопадающие согласные	Rb				F	Sn, As	Be, Li	Cs, B, W
	Пологопадающие поперечно секущие			Rb	Be	Sn, B	Li	Cs	
Танталоносные пегматиты	Пологопадающие диагонально секущие		Rb	B, Be		Cs	Li		
	Крутопадающие согласные		Be		Sn, Li	Cs	B		
Берилл-колумбитовые пегматиты	Пологопадающие поперечно секущие	Rb	Cs, Be	Li, Sn, B					
Дайки аплитов	Крутопадающие согласные	Li, Cs, Be			B				

Примечание. Условная продуктивность — произведение коэффициента аномальности на мощность ореола (в *м*) в висячем боку свиты жил.

Вероятность встречи аномальных содержаний в ореолах касситерит-кварцевых жил колеблется от 0,7 до 1,0. Закон распределения содержаний элементов в них обычно удовлетворяет логнормальной и нормальной моделям (лучше первой), что, вероятно, объясняется малым объемом геохимических выборок.

Средние арифметические содержания в ореолах касситерит-кварцевых жил и танталоносных пегматитов для лития, бора и олова обычно близки, для цезия и бериллия выше в первых, чем во вторых (для цезия в 1,7—1,8 раза, для бериллия — в 1,6—1,8 раза).

Фтор образует интенсивный ореол мощностью до 400 *м* в сланцах вокруг согласных крутопадающих касситерит-кварцевых жил. Среднее содержание фтора в ореоле равно 0,129% и превосходит среднее фоновое в 2,2 раза, а среднее вокруг танталоносных пегматитов в 2 раза.

Мощность ореола вольфрама вокруг тех же жил достигает 600 *м*, а мышьяка — 300 *м*. Средние содержания в них соответственно равны 13 и 80 *г/т*, что превосходит средние вокруг танталоносных пегматитов соответственно в 3 и 1,4 раза.

Коэффициенты вариации содержаний элементов вокруг касситерит-кварцевых жил колеблются в пределах 70—110% и обычно равны или несколько ниже наблюдаемых вокруг танталоносных пегматитов.

Приведенный фактический материал свидетельствует о том, что по параметрам геохимических ореолов (интенсивность, размеры, продуктивность, набор элементов) рассмотренные объекты располагаются в закономерный ряд, соответствующий их геологическому положению и характеризующий вертикальную зональность геохимического ореола поля редкометальных пегматитов.

Ореолы танталоносных пегматитов по своим параметрам занимают промежуточное место между берилл-колумбитовыми пегматитами (нижняя часть ореола) и высокотемпературными касситерит-кварцевыми жилами (верхняя часть ореола). Это их положение иллюстрируется табл. 61, где в порядке возрастания условных продуктивностей расположены ореолообразующие элементы аплитовых даек, берилл-колумбитовых пегматитов, танталоносных пегматитов, касситерит-кварцевых жил.

При переходе от безрудных пегматитов к берилл-колумбитовым ореолы обогащаются литием, бериллием, оловом, бором и в небольшом количестве цезием и рубидием. Ореолы танталоносных пегматитов еще более обогащаются литием, оловом, бериллием, бором и особенно рубидием и цезием. Ореолы касситерит-кварцевых жил вместе с возросшими продуктивностями этих же элементов (кроме рубидия) заметно обогащаются фтором, вольфрамом, мышьяком, т. е. элементами, характерными уже для гидротермального процесса.

Выявленные закономерности необходимо учитывать при интерпретации геохимических аномалий. Наибольшие трудности могут

возникнуть при разделении аномалий вокруг танталоносных и берилл-колумбитовых пегматитов, так как они близки по элементному составу, хотя и сильно отличаются по мощностям и продуктивностям ореолов. Для этой цели можно использовать литий, цезий и рубидий, содержания которых вокруг этих групп пегматитов отличаются наиболее существенно. Как видно из табл. 62, наиболее контрастные содержания, по вероятностям появления которых можно отличать ореолы двух типов пегматитов, должны быть довольно высоки для лития (300—400 *г/т*, т. е. в 4—6 раз выше среднего фонового), менее высоки для цезия (15—50 *г/т*, т. е. в 2—7 раз выше среднего фонового) и еще менее значительны для рубидия (200—300 *г/т*, т. е. в 1,5—2 раза выше среднего фонового).

Различное поведение редких щелочей в геохимическом ореоле поля редкометальных пегматитов еще резче подчеркивается отношениями их содержаний. Наиболее показательно отношение лития к цезию как элементов, стоящих на противоположных концах ряда щелочных металлов, расположенных в порядке возрастания или убывания их наиболее существенных энергетических характеристик (атомный вес, радиус иона, щелочные свойства).

В табл. 63 приведены отношения средних арифметических содержаний лития к цезию для фона и ореолов. Величины отношений в пределах фона колеблются в основном около 10. Вокруг берилл-колумбитовых и безрудных пегматитов величина отношения обычно возрастает в связи с тем, что литий здесь начинает играть существенную роль, а цезий практически еще не образует ореолов. При переходе на более высокие уровни ореола (танталоносные пегматиты висячих боков полей) наблюдается более резкое возрастание роли цезия, чем лития. Это отражается на величинах отношений, которые здесь колеблются в пределах 4,8—5,7, т. е. примерно в 2—3 раза меньше, чем вокруг берилл-колумбитовых пегматитов. Вокруг касситерит-кварцевых жил величина отношения падает до 2,3 в связи с продолжающимся увеличением роли цезия при одновременной тенденции к снижению роли лития.

Вертикальная зональность изменения отношения лития к цезию позволяет использовать его для разделения аномалий вокруг берилл-колумбитовых и танталоносных пегматитов. Наиболее контрастными значениями отношения для отличия танталоносных пегматитов от берилл-колумбитовых являются 7—10 (см. табл. 62).

Для ореолов пегматитовых полей (в том числе и для танталоносных пегматитов) и касситерит-кварцевых месторождений в отличие от фоновых участков характерно наличие положительных корреляционных зависимостей между основными элементами-индикаторами (табл. 64). Это обстоятельство может быть использовано как дополнительный признак для выделения аномальных площадей при поисках.

Уровень среза ореола по наличию — отсутствию или силе корреляционных связей точно определять нельзя, однако некоторые

Таблица 62

Вероятности появления контрастных содержаний лития, цезия, рубидия и контрастных величин отношений Li/Cs в ореолах берилл-колумбитовых и танталоносных пегматитов и касситерит-кварцевых жил (в %)

Элементы и их отношение	Величина контрастного содержания (в *г/т*) или контрастного отношения	Отношение контрастного содержания к среднему фоновому	Берилл-колумбитовые пегматиты			Танталоносные пегматиты				Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
			Граниты	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
			Полого-падающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Полого-падающие поперечно секущие жилы	Полого-падающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Полого-падающие диагонально секущие жилы	Полого-падающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Li	>200	2,9	36,7	25,1	30,8	56,0	58,3	53,6 **	60,3	
	>300	4,3	8,8	6,1	13,1	28,4	39,4	34,1 **	36,7	
	>400	5,7	1,9	1,6	5,8	14,0	27,4	22,4 **	22,4	
Cs	>15	2,1	32,3 *	16,4 *	40,9 *	77,0	69,5	81,6	77,0	
	>20	2,8	20,6 *	10,0 *	26,1 *	67,7	61,8	70,9	68,8	
	>30	4,2	9,2 *	4,4 *	11,1 *	52,4	50,2	52,0	55,2	
	>40	5,7	4,6 *	2,2 *	5,0 *	41,3	42,1	38,2	44,8	
	>50	7,1	2,4 *	1,3 *	2,5 *	33,0	35,9	28,4	37,1	
Rb	>200	1,3—1,5	5,9 *	Не опр.	14,2 *	72,9	Не опр.	73,2	44,8	
	>300	2—2,3	0,02 *	Не опр.	1,0 *	34,1	Не опр.	46,4	12,9	
Li/Cs	>3		0,04	0,3	0,9	14,2	17,1	15,9	9,0	74,9
	>5		0,85	2,6	6,3	33,4	37,8	42,9	27,4	95,6
	>7		4,0	7,6	16,6	49,2	54,8	64,1	45,6	99,2
	>8		6,8	11,1	23,0	56,0	61,0	71,9	53,6	99,6
	>10		14,2	19,2	35,6	66,6	71,6	82,6	65,9	99,9

* Вероятности оценены в границах ореолов лития.

** Контрастные содержания лития для этого объекта приняты 100, 150 и 200 *г/т*, т. е. в 2 раза ниже, чем на остальных объектах, в связи с тем, что фон лития здесь в 2 раза ниже, чем в других изученных районах.

Таблица 63

Средние арифметические содержания лития и цезия (в г/т) и отношения этих содержаний для фона и ореолов различных типов
(в границах ореолов лития)

Элементы и их отношение	Фон				Безрудные пегматиты и аплиты		Редкометальные пегматиты				Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
	Граниты		Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы	Берилл-колумбитовые		Танталоносные		Осадочные породы
	Удаленные от контактов	Зоконтактовая зона шириной 500 м	Удаленные от контактов	Зоконтактовая зона гранитного массива шириной 500 м	Долотопадающие жилы нерудоносных пегматитов	Крутопадающие согласные жилы апикальных участков интрузивов	Долотопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Долотопадающие полностью секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Крутопадающие согласные жилы
Li	60	72	42	69	97	88	188	159	184	367	293
Cs	6	7,3	4	7	5,4	11	15	10	19	69	126
Li/Cs	10,0	9,9	10,5	9,8	18,0	8,0	12,5	15,9	9,7	5,3	2,3
							258		155		
							54		27		
							4,8		5,7		
							300				
							63				
							4,8				

закономерности в изменении коэффициента корреляции по вертикали все же могут быть использованы как вспомогательные признаки.

В ореолах танталоносных пегматитов во многих случаях наблюдается более тесная связь между литием и бором, литием и оловом, оловом и бором, иногда между литием и рубидием, литием и бериллием, литием и ниобием, бериллием и оловом, оловом и ниобием, чем в ореолах берилл-колумбитовых пегматитов. Эта связь, существенная, как правило, с вероятностью 0,99, является следствием совместного участия перечисленных элементов в интенсивном процессе натро-литиевого метасоматоза с привносом тантала, лития, цезия, рубидия, олова, бериллия. Бор, вытесняемый в результате процесса альбитизации из пегматитовых жил во вмещающие породы, тесно связан в растворах, образующих ореолы, с выше перечисленными элементами.

Показательно в этом отношении изменение силы связи между бором и литием. В пределах фона связи между ними не наблюдается; в ореолах берилл-колумбитовых пегматитов связь, как правило, несущественная, по-видимому, из-за несовпадения во времени периодов образования ореолов бора и лития (основная масса бора здесь связана с образованием незамещенных безрудных пегматитов, а основная масса лития — с начавшимся процессом замещения пегматитов); в ореолах танталоносных пегматитов — связь существенная с вероятностью 90—99%. Вокруг касситерит-кварцевых жил связь опять становится несущественной.

По-другому ведет себя пара рубидий — калий. В пределах фона и вмещающих пород берилл-колумбитовых пегматитов между ними обычно существует тесная корреляционная связь, вызванная геохимическим родством этих элементов. Во вмещающих породах танталоносных пегматитов эта связь ухудшается или становится несущественной в связи с увеличением относительной активности рубидия (по отношению к калию). Рубидий в процессе формирования ореолов вокруг танталоносных пегматитов тесно связан с литием и цезием.

В ореоле касситерит-кварцевых жил редкие щелочи также тесно связаны между собой, а также с бериллием, оловом и фтором. Характерна существенная положительная корреляция между оловом и медью, которая вызвана тем, что оба элемента образуют положительные аномалии вблизи этих жил. В ореолах пегматитов связь между этими металлами не устанавливается, так как они имеют противоположные тенденции накопления вокруг пегматитов. Поведение меди во вмещающих породах пегматитов близко к поведению свинца и цинка, что и подтверждается в большинстве случаев существенной положительной корреляционной связью между ними. В ореолах касситерит-кварцевых жил поведение меди отличается от свинца и цинка, которые практически не образуют ореолов. Вследствие этого связь между ними несущественная, но с характерным отрицательным коэффициентом.

Таблица 64

Коэффициенты линейной корреляции между некоторыми парами элементов в пределах фона (между содержаниями) и ореолов
(между логарифмами содержаний)

Коррелируемые пары элементов	Фон				Редкометальные пегматиты						Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
					колумбитовые		Танталоносные				
	Граниты		Осадочные породы		Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Удаленные от контактов	Эндоконтактовая зона шириной 500 м	Удаленные от гранитов	Экзоконтактовая зона гранитных массивов шириной 500 м	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Литий — цезий	С. Н. $\frac{0,307}{25}$	$99\frac{0,616}{22}$	С. Н. $\frac{0,083}{34}$	С. Н. $\frac{0,160}{41}$	$99\frac{0,849}{14}$	$99\frac{0,598}{26}$	$99\frac{0,713}{36}$	$99\frac{0,798}{29}$	$99\frac{0,734}{23}$	$99\frac{0,792}{55}$	$99\frac{0,888}{16}$
Литий — рубидий	$-99\frac{-0,719}{25}$	С. Н. $\frac{0,156}{24}$	$98\frac{0,404}{36}$	С. Н. $\frac{0,000}{42}$	Не опр.	$99\frac{0,578}{25}$	$99\frac{0,464}{42}$	Не опр.	$99\frac{0,383}{82}$	$99\frac{0,456}{86}$	$99\frac{0,879}{19}$
Рубидий — цезий	С. Н. $\frac{-0,084}{25}$	С. Н. $\frac{0,221}{20}$	$90\frac{0,301}{34}$	$99\frac{0,571}{41}$	Не опр.	$99\frac{0,698}{26}$	$99\frac{0,780}{33}$	Не опр.	$95\frac{0,440}{23}$	$99\frac{0,689}{55}$	$99\frac{0,784}{16}$
Литий — бериллий	С. Н. $\frac{-0,038}{29}$	С. Н. $\frac{-0,007}{25}$	С. Н. $\frac{-0,072}{38}$	С. Н. $\frac{-0,054}{48}$	С. Н. $\frac{0,068}{21}$	С. Н. $\frac{0,000}{29}$	С. Н. $\frac{0,172}{45}$	С. Н. $\frac{0,330}{19}$	$99\frac{0,408}{98}$	С. Н. $\frac{0,117}{122}$	$99\frac{0,649}{19}$
Литий — ниобий	С. Н. $\frac{0,080}{29}$	С. Н. $\frac{0,010}{21}$	С. Н. $\frac{-0,220}{36}$	С. Н. $\frac{-0,150}{30}$	С. Н. $\frac{-0.219}{21}$	С. Н. $\frac{-0,141}{27}$	С. Н. $\frac{0,149}{45}$	С. Н. $\frac{-0,012}{20}$	Не опр.	$99\frac{0,514}{101}$	С. Н. $\frac{0,171}{19}$
Литий — олово	С. Н. $\frac{0,228}{21}$	С. Н. $\frac{-0,089}{25}$	$-95\frac{-0,322}{38}$	С. Н. $\frac{0,181}{48}$	$99\frac{0,614}{21}$	С. Н. $\frac{0,034}{30}$	$99\frac{0,576}{45}$	$99\frac{0,628}{19}$	Не опр.	$99\frac{0,370}{121}$	$99\frac{0,893}{19}$
Литий — бор	С. Н. $\frac{0,036}{27}$	С. Н. $\frac{-0,069}{23}$	С. Н. $\frac{0,056}{36}$	С. Н. $\frac{0,057}{39}$	С. Н. $\frac{-0,173}{21}$	$99\frac{0,469}{30}$	$98\frac{0,387}{42}$	$90\frac{0,380}{19}$	$99\frac{0,487}{66}$	$99\frac{0,380}{122}$	С. Н. $\frac{0,263}{19}$
Литий — фтор	С. Н. $\frac{-0,019}{21}$	С. Н. $\frac{-0,005}{24}$	$99\frac{0,463}{35}$	$98\frac{0,402}{38}$	Не опр.	С. Н. $\frac{0,097}{15}$	С. Н. $\frac{-0,001}{26}$	Не опр.	Не опр.	$99\frac{0,472}{39}$	$99\frac{0,783}{15}$
Рубидий — калий	$99\frac{0,610}{24}$	С. Н. $\frac{0,190}{20}$	$99\frac{0,714}{29}$	$99\frac{0,870}{42}$	Не опр.	$99\frac{0,885}{10}$	С. Н. $\frac{0,069}{39}$	Не опр.	Не опр.	$95\frac{0,276}{67}$	С. Н. $\frac{0,211}{16}$
Олово — ниобий	С. Н. $\frac{-0,248}{21}$	С. Н. $\frac{0,066}{21}$	С. Н. $\frac{0,028}{53}$	$-90\frac{-0,290}{34}$	$95\frac{0,414}{27}$	С. Н. $\frac{0,164}{42}$	$99\frac{0,684}{66}$	С. Н. $\frac{0,034}{39}$	Не опр.	$90\frac{0,203}{72}$	С. Н. $\frac{0,144}{28}$

Коррелируемые пары элементов	Фон				Редко
					Берилл-
	Граниты		Осадочные породы		Граниты
	Удаленные от контактов	Эндоконтактовая зона шириной 500 м	Удаленные от гранитов	Экзоконтактовая зона гранитных массивов шириной 500 м	Пологопадающие жилы
Олово — бериллий	С. Н. $\frac{0,079}{22}$	С. Н. $\frac{0,003}{31}$	С. Н. $\frac{0,075}{59}$	С. Н. $\frac{0,054}{53}$	С. Н. $\frac{0,057}{57}$
Олово — бор	С. Н. $\frac{-0,007}{30}$	С. Н. $\frac{0,137}{29}$	С. Н. $\frac{0,039}{49}$	С. Н. $\frac{-0,028}{44}$	С. Н. $\frac{0,031}{56}$
Олово — медь	С. Н. $\frac{-0,016}{22}$	С. Н. $\frac{-0,156}{31}$	С. Н. $\frac{0,147}{53}$	С. Н. $\frac{0,171}{35}$	С. Н. $\frac{0,011}{56}$
Медь — цинк	С. Н. $\frac{0,133}{39}$	С. Н. $\frac{0,074}{40}$	С. Н. $\frac{-0,055}{53}$	С. Н. $\frac{0,141}{34}$	99 $\frac{0,512}{57}$
Медь — свинец	С. Н. $\frac{-0,056}{39}$	С. Н. $\frac{-0,185}{40}$	С. Н. $\frac{0,032}{52}$	С. Н. $\frac{0,029}{34}$	99 $\frac{0,354}{57}$
Свинец — цинк	С. Н. $\frac{-0,080}{39}$	С. Н. $\frac{-0,008}{40}$	С. Н. $\frac{0,016}{58}$	С. Н. $\frac{0,067}{52}$	99 $\frac{0,514}{57}$

Примечание. В числителе дан коэффициент корреляции, в знаменателе — количество коррелируемых пар; число перед дробью — вероятность наличия связи, %. С. Н. — связь несущественная.

Строение и зональность ореолов танталоносных пегматитов

Продуктивность ореолов элементов-индикаторов танталового оруденения в пегматитах различна. Сравнение условных продуктивностей (произведение коэффициента аномальности на мощность ореола в висячем боку в метрах) показывает, что относительно наиболее продуктивны обычно ореолы лития и цезия, далее следуют бор, олово и бериллий, замыкает ряд рубидий (см. табл. 61).

При поступлении этих основных элементов-индикаторов с замещающими растворами в пределы висячего бока пегматитового поля происходит различное распределение их массы между жилами и ореолами. Показательным в этом отношении является приблизительный расчет соотношения продуктивностей жил и ореолов по разным

Продолжение табл. 64

Коррелируемые пары элементов	Метальные пегматиты						Гидротермальные месторождения касситерит-кварцевой формации
	колумбитовые		Танталоносные				
	Осадочные породы		Граниты	Осадочные породы			Осадочные породы
	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Пологопадающие жилы	Крутопадающие согласные жилы	Пологопадающие диагонально секущие жилы	Пологопадающие поперечно секущие жилы	Крутопадающие согласные жилы
Олово — бериллий	99 $\frac{0,575}{27}$	С. Н. $\frac{0,069}{27}$	С. Н. $\frac{0,064}{58}$	99 $\frac{0,595}{39}$	Не опр.	99 $\frac{0,269}{98}$	99 $\frac{0,670}{28}$
Олово — бор	С. Н. $\frac{0,101}{27}$	С. Н $\frac{0,196}{30}$	98 $\frac{0,332}{55}$	99 $\frac{0,723}{39}$	Не опр.	99 $\frac{0,287}{95}$	98 $\frac{0,438}{29}$
Олово — медь	С. Н. $\frac{0,125}{27}$	С. Н. $\frac{0,152}{85}$	С. Н. $\frac{0,000}{58}$	С. Н. $\frac{0,073}{39}$	Не опр.	С. Н. $\frac{-0,024}{94}$	95 $\frac{0,405}{29}$
Медь — цинк	С. Н. $\frac{0,113}{27}$	99 $\frac{0,317}{89}$	95 $\frac{0,272}{58}$	С. Н. $\frac{0,213}{39}$	Не опр.	99 $\frac{0,289}{95}$	С. Н. $\frac{-0,302}{29}$
Медь — свинец	С. Н. $\frac{0,310}{27}$	98 $\frac{0,261}{89}$	90 $\frac{0,219}{58}$	С. Н. $\frac{0,089}{39}$	Не опр.	С. Н. $\frac{0,105}{95}$	С. Н. $\frac{-0,184}{29}$
Свинец — цинк	С. Н. $\frac{0,288}{27}$	99 $\frac{0,481}{89}$	99 $\frac{0,361}{58}$	90 $\frac{0,305}{39}$	Не опр.	99 $\frac{0,452}{96}$	90 $\frac{0,339}{29}$

элементам на примере одного из танталовых месторождений (табл. 65). Расчет сделан для ореолов, развитых только в висячем боку свиты пологопадающих танталоносных пегматитов. Суммарная мощность жил, к которым могут быть отнесены эти ореолы, принята 20 *м*.

Как видно из этих ориентировочных данных, бо́льшая часть бериллия и олова сосредоточена в пегматитах, а цезия, лития и бора — в ореолах. Иными словами, в ходе метасоматоза основная масса бериллия и олова концентрируется в пегматитах, а редкие щелочи в значительной степени расходуются на образование ореолов (цезий и литий в большей степени, чем рубидий).

Все количество бора в ореолах вполне может быть объяснено выносом его из шерл-микроклиновых пегматитов при их альбитизации (среднее содержание шерла в них до интенсивной альбитизации принято 5—10%).

Таблица 65

Сравнение средних содержаний и продуктивностей танталоносных пегматитов и их эндогенных геохимических ореолов

Элемент	Ориентировочные параметры танталоносных пегматитов			Параметры ореолов танталоносных пегматитов в сланцах					Отношение	
	Мощность, *м*	Среднее содержание, *г/т*	Продуктивность	Примерная мощность, *м*	Среднее содержание в ореоле, *г/т*	Среднее фоновое содержание, *г/т*	Разница между средним содержанием в ореоле и средним фоновым	Продуктивность ореола (мощность × × разницу содержаний)	средних содержаний в танталоносных пегматитах к разнице содержаний	продуктивностей
Li	20	1600	32 000	300	300	69	231	69 300	6,9	0,46
Cs	20	200	4 000	200	73	7	66	13 200	3,0	0,30
Rb	20	1000	20 000	70	209	130	79	5 530	12,7	3,6
Be	20	200	4 000	110	5,4	2,2	3,2	352	62,5	11,4
Sn	20	500	10 000	150	20,4	3,4	17,0	2 550	29,4	3,9
B	20	300	6 000	150	182	47	135	20 250	2,2	0,30

Примечание. Для определения среднего содержания бора количество турмалина в интенсивно альбитизированном пегматите условно принято равным 1%.

Отношение средних содержаний в пегматитах к средним содержаниям в ореолах (см. табл. 65) свидетельствует о меньшей разнице в концентрациях между ними для редких щелочей (особенно для цезия) и бора, чем для олова и бериллия, что также свидетельствует о большей миграционной способности (подвижности) первых.

Средние содержания лития и цезия в танталоносных пегматитах относятся примерно как 8 : 1, в ореолах это отношение для привнесенных элементов уменьшается до 3,5 : 1, т. е. во вмещающих породах наблюдается относительное обогащение цезием.

Еще более резкая разница в средних содержаниях устанавливается между цезием и бериллием. Содержания их в пегматитах примерно равны, в ореолах же привнесенного цезия в 20 раз больше, чем привнесенного бериллия. То же можно сказать и об олове. В пегматитах олова в 2,5 раза больше, чем цезия, в ореолах же обратное соотношение — цезия больше, чем олова.

Бериллий, олово, а также тантал при резком изменении щелочности минерализующих растворов, происходящем при смене натрия на калий (при альбитизации микроклина пегматитов), в основной массе выпадают в твердую фазу в жилах. Редкие щелочи реагируют на изменение щелочности растворов изменением относительной активности, что выражается в закономерной эволюции отношения крайних членов ряда сильных оснований — лития и цезия при переходе из центральных зон метасоматических образований, представленных пегматитами, в боковые зоны измененных вмещающих пород, формировавшиеся в условиях более высокой щелочности растворов.

Все вышеприведенные факты свидетельствуют о первостепенной роли цезия и лития (и особенно первого) в образовании геохимических ореолов танталоносных пегматитов.

Для изучения вертикального разреза геохимического ореола над свитой пологозалегающих поперечно секущих танталоносных пегматитов ореол был расчленен на пять зон шириной по 50 *м*. Выборки по зонам комплектовались из проб, отобранных над тремя свитами пегматитов в сланцах и над двумя свитами — в гранитах. В выборки вошли и неаномальные пробы, так как размер ореолов в отдельных профилях и над разными свитами не является постоянным.

На рис. 10—11 показано изменение средних арифметических содержаний элементов-индикаторов по зонам. Эти содержания в большинстве случаев увеличиваются по мере приближения к свите пегматитов.

Для нас представляет интерес, на каком расстоянии по вертикали от свиты танталоносных пегматитов можно отличить по концентрациям элементов-индикаторов аномалию, связанную с этими пегматитами, от аномалии, связанной с берилл-колумбитовыми пегматитами. Как видно из табл. 66, где представлены средние содержания элементов по зонам над танталоносными пегматитами и средние содержания в зоне 0—50 *м* над берилл-колумбитовыми пегматитами, разница в средних становится существенной для цезия уже в зоне 50—100 *м*, для лития и рубидия — в зоне 0—50 *м*. В гранитах в отличие

от сланцев наблюдается также существенная разница в средних содержаниях для бора уже в зоне 50—100 *м*. Средние содержания остальных элементов-индикаторов во всех зонах ореола танталоносных пегматитов, а цезия, лития и рубидия в более удаленных зонах не отличаются резко от наблюдаемых средних над берилл-колумбитовыми пегматитами в зоне 0—50 *м*.

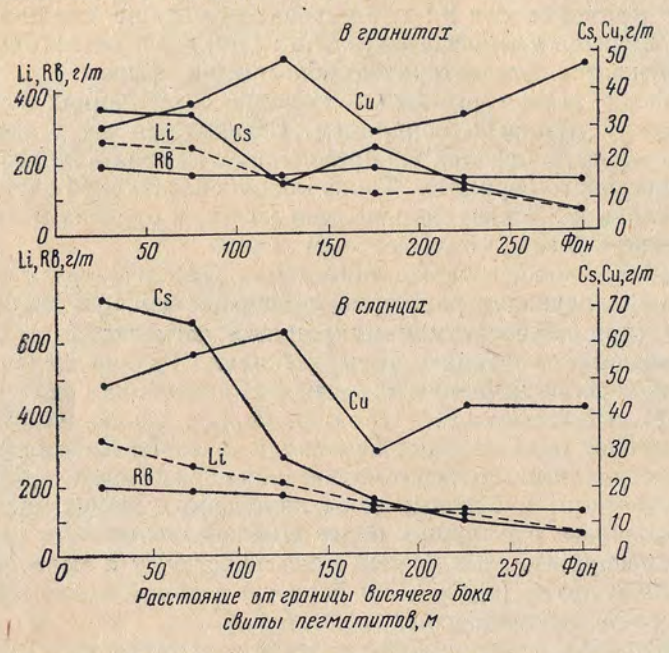


Рис. 10. Средние арифметические содержания лития, рубидия, цезия и меди во вмещающих породах на разном расстоянии от висячего бока свиты пологопадающих поперечно секущих танталоносных пегматитов

Наряду с разбраковкой аномалий по средним содержаниям целесообразно использовать вероятности появления контрастных содержаний цезия, лития и рубидия (табл. 67). Как и по средним содержаниям, наиболее резкие отличия характерны в основном для зоны 0—50 *м* и реже 50—100 *м* (цезий, иногда рубидий).

Приведенные в табл. 66 и 67 данные о распределении по зонам индикаторного отношения лития к цезию свидетельствуют о целесообразности использования его для разбраковки аномалий двух типов пегматитов. Так, например, вероятность появления величин отношений менее 8 на расстоянии до 250 *м* над танталоносными пегматитами существенно не меняется по мере удаления от свиты и составляет около 50—60%, в то время как над берилл-колумбитовыми пегматитами эта вероятность равна 7—23%. Вероятность появления величины отношения менее 10 в первом случае равна 60—70%, во

втором — менее 50% (14—35%). Разница в величинах отношений показана на рис. 12

Рассмотрение изменений средних содержаний щелочных элементов-индикаторов по зонам над танталоносными пегматитами

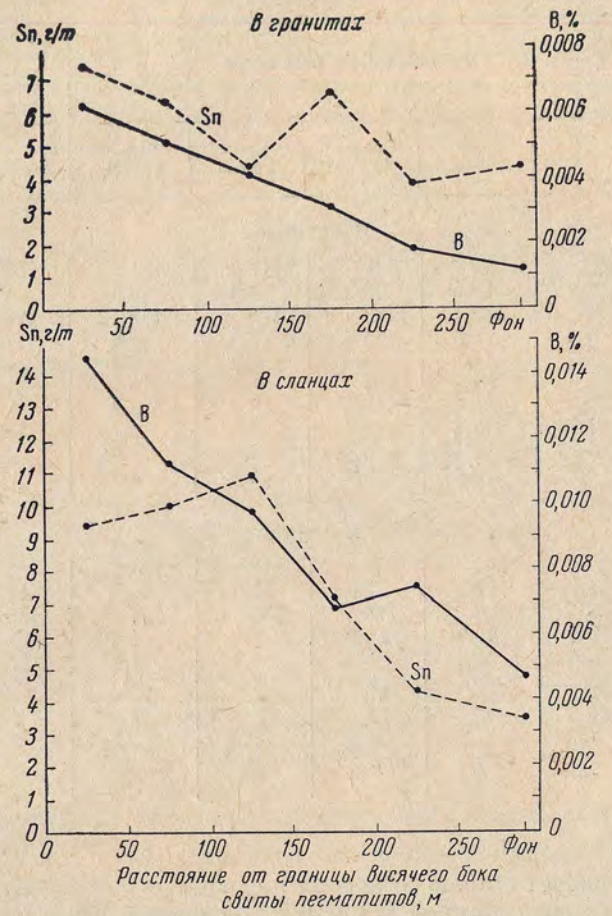


Рис. 11. Средние арифметические содержания олова и бора во вмещающих породах на разном расстоянии от висячего бока свиты пологопадающих поперечно секущих танталоносных пегматитов

(см. рис. 10) позволяет сделать еще некоторые выводы. В гранитах и сланцах градиент концентрации цезия выше, чем лития. Это обстоятельство при учете примерно одинаковых градиентов содержаний этих элементов между жилами и фоном (см. табл. 65 и 66), а также сравнительно низких фоновых концентраций объясняет наблюдающийся несколько больший размер ореолов лития, чем цезия. Рубидий

Таблица 66

Средние арифметические содержания (в *г/т*) элементов-индикаторов и их отношения на разном расстоянии от висячего бока свит пологопадающих поперечно секущих танталоносных и берилл-колумбитовых пегматитов

Элементы и их отношения	Танталоносные пегматиты					Берилл-колумбитовые пегматиты	Фон
	0—50 *м*	50—100 *м*	100—150 *м*	150—200 *м*	200—250 *м*	0—50 *м*	
В гранитах							
Li	253	242	143	117	131	188	72
Cs	34,9	33,5	14,0	24,2	13,5	15	7,3
Rb	190	168	167	186	149	150	154
Sn	7,4	6,3	4,3	6,6	3,8	4,0	4,3
Be	4,2	4,8	5,2	4,8	3,5	4,1	4,0
B	62	51	41	31	18	27	11
Cu	29,2	35,6	48,3	28	32,9		47
Li/Cs	7,25	7,2	10,2	4,8	9,7	12,5	10,0
Li/Rb	1,33	1,44	0,86	0,63	0,88		0,47
Li/Cu	8,7	6,8	3,0	4,2	4,0		1,54
В сланцах							
Li	329	262	205	149	123	184	69
Cs	72,1	66,4	27,6	15,6	10,5	19,0	7,0
Rb	199	187	176	134	132	149	136
Sn	9,4	10,0	10,9	7,1	4,3	7,9	3,4
Be	3,4	3,3	3,0	4,0	4,0	3,2	2,2
B	145	113	98	68	75	94	47
Cu	47	56	62	29	42		42
Li/Cs	4,6	3,9	7,4	9,5	11,7	9,7	9,8
Li/Rb	1,65	1,4	1,16	1,11	0,93		0,53
Li/Cu	7,0	4,7	3,3	5,1	3,0		1,64

с наиболее низким градиентом концентрации в ореолах тем не менее не образует широкого ореола в связи с его сравнительно высоким фоновым содержанием и низким градиентом содержаний между фоном и жилами. Отношение средних содержаний рубидия в жилах и фоновых сланцах около 8, этот же показатель для лития равен 23, для цезия — 29.

Градиент концентрации щелочных металлов в сланцах несколько выше, чем в гранитах (см. рис. 10, табл. 65). Несмотря на это, ореолы редких щелочей в гранитах несколько меньше в связи с более резким падением концентраций при переходе от жил к ореолам в гранитах, чем в сланцах, а также в некоторых случаях из-за более высокого фона гранитов (рубидий). Более резкое падение концентраций при переходе от жил к ореолам в гранитах вызвано главным образом меньшей проницаемостью для ореолообразующих растворов относи-

Таблица 67

Вероятности появления контрастных содержаний лития, цезия, рубидия и контрастных отношений Li/Cs на разном расстоянии от висячего бока свит пологопадающих поперечно секущих танталоносных и берилл-колумбитовых пегматитов

(в %)

Величина контрастного содержания, *г/т*	Ореол берилл-колумбитовых пегматитов, *м*		Ореол танталоносных пегматитов, *м*					
	в гранитах	в сланцах	в гранитах			в сланцах		
	0—50	0—50	0—50	50—100	100—250	0—50	50—100	100—250
Литий								
>200	36,7	30,8	57,1	44,0	12,9	62,2	43,6	28,1
>300	8,8	13,1	28,1	29,8	2,4	41,3	26,8	10,0
>400	1,9	5,8	13,1	21,2	0,5	27,4	17,4	3,8
Цезий								
>15	32,3	40,9	74,2	62,6	47,2	80,2	51,6	55,2
>20	20,6	26,1	60,3	52,0	28,1	72,2	35,2	43,6
>30	9,2	11,1	38,6	37,8	9,7	59,1	16,4	28,1
>40	4,6	5,0	24,8	28,1	3,5	48,8	8,1	19,2
>50	2,4	2,5	16,4	21,8	1,4	40,5	4,2	13,6
Рубидий								
>200	5,9	14,2	35,9	20,0	17,1	37,1	31,2	21,5
>300	0,02	1,0	3,2	0,6	0,1	10,2	9,7	3,4
Li/Cs								
<3	0,04	0,9	8,5	10,6	19,2	13,6	5,8	6,6
<5	0,85	6,3	24,8	29,1	39,4	34,5	22,4	22,4
<7	4,0	16,6	40,9	46,4	55,2	52,8	40,9	39,7
<8	6,8	23,0	48,0	54,0	61,0	59,9	49,6	47,6
<10	14,2	35,6	59,9	65,9	70,9	71,2	63,3	60,3

тельно монолитных изверженных пород по сравнению со слоистыми осадочными, а также, вероятно, более интенсивным поглощением

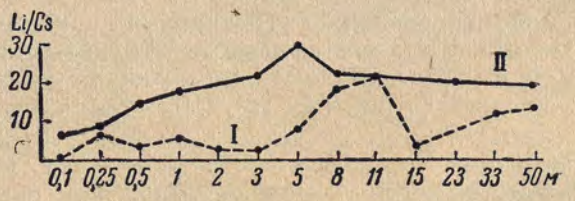


Рис. 12. Отношения лития к цезию в пробах вмещающих гранитов, отобранных на одинаковых расстояниях от висячих боков танталоносной (I) и берилл-колумбитовой (II) пологопадающих пегматитовых жил

калиевыми полевыми шпатами гранитов редких щелочей (особенно рубидия) на первых метрах ореолов, где значительная роль принадлежит диффузии. Свидетельством этого могут служить отношения привнесенных количеств металлов в пробах, отобранных в гранитах

и сланцах непосредственно на контакте с жилами и на расстоянии 0,5 *м* от них. В гранитах это отношение в 3 раза выше для рубидия и в 1,3 раза выше для лития. Таким образом, растворы, преодолевшие барьер первых метров вмещающих пород, в гранитах оказываются менее концентрированными, чем в сланцах.

Более резкое падение по мере удаления от жил концентраций редких щелочей в ореолах в сланцах по сравнению с гранитами (рис. 10) связано, вероятно, с более высокими концентрациями этих элементов в ореолообразующих растворах в сланцах и с интенсивной трещиноватостью последних.

Ореол бора в гранитах шире, чем в сланцах, что объясняется значительно меньшей величиной фона бора в гранитах, чем в сланцах (примерно в 4 раза).

При рассмотрении графиков (см. рис. 10—11) видно, что элементам с относительно более высокими концентрациями (цезий, бор) в любой породе присущи и более высокие градиенты падения концентраций. Это становится понятным, если иметь в виду, что элементы, содержащиеся в растворе в бо́льших количествах, при прочих равных условиях более интенсивно реагируют с вмещающими породами на начальных этапах миграции растворов, выпадая в твердую фазу. Отсюда градиент падения концентраций у цезия и бора, например, выше, чем у лития и рубидия, а у лития выше, чем у рубидия. В ходе дальнейшего продвижения растворов относительные концентрации элементов в них выравниваются и градиенты падения концентраций становятся близкими. Графики, начиная с 150—200 *м*, для большинства элементов почти параллельны.

Закономерное поведение щелочных элементов в ореолах танталоносных пегматитов позволяет использовать их отношения для определения глубины залегания рудных тел, удобнее пользоваться отношением лития к рубидию. Вблизи рудных тел (рис. 13 и табл. 66) литий преобладает над рубидием, а вдали от рудных тел и в пределах фона — рубидий над литием. Пересечение линий лития и рубидия происходит примерно на расстоянии 100—200 *м* от висячего бока свиты танталоносных пегматитов.

Для определения глубины залегания танталоносного пегматита можно использовать также отношение лития к меди, как элементов с противоположными тенденциями концентрации вблизи пегматитов. Медь, как это уже отмечалось, вблизи пегматитов образует отрицательные аномалии, которые в сторону удаления от жил сменяются положительными (рис. 14). Содержания лития по мере приближения к пегматитам увеличиваются, в связи с чем в этом направлении резко возрастает отношение лития к меди (см. табл. 66 и рис. 13). Если в пределах фона величина отношения средних содержаний лития к меди равна примерно 1,5, то в зоне 0—50 *м* от висячего бока свиты пегматитов она возрастает до 7—9. Подобное закономерное изменение величины этого отношения по мере удаления от свит наблюдается и на других изученных объектах как вкрест, так и по простиранию рудных тел.

Зональность ореолов танталоносных пегматитов кроме характерного распределения величин отношений некоторых пар элементов определяется размерами ореолов отдельных элементов. Несмотря на значительные колебания размеров, на изученных типах месторождений удалось наметить грубую зональность.

Наиболее мощные ореолы в сланцах в висячих боках свит поперечно секущих пологозалегающих пегматитов образует литий (мощность более 300 *м*), далее следует цезий (200—250 *м*), бор и олово (150—200 *м*), бериллий (100—150 *м*), рубидий (до 50—100 *м*).

В гранитах ореолы этого типа жил менее мощные, но последовательность элементов примерно сохраняется (литий 200—300 *м*, бор до 200 *м*, цезий 100—200 *м*, олово 100—150 *м*, бериллий до 100 *м*, рубидий 20—50 *м*).

Ореолы согласных крутопадающих жил в сланцах вместе с меньшей мощностью имеют и менее значительные отличия в размерах для разных элементов. Бор, литий и цезий имеют мощность аномалий до 50—150 *м*, олово 50—100 *м*, бериллий до 50 *м*.

Наметившаяся последовательность элементов сохраняется в ореолах и по простиранию свит согласных крутопадающих пегматитов: литий — более 500 *м*, цезий и бор около 500 *м*, олово около 400 *м*, бериллий до 300 *м*.

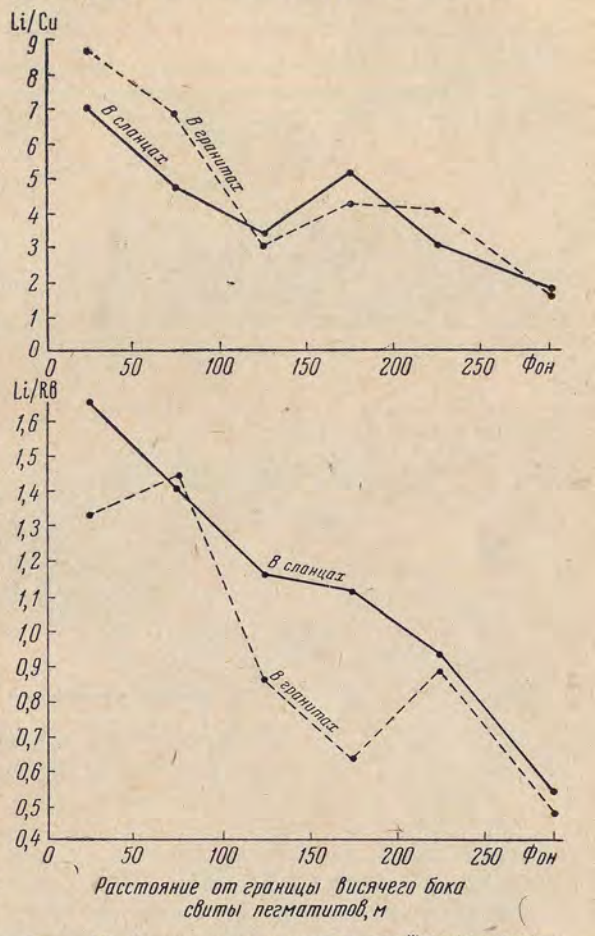


Рис. 13. Отношения средних арифметических содержаний лития к рубидию и лития к меди во вмещающих породах на разном расстоянии от висячего бока свиты пологопадающих поперечно секущих танталоносных пегматитов

Своеобразная зональность в ореолах пегматитов наблюдается в распределении концентраций меди (см. рис. 14) и в меньшей степени других халькофильных элементов (цинк и свинец). Вокруг пегматитовых свит образуются отрицательные аномалии (мощность

от 30 до 150 *м*), окруженные положительными аномалиями (мощность от 20 до 100 *м* и более).

Поведение элементов-индикаторов танталового оруденения во вмещающих породах в висячих и лежачих боках пегматитовых тел

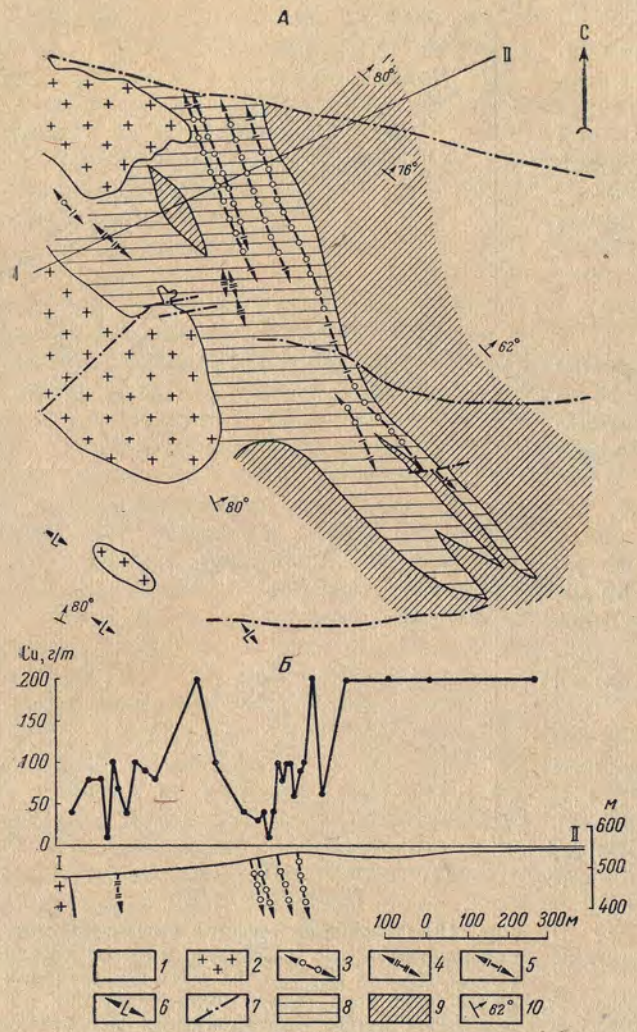


Рис. 14. Эндогенные геохимические ореолы меди вокруг свиты крутопадающих согласных редкометальных пегматитов (*А*) и график распределения меди по профилю I—II (*Б*)

1 — сланцы; *2* — граниты; *3—5* — интенсивно замещенные пегматиты: *3* — сподумен-альбитовые с интенсивной неравномерной альбитизацией, *4* — сподумен-альбитовые с интенсивной альбитизацией и с участками нацело альбитизированного пегматита, *5* — мусковит-альбитовые с интенсивной неравномерной альбитизацией; *6* — слабо замещенные мусковит-микроклиновые пегматиты; *7* — тектонические нарушения; *8* — отрицательная аномалия; *9* — положительная аномалия; *10* — элементы залегания напластования сланцев

различно, что особенно наглядно выражено у пологозалегающих тел. В висячих боках образуются более мощные и интенсивные ореолы, чем в лежачих. Иллюстрацией различий в средних содержаниях могут служить анализы проб, отобранных в двух квершлагах, пересекающих вмещающие ороговикованные сланцы в висячем и лежачем боку танталоносной жилы (табл. 68). Содержания лития, бериллия,

ниобия, олова, бора в висячем боку выше в 1,3—2,3 раза, чем в лежачем, а меди и свинца, наоборот, в лежачем выше в 1,3—3,2 раза, чем в висячем. Эти данные свидетельствуют о том, что в висячем боку рудных тел процессы ореолообразования, характерные для танталоносных пегматитов, проявляются более отчетливо.

Таблица 68

Средние содержания некоторых элементов в ороговикованных сланцах висячего и лежачего бока пологопадающего поперечно секущего танталоносного пегматита

(в *г/т*)

Место взятия пробы	Истинное расстояние от жилы, *м*	Количество проб	Li	Be	Nb	B	Sn	Cu	Pb
Квершлаг в висячем боку	0,5—20	6	203	10,2	52	28	7,2	40	35
Квершлаг в лежачем боку	0,5—20	6	160	4,5	30	21	4,8	53	113
Отношение средних содержаний			1,3	2,3	1,7	1,3	1,5	0,8	0,3

Поведение элементов-индикаторов на участке выклинивания пологопадающих поперечно секущих танталоносных жил («корни» ореолов) по данным опробования двух скважин в гранитах и сланцах, оконтуривающих свиту пегматитов по падению и отстоящих от места выклинивания жил на 100—200 *м*, отличается следующими чертами.

Установлено, что в гранитах на расстоянии примерно 200 *м* по падению от выклинивания танталоносных жил (рис. 15) наблюдаются лишь слабые аномальные концентрации бериллия и олова, в среднем в 1,2—1,5 раза превосходящие фоновые. В сланцах на расстоянии примерно 100—150 *м* по падению от места выклинивания жил (рис. 16) наряду с аномальными концентрациями бериллия (в среднем в 2 раза превосходящих фоновую концентрацию) и единичными аномальными пробами олова наблюдаются и слабые аномалии цезия и лития. Средняя концентрация цезия в «корневых» частях ореола превосходит среднее фоновое содержание в 1,8 раза, лития — в 1,2 раза. Ореолы рубидия и бора не фиксируются.

Важной особенностью «корневых» частей ореолов наряду с более высокой ролью бериллия и олова по отношению к редким щелочам является также характерное для танталоносных пегматитов пониженное отношение лития к цезию даже при отсутствии аномальных концентраций этих элементов. Пониженные величины отношений (в среднем около 6) приурочены к местам пересечения скважинами «корней» ореолов (см. рис. 15—16).

Важными признаками, свидетельствующими об удаленности скважин от жил, являются величины отношений лития к рубидию и лития к меди. Отношение лития к рубидию в обоих случаях меньше 1, следовательно, скважины удалены от жил на расстояние более 100 *м*, но в скважине, расположенной ближе к жилам, отношение выше, чем в более удаленной скважине (0,85 против 0,38). Также закономерно меняется и отношение лития к меди. В более далекой скважине

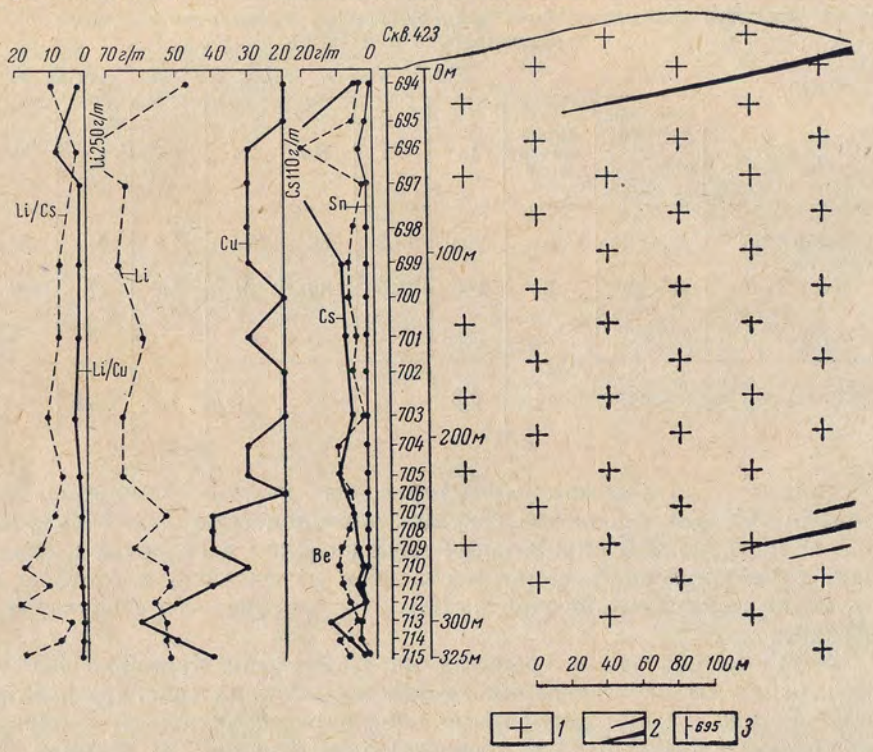


Рис. 15. Распределение элементов-индикаторов и их отношений по скважине, пробуренной в гранитах на участке выклинивания пологопадающих танталоносных жил по падению

1 — биотитовый гранит; *2* — жилы пегматитов; *3* — номер пробы

в месте пересечения ореола оно в среднем равно 1,25, а в более близкой — 3,5. Характерно, что в более близкой скважине в ореоле наблюдается некоторое понижение содержаний меди, а в более удаленной — повышение.

Поведение элементов-индикаторов на участке выклинивания пологопадающих поперечно секущих танталоносных жил по восстанию (верхняя часть ореола) было изучено в одном поперечном профиле через III свиту (см. рис. 8). Здесь в жилах наблюдается смена по восстанию интенсивно замещенных танталоносных разновидностей пегматита, подсеченных на глубине, слабо замещенными берилл-колум-

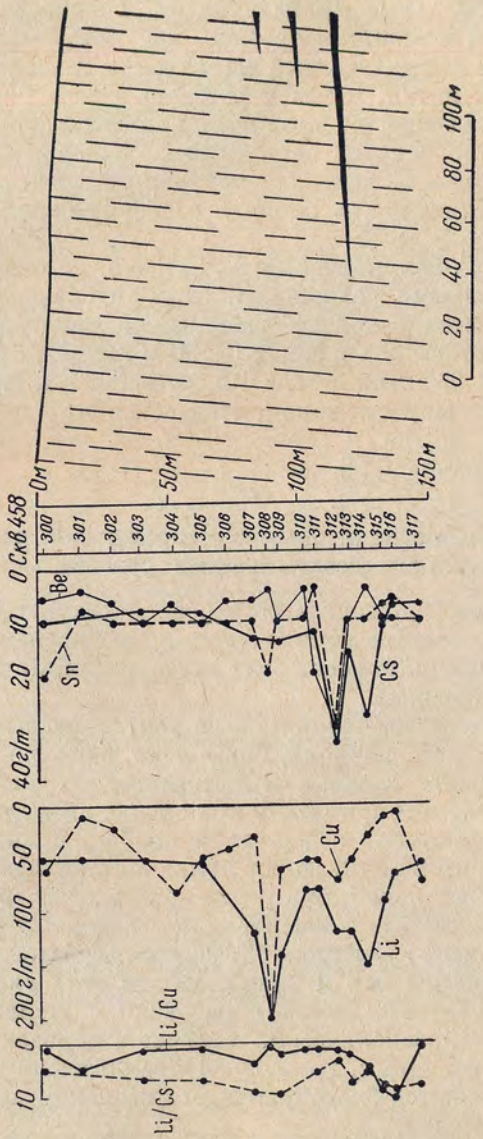


Рис. 16. Распределение элементов-индикаторов и их отношений по скважине, пробуренной в ороговикованных сланцах на участке выклинивания поперечно секущих пологопадающих танталоносных жил по падению

1 — ороговикованные сланцы; *2* — жилы пегматитов; *3* — номер пробы

битовыми, которые обнажаются на поверхности. Эти последние и пересекаются профилем. Выводы делаются по 9—18 анализам проб, отобранных в сланцах не далее чем в 50 *м* от жил по вертикали.

Вокруг жил наблюдаются ореолы лития, цезия, бериллия, олова, бора и единичные аномальные пробы рубидия. Мощности ореолов, как правило, близки к мощностям ореолов над берилл-колумбитовыми пегматитами, не сменяющимися на глубине танталоносными. Средние концентрации лития, цезия и рубидия в зоне 0—50 *м* над этими пегматитами сравнимы со средними концентрациями в зоне 50—150 *м* над танталоносными пегматитами. Содержания олова, бериллия и бора высоки и не уступают внутренней зоне ореолов над танталоносными пегматитами (по олову и особенно бериллию даже превосходят).

В отличие от берилл-колумбитовых пегматитов, не сменяющихся с глубиной танталоносными разностями, здесь наблюдаются более высокие содержания всех основных элементов-индикаторов. Отношение средних арифметических в зонах 0—50 *м* для бериллия равно 2,7, олова 1,8, цезия 1,6, лития и бора 1,5, рубидия 1,1. Характерно повышение частот встречаемости вокруг этих пегматитов проб с пониженным отношением лития к цезию. Частость встречи величин отношений менее 10 равна 0,56, менее 7—8 — 0,44.

Критерии поисков пегматитовых месторождений тантала по эндогенным геохимическим ореолам

Резюмируя все вышеизложенное об особенностях геохимических ореолов пегматитовых месторождений тантала, можно наметить следующие основные критерии поисков этих месторождений по эндогенным геохимическим ореолам.

1. Основными элементами-индикаторами танталоносных пегматитов являются литий, цезий, рубидий, бор, олово, бериллий. Эти элементы образуют наиболее мощные и интенсивные ореолы вокруг рудных тел. Благоприятным признаком при оценке аномалий является наличие в них аномальных содержаний ниобия, свинца, калия.

Большинство элементов-индикаторов являются примесями во вмещающих породах рудных полей, они почти не образуют собственных минералов и их повышенные концентрации устанавливаются с помощью анализов. К числу элементов, образующих собственные минералы в ореолах, относятся бор и калий. Вынос этих элементов во вмещающие породы сопровождается образованием шерла и слюд, которые отмечаются макроскопически. Наличие в породах аномалий шерла и мусковитизированных, грейзенизированных или биотитизированных участков является благоприятным признаком при поисках танталоносных пегматитов.

2. Закономерное положение танталоносных пегматитов и их ореолов в сложных пегматитовых полях, которое иллюстрируется нижеприведенной схемой, должно использоваться при интерпретации аномалий.

Главные ореолообразующие элементы сложного поля редкометальных пегматитов

Аплиты и безрудные пегматиты: бор.

Берилл-колумбитовые пегматиты: бор, литий, олово, бериллий.

Танталоносные пегматиты: бор, литий, олово, бериллий, цезий, рубидий.

Касситерит-кварцевые жилы: бор, литий, олово, бериллий, цезий, вольфрам, мышьяк, фтор.

Основным отличием ореолов танталоносных пегматитов от берилл-колумбитовых, кроме мощностей, является наличие аномалий цезия и рубидия и повышенные концентрации лития. При отбраковке аномалий должны использоваться отношения лития к цезию, пониженные величины которых характерны для ореолов танталоносных пегматитов. Глубинность метода поисков, определяемая возможностью отличия аномалий двух типов по вероятностям появления повышенных содержаний цезия, равна 100—200 *м*, а по вероятностям появления пониженных величин отношений лития к цезию — до 250 *м*.

Ореолам высокотемпературных касситерит-кварцевых жил в отличие от ореолов танталоносных пегматитов свойственны высокие содержания фтора, мышьяка, вольфрама.

3. Характерной чертой ореолов танталоносных пегматитов в отличие от фоновых участков является наличие существенных корреляционных связей между основными элементами-индикаторами, а также между халькофильными элементами — медью, свинцом и цинком.

Отличительной чертой ореолов берилл-колумбитовых пегматитов по сравнению с ореолами танталоносных пегматитов является ухудшение в ряде случаев корреляционных связей между некоторыми элементами-индикаторами. Это относится, в первую очередь, к парам литий — бор, бор — олово, литий — олово. Корреляция между рубидием и калием, наоборот, более тесная в ореолах берилл-колумбитовых пегматитов.

Для ореолов касситерит-кварцевых жил в отличие от танталоносных пегматитов характерна существенная корреляционная связь между оловом и медью и отсутствие существенной связи для пар медь — цинк и медь — свинец.

4. Зональность ореолов танталоносных пегматитов, роль которой при поисках очевидна, определяется размерами ореолов отдельных элементов-индикаторов и размещением в них концентраций этих элементов, которые растут по мере приближения к рудным телам. Разный градиент возрастания концентраций приводит к характерным сдвигам величин отношений таких элементов, как литий, рубидий и цезий. Использование этих отношений (например, лития к рубидию) позволяет судить о глубине залегания рудных тел.

Для этой же цели можно использовать и сами концентрации некоторых элементов, указывающих на зональность. Так, рубидий образует контрастные положительные аномалии во внутренних

зонах комплексных ореолов, а медь вблизи пегматитов дает отрицательные аномалии. Хорошим показателем зональности является отношение лития к меди, как элементов с противоположными тенденциями концентрации вблизи пегматитов.

ГЛАВА 3

ЭКЗОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА

Присутствие относительно высоких концентраций тантала и ряда редких элементов-спутников тантала в месторождениях апогранитового и пегматитового типа определяет возможность обогащения этими элементами продуктов гипергенного разрушения как танталовых месторождений, так и их эндогенных геохимических ореолов. Элементами-спутниками тантала (особенно обладающими повышенной миграционной способностью) могут быть обогащены также растения, произрастающие в районе месторождений, и омывающие их поверхностные и подземные воды. Эти факторы являются предпосылкой для использования экзогенных ореолов рассеяния месторождений тантала для поисков месторождений, перекрытых рыхлыми отложениями.

Вторичные (экзогенные) литогеохимические ореолы рассеяния месторождений тантала

Характеристика экзогенных литогеохимических ореолов месторождений тантала дается на примере известных месторождений и рудопроявлений, расположенных в различных физико-географических условиях в пределах горно-таежной, лесостепной и степной зон Забайкалья. Несомненно, что общие закономерности в поведении тантала и элементов-индикаторов его оруденения в почвах, определяющие методику поисков его месторождений, выявленные для данной территории, могут распространяться также и на другие аналогичные или близкие по природным условиям районы.

Помимо описания вторичных ореолов месторождений тантала, связанных с литионит-амазонит-альбитовыми апогранитами, а также мусковит-альбитовыми и сподумен-альбитовыми пегматитами, с целью сравнения приводится характеристика вторичных ореолов рассеяния, сопровождающих бериллоносные апограниты с кларковыми содержаниями тантала.

Горные мерзлотно-таежные ландшафты

В пределах горных мерзлотно-таежных ландшафтов вторичные ореолы рассеяния месторождений тантала могут быть охарактеризованы на примере двух массивов танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов верхнеюрского возраста, один из которых характеризуется неглубоким эрозионным срезом и высокими содержаниями тантала в эндоконтактовой зоне (массив 1)[1], другой — более глубоким срезом и низкой концентрацией металла (массив 2). Кроме того, в этой же зоне были изучены вторичные ореолы рассеяния, сопровождающие массив бериллоносных апогранитов среднеюрского возраста с кларковыми содержаниями тантала (массив 3).

Массивы апогранитов расположены на высоте 1000—1300 *м*. Рельеф участков, пересеченный: дренирован небольшими ручьями с проточной водой. Долины ручьев и склоны сопок нередко заболочены. Древесная растительность представлена в основном лиственницей с примесью березы и ольхи с рододендроном даурским в подлеске. Наземный покров лесов кустарничковый или мохово-травянистый. Для почв характерно присутствие многолетней мерзлоты. В пределах этой территории, согласно классификации Н. А. Ногиной (1964), выделены следующие основные типы почв: 1) горные мерзлотно-таежные; 2) горные мерзлотные лугово-лесные; 3) горные мерзлотно-болотные.

Преимущественно развиты горные мерзлотно-таежные почвы. Мерзлотные лугово-лесные встречаются спорадически, небольшими пятнами на южных экспозициях гор и по широким долинам, горные мерзлотно-болотные — по долинам рек и на пологих склонах северных экспозиций.

Среди подтипов горных мерзлотно-таежных почв в пределах изученных районов распространены собственно мерзлотно-таежные и дерново-таежные почвы.

Один из типичных разрезов собственно мерзлотно-таежных почв следующий:

Абсолютная высота 1200 *м*, южный склон сопки крутизной в 10°.

A_0 (0—3 *см*) — хвойная подстилка.

AB (3—15 *см*) — буровато-серый легкий пылеватый суглинок зернистой структуры, с обломками аргиллитов до 5—10%, рыхлый, корней много, переход ясный, граница неровная.

B_1 (15—30 *см*) — ярко-бурый ожелезненный средний суглинок, зернистый, с обломками аргиллитов до 20%, рыхлый, влажный, корней много, переход постепенный.

B_2 (30—60 *см*) — желто-бурый средний суглинок зернисто-ореховатый, уплотненный, влажный, с обломками аргиллитов до 40%, корни в среднем количестве, переход ясный, граница неровная.

BC (60—120 *см*) — серовато-бурый легкий суглинок бесструктурный, плотный, сырой, с дресвой и обломками аргиллитов до 70%, переход четкий, граница неровная.

C (120—150 *см*) — элювий темно-серых аргиллитов.

Весь профиль мерзлотно-таежных почв имеет кислую реакцию (pH = 5,2—6,0). Содержание гумуса в почвах достаточно высокое 3—4%, хотя морфологически гумусовый горизонт выражен очень слабо.

Мерзлотные дерново-таежные почвы характеризуются более развитым дерновым и гумусовым горизонтами (20—30 *см*),

[1] Геолого-геохимическую характеристику массива танталоносных апогранитов см. часть I, глава 2, пример 2.

буровато-серыми тонами почвенного профиля, относительно меньшей щебнистостью и ожелезнением, а также менее кислой реакцией почв (pH = 5,6—6,3). Содержание гумуса в этих почвах несколько выше и составляет 4—5%. В ряде разрезов мерзлотных дерново-таежных почв обнаружены следы подзолистого процесса в виде слабого осветления нижней части горизонта *A*. Нижняя часть профиля почв нередко оглеена.

Горные мерзлотно-болотные почвы в пределах исследованных участков представлены поверхностно-оглеенными, перегнойно-глеевыми и торфянисто-глеевыми разностями.

Для мерзлотных поверхностно-оглеенных почв характерно наличие под горизонтом A_1 оглеенного горизонта A_g или AB_g. На глубине 50—80 *см* находится вечная мерзлота, над которой стоит горизонт верховодки. Реакция поверхностно-оглеенных почв кислая (pH = =5,3—6,0).

Примером, характеризующим мерзлотные перегнойно-глеевые почвы, может служить следующий типичный разрез:

Абсолютная высота 1125 *м*, долина ручья.

A_0 (0—5 *см*) — моховая подстилка.

A_1 (5—25 *см*) — темно-серый с буроватым оттенком легкий суглинок с недоразложившимися остатками растительности (грубый гумус), бесструктурный, влажный, рыхлый, переход четкий, граница неровная, корней очень много.

(25—70 *см*) — каменистый слой несцементированных обломков сланцев, песчаников и гранитов, граница неровная.

B_g (70—90 *см*) — темно-серый оглеенный суглинок с бурым оттенком, бесструктурный, плотный, вязкий, с сизыми пятнами и разводами, щебнистый на 50%, сырой.

Мерзлотные торфянисто-глеевые почвы отличаются довольно хорошо развитым торфянистым горизонтом $A_0A_т$ мощностью до 30—40 *см*. Ниже 60—70 *см* как правило, залегает слой несцементированных обломков, в котором нередко циркулирует проточная вода. Реакция торфянисто-глеевых почв по всему профилю равномерно кислая (pH = 5,2—5,9).

Горные мерзлотные лугово-лесные почвы отличаются хорошо развитым темно-серым гумусовым горизонтом мощностью от 15 до 50 *см*, который резко переходит к бурому иллювиальному горизонту; граница перехода — неровная, с затеками. В основном почвы среднесуглинистые; имеют по всему горизонту слабокислую реакцию (pH = 5,9—6,5%). Верхние горизонты содержат большое количество гумуса (8—10%). В профиле иногда встречается морозная чешуйчатость и трещиноватость. Лугово-лесные почвы, развитые по долинам рек, как правило оглеены.

В почвах исследуемых ландшафтов, формирующихся на массивах литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, зарегистрированы в повышенных количествах следующие элементы: тантал, ниобий, литий, рубидий, олово, свинец, галлий и фтор и в зоне экзоконтактовых изменений — бериллий, литий, рубидий, олово, фтор и свинец. Для почв, развивающихся вдали от рудных участков на осадочно-метаморфических породах, биотитовых гранитах, а также на бериллоносных

апогранитах, не затронутых процессами амазонитизации, характерны кларковые содержания перечисленных выше элементов (в последнем случае исключение составляет бериллий).

Оценки параметров распределения элементов-спутников танталового оруденения в почвах в пределах геохимического фона горных мерзлотно-таежных ландшафтов даны в табл. 69. Здесь приводятся данные математической обработки количественных анализов проб по горизонтам *A* и *B*. С целью выявления общих закономерностей распределения рудных элементов по всему почвенному профилю на примере района массива танталоносных апогранитов произведена обработка полуколичественных анализов (по средним значениям интервалов), в результате которой получены средние арифметические содержания элементов по каждому генетическому горизонту почв (табл. 70).

Геохимический фон в почвах, формирующихся за счет осадочно-метаморфических пород в районе распространения танталоносных апогранитов для ниобия, бериллия, лития, рубидия и свинца является повышенным в сравнении с данными А. П. Виноградова (1957) и Х. Е. Хокса (1964), исключение составляет олово. На участке выхода массива апогранитов с кларковыми содержаниями тантала концентрация указанных элементов в почвах в пределах геохимического фона, как правило, в 2—3 раза ниже и соответствует кларковым значениям.

Основной закономерностью поведения элементов-индикаторов танталового оруденения в почвенном профиле таежных ландшафтов является увеличение их содержаний с глубиной. Обычно в пределах фона оно возрастает от горизонта *A* до горизонта *BC* или *C* в 1,5—2 раза (для рубидия — в 1,2—1,3 раза). Эта закономерность наиболее ярко проявлена в горных мерзлотно-таежных почвах. В мерзлотно-луговых и мерзлотных болотно-таежных почвах изменение концентраций элементов по профилю выражено слабо.

Распределение тантала и элементов-индикаторов его оруденения в пределах экзогенных ореолов рассеяния массивов апогранитов

Основная закономерность поведения элементов-спутников в почвенном профиле таежных ландшафтов в пределах аномалий, так же как и в пределах фона, выражается в увеличении их содержаний с глубиной. Однако в пределах аномалий концентрация элементов с глубиной возрастает более резко (в 2—4 раза). В зависимости от типов почв, характер изменений различен для разных элементов. Наиболее четкое возрастание содержаний с глубиной характерно для ниобия, тантала, олова, лития и бериллия; слабее оно проявлено для свинца и рубидия. Эта основная закономерность ярко выражена преимущественно в собственно мерзлотно-таежных и несколько слабее — в мерзлотных дерново-таежных почвах. Причем при наличии хорошо развитой коры выветривания в самых нижних горизонтах

Таблица 69

Оценки параметров распределения элементов-примесей в почвах горных мерзлотно-таежных ландшафтов в пределах геохимического фона

Компоненты	Номер массива	Материнские породы	Горизонт	Количество проб	Среднее арифметическое		Среднее квадратическое отклонение		Коэффициент вариаций содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
					содержаний, г/т	логарифмов содержаний	содержаний, г/т	логарифмов содержаний		
Nb_2O_5	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	15	43 ± 10	—	19	—	44,4	16—99
			B	12	45 ± 8	—	14	—	30,7	23—82
Sn	1	То же	*A*	21	7 ± 2	—	4	—	55,6	2—21
			B	25	8 ± 1	—	3,4	—	42,0	2—21
	2	То же	*A*	17	9 ± 2	—	5	—	52,0	3—25
			B	24	12 ± 3	—	7	—	55,0	3—33
	3	То же	*A*	43	2 ± 1	—	1,3	—	64,0	0,6—8
			B	37	3 ± 0,1	—	1,1	—	37,0	1—10
	3	Биотитовые граниты	*A*	38	4 ± 1	0,515	—	0,346	82.9	0,5—20
			B	40	11 ± 4	0,895	—	0,373	102,0	1—54
Pb	1	Осадочно-метаморфические породы	*B*	19	50 ± 10	—	27	—	53,6	10—120
	3	То же	*A*	47	20 ± 3	1,246	—	0,205	50,0	6—50
			B	41	20 ± 3	1,295	—	0,195	50,0	7—60
	3	Биотитовые граниты	*A*	42	20 ± 3	1,193	—	0,210	48,0	2—42
			B	40	30 ± 6	1,421	—	0,270	64,0	6—112
Be	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	18	7 ± 1	—	3	—	43,7	0,2—14
			B	15	12 ± 3	—	8	—	64,0	6—30
	3	Биотитовые граниты	*B*	13	5 ± 0,7	—	1,3	—	25,0	1—9
Li_2O	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	22	128 ± 24	—	57	—	44,7	42—306
			B	43	157 ± 17	—	56	—	36,0	70—315
	3	То же	*A*	12	74 ± 5	—	9	—	12,4	55—99
			B	12	86 ± 5	—	8	—	9,0	68—107
	3	Биотитовые граниты	*A*	22	113 ± 16	2,035		0,119	33,4	57—206
			B	27	150 ± 19	2,155		0,126	32,7	73—230
Rb_2O	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	27	210 ± 15	—	40		18,9	120—302
			B	44	220 ± 14	—	45		20,5	135—344

Примечание. Для распределений, согласующихся с логнормальным законом, приведены соответствующие оценки параметров распределения логарифмов.

Таблица 70

Среднее содержание элементов (в г/т) по генетическим горизонтам почв, развитых в районе массива апогранитов с высокими содержаниями тантала

(По данным спектральных полуколичественных анализов)

Горизонт	Материнские породы	Ta		Nb		Sn		Be		Li		Rb		Pb	
		Аномалия	Фон	Аномалия	Фон	Аномалия	Фон	Аномалия	Фон	Аномалия	Фон	Аномалия	Фон	Аномалия	Фон
A	Амазонит-альбитовые апограниты	45/42		80/10	—	110/21	—	7/32	—	—	—	—	—	340/47	—
	Сланцы и песчаники	—		—	20/8	50/34	6/49	29/48	10/25	250/27	40/41	—	180/26	—	26/45
B_1	Амазонит-альбитовые апограниты	68/102		120/39	—	163/44	—	14/74	—	330/19	—	600/17	—	410/115	—
	Сланцы и песчаники	—		—	30/51	120/26	8/75	63/67	13/71	500/29	50/103	—	210/42	—	31/77
B_2	Амазонит-альбитовые апограниты	72/98		140/67	—	194/45	—	14/68	—	370/18	—	700/16	—	450/104	—
	Сланцы и песчаники	—		—	30/37	130/24	10/57	83/61	19/51	700/24	65/62	—	210/30	—	37/51
BC	Амазонит-альбитовые апограниты	120/61		170/30	—	450/31	—	17/44	—	600/9	—	960/7	—	570/23	—
	Сланцы и песчаники	—		—	31/30	260/15	12/32	100/31	30/35	1000/3	75/50	—	230/24	—	52/36
C	Амазонит-альбитовые апограниты	140/32		300/13	—	370/13	—	16/21	—	—	—	—	—	570/36	—
	Сланцы и песчаники	—		—	28/12	—	—	—	—	—	90/9	—	180/2	—	—

Примечание. Здесь и далее в числителе дано среднее содержание (в г/т), в знаменателе — количество проанализированных проб.

этих почв наблюдается значительное уменьшение концентрации некоторых элементов (олово, бериллий литий, свинец). Для мерзлотных лугово-лесных и мерзлотно-болотных почв характерно слабое изменение содержания микроэлементов по профилю, при этом наиболее повышенные количества рудных элементов нередко отмечаются в верхних горизонтах (A, AB). Во всех случаях горизонт B является для данных ландшафтов наиболее стабильным, он характеризуется как бы усредненным содержанием по профилю; в нем не отмечается, как правило, ни значительного накопления, ни резкого выщелачивания элементов.

При сопоставлении средних содержаний рудных элементов в коренных породах и почвах по всем генетическим горизонтам установлено, что все элементы по степени их накопления в почвах можно разделить на три группы (табл. 71).

Таблица 71

Элювиально-аккумулятивные коэффициенты по генетическим горизонтам горных мерзлотно-таежных почв в пределах геохимических аномалий

Группа	Элемент	Горизонт			Примечание
		A	B	$BC-C$	
I	Pb	1	1,2	1,4—1,6	Элементы накапливаются по всему профилю
II	Ta	0,7	1	1,4—1,5	Среднее содержание элементов по профилю такое же, как в коренной породе
	Nb	0,7	1	1,2—1,4	
	Sn	0,6	1,1	1—1,2	
III	Rb	0,6	0,8	1,1—1,2	Из профиля происходит вынос элементов
	Li	0,4	0,8	1,0—1,2	
	Be	0,4	0,8	0,9—1,1	

I группа — элементы, накапливающиеся по всему профилю почв — свинец. Элювиально-аккумулятивный коэффициент, характеризующий степень накопления свинца в почвах $\left(K_{эа} = \frac{\text{содержание в почве}}{\text{содержание в породе}}\right)$, выше 1 по всем генетическим горизонтам. Максимального значения (1,5) он достигает в нижней части профиля.

II группа — элементы, содержание которых в целом по профилю почв не отличается от материнских пород, т. е. выноса за пределы профиля или их накопления не происходит. В эту группу можно отнести тантал, ниобий и олово.

III группа — элементы, для которых характерен вынос из почвенного профиля: бериллий, литий, в меньшей степени рубидий. Низкие значения $K_{эа}$ свидетельствуют о подвижности указанных

элементов в исследуемых ландшафтах. Подвижность лития и бериллия в сравнении с другими элементами подтверждается также более широкими ореолами их рассеяния и наличием смещенных аккумулятивных ореолов. В то же время значительная площадь ореолов свинца и олова объясняется величиной эндогенных ореолов этих элементов.

Оконтуривание геохимических аномалий элементов-индикаторов танталового оруденения произведено по минимально-аномальным значениям, определенным с учетом закона распределения как максимальное фоновое содержание с односторонней вероятностью 0,01 (табл. 72). Для тантала за минимально-аномальное значение условно принят предел чувствительности спектрального анализа, равный 0,001% (10 *г/т*), что превышает его содержание в коренных породах примерно в 4—5 раз.

Таблица 72

Минимально-аномальные значения, определенные с вероятностью 0,01 по горизонту *B* горных мерзлотно-таежных ландшафтов (в *г/т*)

Элемент	Материнские породы		
	Осадочно-метаморфические породы (участки массивов 1 и 2)	Биотитовые граниты (участок массива 3)	Кларк по А. П. Виноградову
Nb	60	63	?
Sn	21	54	10
Be	30	9	6
Li	140	110	30
Rb	310	—	60
Pb	120	110	10

В табл. 73 приведены оценки основных параметров, характеризующие распределение этих элементов в почвах в пределах аномалий.

Тантал. Танталоносные амазонитсодержащие альбитовые апограниты сопровождаются четкими экзогенными аномалиями тантала (рис. 17). В то же время бериллоносные апограниты ореолов рассеяния тантала в почвах не образуют.

Ореолы рассеяния тантала по горизонту *B*, сопровождающие массивы апогранитов с содержаниями Ta_2O_5 80—120 *г/т* (массив 1), перекрывают его полностью и выходят за пределы массива на расстояние до 400 *м* в местах, где наблюдается смещение гранитного делювия вниз по склону. Содержание тантала в этом ореоле, подсчитанное по результатам спектральных анализов 200 проб, изменяется от 10 до 300 *г/т* и составляет в среднем по горизонту *A* 45 *г/т*, по *B* — 70 *г/т*, по *BC* — 120 *г/т* и по *C* — 140 *г/т*, а по данным химических анализов 37 проб соответственно 57; 90; 90 и 120 *г/т*.

Участки с аномальными содержаниями ($\geqslant$10 *г/т*) металла в горизонте *A* наблюдаются в виде сравнительно небольших изолированных пятен внутри контура, выделенного по горизонту *B*.

Концентрация металла в почвах, развивающихся над массивом апогранитов с содержаниями 30—80 *г/т* Ta_2O_5, достигает в ореоле

Таблица 73

Оценки параметров распределения некоторых рудных элементов в почвах горных мерзлотно-таежных ландшафтов в пределах экзогенных ореолов рассеяния массивов редкометальных апогранитов

Компонент	Номер массива	Материнские породы	Горизонт	Количество проб	Среднее арифметическое		Среднее квадратическое отклонение		Коэффициент вариации содержаний, %
					содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний	содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний	
Nb_2O_5	1	Танталоносные апограниты	*A*	9	140 ± 60	—	99	—	71,0
			B	16	147 ± 30	—	69	—	46,8
Sn	1	Танталоносные апограниты	*A*	17	94 ± 70	1,513	—	0,621	166,5
			B	29	165 ± 84	1,883	—	0,564	137,0
	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	12	45 ± 29	—	51	—	113,8
			B	14	115 ± 73	—	136	—	116,6
	2	Танталоносные апограниты (массив в целом)	*A*	30	41 ± 24	1,303	—	0,500	158,0
			B	33	76 ± 33	1,556	—	0,555	126,0
Be	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	18	19 ± 7	1,122	—	0,427	77,9
			B	27	47 ± 13	1,578	—	0,283	71,8
	2	Осадочно-метаморфические породы	*A*	21	18 ± 4	—	8	—	46,4
			B	33	40 ± 8	—	20	—	49,7
	2	Танталоносные апограниты	*B*	19	10 ± 2	—	5,4	—	54,5
	3	Бериллоносные апограниты	*B*	12	11 ± 1	—	2,2	—	20,1
Pb	1	Танталоносные апограниты	*B*	24	360 ± 90	—	212	—	58,9
Li_2O	1	Танталоносные апограниты	*A*	15	410 ± 128	2,554	—	0,218	60,2
			B	67	790 ± 149	2,823	—	0,235	77,2
	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	21	280 ± 84	2,373	—	0,247	68,8
			B	29	840 ± 210	2,814	—	0,298	66,4
	2	Танталоносные апограниты	*A*	18	350 ± 60	—	134	—	38,0
			B	17	620 ± 158	—	323	—	52,0
Rb_2O	1	Танталоносные апограниты	*A*	15	400 ± 85	—	164	—	41,1
			B	64	800 ± 97	—	290	—	36,2
	1	Осадочно-метаморфические породы	*A*	17	310 ± 68	2,462	—	0,174	46,0
			B	38	490 ± 80	2,638	—	0,203	51,4
	2	Танталоносные апограниты	*A*	21	270 ± 27	—	62	—	23
			B	20	380 ± 59	—	133	—	35

Примечание. Для распределений, согласующихся с логнормальным законом, приведены соответствующие оценки параметров распределения логарифмов.

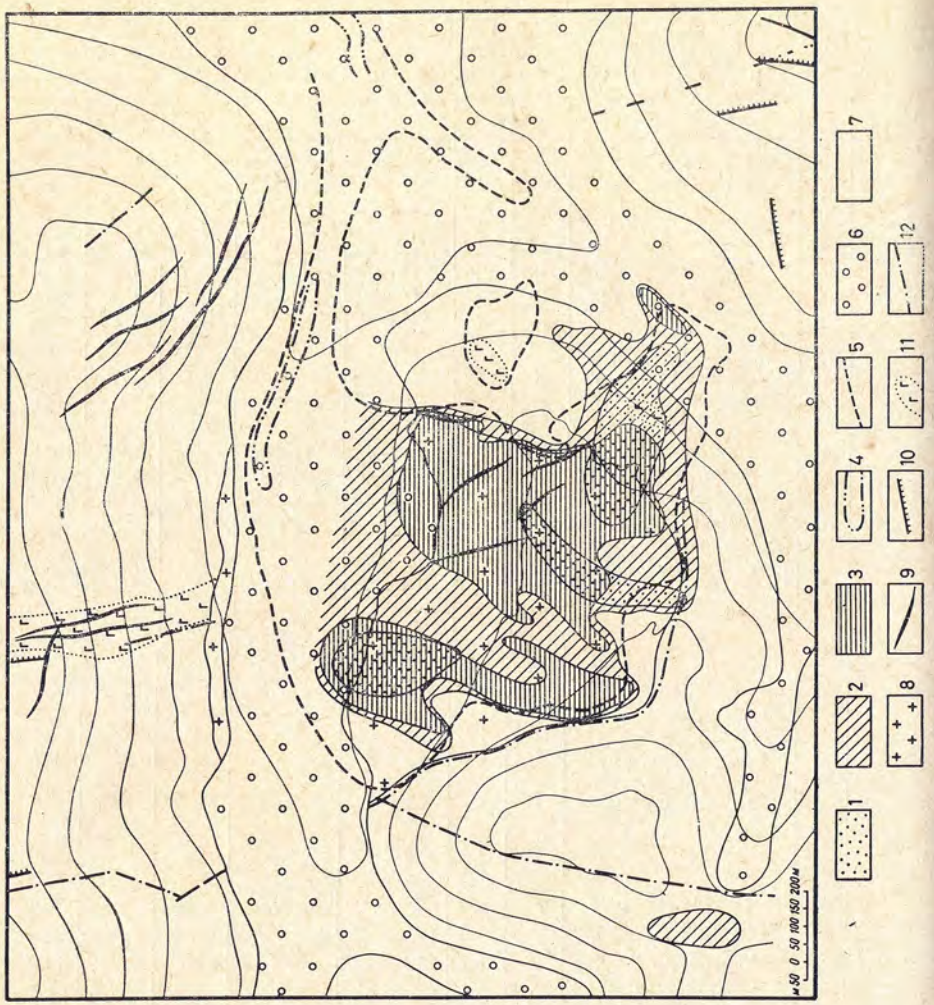


Рис. 17. Экзогенные ореолы рассеяния тантала в почвах по горизонтам A, B (массив 1)

1 — ореолы рассеяния тантала по горизонту A с содержанием 10—100 *г/т*; *2* — ореолы рассеяния тантала по горизонту B с содержанием 10—60 *г/т*; *3* — ореолы рассеяния тантала по горизонту B с содержанием 60—300 *г/т*; *4* — потоки рассеяния тантала с содержанием 10—60 *г/т*; *5* — ореол механического рассеяния тантала с содержанием тантало-ниобиевых минералов 10—200 *г/т*; *6* — делювиально-аллювиальные отложения (Q); *7* — осадочно-метаморфические породы (J_1^{0b}+$_2$); *8* — литионит-амазонит-альбитовые апограниты (γJ$_3$); *9* — кварц-топазовые и амазонит-кварцевые жилы с касситеритом; *10* — кварцевые жилы с вольфрамитом, молибденитом и бериллом; *11* — грейзены; *12* — тектонические нарушения

лишь 60 *г/т* при среднем его содержании по горизонту B над массивом в целом около 20 *г/т*. В горизонте A в этом случае тантал, как правило, спектральными анализами не фиксируется.

Появление в почвах ореолов рассеяния тантала обязано наличию в апогранитах танталит-колумбита и пирохлор-микролита.

Ниобий. По ниобию ореолы рассеяния в почвах фиксируются также в основном над танталоносными апогранитами. Контур ниобиевой аномалии над массивом 1, выделенный по горизонту B, довольно четко повторяет конфигурацию апогранитного массива, выходя за его пределы лишь в местах сползания делювия гранитов вниз по склону. На участках, где наблюдается значительное перекрытие апогранитов делювием осадочных пород и аллювиальными образованиями мощностью свыше 6—8 *м*, аномальных содержаний металла в почвах не отмечается. Ореол рассеяния, выделенный по горизонту A, занимает вдвое меньшую площадь.

Распределение ниобия в аномалии над апогранитами представлено в табл. 73. Среднее его содержание в экзогенном ореоле превышает фоновое в 3—4 раза.

В пределах аномалий, сопровождающих массив апогранитов с низкими содержаниями тантала, концентрация ниобия несколько снижается. Так, по горизонту B среднее содержание, подсчитанное по данным химических анализов восьми проб, составляет 90 *г/т*. Аномалий по горизонту A выделить не удается.

Основным отличием ниобиевых аномалий, генетически связанных с массивами апогранитов, характеризующихся низкими концентрациями тантала, является значительно меньший размер аномалий по отношению к площади массива и более низкие концентрации металла.

Ореолы рассеяния ниобия в связи с массивами танталоносных апогранитов обязаны своим происхождением присутствию таких устойчивых и выветриванию минералов, как танталит-колумбит и, в меньшей степени, пирохлор-микролит. Частично играют роль и другие ниобийсодержащие минералы (касситерит, циртолит, слюды и др.).

Олово. В отличие от тантала и ниобия олово образует значительно более широкие ореолы рассеяния, приуроченные не только к массивам амазонитсодержащих альбитовых апогранитов, но также и к связанным с ними грейзенам экзоконтактовых зон и участкам выходов кварцевых жил с касситеритом, расположенных на расстоянии до 1 *км* от массива. Вероятность появления проб с аномальными содержаниями, определенная при помощи таблиц нормированной интегральной функции Лапласа, в ореоле над танталоносными апогранитами массива 1 по горизонту B равна 0,73. Коэффициент аномальности [1] 21. Ореолы рассеяния олова в почвах по горизонту A наблюдаются в виде небольших пятен.

[1] Коэффициент аномальности — отношение средних содержаний в пределах аномалий и геохимического фона.

Аномалии, выделенные по горизонту B над апогранитами с низкими содержаниями тантала, образуют сравнительно небольшие участки, приуроченные к массиву или зонам его экзоконтактовых изменений. Вероятность встречи проб с аномальными содержаниями в почвах над массивом в целом по горизонту B составляет 0,48.

При сопоставлении средних содержаний олова в аномалиях над массивами с низкими и высокими концентрациями тантала установлено, что для первых характерны также и более низкие (в 2 раза) содержания олова.

Аномалии олова на описываемых участках в основном обязаны своим происхождением присутствию в коренных породах (в апогранитах, грейзенах и кварцевых жилах) касситерита и в незначительной мере таких минералов, содержащих примесь олова, как микролит, колумбит и стрюверит.

Бериллий. В отличие от элементов, описанных выше, бериллий образует целый ряд аномалий сложной формы, приуроченных не к массивам амазонитовых апогранитов, а к их экзоконтактовым зонам что соответствует положению эндогенных геохимических ореолов бериллия.

На массиве 1 зафиксировано несколько аномалий по горизонту B. Одна из них наблюдается в виде полукольца, опоясывающего массив апогранитов с южной стороны. Эта аномалия связана с эндогенным геохимическим ореолом бериллия в коренных породах. В северной экзоконтактовой зоне массива наблюдается другая крупная аномалия, совпадающая с выходами кварцевых жил и грейзенов. Эти аномалии отделены друг от друга полосой мощных долинных делювиально-аллювиальных отложений (рис. 18).

Вероятность встречаемости аномальных проб в ореоле для этих аномалий равна 0,65; коэффициент аномальности 3,9.

Ореолы рассеяния по горизонту A фиксируются в виде небольших пятен, располагающихся, как правило, внутри контуров аномалий, выделенных по горизонту B.

Ореолы рассеяния бериллия, сопровождающие массив амазонит-альбитовых апогранитов с низким содержанием тантала, образуют прерывистое кольцо вокруг массива шириной 200—250 *м*. Средние содержания металла в пределах аномалий почти такие же, как на первом массиве. Максимальная же его концентрация здесь в 2 раза ниже. Вероятность встречаемости проб с аномальными значениями составляет: по горизонту A — 0,08, по горизонту B — 0,59.

Аномалии бериллия, связанные с бериллоносными апогранитами, характеризующимися кларковыми содержаниями тантала (массив 3), значительно отличаются от рассмотренных. Если в первом случае аномалии располагаются в зоне экзоконтактов над эндогенными геохимическими ореолами апогранитовых массивов, то в данном случае они приурочены к эндоконтактам массива, т. е. непосредственно связаны с апогранитами.

Среднее содержание бериллия в этих аномалиях в горизонте A составляет 7 *г/т* и по B — 11 *г/т*, что в 4—5 раз ниже по сравнению

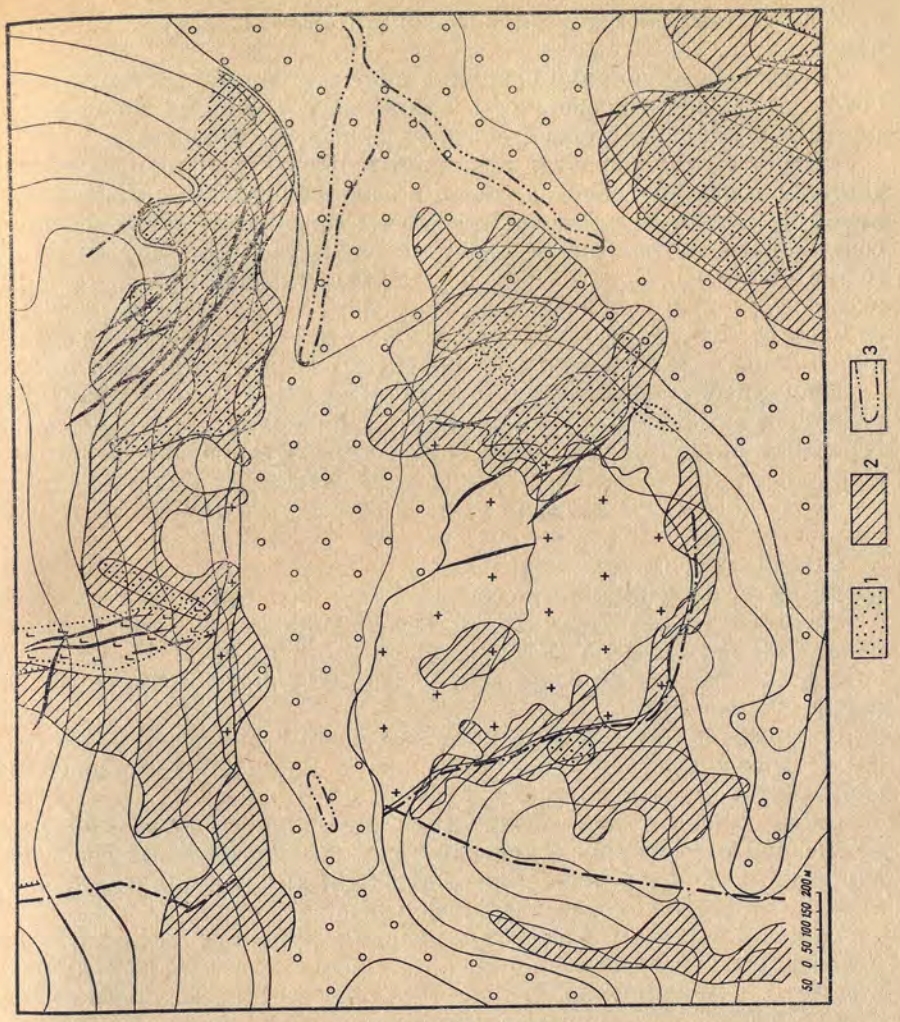


Рис. 18. Экзогенные ореолы рассеяния бериллия в почвах по горизонтам A, B (массив 1).

1 — ореолы рассеяния бериллия по горизонту A с содержанием 30—100 *г/т*; *2* — ореолы рассеяния бериллия по горизонту B с содержанием 30—300 *г/т*; *3* — потоки рассеяния бериллия с содержанием 30—300 *г/т*. Остальные условные знаки см. на рис. 17.

с почвенными аномалиями экзоконтактовых зон танталоносных апогранитов.

Образование аномалий бериллия в почвах по всем рассмотренным объектам связано в основном с наличием в коренных породах берилла и в меньшей степени слюд, содержащих бериллий.

Литий. Литий образует аномалии в почвах как над массивами танталоносных апогранитов, так и в зоне их экзоконтактовых изменений (рис. 19). В пределах массива апогранитов с повышенным содержанием тантала по горизонту *B* оконтурены две крупные аномалии (>1 *км*^{2}). Одна из них перекрывает массив и его восточную экзоконтактовую зону, спускаясь в долину на расстояние до 600 *м* от массива. Другая (северная) совпадает с ореолами рассеяния бериллия и олова в районе развития кварцевых жил и грейзенов.

По горизонту *A* выделяется несколько более мелких аномалий, расположенных, как правило, внутри аномалий, выделенных по горизонту *B*. И лишь в одном случае зарегистрирована смещенная аномалия, расположенная в долине реки на мощных рыхлых отложениях. Среднее содержание металла в ореолах по горизонту *B* превышает фоновое в 5 раз и по горизонту *A* — в 2,5 раза.

Оценка вероятности появления в почвах на амазонитовых апогранитах содержаний лития более 100 и 300 *г/т* свидетельствует о том, что в горизонте *A* 78,2% содержаний лития превышает или равно 100 *г/т* и 18,4% содержаний выше 300 *г/т*. В горизонте *B* 98% всех содержаний более или равно 100 *г/т*, а 67,8% более или равно 300 *г/т* лития.

Содержание лития в почвах над массивом 2, имеющим более глубокий эрозионный срез по сравнению с массивом танталоносных апогранитов (массив 1), ниже примерно в 1,5 раза.

Своим происхождением литиевые аномалии в почвах обязаны в основном присутствию в апогранитах и экзоконтактовых грейзенизированных породах литийсодержащих слюд: криофиллита, лепидолита, литиевого биотита, циннвальдита.

Рубидий. Ореолы рассеяния рубидия в почвах располагаются в основном непосредственно над массивами и в меньшей степени в зоне их экзоконтактов. Однако в сравнении с аномалиями лития, олова и свинца они занимают меньшую площадь, выходя за пределы массива не далее 400—500 *м*.

Геохимические аномалии рубидия в почвах по горизонту *B*, выделенные над апогранитами с высокими содержаниями тантала (массив 1), располагаются внутри контуров литиевых ореолов. Наиболее крупная из них, равная по площади примерно 1,0 *км*^{2}, перекрывает массив и восточную зону его экзоконтактовых изменений. Аномалии, выделенные по горизонту *A*, находятся внутри контуров, ограничивающих аномальные содержания горизонта *B*.

Анализ статистических параметров, характеризующих распределение рубидия в почвах над апогранитами, свидетельствует о том, что в рассматриваемых почвах по горизонту *B* 97,6% всех содержаний рубидия равно или более 300 *г/т*, т. е. являются аномальными

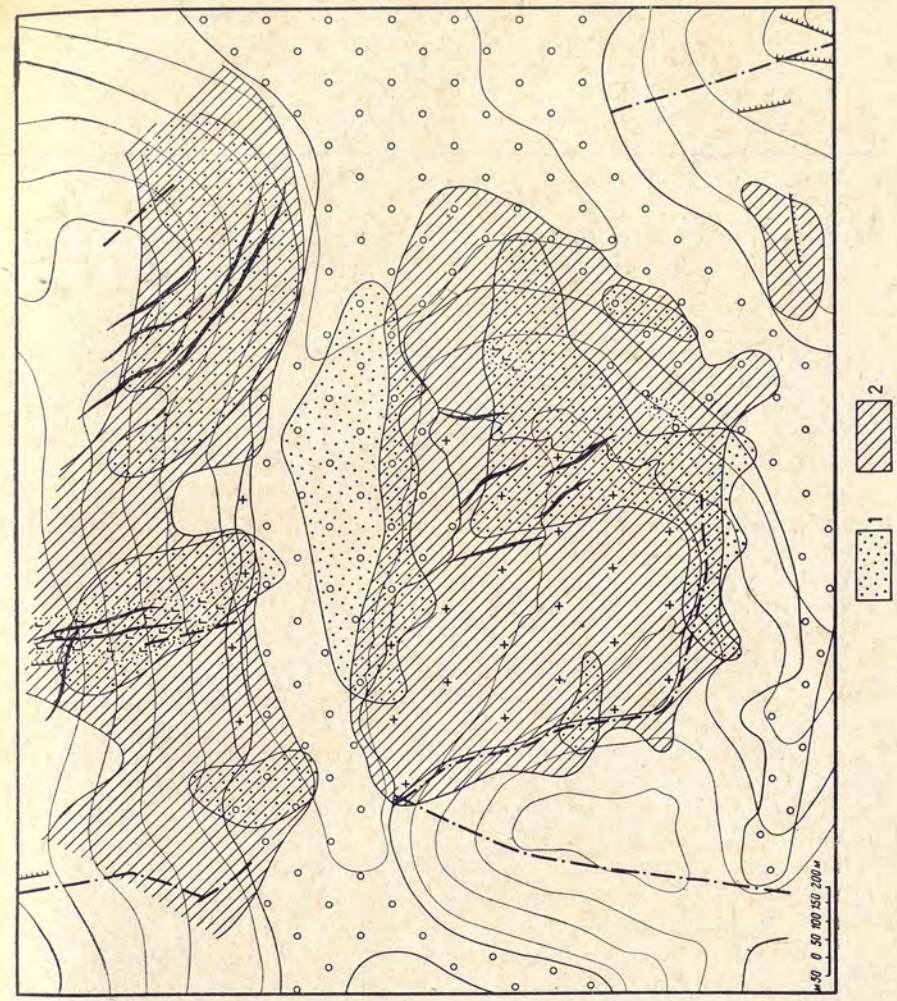


Рис. 19. Экзогенные ореолы рассеяния лития в почвах по горизонтам *A*, *B* (массив 1)

1 — ореолы рассеяния лития по горизонту *A* с содержанием 100—600 *г/т*; *2* — ореолы рассеяния лития по горизонту *B* с содержанием 100—3000 *г/т*. Остальные условные знаки см. на рис. 17

и 68,4% равно или выше 600 *г/т* рубидия. В аномалии над осадочными породами содержание рубидия снижается. Вероятность встречи проб с аномальными содержаниями равна для этих пород 0,52%.

Среднее содержание рубидия в ореолах над апогранитами и в экзоконтактовой зоне массива 2 снижается по сравнению с танталоносным массивом 1 примерено в 2 раза. Вероятность встречи проб с аномальными содержаниями составляет: по горизонту *A* 0,15, по *B* — 0,64.

Аномалии в горизонте *A* в этом случае практически отсутствуют, а по горизонту *B* намечается нечеткий, слабо выраженный ореол, среднее содержание металла в котором, по существу, почти не отличается от минимально-аномального значения.

Ореолы рассеяния рубидия в почвах образовались, по-видимому, в основном за счет разрушения породообразующих рубидийсодержащих минералов: амазонита и литиевых слюд.

Свинец. В районе массива апогранитов с высоким содержанием тантала выделено несколько участков с аномальными содержаниями свинца. Наиболее крупный из них, оконтуренный по горизонту *B* (1,4 *км*^{2}), перекрывает массив, выходя за его пределы на расстояние до 600 *м*.

Ореолы рассеяния свинца, выделенные по горизонту *A*, в отличие от других элементов почти полностью совпадают с ореолами, оконтуренными по горизонту *B*. Существенной разницей является лишь смещение некоторой части этого ореола в долину реки. Вероятность встречи аномальных значений в пределах характеризуемого ореола по горизонту *B* равна 0,86, коэффициент аномальности 7,2.

Ореолы рассеяния свинца, сопровождающие массив амазонит-альбитовых апогранитов с низким содержанием тантала, располагаются в основном над массивом и в отличие от первого полностью его не перекрывают.

В отличие от массива апогранитов с повышенными концентрациями тантала, описанные аномалии свинца характеризуются также значительно более низкими содержаниями (в 3 раза).

Возможность использования закономерностей распределения элементов-примесей в почвах для индикации перекрытых массивов апогранитов и их эндогенных ореолов убедительно подтверждается наличием корреляционной связи между распределением типоморфных элементов танталоносных апогранитов в коренных породах и развивающихся на них почвах (табл. 74).

Как видно из табл. 74, корреляционная связь между содержаниями указанных элементов в коренных породах и почвах установлена на высоком уровне значимости по всем горизонтам кроме горизонта *A*. Последнее свидетельствует о его недостаточной представительности для геохимического опробования при поисковых работах.

Существенная корреляционная связь в пределах аномалий на апогранитах характерна также почти между всеми рудными элементами почв по всем горизонтам кроме горизонта *A*. По горизонту *A*

Таблица 74

Корреляция содержаний ниобия, олова и свинца в коренных породах [1]
(в пределах пологого склона)

Элемент	Горизонт	Число степеней свободы	Коэффициент корреляции *r*	Критическое значение *r* на 1%-ном уровне значимости	Характер связи
Nb	*A*	16	0,113	0,590	Н. с.
	B	65	0,642	0,310	+
	BC	47	0,637	0,360	+
	C	17	0,726	0,575	+
Sn	*A*	16	0,467	0,590	Н. с.
	B	65	0,535	0,310	+
	BC	47	0,360	0,360	+
	C	17	0,772	0,575	+
Pb	*A*	16	0,324	0,589	Н. с.
	B	65	0,548	0,310	+
	BC	47	0,491	0,360	+
	C	17	0,775	0,575	+

[1] Опробование проводилось по специально заданным линиям шурфов.

Примечание. Здесь и далее Н. с. — связь несущественная, + — связь положительная.

существенная положительная связь наблюдается лишь между бериллием и свинцом. В почвах, развитых над осадочными породами, коррелируются бериллий с оловом, литий с оловом и литий с рубидием как по горизонту *A*, так и по горизонту *B*.

В пределах геохимического фона корреляционная связь в почвах над осадочными породами установлена лишь для бериллия — олова и лития — рубидия. Во всех других случаях она не проявляется. Характер корреляционной связи между элементами в основном положительный (табл. 75).

В отличие от танталоносных апогранитов в почвах над бериллоносными апогранитами корреляционная связь между рудными элементами (Be—Sn, Be—Pb, Be—Li, Sn—Pb, Pb—Li) не установлена.

На картах ореолов механического рассеяния тантало-ниобиевых минералов и касситерита наблюдается совпадение ореолов, выделенных по данным минералогических и спектральных анализов, что свидетельствует о преимущественном механическом характере экзогенных ореолов тантала, ниобия и олова в почвах таежных ландшафтов. Минералы этих элементов легко переходят в россыпь и отличаются довольно высокой устойчивостью к химическому выветриванию, что является благоприятным фактором для образования механических ореолов.

Таблица 75

Корреляция содержаний рудных элементов в почвах таежных ландшафтов

Пары коррелируемых элементов	Материнские породы	Горизонт	Число степеней свободы	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r	Уровень значимости корреляции, %	Характер связи
Ta — Nb	Апограниты (аномалия)	*B*	40	0,306	0,304	5	+
Nb — Sn	То же	*B*	17	0,783	0,575	1	+
Nb — Li	»	*B*	6	0,834	0,834	1	+
Li — Rb	Осадочные породы (аномалия)	*A*	19	0,732	0,549	1	+
		B	14	0,799	0,623	1	+
	Апограниты (аномалия)	*A*	13	0,316	0,441	5	Н. с.
		B	62	0,297	0,253	5	+
	Осадочные породы (фон)	*A*	21	0,540	0,530	1	+
		B	38	0,363	0,310	5	+
Li — Sn	Апограниты (аномалия)	*A*	8	0,566	0,707	5	Н. с.
		B	13	0,566	0,515	5	+
	Осадочные породы (аномалия)	*A*	7	0,768	0,666	5	+
		B	11	0,841	0,684	1	+
Be — Li	Апограниты (аномалия лития)	*A*	13	—0,306	0,441	5	Н. с.
		B	5	—0,889	0,875	1	—
Sn — Be	Осадочные породы (фон)	*A*	30	0,460	0,449	1	+
		B	15	0,728	0,606	1	+
	Апограниты (аномалия олова)	*A*	14	0,150	0,426	5	Н. с.
		B	29	—0,478	0,455	1	—
	Осадочные породы (аномалия бериллия)	*A*	11	0,417	0,476	5	Н. с.
		B	15	0,803	0,606	1	+
Pb — Sn	Апограниты (аномалия)	*B*	40	0,360	0,304	5	+
	То же	*B*	19	—0,441	0,433	5	Н. с.
Pb — Be	Апограниты (аномалия свинца)	*A*	57	0,514	0,335	1	+
		AB	70	0,493	0,302	1	+
		B_1	80	0,219	0,217	5	+
		B_2	22	0,584	0,525	1	+
		BC	104	0,411	0,254	1	+
		C	40	0,357	0,304	5	+

Аномалии бериллия, свинца, лития и рубидия носят смешанный характер, т. е. в их фазовом составе присутствуют солевые и механические компоненты. Минералы-носители этих элементов не относятся к числу устойчивых и сравнительно легко разрушаются при транспортировке. Однако механический компонент в ореолах рассеяния этих элементов играет, по-видимому, существенную роль, что объясняется направлением процессов выветривания в таежных ландшафтах, где физическое выветривание преобладает над биохимическим. На существование солевого компонента в ореолах рассеяния лития, бериллия и свинца указывает, в частности, наличие четких биогеохимических аномалий и смещенных ореолов в гумусовом горизонте при отсутствии их повышенных концентраций в нижележащих горизонтах.

Таким образом, танталоносные литионит-амазонит-альбитовые апограниты в пределах таежных ландшафтов сопровождаются экзогенными ореолами рассеяния тантала, ниобия, олова, бериллия, лития, рубидия, свинца, т. е. всех типоморфных элементов, характерных для апогранитов.

Четкие ореолы для этих элементов наблюдаются в основном в пределах нижних горизонтов почвенного профиля и, в частности, по горизонту *B*, который отражает закономерности распределения рудных элементов в коренных породах и, следовательно, является представительным для производства геохимического опробования.

Характерной особенностью распределения рассмотренных элементов в почвах горных мерзлотно-таежных ландшафтов является возрастание их содержаний с глубиной.

Для рудных элементов характерна горизонтальная (площадная) зональность в распределении их аномалий по отношению к массивам апогранитов. Она выражается вполне определенной последовательностью в расположении ореолов; тантал и ниобий не выходят за пределы массива (не считая механических смещений), рубидий, свинец и литий уходят за его пределы до 600—800 *м*, бериллий и олово — до 1 *км* (последнее за счет жильных образований).

Ореолы рассеяния рудных элементов, сопровождающие массив амазонитсодержащих альбитовых апогранитов с низкими концентрациями тантала (массив 2) по сравнению с массивом 1, характеризующимся промышленными содержаниями, отличаются значительно меньшими размерами аномалий по отношению к площади массива, более низкой концентрацией по всем элементам и иными соотношениями элементов и, в частности, тантала и ниобия (в почвах массива 1 Ta : Nb = 1 : 1,5, на массиве 2 Ta : Nb = 1 : 3,5).

Массив бериллоносных апогранитов, характеризующийся кларковыми содержаниями тантала, в отличие от танталоносных апогранитов никаких ореолов рассеяния редких элементов кроме бериллия в почвах не образует. Последний в отличие от массивов танталоносных апогранитов имеет более низкие содержания и приурочен не к зоне экзоконтактовых изменений, а к самому массиву; корреляция между содержаниями рудных элементов в почвах здесь также отсутствует.

Ландшафты лесостепной зоны

В пределах лесостепной зоны особенности вторичных ореолов рассеяния месторождений тантала могут быть охарактеризованы на примере массива амазонитсодержащих альбитовых апогранитов,

с высокими содержаниями тантала в эндоконтактовой зоне (см. часть I, глава 2, пример 1).

Район месторождения расположен на высоте 850—1050 *м* на территории развития островной мерзлоты. Лесные массивы представлены здесь разреженным березово-лиственничным лесом, иногда с примесью сосны; в подлеске рододендрон даурский, в сырых местах ольха; наземный покров — кустарничково-травянистый, реже травянистый. Характерны также березовые леса с травянистым покровом. Южные склоны сопок покрыты лугами и настоящими степями. В пределах описываемых районов лесостепной зоны развиты: горные мерзлотные дерново-таежные, мерзлотные лугово-лесные, серые лесные, горные черноземные и мерзлотные болотные почвы. Наиболее распространены дерново-таежные и мерзлотные лугово-лесные; все остальные разности почв развиты незначительно, следовательно, существенного влияния на формирование ореолов рассеяния рудных элементов не оказывают. Все это свидетельствует о том, что условия миграции химических элементов в почвах лесостепных (при наличии мерзлоты) и таежных ландшафтов близки.

Горные мерзлотные дерново-таежные почвы лесостепной зоны по морфологическому строению и физико-химическим свойствам в общем аналогичны почвам таежной зоны. Основной разницей в их строении является более слабое проявление криогенных процессов, более слабое ожелезнение и менее кислая реакция, близкая к нейтральной (pH = 6,2—6,8).

Примером мерзлотных дерново-таежных почв может служить следующий типичный разрез:

Абсолютная высота 1041 *м*.

Выположенный участок шлейфа, покрытый березовым редколесьем с высоким травостоем.

A_0(0—5 *см*) — дернина.

A_1(5—20 *см*) — серовато-бурый суглинок, зернистый, рыхлый, корней много, переход четкий, граница неровная.

B (20—60 *см*) — бурый средний суглинок, зернисто-ореховатый, уплощенный, с обломками гранитов до 30%. Корни в среднем количестве. Переход ясный, граница неровная.

BC (60—100 *см*) — желто-бурый средний суглинок, чешуйчато-ореховатый, плотный, с обломками и глыбами гранитов до 60%. Корней мало. Переход четкий, граница неровная.

C (100—130 *см*) — дресва и песок гранитов.

По узким водоразделам и крутым склонам наблюдаются маломощные сильно щебнистые разности дерново-таежных почв мощностью менее 60—70 *см*.

Горные мерзлотные лугово-лесные почвы формируются по склонам южных экспозиций и логам под луговой, лугово-степной растительностью и участками лиственнично-березового редколесья.

Для них характерен среднесуглинистый механический состав и хорошо развитый темно-серый до черного гумусовый горизонт

мощностью 15—50 *см*. В профиле почв иногда встречаются морозная чешуйчатость, трещиноватость. Горизонты описываемых почв, как правило, имеют слабокислую реакцию (pH 5,9—6,5). Поверхностные горизонты содержат большое (9—11%) количество гумуса. Среди подтипов мерзлотных лугово-лесных почв встречаются обычные и глеевые.

Горные черноземные бескарбонатные почвы развиты по открытым, чаще крутым склонам южных экспозиций под степной и лугово-степной растительностью. Они отличаются небольшой мощностью (менее 0,8—1 *м*), сильной щебнистостью, темной окраской гумусового горизонта и слабокислой, близкой к нейтральной, реакцией профиля. Более подробное их описание будет дано при рассмотрении почв степных ландшафтов, где они широко развиты.

Серые лесные почвы формируются обычно в нижней части облесенных склонов, под редкими березовыми лесами паркового типа с густым высокостойным разнотравьем. Вечной мерзлоты в их профиле не обнаружено, оподзоленность, как правило, отсутствует. Мощность гумусового горизонта колеблется в пределах 20—25 *см*. Характерной чертой строения профиля этих почв является присутствие мощного переходного горизонта *AB*. Горизонт *B* ореховатой или зернистой структуры. Верхние горизонты серых лесных почв имеют слабокислую реакцию, с глубиной реакция становится значительно более кислой. Содержание гумуса в верхнем горизонте колеблется от 5 до 10%. Описанные почвы относятся к подтипу темно-серых, глубоко промерзающих (Ногина, 1964).

Апограниты, расположенные в пределах лесостепной зоны, по геохимическим особенностям близки к апогранитам таежной зоны (см. часть I, глава 2, примеры 1 и 2). В связи с этим комплекс рудных элементов в экзогенных аномалиях лесостепных и таежных ландшафтов одинаков. Здесь также в повышенных содержаниях зафиксированы тантал, ниобий, олово, свинец, литий, рубидий, бериллий. Однако содержание этих элементов в почвах по сравнению с мерзлотно-таежными ландшафтами здесь более низкое. Из табл. 76 и 77 видно, что в пределах геохимического фона концентрация элементов кроме ниобия снижается здесь в 1,5—4 раза и примерно соответствует кларковым значениям (Виноградов, 1957; Хокс и Уэбб, 1964). В почвах над биотитовыми гранитами геохимический фон для олова и бериллия ниже кларкового значения в 2 раза, а для свинца — выше в 2 раза.

Основной особенностью поведения рудных элементов в почвах рассматриваемых ландшафтов, так же как и в таежных, является тенденция к возрастанию их содержаний с глубиной. Но в отличие от таежной зоны здесь эта особенность проявлена несколько слабее. Если в первом случае концентрация элементов в пределах геохимического фона возрастает с глубиной в основном в 1,5—2 раза, то в лесостепных почвах только в 1,1—1,5 раза. Исключение составляет ниобий, содержание которого в почвах над биотитовыми гранитами увеличивается с глубиной в 3 раза.

Таблица 77

Среднее содержание элементов по генетическим горизонтам почв лесостепных ландшафтов по данным полуколичественного спектрального анализа
(в *г/т*)

Горизонт	Материнские породы	Ta	Nb	Sn	Be	Li	Pb	Rb
A_1	Танталоносные апограниты	21 * / 13	26 / 45	15 / 49	6 / 64	220 / 36	73 / 29	180 / 13
	Биотитовые граниты	—	16 / 35	4 / 33	2,4 / 32	50 / 28	19 / 33	130 / 8
	Вмещающие породы (вулканогенно-осадочные)	—	—	18 / 25	6 / 52	—	—	120 / 17
B_1	Танталоносные апограниты	42 / 11	34 / 48	24 / 46	8 / 64	230 / 38	108 / 29	240 / 13
	Биотитовые граниты	—	32 / 39	4 / 36	2,5 / 36	50 / 28	27 / 36	140 / 8
	Вмещающие породы (вулканогенно-осадочные)	—	—	23 / 24	7 / 50	—	—	140 / 17
B_2	Танталоносные апограниты	15 / 9	45 / 43	21 / 35	9 / 49	210 / 34	99 / 23	210 / 12
	Биотитовые граниты	—	33 / 36	4 / 34	2,3 / 33	53 / 26	27 / 34	140 / 7
	Вмещающие породы (вулканогенно-осадочные)	—	—	22 / 20	6 / 40	—	—	130 / 16
BC	Танталоносные апограниты	44 / 12	48 / 36	29 / 43	8 / 53	260 / 25	123 / 25	290 / 11
	Биотитовые граниты	—	45 / 25	5 / 23	3,7 / 24	57 / 18	30 / 23	150 / 7
	Вмещающие породы (вулканогенно-осадочные)	—	—	27 / 21	7 / 36	—	—	150 / 9
C	Танталоносные апограниты	44 / 11	50 / 29	28 / 28	11 / 36	820 / 16	133 / 20	530 / 9
	Биотитовые граниты	—	53 / 11	5 / 8	4,4 / 11	50 / 8	32 / 9	180 / 3
	Вмещающие породы (вулканогенно-осадочные)	—	—	29 / 14	8 / 25	—	—	150 / 1

Таблица 76

Оценки параметров распределения элементов-примесей в почвах лесостепных ландшафтов в пределах геохимического фона

Компонент	Материнские породы	Горизонт	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, *г/т*
Sn	Биотитовые граниты	*B*	39	4 ± 1	6,2	2,5	61,6	1—16
Pb	То же	*B*	42	30 ± 5	256	16	54,6	7—67
Li_2O	Вулканогенно-осадочные породы	*A*	25	63 ± 5	144	12	18,8	40—96
		B	23	77 ± 6	196	14	17,9	45—110
	Биотитовые граниты	*A*	13	88 ± 12	484	22	25,5	37—140
		B	14	95 ± 17	961	31	32,6	23—160
Rb_2O	Вулканогенно-осадочные породы	*A*	25	120 ± 3	441	21	17,7	84—179
		B	23	140 ± 11	729	27	19,7	92—230

Указанные изменения в почвенном профиле достаточно четко проявляются лишь в мерзлотных дерново-таежных почвах, для других типов почв они выражены очень слабо.

Распределение тантала и элементов-индикаторов его оруденения в экзогенных ореолах рассеяния массивов апогранитов

Основной особенностью поведения элементов-спутников в экзогенных ореолах рассматриваемых ландшафтов, так же как и в пределах геохимического фона, является возрастание их содержания с глубиной в среднем в 1,5—2 раза (табл. 77 и 78).

Сравнительно четкое возрастание содержаний проявлено у ниобия, тантала, олова и очень слабо — у свинца, бериллия, лития и рубидия, для которых в отдельных случаях отмечено выщелачивание из нижних горизонтов. В таежной зоне изменение концентраций в профиле проявлено более четко (слабое изменение отмечалось лишь для свинца и бериллия). Следовательно, в почвах лесостепной зоны происходит как бы выравнивание содержаний элементов в почвенном профиле, т. е. дифференциация содержаний

Таблица 78

Оценки параметров распределения элементов-индикаторов в почвах лесостепных ландшафтов в пределах экзогенного ореола рассеяния массива танталоносных апогранитов

Компонент	Горизонт	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Коэффициент аномальности
Nb	*A*	11	23 ± 12	361	19	83,9	
	B	12	31 ± 8	169	13	41,9	2,2
Sn	*B*	21	12 ± 4	88	9,4	78,3	3
Be	*A*	12	4 ± 2	14	3,8	95,0	
	B	12	5 ± 2	17	4,1	82,2	2,5
Pb	*A*	11	40 ± 13	441	21	53,5	
	B	10	67 ± 30	2304	48	71,8	2,2
Li_2O	*A*	12	211 ± 100	31 329	177	84,0	2
	B	12	242 ± 130	54 756	234	97,0	3
Rb_2O	*A*	12	200 ± 85	21 904	148	74,0	
	B	12	220 ± 77	17 689	133	60,4	1,6

рудных элементов по генетическим горизонтам почв здесь более слабая.

По степени накопления и выщелачивания рудные элементы в условиях лесостепной зоны можно разделить на две группы (табл. 79). Одна из них включает тантал, ниобий, свинец и олово (?), для которых существенный вынос или накопление в целом по профилю нехарактерны [1]. Для этих элементов в верхних горизонтах (*A*, *AB*) обычно $К_{эа} < 1$, в промежуточных горизонтах (B_1, B_2) $К_{эа} \approx 1$, в нижних горизонтах $К_{эа} > 1$.

Для другой группы характерен вынос элементов из почвенного профиля. В эту группу входят бериллий, литий, рубидий (?), для которых элювиально-аккумулятивный коэффициент обычно менее единицы как для верхних, так и для нижних горизонтов (*A*, *AB*, *B*, *BC*) и лишь для рубидия в горизонте *C* он более единицы. В целом для большинства элементов элювиально-аккумулятивный коэффициент в почвах лесостепной зоны несколько ниже по сравнению с таежной, т. е. рудные элементы (бериллий, олово, свинец, литий, рубидий) в пределах лесостепных ландшафтов, по-видимому, более подвижны. Следовательно, более низкие содержания редких эле-

[1] Элювиально-аккумулятивные коэффициенты подсчитаны в основном по мерзлотным дерново-таежным почвам, преобладающим над другими разновидностями.

Таблица 79

Элювиально-аккумулятивные коэффициенты по генетическим горизонтам почв в геохимических аномалиях лесостепных ландшафтов

Группа	Элемент	Горизонт			Примечание
		A	*B*	*BC—C*	
I	Ta	0,7	0,9 (?)	1,4—1,5	Среднее содержание элементов по профилю примерно такое же, как в коренной породе
	Nb	0,7	0,9	1,4—1,5	
	Pb	0,7	1	1,1	
	Sn(?)	0,7	0,8	0,9—1,1	
II	Rb (?)	0,6	0,7	0,8—1,5	Элементы из профиля выносятся
	Li	0,6	0,7	0,8—0,9	
	Be	0,5	0,6	0,8—0,9	

ментов в почвах данных ландшафтов можно объяснить не только их меньшей концентрацией в коренных породах, но и их более интенсивным выносом из почвенных горизонтов.

Оконтуривание вторичных ореолов рассеяния в районе массива танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов может быть произведено исходя из максимальных фоновых содержаний, определенных с вероятностью 0,01 (Li, Rb) и 0,05 (Pb, Nb, Sn, Be).

Тантал. В аномалию тантала вошли все пробы, в которых спектральным методом (предел чувствительности 10 *г/т* тантала) обнаружено присутствие тантала. В пределах ореола по горизонту *B* содержание металла колеблется от 10 до 300 *г/т* при среднем значении 42 *г/т*. Форма аномалии повторяет контур кольцевой эндоконтактовой зоны апогранитов, обогащенной танталом. Внутри этого ореола непосредственно над танталоносной зоной оконтуривается участок с более высокими содержаниями (>30 *г/т*). Среднее содержание тантала в этом контуре равно 60 *г/т*.

По горизонту *A* содержание тантала снижается примерно вдвое.

Образование ореолов рассеяния тантала в почвах связано с присутствием в апогранитах колумбит-танталита и микролита.

Ниобий. Оценки параметров распределения ниобия над зоной апогранитов в целом приведены в табл. 78. Аномалии ниобия, оконтуренные по иллювиальному горизонту по значению 60 *г/т* (с вероятностью 95%), незначительны по площади и приурочены непосредственно к выходам рудных тел.

По горизонту *A* над апогранитами и частично над зоной экзоконтактовых изменений оконтурен ореол с содержаниями от 30 *г/т* ниобия и выше. Этот ореол грубо повторяет форму эндоконтактовой зоны массива. Аномалии ниобия в почвах в основном обязаны присутствию в апогранитах колумбит-танталита.

Олово. Ореол рассеяния олова, оконтуренный с 5%-ным уровнем значимости по значению 10 *г/т*, имеет нечетко выраженную

подковообразную форму, повторяющую в общем форму краевой минерализованной зоны массива апогранитов. Среднее содержание металла в этом ореоле по горизонту *B* в 3 раза превышает фоновое. Вероятность появления проб с содержанием более 10 *г/т* составляет по горизонту *B* 69%, а с содержанием более 16 *г/т* — 33,7%. Внутри этой аномалии выделяются два небольших (менее 0,1 *км*²) контура со средним содержанием олова, равным 30 *г/т*. Они расположены непосредственно над рудными телами.

Аномалии, оконтуренные по горизонту *A* по значению 10 *г/т*, представляют собой три разрозненных контура, в основном сохраняющих форму аномалии, выделенной по горизонту *B*. Но над вмещающими породами аномалии в гумусовом горизонте смещаются вниз по склонам на расстояние до 400—500 *м*.

Главную роль в образовании ореолов рассеяния олова играет касситерит.

Бериллий. Ореолы рассеяния бериллия в почвах, выделенные по горизонту *B* по значению 10 *г/т*, занимают сравнительно небольшие площади и приурочены к узкой полосе экзо- и частично эндоконтактовой зоны апогранитов непосредственно вблизи выходов рудных зон. Среднее содержание металла в этих ореолах составляет по горизонту *B* 16 *г/т*.

Ореолы по горизонту *A* занимают небольшие площади и целиком располагаются в пределах контуров ореола по горизонту *B*. Образование аномалий бериллия в почвах связано, по-видимому, в основном со слюдами апогранитов, содержащими изоморфную примесь бериллия, а также с наличием кварц-берилловых прожилков в зоне экзоконтакта массива танталоносных апогранитов.

Литий. Литий образует четкие ореолы рассеяния над апогранитами и вмещающими породами экзоконтактовых зон.

Аномалия по горизонту *B*, выделенная по значению содержания 100 *г/т* занимает относительно большую площадь, перекрывая массив апогранитов и выходя за его пределы на расстояние более 200 *м*. Наиболее высокие содержания лития (до 670 *г/т*) наблюдаются непосредственно над танталоносной рудной зоной и ниже по склону на расстоянии примерно 100 *м*.

Аномалия, выделенная по горизонту *A*, занимает значительно меньшую площадь и образует два овальных контура, приуроченных к участкам с наиболее высокими содержаниями лития в горизонте *B*.

Основную роль в образовании литиевых ореолов играют слюды литионит-амазонит-альбитовых апогранитов (лепидолит и литиевый мусковит); в меньшей степени образование их происходит за счет литийсодержащих слюд, находящихся в измененных экзоконтактовых фациях вмещающих пород.

Рубидий. Среднее значение содержания Rb_2O в экзогенном ореоле массива апогранитов в целом составляет: по горизонту *A* — 200 *г/т* и по *B* — 220 *г/т*. В пределах ореола около 45% всех значений содержания Rb_2O равно или более 230 *г/т*, т. е. являются аномальными, и только около 0,4% значений равно или более 600 *г/т*.

Наиболее высокие концентрации рубидия встречаются непосредственно над танталоносной рудной зоной.

Вторичные ореолы рассеяния рубидия на изученном участке в основном образуются за счет литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, в состав которых входят минералы — носители рубидия — лепидолит и микроклин (амазонит).

Свинец. Оконтуривание ореолов рассеяния свинца произведено по значению 60 *г/т*.

Выделенные по горизонту *B* аномалии представляют собой несколько разобщенных мелких контуров изометричной и овальной формы площадью от 0,03 до 0,2 *км*², среднее содержание свинца в которых почти не отличается от минимально-аномального и составляет 67 *г/т*. Частота встречаемости проб с содержанием выше 60 *г/т* в этих ореолах равна 55,6%, а выше 67 *г/т* — 50%.

Ореолы по горизонту *A* выделяются в виде очень незначительных по площади участков, всегда совмещенных с аномалиями, зафиксированными по горизонту *B*.

Образование ореолов рассеяния свинца в почвах происходит в основном в результате разрушения амазонит-альбитовых апогранитов, в составе которых присутствует свинецсодержащий микроклин (амазонит). В отдельных случаях аномалии свинца отмечаются над биотитовыми гранитами.

По генетическим особенностям вторичные ореолы рассматриваемых элементов-индикаторов относятся к остаточным элювиально-делювиальным ореолам открытого типа; ряд элементов — бериллий, литий, рубидий, свинец — образуют смешанные ореолы (солевые и механические); тантал, ниобий и олово — преимущественно механические.

Наличие солевого компонента в фазовом составе ореолов рассеяния олова, бериллия, свинца и лития подтверждается присутствием их в золе растений. Однако механический компонент в ореолах рассеяния всех указанных элементов, по-видимому, преобладает, а для тантала и ниобия является возможно единственным. Это объясняется, с одной стороны, направлением процессов выветривания в данных ландшафтных условиях, где физическое выветривание преобладает над биохимическим, а с другой — значительной устойчивостью большинства минералов тантала и ниобия.

Наличие механического компонента в составе ореолов рассеяния тантала, ниобия и олова подтверждается минералогическими анализами шлиховых проб, отобранных из элювиально-делювиальных отложений, в которых обнаружены колумбит-танталит, пирохлор-микролит и касситерит. Корреляционным анализом в аномалиях установлена связь между литием и рубидием по горизонтам *A* и *B*. В пределах геохимического фона связь между этими элементами не выявлена (табл. 80).

Из анализа графиков распределения редких элементов в почвах над апогранитами по горизонту *B* намечается, кроме того, положи-

Таблица 80

Корреляция содержаний некоторых рудных элементов в почвах лесостепной зоны

Пары коррелируемых элементов	Порода	Горизонт	Число степеней свободы	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Li—Rb	Апограниты	*A*	10	0,653	0,576	+
	аномалия	*B*	10	0,891	0,576	+
Li—Rb	Вмещающие	*A*	22	0,074	0,400	Н. с.
	породы (фон)	*B*	21	0,328	0,417	Н. с.
Nb—Be	Апограниты	*B*	10	0,419	0,576	Н. с.
Be—Pb	»	*B*	8	0,520	0,707	Н. с.

тельная корреляционная связь между танталом — ниобием, танталом — литием, оловом — бериллием, оловом — свинцом, свинцом — литием, ниобием — бериллием.

Таким образом, массив танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, расположенный в пределах лесостепной зоны, сопровождается ореолами рассеяния тех же рудных элементов, которые характерны для аналогичных массивов таежных ландшафтов, т. е. тантала, ниобия, олова, бериллия, лития, рубидия и свинца.

Указанные элементы здесь также образуют аномалии по всем генетическим горизонтам; но площади их по горизонту *A*, как правило, в 2—5 раза меньше по сравнению с площадями горизонта *B*.

Для ореолов всех элементов наблюдается четкая пространственная и генетическая связь с танталоносными апогранитами или зонами экзоконтактовых изменений. В почвах над апогранитами между рудными элементами существует корреляционная связь, характерная для аналогичных объектов таежной зоны, однако здесь она проявлена несколько слабее. Особенностью распределения рудных элементов в почвенном профиле лесостепных ландшафтов, так же как и таежных, является тенденция к возрастанию содержаний с глубиной.

В расположении аномалий по отношению к выходам апогранитов намечается следующая зональность:

тантал, ниобий, свинец, рубидий — не выходят за пределы массива (не считая механического смещения);

бериллий, олово и литий — уходят в сторону вмещающих пород до 200—500 *м* и более.

Отличительной особенностью ореолов рассеяния лесостепной зоны в сравнении с таежной (для объектов с промышленной концентрацией тантала) является:

1) более слабая контрастность аномалий лесостепных ландшафтов; по всем элементам (кроме тантала) коэффициенты аномальности здесь ниже в 1,5—3 раза (см. табл. 78);

2) более низкие концентрации рудных элементов в пределах аномалий; содержание бериллия, рубидия и лития в 3—4 раза ниже,

олова и свинца — в 5—6 раз; тантал и ниобий присутствуют примерно в равных количествах (см. табл. 77, 78);

3) более низкий коэффициент контрастности по всем элементам, а также более низкая частота встречаемости проб с аномальными содержаниями;

4) значительно меньшая площадь ореолов.

Сравнительно низкие содержания рудных элементов в почвах над апогранитами лесостепной зоны можно объяснить, с одной стороны, их более интенсивным выносом из профиля почв, что подтверждается более низкими коэффициентами аккумуляции по всем элементам (кроме тантала) в сравнении с таежной зоной (см. табл. 79), а с другой — более низкой концентрацией элементов в коренных породах.

Степные ландшафты

Характеристика экзогенных геохимических ореолов рассеяния месторождений тантала в условиях степных ландшафтов приводится на примере поля танталоносных мусковит-альбитовых и сподумен-альбитовых пегматитов.

Пегматитовые жилы в пределах поля образуют субпараллельные зоны, состоящие из серии секущих тел плитообразной формы мощностью от 5—10 *см* до 20 *м*. Длина зон достигает 1,5—2 *км*.

Район пегматитового поля находится на высоте 650—800 *м*. Рельеф района мелкосопочный. Для пониженных его участков и северных экспозиций характерно наличие островной мерзлоты. Растительный покров характеризуется сочетанием лугово-степных и типичных степных растительных группировок. Почвенный покров представлен глубоко промерзающими черноземами с кальциевым классом водной миграции. Согласно классификации Н. А. Ногиной (1964), среди них выделяются следующие разности: на водоразделах и верхних частях склонов развиты бескарбонатные горные черноземы, в средних и нижних частях склонов, а также по логам — лугово-черноземные и черноземно-луговые разности, вдоль водных потоков формируются мерзлотные перегнойно-глеевые почвы. Наиболее распространены из них горные черноземы (разрез I) и лугово-черноземные почвы (разрез II).

Разрез I. Горная черноземная бикарбонатная почва. Абсолютная высота 775 *м*. Склон северной экспозиции, крутизна ~15°.

A_1(0—35 *см*) — темно-серый гумусированный легкий слабощебнистый (каменистость 3%) суглинок порошковато-зернистой структуры, корней много, переход неровный, заметный.

B (35—60 *см*) — желто-серая щебнистая слабо гумусированная супесь (каменистость 15—20%) комковато-зернистой структуры; корни в среднем количестве, переход неровный ясный.

BC (60—90 *см*) — желто-серая сильнощебнистая уплотненная супесь (каменистость 60—70%), корней мало. Щебень представлен слюдисто-глинистыми сланцами.

Для карбонатных разностей черноземов характерно присутствие карбонатных горизонтов в средней или нижней части профиля ($B_к$ и $BC_к$).

накопление в верхней части профиля преимущественно в горизонтах *A* и *B*, при убывании их содержаний в нижних горизонтах *BC* и *C* (см. табл. 81). У тантала эта особенность проявлена наиболее ярко. Уменьшение его концентраций с глубиной происходит в среднем в 2 раза, у бериллия и олова примерно в 1,5 раза, а у рубидия и в меньшей степени у лития наблюдается обратная закономерность, т. е. содержания возрастают с глубиной.

Характер распределения рудных элементов в почвах обычно почти не зависит от их типа или их принадлежности к различным элементарным ландшафтам. Исключение составляют маломощные сильно щебнистые черноземы, для которых характерно увеличение содержаний по всем элементам в нижних горизонтах, и карбонатные разности почв, характеризующиеся возрастанием концентраций в карбонатных горизонтах таких элементов, как тантал, ниобий и литий.

По интенсивности выноса из почвенного профиля степных ландшафтов редкие элементы можно разделить на две группы. Для одной из них, к которой относятся рубидий, бериллий, тантал и литий, характерен значительный вынос элементов. Элювиально-аккумулятивный коэффициент ($К_{эа}$) этих элементов колеблется от 0,6 до 1,0 (табл. 83). Другая группа элементов, в которую входят олово и ниобий, отличается очень слабым выносом из профиля, $К_{эа}$ для них меняется от 0,7 до 1,1.

Таблица 83

Элювиально-аккумулятивные коэффициенты по генетическим горизонтам почв в аномалиях степных ландшафтов

Группа	Элемент	Горизонт			Примечание
		A	*B*	*BC—C*	
I	Nb	1,0	1,1	0,9—1,0	Элементы из профиля почти не выносятся
	Sn	1,0	1,1	0,7—0,85	
II	Ta	1,0	0,9	0,6—0,8	Элементы из профиля выносятся
	Be	0,85	0,8	0,7—0,6	
	Li	0,7	0,8	0,8—0,9	
	Rb	0,6	0,7	0,7—0,8	

Выделение геохимических аномалий элементов-спутников танталового оруденения в почвах произведено по минимально-аномальным значениям, вероятность появления которых в фоновой совокупности составляет 0,01 (табл. 84). Для тантала за пороговое значение условно принят предел чувствительности анализа, равный 10 *г/т*, что превышает кларк коренных пород примерно в 4—5 раз.

Тантал. В исследованных ландшафтах пегматиты сопровождаются четкими ореолами рассеяния тантала по горизонтам *A* и *B* (рис. 20). Ореолы рассеяния по гумусовому горизонту фиксируются над всеми

пегматитовыми телами и занимают большую площадь по сравнению с аномалиями, выделенными по нижележащему горизонту. В последнем они наблюдаются только над рудными телами с повышенными концентрациями тантала. Форма ореолов рассеяния изометричная и вытянутая согласно простиранию рудных зон. Площадь составляет 0,1—0,4 *км²*. Содержание тантала по горизонту *A* изменяется от 10 до 200 *г/т* при среднем содержании 23 *г/т*, по горизонту B_1 — от 10 до 100 *г/т* и составляет в среднем 18 *г/т* (см. табл. 81).

Таблица 84

Минимально-аномальные значения, определенные с вероятностью 0,01 по горизонту *A* степных ландшафтов

Элемент	Минимально-аномальные значения, *г/т*	Кларк по А. П. Виноградову
Nb	30	—
Sn	7	10
Be	7	6
Li	60	30
Rb	210	60

Большинство аномалий пространственно и генетически связаны с пегматитовыми телами, выходящими на дневную поверхность. Исключение составляют аномалии, расположенные в участках, где зафиксированы также повышенные концентрации ниобия, бериллия и лития за счет эндогенных ореолов слепых рудных тел.

Наибольшее смещение ореолов рассеяния тантала от выхода рудных тел составляет по горизонту *A* — до 300 *м* и по *B* — до 200 *м*.

Ниобий. Выделенные аномалии ниобия, так же как и тантала, приурочены к участкам развития пегматитовых жил и довольно четко повторяют их конфигурацию. Существенным отличием между аномалиями тантала и ниобия является различное пространственное распределение в них металла, а именно: аномалии ниобия, выделенные по горизонту *A*, обычно располагаются внутри аномалий горизонта *B*. Исключением является аномалия, расположенная на участках развития маломощных почв, где непосредственно на коренных породах развит лишь гумусовый горизонт *A*. Форма ореолов, выделенных по горизонту *A*, чаще вытянутая — согласная с простиранием пегматитовых жил, реже изометричная. Площадь меняется от 0,02 до 0,24 *км²*.

Площадь аномалий, оконтуренных по горизонту *B*, составляет 0,1—0,5 *км²*, форма, вытянутая по простиранию рудных зон, иногда в зависимости от рельефа неправильная. Среднее содержание ниобия в ореолах превышает фоновое примерно в 2 раза (см. табл. 81).



Рис. 20. Экзогенные ореолы рассеяния тантала в почвах на месторождении редкометальных пегматитов

1 — аллювий (Q); *2* — осадочно-метаморфические породы (J$_1$); *3* — пегматитовые тела; *4* — ореолы рассеяния тантала по горизонту *A* с содержанием 10—200 *г/т*; *5* — ореолы рассеяния тантала по горизонту *B* с содержанием 10—100 *г/т*

Образование аномалий ниобия, так же как и тантала, обязано наличию в пегматитах танталит-колумбита. Смещение вторичных ореолов ниобия от коренных источников находится в пределах 100—300 *м*.

Олово. Ореолы рассеяния олова, выделенные по горизонтам **A** и *B*, так же как и по другим элементам, накладываются друг на друга с некоторым смещением. Обычно они имеют вытянутую, редко неправильную форму площадью от 0,1 до 0,5 *км*^{2}. Концентрация металла в ореолах изменяется от 6 до 100 *г/т* и в среднем превышает фоновое в 9 раз по горизонту *A* и в 10 раз по горизонту *B* (см. табл. 81 и 85).

В табл. 85 приведены оценки параметров распределения рассматриваемых элементов в почвах в пределах аномалий.

Таблица 85

Оценки параметров распределения редких элементов в почвах степных ландшафтов в экзогенных ореолах танталоносных пегматитов

Компонент	Горизонт	Количество проб	Среднее арифметическое		Среднее квадратическое отклонение		Коэффициент вариаций содержаний, %
			содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний	содержаний, *г/т*	логарифмов содержаний	
Sn	*A*	18	18 ± 7	—	—	—	—
	B	28	20 ± 10	1,157	—	0,351	116,5
Be	*A*	13	29 ± 10	—	22	—	74,8
	B	13	30 ± 10	—	24	—	82,4
Li_2O	*A*	17	320 ± 65	—	134	—	41,9
	B	17	412 ± 140	—	292	—	70,9
Rb	*A*	16	210 ± 30	—	66	—	31,6
	B	16	210 ± 40	—	74	—	35,2

Образование аномалий олова в почвах обязано наличию в пегматитовых жилах и в их экзоконтактовых зонах касситерита. Смещение вторичных ореолов рассеяния от коренных источников составляет 300—500 *м*.

Бериллий. Ореолы рассеяния бериллия в почвах по своей конфигурации в общем близки к ореолам вышеописанных элементов, но они занимают несколько большую площадь — 0,7 *км*^{2}. Коэффициент аномальности, характеризующий соотношение средних содержаний металла в аномалиях и в пределах геохимического фона, равен по гумусовому горизонту 7,25 и по горизонту *B* — 7,5 (см. табл. 82 и 85). Частота встречаемости проб с аномальными содержаниями в ореолах составляет соответственно 84 и 83%.

Образование бериллиевых аномалий в почвах связано с наличием в пегматитах и в их экзоконтактовых зонах берилла и слюд, содержащих изоморфную примесь бериллия.

Максимальная удаленность повышенных концентраций бериллия в почвах от рудных жил достигает 500 *м*.

Литий. Почвы на всей площади пегматитового поля характеризуются высокими содержаниями лития (более 60 *г/т*). Ореол рассеяния с содержанием лития 100 *г/т* занимает примерно $^2/_3$ всей площади участка (рис. 21). Среднее содержание металла в его пределах выше среднего значения фона примерно в 5—6 раз (см. табл. 82 и 85). По горизонту *А* — 95,5% всех содержаний больше 50 *г/т* лития и 77% имеют содержание, равное 100 *г/т* лития; по иллювиальному горизонту эти значения несколько снижаются. Форма литиевых аномалий (с содержанием 100 *г/т*) в общем определяется конфигурацией и направлением рудных зон и контролируется рельефом. Расположение и размеры аномалий, выделенных по горизонту *А* и *В*, между собой совпадают, но по гумусовому горизонту они более расплывчаты и занимают несколько бо́льшую площадь. Наиболее высокие содержания лития (более 200 *г/т*) наблюдаются непосредственно у выхода пегматитовых жил и ниже по склону на расстояние до 200—300 *м*. Вообще же вторичные ореолы рассеяния лития (более 60 *г/т*) распространяются от пегматитовых жил на расстояние до 600—700 *м*.

Основную роль в образовании вторичных ореолов лития играют околожильные слюдистые сланцы, содержание лития в которых выше, нежели в пегматитах; второстепенную — пегматиты, в составе которых имеются литийсодержащие минералы — сподумен и амблигонит.

Рубидий. В пределах пегматитового поля содержание рубидия в почвах в 2 раза выше фонового (см. табл. 82 и 85). Повышенные его концентрации отмечаются обычно над пегматитовыми жилами или в непосредственной близости от них. В пределах литиевого ореола (с содержанием 100 *г/т*) частота встречаемости аномальных проб составляет для рубидия по горизонту *А* — 56% и по горизонту *В* — 55,6%.

Присутствие аномальных содержаний рубидия в почвах объясняется присутствием в пегматитах рубидийсодержащих слюд.

По генетическим особенностям аномалии редких элементов в почвах степных ландшафтов относятся к остаточным (элювиально-делювиальным) ореолам открытого типа (Соловов, 1963). В их фазовом составе имеются два компонента: механический и солевой. Наличие солевых ореолов подтверждается присутствием бериллия, олова, ниобия, тантала и лития в золе растений (пижмы сибирской и горицвета амурского) и повышенных содержаний лития, бериллия, ниобия в поверхностных и грунтовых водах (Грабовская, Астрахан, 1964). Данные шлихового опробования указывают на существование механического компонента в ореолах рассеяния тантала, ниобия, лития и олова.

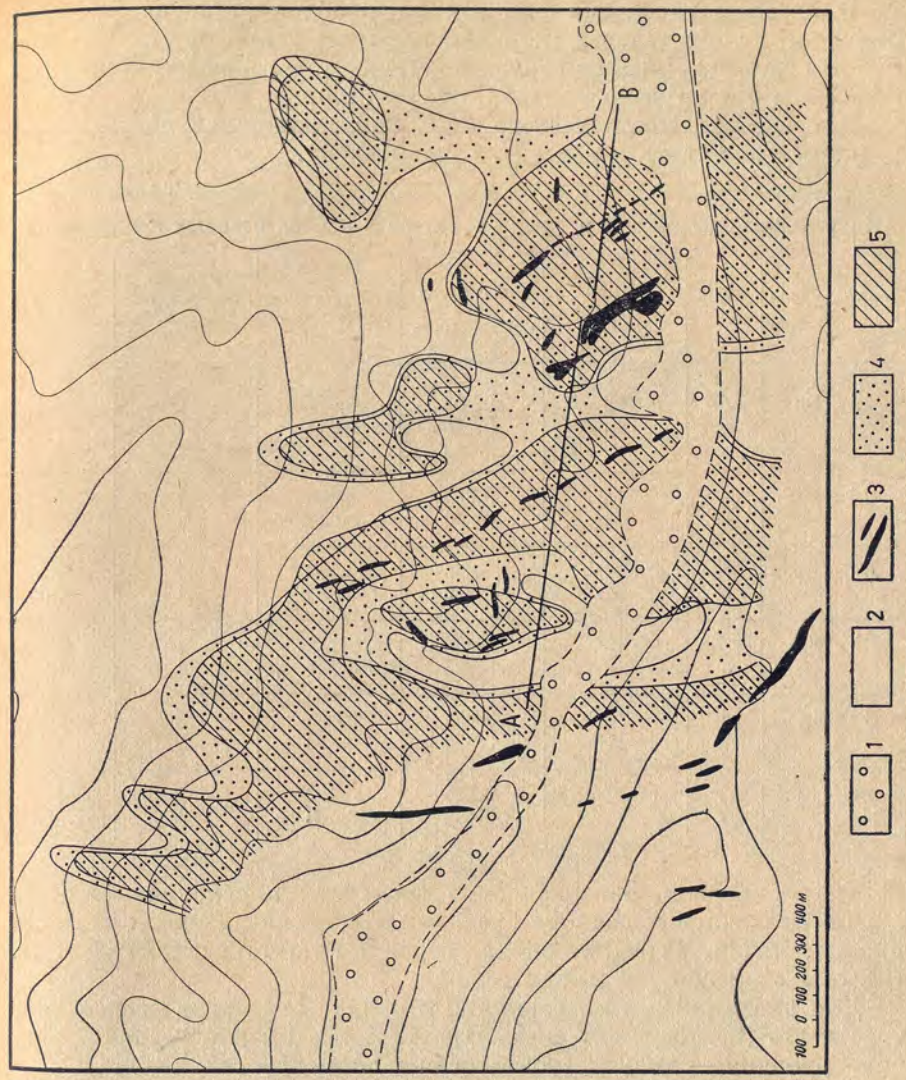


Рис. 21. Экзогенные ореолы рассеяния лития в почвах на месторождении редкометалльных пегматитов

1 — аллювий (Q); *2* — осадочно-метаморфические породы (J$_1$); *3* — пегматитовые тела; *4* — ореолы рассеяния лития по горизонту *А* с содержанием 100—1000 *г/т*; *5* — ореолы рассеяния лития по горизонту *В* с содержанием 100—3000 *г/т*

В ореолах рассеяния степных ландшафтов установлена существенная положительная корреляция содержаний почти по всем рудным элементам как по горизонту A, так и по горизонту B на уровнях 1% и 5% значимости (табл. 86, рис. 22).

В пределах геохимического фона корреляционная связь между редкими элементами в почвах не установлена.

Таблица 86

Корреляция содержаний рудных элементов в почвах степных ландшафтов

Пары коррелируемых элементов	Горизонт	Число степеней свободы	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r	Уровень значимости корреляции, %	Характер связи
Li — Sn	*A*	13	0,752	0,641	1	+
	B	13	0,783	0,641	1	+
Li — Rb	*A*	14	0,655	0,623	1	+
	B	14	0,654	0,623	1	+
Rb — Be	*A*	11	0,625	0,553	5	+
	B	11	0,826	0,683	1	+
Rb — Sn	*A*	9	0,864	0,735	1	+
	B	9	0,815	0,735	1	+
Be — Sn	*A*	11	0,642	0,553	5	+
	B	11	0,553	0,553	5	+
Be — Li	*A*	11	0,566	0,553	5	+
	B	11	0,430	0,553	5	Н. с.

Таким образом, танталоносные пегматиты в условиях степных ландшафтов сопровождаются ореолами рассеяния в почвах: тантала, ниобия, лития, рубидия, олова, бериллия по горизонтам A и B. Все они совмещаются между собой.

Для аномалий лития, бериллия и олова характерна резкая контрастность (коэффициент аномальности более 5); для тантала, ниобия, рубидия — низкая (коэффициент аномальности 2—3).

Для ореолов рассеяния степной зоны характерна следующая горизонтальная зональность: тантал и ниобий образуют аномалии не далее 200—300 *м* от пегматитовых жил; рубидий, олово и бериллий — до 400—500 *м*; литий практически занимает всю площадь рудного поля.

Отличительной особенностью аномалий, связанных с пегматитовыми жилами, является резкое преобладание в почвах лития и рубидия над бериллием и оловом (в 9—18 раз).

По характеру распределения редких элементов в почвенном профиле ландшафты степной зоны резко отличаются от таежных и в меньшей степени — от лесостепных. Основной отличительной особенностью черноземов степей является преобладание процесса относительного накопления элементов в верхней части профиля (преимущественно по горизонтам A, AB и B), при убывании их содержаний с глубиной (горизонты BC и C).

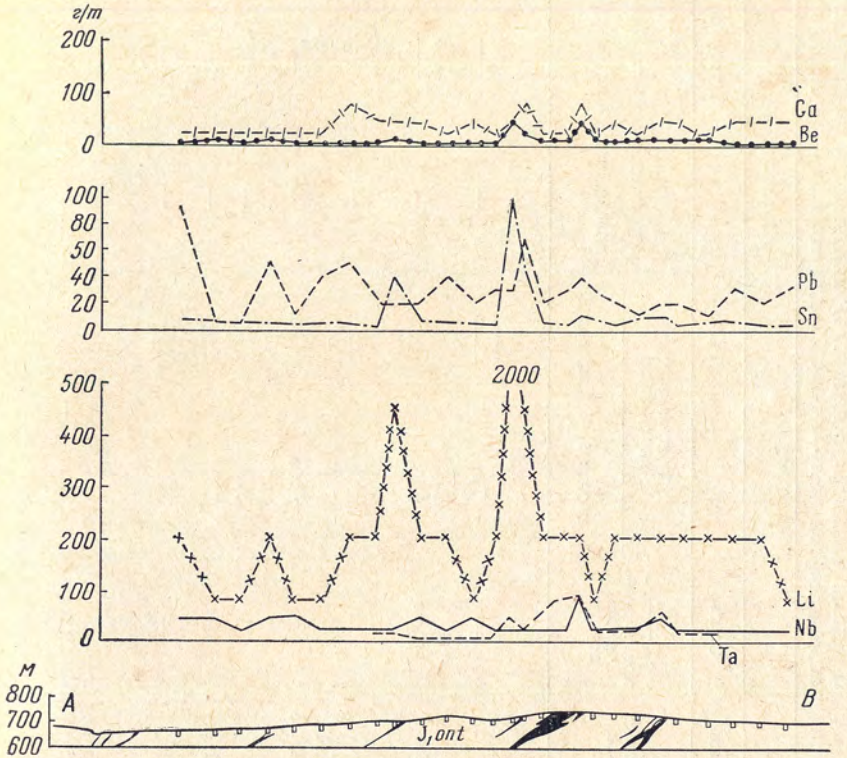


Рис. 22. Графики распределения элементов-индикаторов в почвах по горизонту B на месторождении редкометальных пегматитов

В табл. 87 и 88 для сравнения обобщены данные о средних содержаниях элементов-индикаторов месторождений тантала, а также коэффициентах аномальности и контрастности в почвах различных ландшафтов.

Биогеохимические ореолы рассеяния месторождений тантала

Характеристика биогеохимических ореолов месторождений тантала приводится на примерах апогранитовых и пегматитовых месторождений, расположенных в горной мерзлотно-таежной, лесостепной и степной зонах Сибири, для которых ранее были охарактеризованы эндогенные и экзогенные литогеохимические ореолы. Исключение

Таблица 87

Сопоставление средних содержаний (в г/т) рудных элементов в почвах по аномалиям и геохимическому фону
(для таежных и лесостепных ландшафтов по горизонту *B*, для степных — по *A*)

Элемент	Геохимический фон				Аномалии				
	Тайга		Лесостепь	Степь	Тайга			Лесостепь	Степь
	Осадочно-метаморфические породы	Биотитовые граниты	Биотитовые граниты	Осадочно-метаморфические породы	Танталоносные апограниты		Бериллоносные апограниты	Танталоносные апограниты	Смешанный делювий пегматитов и осадочных пород
					массив 1	массив 2			
Ta	—	—	—	—	70	23 * / 19	—	60 * / 42	23 **
Nb	32	32 **	32 **	19 **	100	80	—	70 * / 31	37 **
Sn	8	11	4	2	170	76 / 22 *	—	30 / 12	20
Be	12	5	2,5 **	4	47 ***	40 ***	11 / 8	16 / 5	30
Li	72	70	44	31	370	280	—	100	150
Rb	200	—	140	120	720	340	—	200	210
Pb	50	30	30	—	360	130 **	—	67 / 30	—

* В числителе дано содержание по аномалии (вероятность 95—99%), в знаменателе — содержание по массиву в целом.

** Подсчет сделан по спектральному полуколичественному анализу.

*** Аномалии характерны только для осадочных пород.

Таблица 88

Сопоставление коэффициентов аномальности и контрастности в почвах различных участков
(по горизонту *B* для таежных и лесостепных ландшафтов, по горизонту *A* — для степных)

Элемент	Таежные ландшафты						Ландшафты лесостепей		Ландшафты степей	
	Апограниты с высокими содержаниями тантала, массив 1		Апограниты с низкими содержаниями тантала, массив 2		Апограниты кларковыми содержаниями тантала		Апограниты с высокими содержаниями тантала		Пегматиты с низкими содержаниями тантала	
	K_a	$K_к$	K_a	$K_к$	K_a	$K_к$	K_a	$K_к$	K_a	$K_к$
Ta	—	7	—	2,3	—	—	—	6	—	2,3
Nb	3,3	1,7	1,8	1,3	—	—	2,2	1,1	2	1,2
Sn	21,0	2,8	7,9	3,7	—	—	3,0	1,9	10	3,3
Be	3,9	1,6	4,4	1,3	2,2	1,1	2,5	1,4	7,5	4,3
Li	5,1	3,7	4,0	2,8	—	—	3,0	1,4	4,7	3,7
Rb	3,6	2,4	—	1,1	—	—	1,6	0,9	1,8	1,1
Pb	7,2	3,6	2,7	2,2	—	—	2,2	1,0	—	—

Примечание. Коэффициент аномальности

$$K_a = \frac{\text{среднее содержание в аномалии}}{\text{среднее значение фона}}.$$

Коэффициент контрастности

$$K_к = \frac{\text{среднее содержание в аномалии}}{\text{минимально-аномальное значение}}.$$

представляет лишь поле танталоносных альбитизированных пегматитов, расположенное в горной мерзлотно-таежной зоне Сибири, которое в настоящей работе охарактеризовано лишь с точки зрения особенностей биогеохимических ореолов танталоносных пегматитов.

Биогеохимические ореолы массива танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, расположенных в зоне горных мерзлотно-таежных ландшафтов

Район массива танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов (см. часть I, глава 2, пример 2) представляет собой среднегорную страну. Водоразделы здесь имеют характер невысоких гребней, хотя иногда встречаются и плоско-выпуклые водоразделы, представляющие собой довольно ровные, слегка наклонные площадки, ограниченные склонами различной крутизны.

Климат района резко континентальный, характеризуется значительными суточными и годовыми колебаниями температур, неравномерным распределением осадков и большой сухостью воздуха.

Климатические условия района предопределяют развитие сезонной и многолетней мерзлоты. Открытые склоны сопок южной экспозиции

за летний период полностью оттаивают и поэтому лишены вечномерзлотного слоя; на пологих склонах (лесистых) северной экспозиции протаивание происходит на глубину 1,5—4,5 *м*, а иногда и меньше, что в основном связано с образованием термоизолирующей мохово-лишайниковой подушки, возникающей в местах с повышенным увлажнением. Наибольшая мощность вечнозеленого горизонта наблюдается по плоским днищам падей и долин.

Растительный покров на 70—80% состоит из лиственницы даурской (*Larix dahurica*) с примесью березы бородавчатой (*Betula verrucosa*), ольхи (*Alnus*), осины (*Populus tremula*). Лиственничные леса характеризуются кустарниковым ярусом из рододендрона и травяным покровом, в котором преобладают вейник (*Calamagrostis Langsdorfii*), мятлик (*Poa pratensis*), и из ягодников брусника (*Vaccinium vitis idaea*), распространенная в основном по пологим восточным и северным склонам сопок. Под пологом этих лесов развиты мерзлотно-таежные щебнистые, частично оподзоленные почвы.

На водоразделах и нагорных террасах преобладают лиственнично-березовые леса с подлеском из поросли березы, лиственницы и рододендрона. В травяном покрове господствуют злаковые травы с незначительной примесью бобовых. Под пологом этих лесов развиваются мерзлотные лугово-лесные щебнистые почвы.

Березовые леса с богатым травяным покровом произрастают главным образом на дерновых мерзлотно-таежных почвах склоновых шлейфов и днищ логов.

Местами по крутым открытым южным склонам сопок встречаются небольшие участки степной растительности (более подробная характеристика которой будет дана ниже при описании биогеохимических аномалий в пределах лесостепной зоны), под которой развиваются мерзлотные торфянисто-глеевые и перегнойно-глеевые почвы; березово-лиственничные леса с примесью ольхи и багульника и наземным покровом из мха, развитые на мерзлотных поверхностно-глеевых почвах; лиственнично-березовые леса с багульником и голубикой на мерзлотных перегнойно-глеевых почвах.

Климатические условия и характер растительности позволяют считать лучшим временем для биогеохимических поисков июнь — сентябрь месяцы.

Распределение микроэлементов в растениях

Биогеохимическая характеристика района месторождения танталоносных апогранитов дается для площади около 320 *км*^{2}, в пределах которой развиты следующие типы магматических и осадочно-метаморфических пород: литионит-амазонит-альбитовые апограниты с промышленным и непромышленным содержанием тантала; биотитовые, лейкократовые и аляскитовые граниты; порфировидные гранодиориты, кварцевые диориты; осадочно-метаморфические породы юрского возраста, представленные алевролитами, аргиллитами с прослоями полимиктовых песчаников, конгломератов и гравелитов.

Характеристика закономерностей распределения микроэлементов непосредственно над массивом танталоносных апогранитов и прилегающей к нему территории приводится по результатам детального биогеохимического опробования по сети 200 × 100 (50) *м*, со сгущением шага опробования над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов до 25 *м*. При этом особое внимание обращено на характер распределения в растениях (особенно в лиственнице — наиболее распространенном древесном растении описываемой зоны) таких элементов, как литий, рубидий, тантал, ниобий, олово, бериллий и свинец, являющихся элементами-индикаторами эндогенных и экзогенных литогеохимических ореолов массивов танталоносных апогранитов.

Рассмотрим отдельно каждый элемент.

Литий является одним из основных и контрастных элементов при биогеохимических поисках месторождений тантала. Содержание его в золе древесных пород как хвойных (лиственница), так и лиственных (береза) над массивом танталоносных апогранитов в 3—4 раза выше, чем в пробах этих же видов растений, отобранных над массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала (табл. 89). Над осадочно-метаморфическими породами литий в растениях был обнаружен только на отдельных участках, пространственно приуроченных к зонам разрывных нарушений. На остальной исследуемой площади (гранодиориты и биотитовые граниты) литий в растениях обнаружен не был.

За критерий минимальных содержаний лития в растениях, характерных только для массива танталоносных апогранитов, принимаются его содержания 40 *г/т* на золу веток и хвои лиственницы и 20 *г/т* на золу веток и листьев березы. Вероятность появления этих содержаний в выборках проб растений с рудных площадей составляет 77—80%, в то время как для совокупностей проб с массива с непромышленным содержанием тантала только 0,05 (см. табл. 89).

Сравнение дисперсии содержаний лития в выборках проб растений с массивов с промышленным и непромышленным содержанием тантала при помощи F-критерия Фишера (Беус и др., 1965$_3$) показало, что дисперсии содержаний лития в растениях над данными массивами существенно различны.

Величина дисперсии содержаний лития в выборках проб растений с рудоносных массивов значительно выше, чем в выборках проб с массива с непромышленным содержанием тантала. Наряду с этим дисперсии в выборках проб растений с двух массивов, для которых характерна только непромышленная тантало-ниобиевая минерализация, однородны, существенного различия между ними не наблюдается (значение вычисленного F для выборок 1,92; табличного F — 3,07). Таким образом, значение величины дисперсии содержаний лития в выборках проб растений, по-видимому, может служить одним из критериев при биогеохимических поисках месторождений тантала.

Таблица 89

Оценки параметров распределения содержаний лития в золе растений в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов

(горные мерзлотно-таежные ландшафты). Закон распределения нормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т
В лиственнице (ветки и хвоя)						
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала	15	20 ± 6	100	10	51,7	2—39
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с промышленным содержанием тантала	33	64 ± 12	1225	35	54,4	7—120
В березе (ветки и листья)						
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала	27	10 ± 2	18,49	4,3	43,0	3—18
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с промышленным содержанием тантала	32	41 ± 8	484	22	54,0	5—77

Непосредственно над массивом танталоносных апогранитов и прилегающей к нему территории в радиусе 1 *км* наблюдается равномерное распределение лития в растениях по данной площади (лиственница, брусника, багульник, береза, рододендрон), что подтверждается отсутствием существенных расхождений в содержании лития в растениях одного вида. Оценка существенности расхождения средних произведена с использованием *t*-критерия Стьюдента (Беус и др., 1965_3).

Здесь необходимо отметить, что на расстоянии более 1 *км* от рудоносного массива содержание лития в растениях резко падает (ниже 1 *г/т*), что характерно и для содержания лития в эндогенных ореолах (падение от 0,113 до 0,01% Li_2O).

Повышенными содержаниями лития в растениях четко выделяется зона экзоконтактовых циннвальдит-топазовых грейзенов (табл. 90), что также обусловлено увеличением концентрации этого элемента в породе.

Выявленная закономерность в распределении содержаний лития в растениях по площади массива и прилегающей к нему территории характерна для всех опробуемых видов растений. Что же касается степени концентрации лития в различных видах растений, то она

Таблица 90

Оценки параметров распределения содержаний лития в золе растений над массивом танталоносных апогранитов

(горные мерзлотно-таежные ландшафты). Закон распределения нормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т
Лиственница (ветки и хвоя)						
Массив танталоносных апогранитов	22	47 ± 8	361	19	40,7	14—80
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	11	97 ± 20	1225	35	35,6	35—160
За пределами массива в радиусе 1 *км*	31	39 ± 6	256	16	30,0	18—70
Брусника (стебли и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	20	95 ± 15	1296	36	38,1	33—160
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	10	190 ± 75	—	—	—	—
За пределами массива в радиусе 1 *км*	25	77 ± 11	256	16	20,1	51—110
Багульник (стебли и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	19	66 ± 10	484	22	33,5	28—100
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	9	140 ± 10	—	—	—	—
За пределами массива в радиусе 1 *км*	21	53 ± 6	121	11	19,5	35—80
Береза (ветки и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	20	28 ± 5	144	12	44,7	6—50
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	12	62 ± 8	225	15	24,0	35—89
За пределами массива в радиусе 1 *км*	32	25 ± 3	49	7	28,7	13—40
Рододендрон (ветки и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	13	34 ± 7	169	13	37,1	12—56
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	10	65 ± 7				
За пределами массива в радиусе 1 *км*	27	28 ± 5	121	11	34,6	11—40

различна (существенного различия средних содержаний лития для березы и рододендрона статистически не было установлено). Наибольшие содержания лития на всех трех выделенных участках (массив апогранитов, зона грейзенов, за пределами массива) отмечаются в золе брусники, затем в порядке их снижения идут багульник, лиственница, рододендрон и береза.

Интересно также отметить, что отношение содержаний лития в различных видах растений почти не изменяется по всей исследованной площади, практически оно постоянно (табл. 91), что очень важно для проведения биогеохимических поисков.

Таблица 91

Отношение содержания лития в различных видах растений к содержанию его в лиственнице

Место отбора проб	Береза бородавчатая	Рододендрон	Багульник	Брусника
Массив танталоносных апогранитов	0,63	0,72	1,4	2,02
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	0,64	0,68	1,44	1,96
За пределами массива в радиусе 1 *км*	0,64	0,72	1,36	1,97
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала	0,65			

Как уже отмечалось выше, характер распределения лития в растениях по исследуемой площади аналогичен характеру его распределения в эндогенных ореолах рассеяния. Увеличение содержаний лития в растениях, как правило, связано с увеличением его концентрации в коренных породах и почве. Путем статистической обработки результатов анализов проб растений, пород и почв установлена четкая корреляционная зависимость содержаний лития в растениях от концентрации его в коренных породах и почве (табл. 92).

Рубидий. Наименьшие содержания рубидия в растениях исследуемого района отмечаются непосредственно над массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с промышленной тантало-ниобиевой минерализацией (табл. 93), а также на тех участках, растения которых характеризуются наиболее высокой концентрацией лития. Между содержаниями этих элементов в древесных породах в условиях характеризуемой ландшафтно-геохимической зоны установлено наличие обратной (отрицательной) корреляционной зависимости. Такая зависимость существует также между содержанием в растениях рубидия, с одной стороны, и бериллия и олова — с другой. Возможно, что в данных условиях препятствием для поступления рубидия в растения является высокая концентрация ими лития.

Таблица 92

Корреляционная зависимость содержания лития в золе растений от содержания его в коренных породах и почве

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости
Лиственница — порода	58	0,48	0,26
Лиственница — иллювиальный почвенный горизонт *B*	24	0,55	0,40
Лиственница — гумусовый горизонт *A*	33	0,43	0,33
Брусника — порода	49	0,48	0,28
Береза — порода	48	0,43	0,28
Багульник — порода	40	0,42	0,31
Багульник — иллювиальный почвенный горизонт	27	0,45	0,38
Рододендрон — порода	38	0,48	0,32

Сравнение значений дисперсий двух выборок проб, отобранных над рудным (танталоносные апограниты) и безрудным (гранодиориты) массивами показало, что дисперсии распределения содержания рубидия в растениях над этими массивами различны (вычисленное F выборок 38,0; F табличное 2,07). Безрудные площади характеризуются более высоким значением дисперсии распределения рубидия в растениях, чем рудные. Между тем дисперсии выборок проб, отобранных с двух безрудных площадей, представленных осадочно-метаморфическими породами и биотитовыми гранитами, однородны, существенного различия между ними не наблюдается (вычисленное F выборок 1,27; F табличное 1,96).

Если за верхний предел содержаний рубидия в лиственнице на рудном массиве принять величину 130 *г/т* на золу веток и хвои лиственницы (см. табл. 93), вычисленную для данной выборки с вероятностью 0,95, то рудная площадь четко оконтурится от безрудной более низкими содержаниями рубидия в растениях.

Непосредственно над массивом танталоносных апогранитов, над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов и за пределами массива в радиусе 1 *км* в растениях отмечаются более или менее одинаковые содержания рубидия, причем это характерно для всех опробуемых видов растений (табл. 94), о чем свидетельствует и сравнение дисперсий и средних содержаний в выборках с использованием F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента.

Что касается степени концентрации рубидия опробуемыми видами растений, то она различна для разных видов растений. Одинаковым содержанием рубидия характеризуются только лиственница и береза.

Наибольшие содержания рубидия отмечаются в золе веток и листьев рододендрона, затем в порядке снижения его концентрации

Таблица 93

Оценки параметров распределения содержания рубидия в золе растений в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты)

Место отбора проб	Количество проб	Закон распределения	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Безрудные площади								
Осадочно-метаморфические породы юрского возраста	286	Л	120 ± 20	—	2,080	0,139	60,3	30—470
Гранодиориты	13	Н	150 ± 50	7569	87	—	56,6	4—300
Биотитовые граниты	48	Л	170 ± 50		2,240	0,162	67,0	38—780
Площади с промышленным содержанием тантала								
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	33	Н	100 ± 10	169	13		13,2	80—120

Таблица 94

Оценки параметров распределения рубидия в золе растений над массивом танталоносных апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты). Закон распределения нормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,01 для граничных значений, г/т
Лиственница (ветки и хвоя)						
Массив танталоносных апогранитов	22	97 ± 5	169	13	12,9	76—120
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	11	98 ± 15	361	19	19,9	64—130
За пределами массива в радиусе 1 *км*	30	90 ± 6	289	17	19,7	58—110
Береза (ветки и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	20	100 ± 7	256	16	15,6	74—130
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	12	100 ± 10	289	17	17,7	81—130
За пределами массива в радиусе 1 *км*	32	93 ± 6	256	16	19,4	57—110
Багульник (стебли и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	19	120 ± 10	729	27	22,1	75—170
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	9	140 ± 10	—	—	—	—
За пределами массива в радиусе 1 *км*	18	110 ± 10	900	30	27,1	58—170
Брусника (стебли и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	20	140 ± 10	961	31	21,5	90—200
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	10	160 ± 20	—	—	—	—
За пределами массива в радиусе 1 *км*	26	120 ± 20	2601	51	42,6	30—210
Рододендрон (ветки и листья)						
Массив танталоносных апогранитов	13	220 ± 30	2025	45	20,4	140—300
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	9	240 ± 40	—	—	—	—
За пределами массива в радиусе 1 *км*	27	200 ± 20	3600	60	30	100—300

в растениях идет брусника, багульник, береза и лиственница. Корреляционной зависимости содержаний рубидия в растениях и почве, растениях и породе не установлено.

Таким образом, распределение рубидия в растениях не может служить оптимальным критерием при поисках месторождений тантала в ландшафтно-геохимических условиях, аналогичных описанным.

Тантал и ниобий в растениях обнаружены только в двух опробуемых видах растений — бруснике и лиственнице — и только над массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с промышленной тантало-ниобиевой минерализацией, а также за пределами массива в радиусе 500—600 *м*. Распределение этих элементов в растениях по площади массива равномерное и составляет 10—50 *г/т* на золу. На остальной площади тантал и ниобий в растениях обнаружены не были. Возможно они концентрируются в опробуемых видах в количестве ниже предела чувствительности [1]. Распределение ниобия в растениях по площади рудного массива совпадает с распределением его в эндогенных геохимических ореолах. Установлена прямая корреляционная связь между содержанием ниобия в лиственнице и бруснике и концентрацией его в породе. Вычисленный коэффициент корреляции $r = 0{,}38$, табличный критический коэффициент для 5%-ного уровня значимости $r = 0{,}22$. Число анализов 47.

Корреляционная зависимость между содержанием тантала в растениях и породе не определена, так как в растениях в большинстве случаев обнаружены только следы этого элемента.

Олово. За фоновые содержания олова в растениях исследуемого района принимаются его содержания в растениях, произрастающих над массивами гранодиоритов и площадями осадочно-метаморфических пород юрского возраста. Для лиственницы это 2—200 *г/т* на золу веток и хвои (табл. 95). Сравнение значений дисперсий и средних содержаний олова в выборках проб растений с этих площадей с использованием статистических критериев позволяет сделать вывод о равнозначности этих величин. Существенного различия в содержании олова в растениях, произрастающих над массивом гранодиоритов и осадочно-метаморфическими породами, также не наблюдается.

Наиболее высокие содержания олова, превышающие фоновые в 6—9 раз, отмечаются в растениях, произрастающих над рудоносным массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов (см. табл. 95). Содержания, превышающие фоновые в 2—3 раза, характерны для растений массива биотитовых апогранитов с оловорудной минерализацией, а также участков, пространственно приуроченных к зонам разрывных нарушений и жильным образованиям.

Во всех рассмотренных случаях увеличение содержания олова в растениях обусловлено повышением его концентрации в коренных породах.

[1] Чувствительность использовавшихся методов определения ниобия и тантала в пробах 10 *г/т*.

Таблица 95

Оценки параметров распределения содержаний олова в золе лиственницы в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов

(горные мерзлотно-таежные ландшафты)

Место отбора проб	Количество проб	Закон распределения	Среднее арифметическое содержание, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,95 для граничных значений, *г/т*
Безрудные площади										
Осадочно-метаморфические породы юрского возраста	33	Л	30 ± 10	—	—	1,480	0,263	0,513	91,2	6—200
Гранодиориты	14	Л	27 ± 8	—	—	1,430	0,117	0,342	55,6	7—97
Биотитовые граниты	59	Л	59 ± 18	—	—	1,770	0,383	0,619	119,0	6—610
Площади с непромышленной тантало-ниобиевой минерализацией										
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	20	Н	70 ± 19	1521	39	—	—	—	56,7	6—134
Площади с промышленной танталовой минерализацией										
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	62	Л	250 ± 30	—	—	2,410	0,153	0,392	49,8	58—1100

Таблица 96

Оценки параметров распределения содержаний олова в золе растений над массивом танталоносных апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты)

Место отбора проб	Количество проб	Закон распределения	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т*
Лиственница (ветки и хвоя)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	63	Л	54 ± 5	—	—	1,730	0,023	0,151	45	30—95
Массив танталоносных апогранитов	34	Л	140 ± 26	—	—	2,150	0,195	0,442	53	27—750
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов . . .	16	Н	220 ± 135	7 290	270	—	—	—	123	<1—660
Береза (ветки и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	47	Н	54 ± 5	1 225	35	—	—	—	65	<1—110
Массив танталоносных апогранитов	33	Л	99 ± 15	—	—	2,00	0,074	0,271	43,0	36—280
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов . . .	20	Л	130 ± 30	6 400	80	—	—	—	1,5	260
Брусника (стебли и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	26	Н	68 ± 10	576	24	—	—	—	5,2	7—110
Массив танталоносных апогранитов	28	Н	320 ± 80	40 000	200	—	—	—	62,2	<1—660
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов . . .	15	Н	480 ± 160	90 000	300	—	—	—	62,4	<1—980
Багульник (стебли и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	10	Н	62 ± 16	—	—	—	—	—	—	—
Массив танталоносных апогранитов	20	Н	190 ± 100	28 900	170	—	—	—	87,7	<1—480
Рододендрон (ветки и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	18	Н	23 ± 5	100	10	—	—	—	43,4	7—39
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов . . .	20	Н	55 ± 2	25	5	—	—	—	9,0	47—63

Над массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала в растениях отмечаются фоновые колебания содержаний олова (2—140 *г/т*), однако средние содержания в 1,5—2 раза выше средних фоновых содержаний.

Непосредственно над массивом танталоносных апогранитов и прилегающей к нему территории в радиусе 1 *км* наблюдается некоторая неравномерность в распределении олова в растениях по площади. Наиболее высокие содержания отмечаются в растениях над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов и северной частью массива, что объясняется повышением концентрации этого элемента в подстилающих породах. Наиболее низкие содержания олова наблюдаются в растениях за пределами массива. Причем такая закономерность устанавливается для всех опробуемых видов растений (табл. 96). Наиболее высокие содержания олова отмечаются в золе брусники, затем в порядке снижения его концентрации в растениях идет багульник, лиственница, береза и рододендрон, причем для лиственницы (ветки и хвоя) и березы (ветки и листья) существенного различия в содержании олова не наблюдается. Травы концентрируют олово хуже, чем древесные породы. При среднем содержании его в лиственнице 70 *г/т* в травах, отобранных с этой же площади, отмечается только 30 *г/т* олова на золу.

Характер распределения олова в растениях исследуемой площади аналогичен характеру его распределения в эндогенных и экзогенных литохимических ореолах. Увеличение содержаний олова в растениях во всех случаях обусловлено повышением его концентрации в коренных породах и почве (иллювиальный горизонт *B*). Установлена корреляционная зависимость содержаний олова в растениях от концентрации его в породе и почвенном иллювиальном горизонте *B*; корреляционной связи содержаний олова в растениях и гумусовом горизонте *A* не наблюдается (табл. 97).

Бериллий. Содержание бериллия по массиву танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов близко к кларковому. В растениях, произрастающих здесь, бериллий также содержится в количествах, близких к фоновым. За последние принимаются содержания бериллия в растениях, произрастающих над массивами биотитовых гранитов и гранодиоритов (табл. 98).

Некоторое повышение содержаний бериллия в растениях над осадочно-метаморфическими породами объясняется наличием зон разрывных нарушений, к которым приурочены участки концентраций бериллия в растениях и породе, а также выносом бериллия за пределы массива танталоносных апогранитов во вмещающие породы зоны экзоконтакта.

Над массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленной тантало-ниобиевой минерализацией содержание бериллия в растениях колеблется от 2,3 до 5,6 *г/т* на золу веток и хвои лиственницы, т. е. фактически равны фоновым. Средние же содержания выше средних фоновых в 1,5—2 раза.

Таблица 97

Корреляционная зависимость содержаний олова в растениях, коренных породах и почве

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Лиственница — порода	66	0,35	0,24	+
Лиственница — иллювиальный почвенный горизонт *B*	53	0,50	0,27	+
Брусника — порода	37	0,45	0,31	+
Брусника — иллювиальный почвенный горизонт *B*	76	0,35	0,22	+
Брусника — гумусовый почвенный горизонт *A*	40	0,17	0,30	Н. с.
Рододендрон — порода	39	0,55	0,30	+
Береза — порода	58	0,81	0,26	+
Рододендрон — гумусовый почвенный горизонт *A*	38	0,21	0,31	Н. с.
Береза — гумусовый горизонт *A*	40	0,17	0,30	» »

Над рудоносным массивом литионит-амазонит-альбитовых апогранитов концентрация бериллия в растениях выше фоновой в 2—2,5 раза (табл. 99). За критерий минимальных содержаний бериллия в растениях, характеризующих рудный массив, принимаются содержания 7 *г/т* бериллия на золу веток и хвои лиственницы (верхний предел фоновых содержаний). Вероятность появления этих содержаний в выборках проб с рудного массива 50%, в то время как для совокупностей проб с фоновых площадей вероятность появления подобных содержаний 5%.

Сравнение дисперсий содержаний выборок проб золы растений с массива танталоносных апогранитов и безрудных площадей с использованием *F*-критерия Фишера показало, что величина дисперсии содержаний в выборках проб с рудного массива значительно выше, чем с безрудных площадей.

Таким образом, величина дисперсии содержаний бериллия в выборках проб растений может служить одним из критериев биогеохимических поисков месторождений тантала.

Непосредственно над массивом танталоносных апогранитов и прилегающей к нему территории в радиусе 1 *км* наблюдается неравномерность в распределении бериллия в растениях. Наиболее высокие содержания отмечаются в растениях над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов и северной частью массива, причем такая закономерность в распределении бериллия по площади характерна для всех опробуемых растений и обусловливается высокой концентрацией этого элемента в экзоконтактовых грейзенах и породах зоны восточного экзоконтакта. Если характер распределения бериллия в различных видах растений по исследуемой площади аналогичен, то степень его концентрации различными видами растений существенно отлична.

Таблица 98

Оценки параметров распределения содержаний бериллия в золе лиственницы в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты)

Место отбора проб	Количество проб	Закон распределения	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации, содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т*
Безрудные, лишенные тантало-ниобиевой минерализации площади										
Осадочно-метаморфические породы юрского возраста (I участок) . .	168	Л+Н	3,3 ± 0,2	—	—	0,510	0,067	0,259	40,9	1,2—9,0
Гранодиориты	18	Л+Н	2,0 ± 0,4	—	—	0,290	0,086	0,293	46,8	0,6—7,0
Биотитовые граниты	95	Л+Н	2,0 ± 0,2	—	—	0,310	0,076	0,280	34,7	0,5—6,0
Площади с непромышленной тантало-ниобиевой минерализацией										
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	42	Н	4,0 ± 0,6	1,0	1,0	—	—	—	26,6	2,3—5,6
Площади с промышленной тантало-ниобиевой минерализацией										
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	52	Л+Н	5,2 ± 1,1			0,720	0,209	0,457	78,4	0,1—29

Оценки параметров распределения содержаний бериллия в золе растений над массивом танталоносных апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты). Закон распределения нормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т*
Лиственница (ветки и хвоя)						
За пределами массива в радиусе 1 *км*	38	3 ± 0,7	7,3	2,7	85,3	1—8
Массив танталоносных апогранитов	29	3 ± 1	8,4	2,9	82,0	<1—8
Зона цинвальдит-топазовых грейзенов	13	9 ± 4	41	6,4	70,0	<1—21
Береза (ветки и листья)						
За пределами массива в радиусе 1 *км*	35	1 ± 0,2	0,36	0,6	60,0	<1—2
Массив танталоносных апогранитов	25	1 ± 0,3	0,81	0,9	90,0	1—3
Зона цинвальдит-топазовых грейзенов	14	3 ± 1	4,0	2,0	66,6	<1—6
Брусника (стебли и листья)						
За пределами массива в радиусе 1 *км*	24	5 ± 1	7,0	2,6	51,6	1—9
Массив танталоносных апогранитов	22	5 ± 1	6,0	2,4	45,1	1—9
Зона цинвальдит-топазовых грейзенов	14	15 ± 4	36	6	40,6	6—24
Багульник (стебли и листья)						
За пределами массива в радиусе 1 *км*	11	2 ± 1	3,0	1,7	85,0	<1—5
Массив танталоносных апогранитов	11	2 ± 1	4,0	2,0	100,0	<1—5
Рододендрон (ветки и листья)						
За пределами массива в радиусе 1 *км*	34	2 ± 1	4,0	2,0	100,0	<1—5
Массив танталоносных апогранитов	12	2 ± 1	8,0	2,8	140,0	<1—7
Зона цинвальдит-топазовых грейзенов	19	5 ± 0,3	0,36	0,6	12,0	4—5

Наибольшие концентрации бериллия обнаружены в бруснике, затем в порядке снижения идут лиственница, багульник, рододендрон и береза. При этом отношение содержаний бериллия в различных видах растений почти не изменяется по всей исследуемой площади (табл. 100), что имеет большое значение для проведения биогеохимических поисков.

Таблица 100

Отношение содержания бериллия в различных видах растений к содержанию его в лиственнице

Место отбора проб	Береза бородавчатая	Рододендрон	Багульник	Брусника
Массив танталоносных апогранитов				
Северная часть массива	0,25	0,67	0,67	1,67
Зона циннвальдит-топазовых грейзенов	0,30	0,70	1,78	
За пределами массива в радиусе 1 *км*	0,33	0,55		1,67
Массив литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с непромышленным содержанием тантала	0,33 0,29	0,67	0,67	1,67

Как уже отмечалось выше, повышение содержания бериллия в растениях обусловливается повышением его концентрации в коренных породах. Для всех опробуемых видов растений установлена прямая корреляционная зависимость содержаний бериллия в растениях от содержаний его в породе. Что же касается почвы, то корреляционная зависимость существует только между содержанием

Таблица 101

Корреляционная зависимость содержаний бериллия в растениях, коренных породах и почве

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Лиственница — порода	49	0,66	0,28	+
Лиственница — почвенный горизонт *B*	48	0,35	0,28	+
Лиственница — почвенный горизонт *A*	70	—0,1	0,23	Н. с.
Рододендрон — порода	36	0,57	0,33	+
Рододендрон — почвенный горизонт *B*	59	0,40	0,25	+
Рододендрон — почвенный горизонт *A*	34	—0,14	0,34	Н. с.
Береза — порода	41	0,40	0,30	+
Береза — почвенный горизонт *A*	45	0,05	0,29	Н. с.
Брусника — порода	34	0,33	0,33	+
Брусника — почвенный горизонт *A*	41	—0,03	0,30	Н. с.

Таблица 102

Оценки параметров распределения содержаний свинца в золе лиственницы в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты). Закон распределения логнормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Среднее квадратическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Коэффициент вариации, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т*
Безрудные площади, лишенные танталониобиевой минерализации							
Осадочно-метаморфические породы . .	165	38 ± 5	1,580	0,429	0,359	69,2	10—150
Гранитоиды . . .	20	48 ± 15	1,610	0,405	0,324	52,3	13—170
Биотитовые граниты	75	42 ± 7	1,650	0,483	0,427	72,1	9—220
Площади с промышленной танталониобиевой минерализацией							
Литионит-амазонит-альбитовые апограниты	69	91 ± 9	1,960	0,065	0,265	40,1	35—300

Таблица 103

Оценки параметров распределения содержаний свинца в золе растений над массивом танталоносных апогранитов
(горные мерзлотно-таежные ландшафты)

Место отбора проб	Количество проб	Закон распределения	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т*
Лиственница (хвоя и ветки)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	58	Н	35 ± 4	256	16	—	—	—	44,8	9—61
Массив танталоносных апогранитов	38	Л	67 ± 7	—	—	1,830	0,026	0,161	7,9	37—120
Циннвальдит-топазовые грейзены	19	Л	120 ± 40	—	—	2,090	0,054	0,233	36,5	48—310
Береза (ветки и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	37	Н	40 ± 6	169	13	—	—	—	32,4	19—61
Массив танталоносных апогранитов	35	Н	58 ± 5	225	15	—	—	—	25,8	33—83
Циннвальдит-топазовые грейзены	20	Н	64 ± 8	289	17	—	—	—	26,6	35—98
***Брусника* (стебли и листья)**										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	22	Н	52 ± 6	225	15	—	—	—	29,0	27—77
Массив танталоносных апогранитов	23	Н	81 ± 7	289	17	—	—	—	21,0	53—110
Циннвальдит-топазовые грейзены	12	Н	93 ± 6	100	10	—	—	—	10,6	77—110
Багульник (стебли и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	10	Н	40 ± 7	—	—	—	—	—	—	—
Массив танталоносных апогранитов	10	Н	61 ± 12	—	—	—	—	—	—	—
Рододендрон (ветки и листья)										
За пределами массива в радиусе 1 *км*	32	Н	31 ± 5	196	14	—	—	—	45,3	8—54
Массив танталоносных апогранитов	10	Н	47 ± 7	—	—	—	—	—	—	—
Циннвальдит-топазовые грейзены	20	Н	50 ± 4	289	17	—	—	—	34,0	22—78

бериллия в растениях и концентрацией его в иллювиальном почвенном горизонте *B*; с гумусовым горизонтом *A* такой зависимости не установлено (табл. 101).

Интересно также отметить существование прямой корреляционной связи между содержанием в растениях олова и бериллия. В данном случае высокие содержания одного элемента в растениях не препятствуют концентрации в них другого.

Свинец. Параметры распределения свинца в растениях исследуемого района приводятся в табл. 102—103.

За фоновые содержания этого элемента в растениях принимаются его содержания в растениях, произрастающих над безрудными площадями, лишенными тантало-ниобиевой минерализации. Сравнение значений дисперсии и средних содержаний свинца в выборках проб с этих площадей позволяет сделать вывод о равнозначности этих величин. Дисперсии содержаний однородны, существенного различия в концентрации свинца растениями, произрастающими над осадочно-метаморфическими породами, массивами гранодиоритов и биотитовых гранитов, не наблюдается.

Над литионит-амазонит-альбитовыми апогранитами с промышленной тантало-ниобиевой минерализацией колебания содержаний свинца в золе растений превышают фон в 1,5—2 раза (см. табл. 102). Величина дисперсии содержаний свинца в выборках проб с рудного массива в несколько раз меньше, чем в выборках проб с безрудных площадей.

Непосредственно над массивом танталоносных апогранитов и прилегающей к нему территории в радиусе 1 *км* наблюдается неравномерность в распределении свинца в растениях по площади. Наиболее высокие содержания его в растениях отмечаются над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов и северной частью массива, причем это характерно для всех опробуемых на этой площади растений (см. табл. 103).

Что же касается степени концентрации свинца различными видами растений, то лучше всего этот элемент усваивается брусникой, затем идет багульник, береза, лиственница и рододендрон, причем существенного различия в содержании свинца в последних четырех видах растений не наблюдается.

Содержание свинца в растениях, как правило, зависит от концентрации его в коренных породах. Установлена прямая корреляционная зависимость содержаний свинца в растениях от содержания его в породе (табл. 104).

К выявленным закономерностям в распределении микроэлементов (Li, Rb, Ta, Nb, Sn, Be, Pb) в растениях описанного района следует также добавить данные геоботанических наблюдений. В районе массива танталоносных апогранитов, над зоной циннвальдит-топазовых грейзенов восточного экзоконтакта массива и прилегающей к нему площади отмечалось чрезвычайно раннее пожелтение и осыпание листьев деревьев, в то время как растения бóльшей части исследуемой территории находились в лучшую пору своего развития.

Таблица 104

Корреляционная зависимость содержания свинца в растениях и коренных породах

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции *r*	Критическое значение *r* на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Лиственница — порода . .	71	0,41	0,23	+
Береза — порода	59	0,40	0,25	+
Багульник — порода . . .	22	0,54	0,43	+
Брусника — порода	37	0,32	0,32	Н. с
Рододендрон — порода . .	41	0,46	0,30	+

Такое раннее пожелтение и осыпание листьев у деревьев над зоной грейзенов, по-видимому, объясняется увеличением концентрации ряда микроэлементов в породе и особенно в почве в количествах, во много раз превышающих их кларковые содержания. Это, в первую очередь, относится к увеличению концентрации фтора за счет разрушения слюд и топаза. Большие концентрации этого элемента очень ядовиты для растений.

Биогеохимические ореолы массива танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, расположенного в зоне лесостепных ландшафтов

Район месторождения (см. часть I, глава 2, пример 1) в орографическом отношении также представляет собой среднегорную страну. Водоразделы имеют плоско-выпуклую форму с отдельными относительно невысокими куполообразными вершинами. Общая крутизна склонов в среднем составляет 15—25°, редко достигает 35—40°.

Речная сеть выражена слабо. Ручьи небольшой протяженности протекают в хорошо разработанных корытообразных долинах. Режим водных потоков неустойчив, дебит ручьев и ключей незначительный, они пополняются водой главным образом за счет обильных дождей и таяния снега. Многолетняя мерзлота носит островной характер и приурочена к пониженным участкам рельефа.

Растительный покров на 50—60% состоит из мелколиственных лесных массивов, чередующихся с участками развития степных растительных группировок; среди древесных пород господствующее положение занимает береза бородавчатая (*Betula verrucosa*). На пологих северных склонах сопок и в местах близкого залегания грунтовых вод обильно произрастает осина (*Populus tremula*), местами образующая труднопроходимые заросли. Из хвойных пород наиболее распространена сосна (*Pinus silvestris*), изредка встречается лиственница (*Larix dahurica*).

Подлесок березовых лесов состоит из молодой поросли березы, осины, иногда ивы и ольхи. Травяной покров хорошо развит и богат разнообразными видами трав, из которых наиболее часто встречаются чина низкая (*Lathyris humilis*), горошек ложносечевичниковый (*Vicia pseudorobus*), вика однопарная (*Vicia unijuga*), прострел (*Pulsatilla patens*), полынь серебристая (*Artemisia sericea*), полынь рассеченная (*Artemisia laciniata*), ирис (*Iris ensata*), василистник (*Thalictrum minus*). Из ягодников — много костяники и земляники.

В сосновых лесах травостой бедный, местами совсем отсутствует. Из трав чаще других встречается чина низкая.

Степная растительность развита главным образом по крутым западным склонам сопок и состоит в основном из пижмы сибирской (*Tanacetum sibiricum*), лапчатки пижмолистной (*Potentilla tanacetifolia*), остролодочника тысячелистного (*Oxytropis myriophylla*), полыни Гмелина (*Artemisia Gmelini*), володушки (*Pupleurum tenuisimum*), василистника малого (*Thalictrum minus*), стеллеры карликовой (*Stellera chameajasme*), патринии сибирской (*Patrinia sibirica*), клевера люпинового (*Trifolium lupinaster*), горошка красивого (*Vicia amoena*).

В долинах рек и ручьев распространена луговая растительность, среди которой наиболее часто встречаются злаковые травы (вейник, мятлик, костер), кровохлебка (*Sanguisorba officinalis*), василистник (*Thalictrum contortum*) и др. Обильно распространена земляника.

Почвенный покров под лесной растительностью представлен горными лесными почвами (см. раздел «Вторичные литогеохимические ореолы рассеяния»).

Распределение микроэлементов в растениях

Биогеохимические ореолы массива танталоносных апогранитов, расположенного в лесостепной зоне, могут быть наиболее четко охарактеризованы на основании изучения особенностей распределения элементов-индикаторов танталоносных апогранитов в стеблях и листьях бобовых трав: вики однопарной, горошка ложносечевичникового, горошка приятного, чины низкой, клевера люпинового и астрагала перепончатого, — распространенных в данной зоне наиболее широко. Эти растения характеризуются одинаковой концентрацией в них лития, рубидия, бериллия, ниобия, тантала и олова, что позволило заменить одно растение другим и получить сопоставимые данные содержаний этих элементов в растениях для всей исследуемой площади. Особое внимание следует обратить на концентрацию растениями лития и рубидия, которые наиболее хорошо усваиваются всеми опробуемыми видами растений. Что касается ниобия, тантала, бериллия и олова, являющихся элементами-индикаторами биогеохимических ореолов в таежных ландшафтах, то в растениях лесостепной зоны в характеризуемом районе они или не были обнаружены, или отмечались их следы.

Литий в характеризуемых ландшафтно-геохимических условиях является одним из основных элементов-индикаторов биогеохимических ореолов месторождений тантала типа литионит-амазонит-альбитовых апогранитов.

За фоновые содержания лития в растениях данного района принимались его содержания в растениях над вулканогенно-осадочными образованиями и биотитовыми порфировидными гранитами, т. е. над безрудными площадями, лишенными тантало-ниобиевой минерализации (табл. 105). Сравнение значений дисперсий и средних содержаний лития в выборках проб растений с этих площадей говорит о том, что распределение элемента над фоновыми площадями однородно, существенного различия в содержании лития в растениях над вулканогенно-осадочными образованиями и биотитовыми порфировидными гранитами не наблюдается.

Над массивами мусковит-альбитовых апогранитов и двуслюдяных порфировидных гранитов в растениях отмечаются более высокие содержания лития, в среднем превышающие фоновые в 1,5—2 раза. Сравнение значений дисперсий содержаний лития в выборках проб с этих площадей и фоновых участков говорит о том, что распределение лития в растениях сравниваемых площадей неоднородно. Дисперсии в выборках проб растений с массивов мусковит-альбитовых апогранитов и двуслюдяных порфировидных гранитов в 1,5—2 раза больше, чем для выборок растений с площадей развития вулканогенно-осадочных пород и биотитовых порфировидных гранитов.

Над рудными танталоносными массивами литионит-амазонит-альбитовых апогранитов концентрация лития в растениях превышает фоновые содержания в 3 раза. Дисперсии в выборках проб золы растений с рудных массивов в 2,5—5,5 раза выше, чем с фоновых площадей, и в 1,5—3 раза выше, чем с массивов мусковитовых и двуслюдяных порфировидных гранитов.

Содержание лития в растениях непосредственно зависит от концентрации его в почве и породе. Установлена прямая корреляционная зависимость содержаний лития в растениях от содержаний его в иллювиальном почвенном горизонте *B*. Зависимости концентраций лития в растениях от содержаний его в гумусовом почвенном горизонте *A* не наблюдается. Корреляционная зависимость концентраций лития в растениях, почве и породе находится на пределе значимости (табл. 106).

Рубидий в данных ландшафтно-геохимических условиях является элементом-индикатором биогеохимических ореолов массивов танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов. За фоновые содержания этого элемента в растениях принимались его содержания в растениях над вулканогенно-осадочными образованиями (табл. 107). Для бобовых трав это 0,003—0,018% рубидия на золу стеблей и листьев.

Растения, произрастающие на площади распространения массивов мусковит-альбитовых апогранитов и двуслюдяных порфировидных гранитов, характеризуются повышенными содержаниями

Таблица 105

Оценки параметров распределения лития в золе бобовых трав в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов
(лесостепная зона)

Закон распределения логнормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебаний содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т
Вулканогенно-осадочные образования	74	1,9 ± 0,5	0,270	0,083	0,284	48,7	0,5—6
Биотитовые порфировидные граниты	41	2,2 ± 0,6	0,340	0,064	0,252	54,8	0,8—8
Мусковит-альбитовые апограниты и двуслюдяные порфировидные граниты . .	61	3,1 ± 0,7	0,490	0,130	0,361	54,8	0,8—13
Амазонит-альбитовые апограниты с литионитом и мусковитом	36	6,6 ± 1,0	0,820	0,189	0,435	73,8	1—34
Амазонит-альбитовые апограниты с литионитом	28	6,3 ± 1	1,800	0,244	0,494	86,4	1—40

Таблица 106

Корреляционная зависимость содержания лития в растениях, почве и породе

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Бобовые травы — порода	25	0,40	0,40	Н. с.
Бобовые травы — почва (средневзвешенные содержания)	30	0,27	0,36	Н. с.
Бобовые травы — иллювиальный горизонт *B*	25	0,48	0,39	+
Бобовые травы — гумусовый горизонт *A*	24	0,27	0,40	Н. с.

Таблица 107

Оценки параметров распределения рубидия в золе бобовых трав в районе массива литионит-амазонит-альбитовых апогранитов
(лесостепная зона)

Закон распределения логнормальный

Место отбора проб	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т	Среднее арифметическое логарифмов содержаний	Дисперсия логарифмов содержаний	Среднее квадратическое отклонение логарифмов содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т
Вулканогенно-осадочные образования . . .	49	80 ± 10	1,880	0,054	0,233	36,5	30—180
Мусковит-альбитовые апограниты и двуслюдяные порфировидные граниты	35	170 ± 30	2,220	0,076	0,275	43,1	60—470
Танталоносные литионит-амазонит-альбитовые апограниты	37	280 ± 60	1,450	0,077	0,278	44,0	100—810

рубидия, превышающими содержание его в растениях на площадях вулканогенно-осадочных пород. Наиболее высокие концентрации рубидия наблюдаются в растениях, произрастающих над рудными массивами танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов. Содержания рубидия здесь выше фоновых в среднем в 3,5 раза (см. табл. 107).

Распределение рубидия в растениях во всех случаях зависит от распределения его в почвах, на которых произрастают данные растения. Установлена прямая корреляционная зависимость содержаний рубидия в растениях от концентрации его в иллювиальном и гумусовом горизонтах почв (табл. 108).

Таблица 108

Корреляционная зависимость содержания рубидия в растениях, породе и почве

Коррелируемые пары	Количество проб	Коэффициент корреляции r	Критическое значение r на 5%-ном уровне значимости	Характер связи
Бобовые травы — гумусовый горизонт A	27	0,65	0,37	+
Бобовые травы — иллювиальный горизонт B	27	0,58	0,37	+

В характеризуемых ландшафтно-геохимических условиях малообводненных лесостепных ландшафтов четкие биогеохимические ореолы других элементов-индикаторов танталоносных апогранитов не проявляются. Несколько иное положение характерно для существенно более обводненных лесостепных ландшафтов.

Биогеохимические ореолы поля танталоносных сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов, расположенного в зоне лесостепных ландшафтов

Характеризуемое поле танталоносных пегматитов представлено замещенными пегматитами сподумен-альбитового и лепидолит-альбитового типа. Серия редкометальных пегматитовых жил прорывает осадочный комплекс юрских отложений, представленных среднегалечными конгломератами с подчиненными прослоями песчаников и сланцев, а также кварцевыми и кварц-полевошпатовыми песчаниками и сланцами.

Описываемое пегматитовое поле расположено на отрогах хребта, разделенных неглубокими долинами (относительное превышение 200—250 *м*) на узкие водораздельные гребни. Склоны гребней слабо расчленены. Днища долин узкие, плоские, часто заболоченные. Гидросеть района развита довольно хорошо. Режим рек и ручьев зависит от количества атмосферных осадков. Наблюдается резкое колебание уровней и расходов.

Для растительного покрова характерно чередование лесных массивов с площадями степных растительных группировок. Облесенность района составляет 50—60%. Из древесных пород наибольшее распространение имеют мелколиственные породы — береза (*Betula*

verrucosa) и осина (*Populus tremula*). В пониженных заболоченных местах рельефа и по берегам рек и ручьев в большом количестве встречаются ольха (*Alnus gluticosa*) и различные виды ив. Местами по водоразделам сопок произрастают сосна (*Pinus silvestris*) и лиственница (*Larix dahurica*), причем сосна в основном развивается над гранитными массивами.

Подлесок лесов, развитых над осадочно-метаморфическими породами алюмосиликатного состава, состоит из поросли вышеперечисленных пород деревьев и кустарников: рододендрона (*Rhododendron dahuricum*), спиреи (*Spireae media*), шиповника (*Rosa*), малины (*Rubus idaes*) и смородины (*Ribes hispidulum*).

В подлеске сосновых лесов над гранитными интрузиями обильно распространен рододендрон, образующий труднопроходимые заросли. Помимо рододендрона часто встречается малина.

Травяной покров лиственных лесов разнообразен по видовому составу. Наиболее распространенными видами трав светлых разреженных березовых лесов являются: вика однопарная (*Vicia unijuga*), вика байкальская (*Vicia baicalensis*), горошек ложносечевичниковый (*Vicia pseudorobus*), чина низкая (*Lathyris humilis*), башмачок крупноцветный (*Cypripedium macranthum*), прострел (*Pulsatilla patens*), полынь рассеченная (*Artemisia laciniata*), ирис мечевидный (*Iris ensata*), мятлики, вейники. Из ягодников в большом количестве встречаются земляника (*Fragaria vesca*) и костяника (*Rubus saxatilis*).

В затемненных и увлажненных березовых лесах с примесью осины и лиственницы наиболее часто встречающимися травами являются ландыш (*Convallaria majalis*), майник (*Majan themum bifolium*), грушанка круглолистная (*Pirola rotundifolia*) и из ягодников — брусника (*Vaccinium vitic idaea*).

В лиственничных лесах водоразделов травостой более редкий и в основном представлен чиной низкой (*Lathyrus humilis*), горошком красивым (*Vicia amoena*), полынью рассеченной (*Artemisia laciniata*), остролодочником тысячелистным (*Oxytropis miriophylla*).

В сосновых лесах травостой очень редкий и очень бедный в видовом отношении. Наиболее часто встречаются камнеломка (*Saxifraga foliosa*), остролодочник тысячелистный, чистотел (*Chelidonum majus*).

Степные группировки растений развиваются по открытым склонам сопок южной и западной экспозиции. Наиболее часто встречаются следующие виды трав: остролодочник тысячелистный, горошек красивый, астрагал перепончатый (*Astragalus membranaceus*), стеллера карликовая (*Stellera chameajasme*), василистник малый (*Thalictrum minus*), эдельвейс (*Leontopodium alpinum*), горицвет амурский (*Adonis amurensis*), ковыль-волосатик (*Stipa capillata*), лилия даурская (*Lilium dahuricum*), саранка (*Lilium tenifolium*), клевер люпиновидный (*Trifolium lupinaster*), лапчатка пижмолистная (*Potentilla tanacetifolia*), полынь Гмелина (*Artemisia Gmelini*), смолевка енисейская (*Jilene jenissea*), гвоздика разноцветная (*Diantus verrucosa*), володушка (*Bupleurum tenuissimum*).

В сырых пониженных участках рельефа по лугам обильно распространены копеечник альпийский (*Hedysarum alpinium palmata*), лабазник дланевидный (*Filipendula palmata*), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaris*), яртышник (*Orchis maculata*), бузульник сибирский (*Gigularia sibirica*), злаковые и осоковые травы. Много брусники и голубики. Часто встречается багульник (*Ledum palustre*).

Почвенный покров характеризуется частой сменой почвенных разностей, что обусловлено сравнительно резкими колебаниями рельефа и чередованием участков лиственных и лиственничных лесов, а также участков развития степной растительности.

Основной почвенной разностью, занимающей 50% характеризуемой территории, являются горные серые лесные почвы с морфологически незаметным процессом оподзоливания. Мощность почв колеблется от 60 до 150 *см*, чаще всего 90 *см*. Механический состав — средний и тяжелый суглинок. Почвы этого типа развиты под лиственными лесами с примесью хвойных пород, на восточных и пологих западных склонах. В падях развиты серые лесные оглеенные почвы.

Около 20% площади заняты бурыми горными лесными почвами, мощностью от 4 *см* на вершинах и крутых склонах и до 60 *см* на пологих склонах сопок. Чаще всего встречаются почвы мощностью 30 *см*. По механическому составу это тяжелый и средний суглинок. Почвы данного типа развиваются под березовыми лесами на вершинах и крутых склонах сопок.

Под травяной растительностью западных склонов сопок развиты горные черноземы, средняя мощность которых около 30 *см*.

Под луговой растительностью развиты мощные (до 150—200 *см*) луговые почвы с четкими горизонтами и чередующимися глинистыми слоями наносного происхождения.

Местами встречаются черноземовидные луговые почвы мощностью более 100 *см*.

Распределение микроэлементов в растениях

Биогеохимическая характеристика ореолов рассеяния пегматитового поля дается по результатам опробования растений и почв по профилям, расположенным вкрест простирания рудных тел от водоразделов к местным элементам депрессий. Расстояние между профилями 100 *м*, между пунктами опробования 25—50 *м*.

Литий. За фоновые содержания лития принимались его концентрации в растениях, произрастающих на фоновых площадях. Для разных видов трав и пород деревьев они различны (табл. 109).

Наибольшая концентрация лития на фоновых площадях отмечается у растений рода василистник (*Thalictrum*), затем в порядке ее снижения идут стеллера карликовая, полынь Гмелина, прострел, горицвет, кипрей болотный (иван-чай), полынь рассеченная, серпуха васильковидная, вика однопарная, горошек ложносечевичниковый, астрагал перепончатый, злаки. Причем стеллера карликовая и горицвет амурский характеризуются одинаковой степенью

Таблица 109

Оценки параметров распределения лития в золе растений на фоновых площадях в районе поля редкометалльных пегматитов

(лесостепная зона)

Закон распределения нормальный

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержание, *г/т* на золу	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т* на золу	Коэффициент вариации содержаний, %
Стебли и листья трав						
Василистник	30	160 ± 30	5184	72	80—280	45,0
Стеллера карликовая	21	12 ± 1	9	3,0	7—17	25,0
Полынь Гмелина	13	11 ± 2	9	3,0	6—16	27,5
Прострел (сон-трава)	32	9 ± 0,5	1	1,0	7—12	11,0
Горицвет амурский	17	7 ± 0,6	1	1,0	5—9	14,3
Кипрей болотный	18	7 ± 0,6	2	1,4	5—9	20,0
Полынь рассеченная	18	7 ± 0,7	3	1,7	4—10	24,3
Серпуха васильковидная	18	7 ± 0,4	2	1,4	5—9	20,0
Вика однопарная	26	6 ± 0,6	2	1,7	3—9	28,3
Горошек ложносечевичниковый	20	6 ± 0,8	2	1,4	3—9	23,3
Астрагал перепончатый	35	6 ± 0,6	3	1,7	3—9	28,3
Вейник	52	4 ± 0,3	1	1,0	2—6	25,0
Ветки и листья деревьев						
Береза бородавчатая (5—10 лет)	41	7 ± 0,4	2	1,4	5—9	20,0
Осина (5—10 лет)	60	7 ± 0,4	2	1,4	5—9	20,0
Береза (30—40 лет)	26	6 ± 0,6	3	1,7	3—9	28,3
Осина (30—40 лет)	30	6 ± 0,4	2	1,4	3—9	23,3
Ива (30—40 лет)	20	6 ± 0,4	2	1,4	3—9	23,3

концентрации данного элемента. То же самое можно сказать и о горицвете, кипрее, полыни рассеченной, серпухе васильковидной, а также вике однопарной, горошке ложносечевичниковом, астрагале перепончатом.

Содержание лития в стеллере карликовой и бобовых травах (горошек, вика, астрагал) достигает разницы в 2 раза, а в стеллере карликовой и злаках (вейник) — в 3 раза.

Непосредственно над пегматитовыми жилами содержание лития в растениях возрастает в среднем в 3—4 раза, а в василистнике в 10 раз (табл. 110).

За критерий минимальных содержаний лития в растениях, характеризующий наличие рудного тела, принимались его содержания на золу стеблей и листьев в василистнике в количестве 300 *г/т* и полыни Гмелина — 20 *г/т*, простреле 15 *г/т*, горицвете, полыни рассеченной, кипрее, серпухе васильковидной, вике однопарной, горошке ложносечевичниковом — 10 *г/т* и вейнике 6 *г/т*. Вероятность появления данных содержаний в выборках проб растений с месторождений равна для василистника, стеллеры карликовой и полыни Гмелина 0,90, горицвета, серпухи, вики и горошка 0,75, вейника 0,60, кипрея и полыни рассеченной 1,00. В это же время для совокупностей проб, отобранных за пределами рудного поля, вероятность появления этих содержаний составляет 0,05, что видно из табл. 109.

Над месторождением, как и на фоновых площадях, отмечается неравномерность в концентрации лития различными видами трав. По степени убывания содержаний данного элемента в растениях опробуемые виды трав располагаются в том же порядке, что и на фоновых площадях. Разница в содержании лития в стеллере карликовой и бобовых травах составляет 1,6 раза, а в стеллере карликовой и злаковых травах — 2,5 раза.

В связи с этим опробование трав с целью определения в них лития должно вестись строго с учетом их видовых особенностей. Опробоваться должен или один и тот же вид растения по всей исследуемой площади, или растения, характеризующиеся одинаковой степенью концентрации лития. Если это сделать невозможно, то при обработке результатов анализов следует пользоваться отношением содержаний лития в различных видах растений или уравнением регрессии.

Величина отношения содержаний лития в различных видах трав остается практически постоянной по всей исследуемой площади (табл. 111), что позволяет в случае опробования различных видов трав произвести пересчет содержаний лития в одном виде на содержание его в другом и получить сопоставимые данные по всей исследуемой площади.

При опробовании трав необходимо помнить и о различии в содержании микроэлементов, в том числе и лития, в различных частях растений. В стеблях и листья трав лития меньше, чем в цветах, и больше, чем в корнях. Помимо этого в различные периоды развития растений потребность в литии также различна. В период цветения

Таблица 110

Оценки параметров распределения лития в золе растений над месторождением в пределах поля редкометальных пегматитов

(лесостепная зона)

Закон распределения нормальный

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т* на золу	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т* на золу	Коэффициент вариации содержаний, %
Стебли и листья трав						
Василистник	22	1500 ± 300	640 000	800	200—2800	53,5
Стеллера карликовая	20	41 ± 4	81	9,0	25—57	22,0
Полынь Гмелина	11	40 ± 8	169	13	19—61	32,5
Прострел	35	32 ± 0,6	3	1,7	29—35	6,3
Горицвет	16	27 ± 5	90	9,5	11—43	40,0
Кипрей болотный	15	27 ± 1	7	2,6	20—33	9,5
Полынь рассеченная	18	27 ± 6	100	10	11—43	36,3
Серпуха васильковидная	16	26 ± 5	80	8,9	10—42	34,2
Вика однопарная	20	25 ± 3	50	7,1	13—37	28,4
Горошек ложносечевичниковый	19	25 ± 4	70	8,3	12—38	32,0
Вейник	23	16 ± 0,6	2	1,4	14—18	8,8
Ветки и листья деревьев						
Береза (5—10 лет)	11	20 ± 9	30	5,5	11—29	27,5
Осина (5—10 лет)	12	19 ± 4	30	5,5	10—28	29,0
Береза (30—40 лет)	15	14 ± 4	50	7,1	2—26	51,0
Осина (30—40 лет)	14	13 ± 5	81	9,0	1—28	69,8
Ива (30—40 лет)	11	17 ± 3	30	5,5	8—26	32,4

Таблица 111

Отношение содержания лития в различных видах трав к содержанию его в вейнике наземном

Место отбора проб	Горошек приятный	Вика однопарная	Серпуха	Полынь рассеченная	Кипрей	Горицвет	Прострел	Полынь Гмелина	Стеллера карликовая	Василистник
Фоновые площади . . .	1,5	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8	2,5	2,8	3,0	40,0
Над месторождением	1,6	1,6	1,6	1,8	1,8	1,8	2,0	2,5	2,5	167,0

наблюдается максимум поступления лития в различные органы растений, особенно в соцветия, поэтому лучшим временем для опробования трав с целью определения в них лития является период их массового цветения.

Ореол повышенных содержаний лития в травах (больше фонового в 2—2,5 раза) четко фиксирует рудные тела. Ширина ореолов около 200 *м*. Центр ореола приходится на пегматитовую жилу, однако при большой крутизне склонов (40—50°) спускается вниз по склону на расстояние до 25 *м*.

Что касается опробуемых древесных пород (береза, осина, ива), то литий содержится в них в одинаковых количествах (см. табл. 109, 110), о чем свидетельствует и сравнение значений дисперсии и средних содержаний лития в выборках проб веток с листьями опробуемых деревьев. Распределение лития в древесных породах одного и того же вида неравномерно. В наибольшем количестве этот элемент концентрируется в листьях деревьев, затем в ветках и коре.

Содержание лития в деревьях зависит от их возраста, степени освещенности солнцем и времени отбора проб. Деревья разного возраста, произрастающие в одинаковых условиях, содержат различные количества лития. Об этом, в частности, свидетельствует статистическое сравнение значений дисперсий и средних содержаний лития в выборках проб веток с листьями, например, березы и осины различного возраста. При этом молодые растения концентрируют литий лучше, чем старые. Так, в листьях березы 4—5-летнего возраста содержится 70 *г/т* лития, а в листьях березы 40—50-летнего возраста 40 *г/т*, в осине соответственно 20 и 12 *г/т*.

В ветках и листьях деревьев, отобранных с освещенной солнцем южной стороны дерева, концентрация лития в 2,5—3 раза выше, чем в ветках и листьях того же дерева, но отобранных с его затененной северной стороны. Таким образом, пробы должны отбираться со всех сторон дерева или кустарника, чтобы избежать влияния степени освещенности растений солнцем.

Наиболее интенсивное поступление лития и наибольшая его концентрация во всех опробуемых древесных породах наблюдается весной. Правда, колебания в его содержании в зависимости от времени года незначительны.

Ореолы повышенных содержаний лития в древесных породах, превышающие местный биогеохимический фон в среднем в 2—3 раза, смещаются относительно рудного тела на 100 *м*, а при большой крутизне склонов на 200—300 *м*. Данное обстоятельство значительно затрудняет интерпретацию биогеохимических данных.

Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод, что в характеризуемых ландшафтно-геохимических условиях при поисках редкометальных пегматитов биогеохимическим методом лучше опробовать травы, чем деревья. Отбор проб можно вести как в сухое время года, так и во время дождей и после их выпадения. Анализ имеющегося материала показывает, что содержание лития в одних и тех же видах растений практически не изменялось под влиянием выпавших осадков.

В условиях характеризуемого района горизонты максимальной концентрации лития в почвах располагаются на различной глубине. В серых лесных почвах в большинстве случаев горизонт накопления располагается на глубине 40—60 *см*, в бурых лесных почвах — на глубине 20—40 *см*, луговых — 50—80 *см*. Рассчитанные для безрудных площадей фоновые содержания лития колеблются от 10 до 50 *г/т*. Над месторождением концентрация лития в почве превышает фоновые в среднем в 2,5 раза и достигает 50—100 *г/т*.

Необходимо отметить влияние выпадающих осадков на содержание лития в почве. Так, после непрерывных недельных дождей концентрация лития в гумусовом горизонте серых лесных скрытоподзоленных почв падает от 100 *г/т* (до дождей) до 50 *г/т* (после дождей). Ореол повышенных содержаний лития в почве, превышающих фон в 2,5 раза, имеет ширину около 300 *м* и четко фиксирует пегматитовые тела. Однако при очень большой крутизне склонов (50—60°) наблюдается его смещение вниз по склону на 20—40 *м*.

Величина отношения содержания лития в травах к содержанию его в почве над месторождением по сравнению с фоновыми площадями изменяется в сторону более интенсивного накопления лития в растениях (табл. 112).

Бериллий. За фоновые содержания бериллия в растениях принимались его концентрации в растениях, произрастающих на фоновых площадях. Для разных видов растений они различны (табл. 113). Однако ряд растений (группа бобовых трав, злаковые травы и др.) содержит одинаковые количества данного элемента в пределах группы. Содержание бериллия по отдельным растениям отличается в среднем в 1,5—9 раз. Например, в стеллере карликовой содержится бериллия в 1,5 раза больше, чем в злаковых травах, и в 7 раз больше, чем в бобовых. В патринии сибирской содержится в 2 раза больше бериллия, чем в злаках, и в 9 раз больше, чем в бобовых травах.

Непосредственно над пегматитовыми жилами концентрация бериллия в растениях возрастает по группе разнотравья в среднем в 2—2,5 раза, по группе злаков в 2,5 раза и по группе бобовых трав,

Таблица 112

Отношение содержаний лития в растениях к содержанию его в почве

Вид растения	Над фоновыми площадями	Над месторождением
Стеллера карликовая	2,5	1,8
Полынь Гмелина	2,7	1,8
Прострел	3,3	2,3
Горицвет	4,5	3,2
Вика однопарная	5,0	3,0
Горошек ложносочевичниковый	5,0	3,0
Василистник	0,19	0,05

являющихся максимальными концентраторами бериллия, в 7 раз (табл. 114). Содержание бериллия над рудными площадями по отдельным группам трав отличается в среднем в 1,5—3 раза.

Таким образом, при биогеохимических поисках опробование трав на бериллий должно также вестись строго с учетом видовых особенностей растений. Величина отношения содержания бериллия в различных видах трав практически не изменяется по всей исследуемой площади, исключение составляют только бобовые травы (табл. 115).

Таблица 115

Отношение содержания бериллия в различных видах трав к содержанию его в патринии сибирской

Место отбора проб	Пижма сибирская	Стеллера карликовая	Лапчатка пижмолистная	Василистник малый	Злаковые травы	Бобовые травы
На фоновых площадях	0,75	0,75	0,63	0,50	0,50	0.11
Над месторождением	0,83	0,83	0,66	0,50	0,55	0,33

Данное обстоятельство позволяет при обработке результатов анализов производить пересчет содержаний бериллия в одном виде трав на содержание его в другом опробуемом растении. Это, в свою очередь, способствует получению сопоставимых данных по концентрации бериллия различными видами трав по всей исследуемой площади. Исключение составляет группа бобовых трав.

Таблица 113

Оценки параметров распределения бериллия в золе растений на безрудной площади в районе поля редкометальных пегматитов лесостепной зоны

(закон распределения нормальный)

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т на золу	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т на золу
Бобовые травы						
Клевер люпиновый	18	0,9 ± 0,04	$64 \cdot 10^{-4}$	0,08	9,0	0,8—1,0
Горошек приятный	25	0,9 ± 0,04	$81 \cdot 10^{-4}$	0,09	10,0	0,7—1,1
Горошек ложносочевичниковый . . .	31	0,9 ± 0,04	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,10	11,0	0,7—1,1
Астрагал перепончатый	21	0,9 ± 0,04	$81 \cdot 10^{-4}$	0,09	10,0	0,8—1,0
Вика однопарная	35	0,9 ± 0,04	$81 \cdot 10^{-4}$	0,09	10,0	0,8—1,0
Чина низкая	21	0,9 ± 0,04	$81 \cdot 10^{-4}$	0,09	10,0	0,8—1,0
Злаковые травы						
Вейник наземный	36	4 ± 0,3	0,64	0,8	20,0	3—5
Вейник Лангсдорфа	41	4 ± 0,3	1,0	1,0	25,0	2—6
Мятлик луговой	30	4 ± 0,3	0,81	0,9	22,5	2—6
Разнотравье						
Полынь рассеченная	28	4 ± 0,3	0,81	0,9	22,5	2—6
Кровохлебка лекарственная . . .	34	4 ± 0,4	1,0	1,0	25,0	2—6
Василистник малый	31	4 ± 0,3	0,81	0,9	22,5	2—6
Полынь Гмелина	31	4 ± 0,4	1,44	1,2	30,0	2—6
Ирис мечевидный	15	4 ± 0,4	0,81	0,9	22,5	2—6
Прострел (сон-трава)	31	5 ± 0,8	0,81	0,9	18,0	4—6
Лапчатка пижмолистная	22	5 ± 0,4	0,81	0,9	18,0	3—7
Горицвет амурский	48	5 ± 0,3	1,0	1,0	20,0	3—7
Стеллера карликовая	34	6 ± 0,4	1,69	1,3	21,6	4—8
Пижма сибирская	20	6 ± 0,4	0,81	0,9	15,0	4—8
Эдельвейс	20	6 ± 0,4	1,0	1,0	16,7	4—8
Патриния	20	8 ± 0,6	1,69	1,3	16,2	5—11

Таблица 114

Оценки параметров распределения бериллия в золе растений непосредственно над месторождением в пределах поля редкометальных пегматитов лесостепной зоны
(закон распределения нормальный)

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, г/т на золу	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебаний содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, г/т на золу
Бобовые травы						
Клевер люпиновый	16	6 ± 0,04	0,49	0,7	11,7	5—7
Горошек приятный	17	6 ± 0,8	2,4	1,55	25,8	4—8
Горошек ложносечевичниковый	19	6 ± 0,7	2,0	1,40	23,3	4—8
Астрагал перепончатый	14	6 ± 0,5	0,8	0,9	15,0	4—8
Вика однопарная	23	6 ± 0,7	2,4	1,55	25,8	3—9
Чина низкая	18	6 ± 0,5	1,2	1,1	18,3	4—8
Злаковые травы						
Вейник наземный	16	10 ± 0,6	1,3	1,14	11,4	8—12
Вейник Лангсдорфа	22	10 ± 0,5	2,3	1,52	15,2	7—13
Мятлик луговой	34	10 ± 0,8	2,1	1,45	14,5	8—12
Мятлик болотный	16	10 ± 0,3	0,4	0,63	6,3	9—11
Разнотравье						
Василистник малый	20	9 ± 0,6	1,5	1,22	13,5	7—11
Полынь Гмелина	28	9 ± 0,6	2,7	1,64	18,2	6—12
Ирис мечевидный	20	10 ± 0,5	1,4	1,20	12,0	8—12
Прострел (сон-трава)	66	9 ± 0,4	2,4	1,55	17,2	7—11
Полынь рассеченная	20	9 ± 0,4	0,4	0,63	7,0	8—10
Кровохлебка лекарственная	14	9 ± 0,4	0,6	0,77	8,5	8—10
Смолевка енисейская	16	9 ± 0,4	0,6	0,77	8,5	8—10
Лапчатка пижмолистная	23	12 ± 0,8	3,3	1,81	15,7	9—15
Эдельвейс	17	12 ± 1,0	4,0	2,0	16,7	9—15
Горицвет амурский	39	12 ± 0,5	2,9	1,70	14,2	9—15
Стеллера карликовая	35	15 ± 0,7	4,4	2,10	14,0	12—18
Пижма сибирская	18	15 ± 1,0	5,4	2,3	15,3	8—22
Патриния сибирская	14	18 ± 3,0	17,6	4,2	23,4	13—25

Необходимо подчеркнуть, что не только различные группы трав характеризуются неодинаковым содержанием в них бериллия, но и в одном и том же растении распределение данного элемента между отдельными его частями неравномерно. Наибольшие количества бериллия содержат корни трав, затем идут соцветия, и наименьшие количества его отмечаются в стеблях и листьях.

Следовательно, опробоваться всегда должен один и тот же орган растений.

Содержание бериллия в различных частях трав (г/т на золу)

Растения и их части

Стеллера карликовая	
стебли	12
соцветия	18
корневая система	25
Копеечник альпийский	
стебли и листья	5
соцветия	8
корневая система	16
Кровохлебка лекарственная	
стебли и листья	4
соцветия	6
Горицвет амурский	
стебли и листья	3
корневая система	6
Лапчатка пижмолистная	
стебли и листья	3
соцветия	5
корневая система	7

В различные периоды жизни трав (фазы развития) последние потребляют неодинаковые количества бериллия. Прострел, лапчатка пижмолистная, пижма сибирская, бобовые и злаковые травы в наибольшем количестве накапливают бериллий в период цветения, горицвет — в период созревания семян. Стеллера карликовая характеризуется хорошим усваиванием этого элемента в течение всего цикла своего развития. Выделить какую-либо определенную фазу развития, характеризующуюся наибольшей концентрацией бериллия данным видом растения, очень трудно. Наилучшим временем для опробования растений с целью определения в нем бериллия является период наиболее массового их цветения.

Ореол повышенных содержаний бериллия в растениях, превышающих фон по бобовым травам в 7 раз, злаковым и разнотравью в 2—2,5 раза, четко фиксирует рудные тела. Ширина ореола около 200 *м*. Центр ореола приходится на пегматитовую жилу. Однако при склоне крутизной 40—50° ореол может сместиться на 20—25 *м* вниз по склону.

Из опробуемых древесных пород (береза бородавчатая, осина, ива и лиственница) бериллий лучше всего концентрируется лиственницей. Причем во всех опробуемых древесных породах максимальные

содержания бериллия отмечаются в листьях, затем в ветках и коре деревьев.

Содержание бериллия в деревьях различных пород

(в *г/т* на золу)

Береза бородавчатая (40—50 лет)	
листья	0,6
ветки	2,6
кора	1,5
Лиственница даурская (40—50 лет)	
листья	8
ветки	7
кора	5
Осина (40—50 лет)	
листья	6
ветки	5
кора	2

Кроме этого, на концентрацию бериллия древесными породами оказывает влияние возраст растений, степень освещенности их солнцем и время отбора проб. Наиболее хорошо концентрируют бериллий молодые растения. Содержание бериллия в листьях поросли березы (4—5 лет) составляет 12 *г/т*, а в листьях березы 40—50 лет, растущей рядом, — 6 *г/т*. В ветках и листьях (хвое), отобранных с южной стороны дерева, содержится бериллия в 2—2,5 раза больше, чем в ветках, взятых с северной затемненной стороны.

Наиболее хорошо усваивается бериллий всеми породами деревьев весной, летом наблюдается некоторый спад, осенью усиливается поступление, однако колебания эти весьма незначительны.

Отрицательной стороной опробования деревьев в исследуемых ландшафтно-геохимических условиях является большая величина смещения их биогеохимических ореолов. Ореол повышенных содержаний бериллия в древесных породах, превышающих фон в 2 раза и более, смещается относительно рудного тела на 300—400 *м*. Это объясняется большой разветвленностью корневой системы опробуемых деревьев в горизонтальном направлении.

Влияние выпадения атмосферных осадков на содержание бериллия в растениях обнаружено не было.

Необходимо также отметить изменение величины отношения содержания Be : Li в растениях. Над месторождением наблюдается наиболее интенсивное поступление в растения лития, особенно это характерно для василистника. Исключение составляют только бобовые травы, в которых наиболее интенсивно над месторождением накапливается бериллий (табл. 116).

Величина отношения содержания бериллия в растениях к содержанию его в почве над месторождением изменяется по сравнению с фоновыми площадями в сторону более интенсивного его накопления в почве. Исключение составляют бобовые травы, в которых накопление бериллия, в случае наличия рудных жил, идет более интенсивно, чем в почве (табл. 117).

Тантал и ниобий были обнаружены только в вике однопарной, вейнике, хвоще и хвое лиственницы (чувствительность определения тантала 5 *г/т*). Непосредственно над месторождением концентрация

Таблица 116

Отношение содержания бериллия к литию в различных видах растений

Вид растения	На фоновых площадях	Над месторождением
Стеллера карликовая	1 : 2	1 : 2,7
Горицвет амурский	1 : 1,4	1 : 2,3
Полынь Гмелина	1 : 2,8	1 : 4,4
Прострел	1 : 1,8	1 : 3,5
Злаковые травы	1 : 1	1 : 1,9
Бобовые травы	1 : 6,6	1 : 4,1
Василистник	1 : 40	1 : 155

Таблица 117

Отношение содержания бериллия в растениях к содержанию его в почве

Вид растения	На фоновых площадях	Над месторождением
Бобовые травы	11,1	8,2
Злаковые травы	2,5	5
Василистник	2,5	5,5
Лапчатка пижмолистная	2,0	4,2
Стеллера карликовая	1,7	3,3
Патриния сибирская	1,2	2,7
Горицвет амурский	1,7	4,2

этих элементов в растениях увеличивается в среднем по танталу в 6 раз, ниобию в 3 раза и составляет соответственно 11—61 *г/т* и 10—50 *г/т* на золу стеблей и листьев и хвои лиственницы.

Величина отношения Be : Li : Ta в случае наличия рудных тел изменяется по сравнению с фоновыми площадями в сторону наиболее интенсивного накопления в растениях тантала (табл. 118).

Таблица 118

Отношение содержания бериллия, лития и тантала в растениях

Вид растения	На фоновых площадях	Над месторождением
Вейник Лангсдорфа	1 : 1 : 1,25	1 : 1,9 : 3,4
Вика однопарная	1 : 6,6 : 5,5	1 : 4,1 : 8,7

Ореол повышенных содержаний тантала и ниобия в травах точно фиксирует рудное тело. Центр ореола приходится на пегматитовую жилу. Ширина ореола около 200 *м*. В случае опробования древесных пород ореол максимальных содержаний тантала в ветках и хвое смещается вниз по склону на 400—500 *м*.

Характерно, что в почвах при данной чувствительности определения тантал обнаружен не был. Ниобий был найден только в оторфованных почвах в верхнем горизонте *А*. Можно предположить, что данный элемент обнаруживает склонность к кислым средам, богатым органикой. Ниобий часто отмечается в хвоще, являющемся показателем кислых заболоченных почв.

Таким образом, в обоих примерах, характеризующих биогеохимические ореолы месторождений тантала в пределах лесостепной зоны, более четкую информацию о биогеохимических особенностях ореолов дает травянистая растительность. Отметим также, что как в первом, так и во втором случае концентрация элементов-индикаторов в растениях по отношению к почве не наблюдается. Исключением (во втором примере) может служить тантал, определимые содержания которого были обнаружены только в травах, растущих над танталоносными пегматитами.

Биогеохимические ореолы поля танталоносных мусковит-альбитовых и сподумен-альбитовых пегматитов, расположенного в зоне степных ландшафтов Сибири

Описываемое поле танталоносных пегматитов, эндогенные и экзогенные литогеохимические ореолы которого описаны в предыдущих разделах, расположено на склоне невысокого хребта.

Относительные превышения составляют 150—160 *м*. Гидросеть развита хорошо. Режим ручьев тесно связан с количеством выпадающих атмосферных осадков.

Климат района континентальный. Отличается холодной зимой и жарким летом, значительными суточными и годовыми амплитудами температур.

Отрицательные среднегодовые температуры, глубокое промерзание и маломощный снеговой покров обусловливают наличие островной многолетней мерзлоты, приуроченной к пониженным участкам рельефа.

В растительном покрове преобладает степная растительность, характеризующаяся чередованием участков развития танацетовой, полынной и злаковой степи. Господствующее положение танацетовой степи принадлежит пижме сибирской (*Tanacetum sibiricum*), полынной — полыни холодной (*Artemisia frigida*), полыни Гмелина (*Artemisia Gmelini*), полыни заменяющей (*Artemisia commutata*), в злаковой — ковылю (*Stipa capillata*), пырею (*Agropirum pseudoagropirum*), тонконогу (*Koeleria*), мятлику (*Poa attenuata*). Помимо перечисленных выше видов часто также встречаются лапчатка пижмолистная (*Potentilla tanacetifolia*), лапчатка бесстебельная (*Potentilla ocaulis*),

горицвет амурский (*Adonis amurensis*), астра алтайская (*Aster altaicus*) и др.

По долинам рек, по падям и низинам распространена луговая и болотная растительность.

Среди луговой растительности наиболее распространены осоковые, злаковые и разнотравные ассоциации. Болотная растительность в основном состоит из осоковых ассоциаций.

Особенности почв участка были охарактеризованы выше при описании вторичных литогеохимических ореолов рассеяния танталоносных пегматитов.

Распределение микроэлементов в растениях

Характеристика биогеохимических ореолов пегматитового поля приводится по результатам изучения наиболее распространенных в районе трав: пижмы сибирской (*Tanacetum sibiricum*), горицвета амурского (*Adonis amurensis*), полыни холодной (*Artemisia frigida*), полыни Гмелина (*Artemisia Gmelini*), ковыля (*Stipa capillata*) [1].

Литий был обнаружен во всех видах трав, опробуемых в данных ландшафтно-геохимических условиях (табл. 119). Непосредственно над месторождением концентрация лития в растениях возрастает в среднем по злаковым травам (ковылю) в 5 раз, пижме и полыни — в 4 раза и василистнику — в 8 раз. Ореол повышенных содержаний лития в травах довольно четко фиксирует пегматитовые тела.

Таблица 119

Оценки параметров распределения лития в золе растений в районе поля танталоносных пегматитов степной зоны

(закон распределения нормальный)

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т* на золу	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т* на золу
На фоновых площадях						
Пижма сибирская	35	$7 \pm 0{,}6$	3	1,7	24,0	4—10
Полынь холодная	31	$7 \pm 0{,}6$	3	1,7	24,0	4—10
Ковыль	49	4 ± 3	1	1	25,0	1—5
Василистник . .	36	180 ± 7	576	24	13,3	140—220
Над месторождением						
Пижма сибирская	14	30 ± 3	24	4,9	16,4	22—38
Полынь холодная	34	$32 \pm 0{,}6$	3	1,7	5,3	29—35
Ковыль	25	20 ± 4	100	10	50,0	4—36
Василистник . .	36	1500 ± 300	810 000	900	66,6	15—3000

[1] Растительные пробы отбирались по сети 300 × 100 *м*.

Величина отношения содержаний лития в различных видах трав остается практически постоянной по всей исследуемой площади. Исключение составляет только василистник, для которого в случае наличия редкометальной минерализации наблюдается усиленное накопление лития (табл. 120).

Таблица 120

Отношение содержаний лития в различных видах трав к содержанию его в ковыле

Место отбора проб	Пижма сибирская	Полынь холодная	Василистник малый
Фоновые площади	1,7	1,7	45,0
Рудные площади	1,5	1,6	75,0

Следует подчеркнуть, что закономерности в распределении лития в растениях в пределах полей редкометальных пегматитов одинаковы для условий степной и лесостепной зон Сибири.

Бериллий хорошо концентрируется всеми видами трав. Фоновые содержания бериллия в травах в условиях степной зоны Сибири (табл. 121) такие же, как и в лесостепной зоне. Непосредственно над месторождением концентрация бериллия в травах возрастает в среднем в 2,5—3 раза.

Таблица 121

Оценки параметров распределения бериллия в золе растений в пределах поля редкометальных пегматитов (степной зоны)

(закон распределения нормальный)

Вид растения	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т* на золу
На фоновых площадях						
Пижма сибирская	46	6 ± 0.5	3,0	1,7	28,4	3—9
Горицвет амурский	44	6 ± 0,5	3,0	1,7	28,4	3—9
Полынь холодная	38	6 ± 0,3	1,0	1,0	16,7	5—7
Полынь Гмелина	21	4 ± 0,5	1,0	1,0	25,0	2—6
Ковыль	94	4 ± 0,2	1,0	1,0	25,0	2—6
Над месторождением						
Пижма сибирская	31	19 ± 0,4	100	10	52,7	3—35
Горицвет амурский	30	18 ± 0,4	100	10	55,6	2—34
Полынь холодная	20	18 ± 0,4	64	8	44,6	5—31
Полынь Гмелина	16	12 ± 0,2	25	5	41,7	4—20
Ковыль	15	12 ± 0,2	25	5	41,7	4—20

За предел нижних аномальных содержаний бериллия в травах принимались содержания для злаковых трав, пижмы сибирской и горицвета — 9 *г/т* и полыни холодной 7 *г/т* на золу их стеблей и листьев. Вероятность появления этих содержаний в выборках проб с рудных площадей соответственно составляет 0,80 и 0,94. На фоновых площадях возможность появления подобных содержаний составляет только 0,05 (см. табл. 121).

Ореол повышенных содержаний бериллия в травах довольно четко фиксирует пегматитовые тела. Отношение содержания бериллия в различных видах растений остается постоянным по всей исследуемой площади (табл. 122).

Таблица 122

Отношение содержания бериллия в различных видах растений к содержанию его в пижме сибирской

Место отбора	Горицвет амурский	Полынь холодная	Полынь Гмелина	Ковыль
Фоновые площади	1,0	1,0	0,67	0,67
Рудные площади	0,95	0,95	0,63	0,63

Наибольшие содержания бериллия отмечаются в корнях, затем идут соцветия, стебли и листья.

Содержание бериллия в различных частях трав
(в *г/т* на золу)

Пижма сибирская	
корни	42
соцветия	35
листья и стебли	19
Горицвет амурский	
корни	45
соцветия	38
листья и стебли	18
Полынь Гмелина	
корни	30
соцветия	25
стебли и листья	12

Лучше всего бериллий поглощается всеми опробуемыми видами трав в фазу цветения и образования семян.

Таким образом, закономерности распределения бериллия в травах в пределах поля танталоносных пегматитов в условиях степной зоны Сибири аналогичны таковым в условиях лесостепной зоны.

Величина отношения содержания бериллия к литию в растениях в случае наличия рудных тел изменяется в сторону наиболее интенсивного накопления в них лития (табл. 123), что также отмечалось и для условий лесостепной зоны.

Тантал и ниобий на фоновых площадях содержатся в количестве около 3 *г/т* тантала и 10 *г/т* ниобия на золу стеблей и листьев пижмы сибирской. Над месторождением содержание этих элементов в растениях увеличивается в среднем в 3—4 раза (табл. 124).

За критерий минимальных содержаний данных элементов в пижме сибирской, характеризующих наличие пегматитовых тел, принимались содержания для тантала 4 *г/т* и ниобия 20 *г/т*. Вероятность

Таблица 123

Отношение содержания бериллия к литию в растениях

Вид растения	На фоновых площадях	Над месторождением
Пижма сибирская	1 : 1,17	1 : 1,58
Полынь холодная	1 : 1,17	1 : 1,80
Ковыль	1 : 1	1 : 1,67

Таблица 124

Оценки параметров распределения тантала и ниобия в золе пижмы сибирской над месторождением в пределах поля редкометальных пегматитов (степная зона). Закон распределения нормальный

Элемент	Количество проб	Среднее арифметическое содержаний, *г/т*	Дисперсия содержаний	Среднее квадратическое отклонение содержаний	Коэффициент вариации содержаний, %	Пределы колебания содержаний с вероятностью 0,05 для граничных значений, *г/т* на золу
Ta	20	$5 \pm 0{,}3$	0,36	0,6	12,0	4—6
Nb	20	40 ± 10	25	5	12,5	32—48

появления этих концентраций в выборках проб с рудных площадей составляет по танталу 0,95 и ниобию 0,98, в то время как на фоновых площадях возможность появления подобных содержаний только 0,05.

Ореол повышенных концентраций данных элементов в пижме сибирской хорошо фиксирует рудные тела. Площадь биогеохимических ореолов тантала больше площади эндогенных ореолов.

Величина отношения содержаний Be : Li : Nb : Ta в растениях над месторождением в условиях степной зоны изменяется в сторону более интенсивного накопления ими лития, ниобия и тантала по сравнению с бериллием.

Обобщая имеющиеся данные, характеризующие распределение типоморфных элементов месторождений тантала апогранитового и пегматитового типа в пределах биогеохимических ореолов рассеяния, необходимо подчеркнуть единый, в общем, парагенезис элементов-индикаторов, характеризующий различные типы танталовых месторождений, расположенных в разных ландшафтных зонах (табл. 125). Это практически комплекс элементов, накапливающихся в рудах или в эндогенных геохимических ореолах месторождений собственно танталовых руд.

В то же время в пределах различных ландшафтно-геохимических зон комплекс растений, рекомендуемых для опробования в качестве

Таблица 125

Биогеохимические индикаторы месторождений тантала

Ландшафты	Растения — геохимические индикаторы, рекомендуемые для опробования	Химические элементы-индикаторы
Горные мерзлотно-таежные	**Лиственница**, брусника, багульник, береза, рододендрон	Li, Rb, Be, Sn, (Ta), Pb
Лесостепные	**Бобовые травы**, василистник, полынь Гмелина, горицвет амурский, стеллера, прострел, кипрей болотный, полынь рассеченная, серпуха васильковидная, вейник. В малообводненных ландшафтах — **бобовые травы**	Li, Rb, Be, (Ta, Nb)
Степные	**Пижма сибирская**, полынь Гмелина, василистник, горицвет амурский, полынь холодная	Li, Be, (Ta, Nb)

Примечания. 1. Жирным шрифтом выделены наиболее распространенные растения — геохимические индикаторы, разрядкой — растения, свойственные как лесостепным, так и степным ландшафтам. В скобки заключены трудноопределимые элементы-индикаторы.

2. Свинец — дополнительный индикатор для некоторых массивов апогранитов.

геохимических индикаторов, существенно меняется (см. табл. 125). В этом направлении целесообразно продолжать методические работы.

В заключение необходимо отметить, что за исключением заболоченных площадей в пределах охарактеризованных ландшафтных зон почвы накапливают элементы-индикаторы в большей степени, являясь более благоприятным объектом для проведения геохимических поисков.

В то же время в болотистых участках, а также в случае развития дальнеприносных отложений большой мощности биогеохимические методы оказываются более эффективными по сравнению с почвенным опробованием.

Гидрогеохимические ореолы месторождений тантала[1]

Гидрогеохимические ореолы месторождений тантала, формирование которых обусловлено изменениями в химическом составе природных вод под влиянием рудных концентраций и связанных с ними первичных и вторичных геохимических ореолов, в настоящее время

[1] Раздел в основном составлен по опубликованным материалам Н. В. Тихоновой и И. А. Шрамко.

изучены недостаточно. Имеющаяся по этому вопросу информация в основном касается таежных, лесостепных и степных ландшафтов Сибири, где гидрогеохимические аномалии изучались в районах развития апогранитовых и пегматитовых месторождений тантала.

Для вод, омывающих месторождения тантала, характерно обогащение такими элементами, как ниобий, бериллий, литий, натрий, фтор (последний для апогранитовых месторождений), и в меньшей степени как цинк, свинец, которое происходит за счет гипергенного разрушения рудных и породообразующих минералов (тантал в природных водах в настоящее время не обнаружен из-за низкой чувствительности анализа). При этом образуются воднорастворимые солевые комплексы элементов-спутников тантала, с выносом которых подземными и поверхностными водами и связано формирование подвижных водных ореолов или водных потоков рассеяния. Последние распространяются в области стока поверхностных и подземных вод вокруг месторождений и изменяют свои очертания и характер в зависимости от климатических факторов (Тихонова, Шрамко, 1966).

Обогащение вод натрием связано с гипергенным разложением альбита, являющегося одним из главных породообразующих минералов в рудовмещающих породах танталовых месторождений.

Наличие на многих месторождениях тантала апогранитового типа флюоритовой, топазовой, а местами и сульфидной минерализации, пространственно совпадающей с участками развития танталового оруденения, обусловливает присутствие в водах фтора, молибдена, цинка, свинца, меди и увеличение содержания сульфат-иона.

По Н. В. Тихоновой и И. А. Шрамко (1966), доступные количественному определению в природных водах элементы, характерные для месторождений тантала, по миграционной способности могут быть разделены на четыре основных типа.

1. Легкомигрирующие в ионной форме или образующие легкорастворимые комплексы и содержащиеся в природных водах от десятков до сотен и иногда тысяч микрограмм на литр (фтор, литий, рубидий, цезий, тяжелые металлы).

2. Удовлетворительно мигрирующие, образующие довольно хорошо растворимые комплексы и содержащиеся в природных водах от сотых долей до единиц, а в редких случаях до десятков микрограмм на литр (молибден, титан).

3. Трудномигрирующие, образующие неустойчивые комплексы и содержащиеся в природных водах в пределах первого десятка микрограмм на литр (бериллий, ниобий).

4. Трудномигрирующие, до настоящего времени в природных водах не обнаруженные (тантал).

Из перечисленных элементов прямыми индикаторами апогранитовых месторождений могут служить фтор, литий, бериллий и ниобий. Для вод, омывающих пегматитовые месторождения тантала,

присутствие повышенных концентраций фтора обычно не является характерным.

В качестве косвенных поисковых признаков месторождений тантала могут быть также использованы такие показатели, как увеличение содержания в водах натрий-иона и сульфат-иона.

Ввиду слабого отличия pH аномальных вод от pH фоновых вод этот показатель для данного типа месторождений теряет свое поисковое значение.

По характеру образуемых ими водных ореолов рассеяния перечисленные выше элементы четко разделяются на четыре группы (Тихонова, Шрамко, 1966).

1. Образующие обширные водные ореолы и потоки рассеяния, прослеживающиеся на расстояния от 500—600 *м* до первых километров от месторождения (фтор, литий). Двигаясь по водоносным породам, а также в поверхностных водотоках в неизменных физико-химических условиях эти элементы, очевидно, могут мигрировать на весьма значительные расстояния от источника насыщения.

2. Образующие локальные водные ореолы, прослеживающиеся на расстояния от 200 до 600 *м* от месторождения (бериллий, молибден, сумма тяжелых металлов). Эти микроэлементы в условиях застойных вод зоны глубокой циркуляции могут образовывать ложные гидрохимические аномалии.

3. Образующие узколокальные водные ореолы, которые прослеживаются на расстояние до 200 *м* от месторождения; появление ложных аномалий маловероятно.

4. Не образующие закономерных водных ореолов. В эту группу входят элементы, существование водных ореолов рассеяния у которых достоверно не выявлено в связи с недостаточной чувствительностью анализа (тантал), а также элементы, в отношении которых в природных водах в районах известных танталовых месторождений каких-либо определенных закономерностей не установлено (рубидий и цезий).

Таким образом, зональность гидрогеохимических орелов месторождений тантала определяется изменением по мере удаления от месторождения парагенетических ассоциаций элементов-индикаторов в порядке:

для апогранитовых месторождений	литий фтор бериллий ниобий	литий фтор бериллий	литий фтор
для пегматитовых месторождений	литий бериллий ниобий	литий берилий	литий

В табл. 126 приведены данные, характеризующие содержание некоторых микроэлементов в природных водах в районах танталовых месторождений.

Вероятность появления значащих содержаний элементов-индикаторов в пределах геохимического фона и аномальных содержаний в пределах гидрогеохимического ореола была оценена на примере массива танталоносных апогранитов, расположенного в таежной зоне Забайкалья (табл. 127).

Таблица 126

Содержание (в γ/л) некоторых микроэлементов в водах районов месторождений тантала

По Н. В. Тихоновой и И. А. Шрамко (1966)

Элемент	В пределах геохимического фона	В районе месторождения (гидрогеохимический ореол)
Li	5—20	40—60
Be	0,04—0,10	0,04—0,8
Nb	1,0	1,5—2,2
F	200—500	1000—4000
Mo	Следы—0,6	20—30
Сумма тяжелых металлов	5—10	20—100

Таблица 127

Содержание и характер распределения элементов-индикаторов в природных водах в районе массива танталоносных литионит-амазонит-альбитовых апогранитов.

По Н. В. Тихоновой и И. А. Шрамко (1966)

Элемент	Геохимический фон		Гидрогеохимический ореол месторождения	
	Вероятность появления значимых содержаний в пробах	Содержание, γ/л	Вероятность появления аномальных содержаний	Содержание, γ/л
Be	0,91	0,04—0,09	0,64	0,10—0,40
Nb	0,44	1	0,67	1,0—1,5
F	0,45	0—200	0,64	600—2000
Сумма тяжелых металлов	0,60	5—8	0,585	10—15

Между содержаниями в водах лития, бериллия и фтора в пределах гидрогеохимических ореолов апогранитовых месторождений тантала имеет место прямая корреляционная зависимость, хотя и не всегда резко выраженная (коэффициент корреляции 0,48—0,60).

Характерно, что в различных ландшафтно-геохимических условиях Сибири изменение в величинах общей минерализации поверхностных вод, как правило, не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на содержание микроэлементов-индикаторов.

А. Д. Канищевым (1966) опубликованы любопытные данные о зависимости между распространением бериллия в пределах гидрогеохимических аномалий и содержанием этого элемента в коренных породах. Так, например, в гидрогеохимических аномалиях, связанных с апогранитами (в которых содержание бериллия в среднем составляет 50 *г/т*), содержание бериллия колеблется от 0,2 до 3,8 γ/*л*. В аномалиях, связанных с редкометальными пегматитами, содержание бериллия в воде достигает 0,2 γ/*л*.

Параллельно с образованием водных ореолов рассеяния месторождений тантала формируются потоки рассеяния, представленные гидрогеохимическими аномалиями элементов-спутников тантала в донных осадках гидрографической сети. Ограниченная информация по этому вопросу не позволяет в настоящее время дать исчерпывающую характеристику потоков рассеяния танталовых месторождений, однако имеющиеся данные свидетельствуют, что потоки рассеяния, обогащенные литием, бериллием, ниобием, оловом, фтором, в ряде случаев свинцом, рубидием и цезием, образуются во всех случаях, когда в поверхностные водные потоки поступают продукты эрозии коренных месторождений тантала или же их первичных и вторичных геохимических ореолов.

Масштаб (протяженность) потоков рассеяния определяется ландшафтно-геохимическими условиями района и в значительной мере зависит от площади, с которой обогащенный элементами-индикаторами материал поступает в гидросеть. Наиболее протяженные потоки рассеяния (до десятка километров в реках, дренирующих обнаженные массивы литионитсодержащих апогранитов или поля сподуменсодержащих пегматитов) образует литий. Прочие элементы-индикаторы (бериллий, ниобий, олово) образуют гораздо более локальные потоки, однако их протяженность часто превышает протяженность водного ореола.

Максимальная известная протяженность потока рассеяния бериллия в районе поля танталоносных пегматитов составляет около 1000 *м*.

Фоновые содержания элементов-индикаторов в донных осадках современной гидросети в районах распространения месторождений тантала обычно не достигают кларковых значений, характерных для осадочных пород. Для лития это обычно 10—30 *г/т*, для бериллия 1—3 *г/т*, для олова 1—3 *г/т*, для ниобия — менее 5 *г/т*. В пределах потока рассеяния, связанного с месторождением тантала или его геохимическими ореолами, отмечается заметное повышение содержания перечисленных элементов-индикаторов в донных осадках. При этом контрастность аномалии, очень слабая в конце потока рассеяния, может резко подняться вблизи источника элемента-индикатора (табл. 128).

Попытка установления корреляционной связи между содержаниями лития, бериллия и ниобия в донных осадках потока рассеяния, связанного с массивом танталоносных апогранитов, успеха

не имела, хотя объем геохимической выборки (10 проб) в этом случае нельзя признать достаточным для однозначного решения вопроса.

Таблица 128

Содержание лития, бериллия и ниобия (в *г/т*) в потоках рассеяния месторождений тантала
(по результатам опробования донных осадков)

Элемент	Расстояние от месторождения, *м*	
	>500	200—500
Li	40—100	60—500
Be	4—9	6—20
Nb	5—12	10—80

Часть III

МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОБСТВЕННО ТАНТАЛОВЫХ РУД

ГЛАВА 1

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА

Проведение геохимических поисков месторождений тантала во всех случаях осуществляется совместно с всесторонним геологическим изучением исследуемой территории, а также с использованием рационального для данных условий комплекса геофизических методов.

Комплексирование и условия применения собственно геохимических методов при поисках месторождений тантала, так же как и других месторождений, определяется двумя ведущими факторами: 1) задачами и масштабом поисковых работ; 2) степенью обнаженности и ландшафтными условиями района поисков [1].

Поиски масштаба 1 : 200 000

При поисках рассматриваемого масштаба путем систематического опробования коренных пород производится изучение геохимической специализации гранитных комплексов, а также опробование подземных вод и донных осадков гидросети, производимое параллельно с шлиховой съемкой. Целевым назначением поисковых работ рассматриваемого масштаба является определение площадей, перспективных для постановки более детальных работ. В зависимости от степени обнаженности районов относительная роль перечисленных методов изменяется. В районах со слабой обнаженностью коренных пород на первое место выступает опробование вод и донных осадков, которое производится в соответствии с имеющейся инструкцией (1965). Однако даже в слабо обнаженных районах необходимо стремиться к получению хотя бы минимального количества проб

[1] Общие вопросы комплексирования и условий проведения поисков месторождений цветных и редких металлов изложены в обстоятельной работе В. И. Красникова (1965), а также в сборнике «Геология месторождений редких элементов», вып. 14 (1961). В связи с этим в настоящем разделе рассматриваются лишь специальные вопросы, связанные с геохимическими поисками месторождений тантала.

для характеристики геохимической специализации выявленных гранитных массивов [1].

Поиски масштаба 1 : 50 000

При поисках масштаба 1 : 50 000 производится детализация перспективных площадей, выявленных ранее при мелкомасштабных поисках. В процессе детализации производится оценка геохимической специализации всех гранитных массивов, развитых на площадях поисков, а также собирается необходимый материал для геохимической оценки пегматитовых образований, если поиски производятся в пределах выявленных пегматитовых полей. Учитывая, что эндогенные геохимические ореолы апогранитовых месторождений тантала имеют большую площадь, в процессе проведения поисков масштаба 1 : 50 000 целесообразно отбирать геохимические и шлиховые пробы по всем участкам, где обнажаются в той или иной степени измененные породы, вмещающие гранитные массивы, обращая особое внимание на экзоконтактовые зоны гранитных массивов.

В пределах закрытых площадей для уточнения пространственного положения перспективных участков применяется гидрогеохимический метод, а также опробование донных осадков и шлиховая съемка. При незначительной (до 3 *м*) мощности рыхлых отложений в пределах перспективных участков целесообразно проведение опробования почв и рыхлых отложений (с учетом генезиса последних). При мощности рыхлых отложений, превышающей 3—5 *м*, а также в условиях, неблагоприятных для проведения геохимического опробования почв (заболоченные территории, аридные зоны и др.), следует широко использовать биогеохимические методы.

Учитывая, что поисковые работы всех масштабов в настоящее время сопровождаются радиометрическими исследованиями, необходимо иметь в виду, что массивы танталоносных апогранитов характеризуются повышенной гамма-активностью (связанной с присутствием урансодержащего микролита), никогда не достигающей уровня, интересного с точки зрения урановой минерализации. Апограниты, отличающиеся резким преобладанием ниобия над танталом, соответственно характеризуются резко повышенной ториевой гамма-активностью (широкое распространение торита). Эти особенности рудоносных массивов могут быть успешно использованы при проведении наземных и аэрорадиометрических поисковых работ. Пониженная по сравнению с нормальными гранитами калиевая активность альбитизированных гранитоидов позволяет также использовать и этот критерий при проведении аэрорадиометрических работ.

[1] Проведение комплекса геохимических методов поисков на тантал (а также на другие редкие элементы) в масштабе 1 : 200 000 и 1 : 50 000 целесообразно осуществлять параллельно с геологической съемкой соответствующего масштаба. Это не исключает необходимости проведения специальных геохимических работ в перспективных районах, уже покрытых геологической съемкой.

Поиски масштаба 1 : 10 000 и крупнее

Задача этого этапа геохимических поисковых работ заключается в выявлении и последующем оконтуривании вторичных и первичных геохимических аномалий, являющихся ореолами месторождений или рудопроявлений тантала. В хорошо обнаженных районах выявление и оконтуривание первичных геохимических аномалий производится непосредственно путем геохимического опробования коренных пород. В полностью или частично закрытых районах на первом этапе производится выявление и оконтуривание вторичных ореолов рассеяния. В зависимости от ландшафтно-геохимических условий опробуются почвы или делювий, или же используется биогеохимический метод (при значительной мощности рыхлых отложений, на заболоченных площадях, в аридной зоне и др.).

После выявления и оконтуривания вторичной геохимической аномалии она вскрывается горными выработками (шурфы, канавы) или скважинами с целью изучения коренного месторождения или, что чаще бывает, его эндогенного геохимического ореола.

Оценка первичного геохимического ореола выявленного месторождения или рудопроявления является основанием для постановки предварительных разведочных работ.

ГЛАВА 2

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТАНТАЛОНОСНОСТИ ГРАНИТОИДОВ ПРИ ПОИСКАХ МАСШТАБА 1 : 50 000—1 : 200 000

Геохимические критерии при оценке потенциальной танталоносности гранитоидов могут быть использованы уже на стадии выбора района для проведения поисков танталовых месторождений. Естественно, что все критерии, используемые на этой подготовительной стадии поисковых работ, являются косвенными, однако их применение позволяет более точно и эффективно направлять поисковые работы. Одним из важных критериев, имеющих общее металлогеническое значение, является оловоносность провинции, а также широкое распространение в пределах провинции грейзеновых и кварцево-жильных месторождений вольфрама. Если в литературе имеются данные о содержании тантала и ниобия в касситеритах или вольфрамитах из района планируемых работ, то достоверность прогнозной оценки может быть значительно повышена. При этом можно использовать данные, приведенные в табл. 40, помня, что низкие содержания тантала в касситеритах и вольфрамитах из месторождений и рудопроявлений, удаленных от гранитных массивов, не могут служить поводом для отрицательной оценки района в целом. Если данных о содержании тантала и ниобия в вольфрамитах и касситеритах из района планируемых работ нет, то в процессе проектирования целесообразно провести эти определения на музейных образцах.

Кроме того, могут быть использованы данные о содержании тантала в акцессорных минералах гранитов, а также в минералах тяжелых фракций шлихов (табл. 39), хотя в большинстве случаев имеющаяся в литературе информация по этому вопросу является совершенно недостаточной.

В связи с тем, что в настоящее время данные о распределении в гранитах элементов-примесей, которые могут служить индикаторами танталоносности, в опубликованной и рукописной литературе, как правило, отсутствуют, при проектировании поисковых работ можно использовать данные имеющиеся по району силикатных анализов гранитоидов. В качестве оценочных критериев могут служить содержания в гранитах окиси магния и модальный номер плагиоклаза $\left(\frac{Ca}{Ca+Na} \cdot 100\right)$. Из таблиц 30—31 следует, что вероятность появления содержаний MgO, равных и больших 0,5%, в гранитах, являющихся материнскими для танталоносных апогранитов, составляет всего 0,01. В то же время в непродуктивных на тантал гранитах эта вероятность колеблется от 0,2 до 0,8 (см. табл. 31).

Таким образом, в процессе обработки литературных материалов при выборе районов для проведения поисков танталоносных апогранитов все массивы гранитоидов, анализы по которым показывают содержание магния большее чем 0,5%, должны отбраковываться как неперспективные с точки зрения возможности встречи в связи с этими гранитоидными комплексами массивов танталоносных апогранитов.

К сожалению, по содержанию MgO не могут выделяться граниты, являющиеся материнскими для танталоносных пегматитовых полей. Подобная же картина имеет место при использовании в качестве критерия модального номера плагиоклаза № 10. Вероятность появления плагиоклаза с таким или меньшим номером в гранитах материнских для танталоносных апогранитов составляет 0,74. В прочих группах гранитоидов эта вероятность колеблется от 0,03 до 0,26.

Полевые работы

Источником геохимической информации, используемой для прогнозной оценки потенциальной рудоносности геологических комплексов, является геохимическое опробование, проводимое в процессе геологосъемочных и поисковых работ масштаба 1 : 50 000—1 : 200 000.

Исходя из результатов специальных методических работ (Беус, 1966$_1$), а также особенностей распределения элементов-индикаторов танталоносности в гранитах (Беус и др., 1962; Беус, Ойзерман, 1965; см. также главу 1), оптимальное количество геохимических проб (объем геохимической выборки), отбираемых при поисках с каждого конкретного гранитного массива, составляет 30. Это количество проб для подавляющего большинства случаев позволяет оценить локальные параметры распределения элементов-индикаторов с точностью ±20%, что вполне достаточно для решения поисковых задач.

Таким образом, в геологических маршрутах при проведении поисков потенциально рудоносных на тантал гранитных материнских массивов должен быть собран представительный материал для характеристики особенностей распределения химических элементов-индикаторов танталоносности в гранитах в пределах площади поисковых работ. Поэтому весьма важным методическим фактором, определяющим высокое качество геохимических поисков, является правильное планирование геолого-геохимических маршрутов (пересечений) в направлении максимальной изменчивости геологических комплексов.

При этом опорные геолого-геохимические профили целесообразно выбирать так, чтобы они пересекали все фациальные или фазовые разновидности исследуемого массива. Если геолого-геохимический профиль пересекает разновидности, не выделяющиеся в масштабе поисков, по ним отбираются пробы соответственно той количественной роли, которую играет та или иная разновидность в пределах опробуемого массива. Единичные пробы, отобранные по этим разновидностям, участвуя в геохимической совокупности проб, характеризующих данный гранитный массив, позволят по данным математической обработки результатов анализов проб составить объективное представление об особенностях распределения в этом типе пород элементов-индикаторов танталоносности.

При опробовании гранитных массивов расположение геолого-геохимических маршрутов всецело определяется геологическими особенностями залегания интрузивного массива и его формой. Пересечения рекомендуется ориентировать вкрест простирания длинной оси интрузивного массива. При картировании небольших интрузивных массивов изометричной или близкой к ней формы часто бывает целесообразным выполнение двух опорных пересечений, ориентированных перпендикулярно друг к другу.

Если в пределах относительно однородного интрузивного массива в процессе поисков обнаруживаются явно метасоматические фации или зоны гидротермального изменения и т. д., не выделяющиеся в масштабе поисков, они опробуются отдельно, как перспективные в отношении рудоносности геологические образования, и отобранные по ним пробы не включаются в общую совокупность, характеризующую картируемый тип интрузивных пород [1].

При проведении поисков в масштабе 1 : 50 000 в ряде случаев целесообразно отдельно опробовать в пределах гранитного массива различные фациальные и фазовые разновидности гранитов, слагающие массив.

---

[1] Подробнее эти вопросы рассматриваются в методических указаниях по геохимическому картированию при геологосъемочных работах масштаба 1 : 200 000—1 : 50 000, выпущенных в 1965 г. Геолого-геохимическим трестом (ротопринт).

Рекомендуемый вес геохимической пробы 150 *г*. Как показали специальные экспериментальные исследования, метод отбора проб принципиального значения не имеет. Обычно применяют отбор мелких осколков породы с площади 1—5 $м^2$.

Поскольку определяющим фактором геохимического опробования является степень равномерности распределения элементов-индикаторов в пределах опробуемого геологического образования, главным параметром опробования при оценке геохимической специализации пород является количество проб, равномерно отбираемых из конкретного массива, фациального или фазового обособления и т. д. В данном случае расстояние между пунктами опробования является производным, зависящим от заданного количества проб (объема геохимической выборки) и размеров опробуемого массива.

Интерпретация данных геохимического опробования

Оптимальной задачей использования особенностей распределения элементов-примесей для оценки потенциальной рудоносности геологических комплексов является обоснование геохимических критериев, позволяющих производить уверенную (с вероятностью не менее 0,95) оценку по выборкам геохимических проб малого объема (не более 10—30). При этом в качестве предпосылки ставится условие встречи в геохимической выборке не менее трех проб с критическими значениями содержания элементов-индикаторов.

Элементами-индикаторами при оценке потенциальной танталоносности материнских гранитоидов, как следует из описательной части, могут служить литий, рубидий, олово, ванадий, а также индикаторные отношения магний — литий и цирконий — олово (см. табл. 35 и 36). Использование этих индикаторов позволяет легко различать гранитоиды, непродуктивные с точки зрения редких элементов, и гранитоиды, с которыми связаны месторождения редких элементов, включая и месторождения тантала (табл. 129).

Как видно из табл. 129, геохимическая выборка из 10 проб, отобранных из продуктивных на тантал материнских гранитов с вероятностью более 0,95, не должна включать ни одной пробы с содержанием лития менее 25 *г/т* и рубидия менее 150 *г/т*. В то же время в этой выборке с вероятностью 0,90 и более должно присутствовать не менее 3 проб с содержанием лития 100 *г/т* и выше.

Аналогичные выборки, составленные из 10 проб, характеризующих массивы гранитоидов, непродуктивных на редкие элементы, в этом случае с высокой вероятностью должны включать три или более пробы с содержанием менее 25 *г/т* лития и 150 *г/т* рубидия. Одновременно критические содержания лития, равные или превышающие 100 *г/т*, не должны присутствовать в подобных выборках (во всяком случае не более 1 на 10 проб).

Достаточно четким критерием является также магний-литиевое отношение, превышающее 100. Геохимические выборки, представляющие продуктивные на тантал гранитоиды, практически не

Таблица 129

Вероятность появления трех и более критических значений в выборках объемом 10 проб [1]

Гранитоиды	Li		Rb	Sn	V	Mg/Li		Zr/Sn	
	25 *г/т* и менее	100 *г/т* и более	150 *г/т* и менее	20 *г/т* и более	40 *г/т* и более	30 и менее	100 и более	30 и менее	50 и более
Непродуктивные на редкие элементы	0,98	<0,05	0,95	<0,01	0,60—0,70	<0,001	Около 1,0	Около 0,05	0,95
Материнские для грейзеновых месторождений без танталовой минерализации	0,50	0,40	0,60	0,35	0,15	0,90	0,10	0,90	>0,98
Материнские для пегматитов с убогой танталовой минерализацией	0,50	0,50	0,45	0,20	<0,01	0,50	0,60	>0,98	<0,05
Материнские для танталоносных пегматитов	<0,01	0,90	<0,05	0,50	<0,01	0,80	<0,001	>0,98	<0,01
Материнские для танталоносных апогранитов	<0,01	>0,98	<0,01	0,55	<0,01	Около 1,0	<0,001	>0,98	<0,001

[1] Здесь и далее оценка произведена по таблицам вероятности П. И. Чернцкого (1957).

Таблица 130

Вероятность появления трех и более критических значений в выборках объемом 30 проб

Гранитоиды	Li		Rb	Sn	V	Mg/Li		Zr/Sn	
	25 г/т и более	100 г/т и более	150 г/т и менее	20 г/т и более	40 г/т и более	30 и более	100 и более	30 и менее	50 и более
Непродуктивные на редкие элементы	>0,98	<0,05	>0,98	<0,01	>0,98	<0,001	Около 1,0	0,35	>0,98
Материнские для грейзеновых месторождений без танталовой минерализации	>0,98	0,98	>0,98	0,98	0,80	>0,98	0,70	>0,98	>0,98
Материнские для пегматитов с убогой танталовой минерализацией	>0,98	>0,98	0,98	0,90	<0,05	>0,98	>0,98	>0,98	0,20
Материнские для танталоносных пегматитов	<0,01	>0,98	0,20	0,99	<0,05	>0,98	<0,01	Около 1,0	<0,01
Материнские для танталоносных апогранитов	<0,01	>0,98	<0,01	0,99	<0,01	1,0	<0,001	>0,98	<0,001

должны включать подобные отношения, вероятность появления которых в непродуктивных гранитах близка к 100%. В качестве дополнительных критериев для разделения продуктивных и непродуктивных на редкие элементы гранитов могут быть использованы содержания олова и ванадия, а также отношения циркония к олову.

Наиболее трудной задачей является разделение танталоносных гранитоидов и непродуктивных на тантал гранитов, с которыми связаны пегматитовые или грейзеновые месторождения других редких элементов. В этом случае выборки из 10 проб оказываются недостаточными и приходится увеличивать объем выборки до 30 проб (табл. 130).

Выборки такого объема позволяют по содержанию лития менее 25 *г/т*, рубидия менее 150 *г/т* и магний — литиевому отношению более 100 уверенно различать материнские граниты пегматитовых и апогранитовых месторождений тантала от прочих групп редкометальных гранитов, не являющихся перспективными на тантал.

Отмеченные критерии подтверждают целесообразность отбора из каждого опробуемого массива (фациального или фазового обособления при более детальных работах) выборки объемом 30 геохимических проб. Однако на первом этапе камеральных исследований целесообразно анализировать на литий, рубидий, магний и олово лишь каждую третью пробу общей выборки. По результатам исследования полученной частной выборки из 10 проб непродуктивные граниты могут быть уверенно отделены от гранитов, являющихся материнскими для месторождений редких металлов (см. табл. 129). В дальнейшем для выделенных выборок, представляющих граниты материнские для месторождений редких металлов, производится анализ всех 30 проб (на литий, рубидий, магний, олово, ванадий, цирконий).

Для определения лития и рубидия используется метод фотометрии пламени, магния — химический анализ. Олово, цирконий и ванадий определяются при помощи количественного (или приближенно количественного) спектрального анализа.

ГЛАВА 3

МЕТОДЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА ПО ЭНДОГЕННЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ ОРЕОЛАМ

Эндогенные геохимические ореолы танталоносных апогранитов

Основанием для постановки поисков эндогенных геохимических ореолов скрытых массивов танталоносных апогранитов является наличие в пределах исследуемого региона известных месторождений или рудопроявлений тантала апогранитового типа, а также гранитоидных комплексов, признанных потенциально рудоносными на тантал.

Поиски эндогенных геохимических ореолов массивов танталоносных апогранитов в связи со значительными их размерами

и контрастностью параметров распределения элементов-индикаторов не представляют методически сложной задачи.

Поиски успешно могут проводиться в районах с удовлетворительной и хорошей обнаженностью при масштабе работ 1 : 50 000. При этом сеть опробования 200 × 400 *м* является на первом этапе работ достаточной для выявления ореола. При последующей детализации выявленного ореола (масштаб 1 : 10 000) сеть может быть сгущена до 100 × 200 *м*. В ряде случаев при проектировании[1] разбуривания ореола целесообразно сгустить сеть геохимического опробования до 100 × 100 *м*.

Опробование производится по маршрутным пересечениям, ориентированным вкрест простирания господствующих структурных элементов осадочно-метаморфических пород. Рекомендуемый вес геохимической пробы 150 *г*. Отбор проб сопровождается детальной документацией, в которой особое внимание обращается на характер метаморфических изменений опробуемых пород. На каждой точке опробования должен отбираться образец для изготовления шлифа с целью последующего петрографического изучения пород в пределах выявленных аномалий.

Особое внимание при поисках эндогенных геохимических ореолов танталоносных апогранитов необходимо обращать на экзоконтактовые зоны гранитных массивов, потенциальная рудоносность которых на тантал была установлена ранее. В пределах этих зон могут присутствовать слепые куполовидные выступы и апофизы гранитного массива, представленные апогранитами. С этой точки зрения существенный интерес представляет также систематическое геохимическое опробование продолжения структурной зоны, контролирующей интрузивное тело потенциально танталоносных гранитов.

Вероятность появления трех и более критических содержаний эле

Характер выборок	Количество проб	Li		
		100 *г/т* и более	200 *г/т* и более	500 *г/т* и более
Фоновая выборка . . .	30	0,006	<0,001	<0,001
Ореольная выборка . . .	10	>0,99	>0,99—0,98	0,90—0,50
Ореольная выборка . . .	30	>0,99	>0,99—0,98	0,99—0,98

[1] Проектирование бурения с целью оценки ореола должно также основываться на результатах тщательного структурного изучения и данных геофизических исследований выявленного ореола.

Интерпретация данных геохимического опробования

Как следует из описательной части, оптимальными элементами-индикаторами эндогенных геохимических ореолов массивов танталоносных апогранитов, залегающих в алюмосиликатных породах, являются литий, рубидий, цезий, бериллий, олово и фтор. Для ряда месторождений типичен также свинец, требует уточнения возможность использования непосредственно тантала (ниобий, по-видимому, не может служить характерным индикатором).

В табл. 131 приведены данные о вероятности появления индикаторных значений содержания перечисленных элементов, рекомендуемых в качестве критериев, в фоновой и ореольной выборках различного объема.

Как видно из табл. 131, вероятности встречи аномальных содержаний элементов-индикаторов различаются весьма контрастно уже в малой выборке объемом 10 проб. Таким образом, уже по 10 пробам, отобранным в пределах ореола, можно уверенно диагностировать геохимическую аномалию, предположительно связанную со скрытым массивом апогранитов. Учитывая, что литий и рубидий образуют наиболее значительные ореолы, для того, чтобы получить по этим элементам три и более критических значений содержания лития выше 100 *г/т* и рубидия выше 200 *г/т*, нужно отобрать в пределах аномалии максимум 6—7 проб.

При оконтуривании и более детальном изучении выявленного ореола сеть опробования необходимо строить, исходя из необходимости получения из геохимической аномалии 30—50 проб. Оценки параметров распределения комплекса элементов-индикаторов в пределах аномалии [1], вычисленные по этим данным, позволят однозначно

Таблица 131

ментов-индикаторов в геохимических выборках различного объема

Rb	Cs	Be	Sn	F	Ta
200 *г/т* и более	50 *г/т* и более	20 *г/т* и более	20 *г/т* и более	0,2% и более	4 *г/т* и более
<0,01	<0,001	<0,01	<0,02	<0,01	<0,001
>0,99—0,99	>0,99—0,98	>0,99—0,70	>0,99—0,65	>0,99	0,05
>0,99	>0,99	>0,99	>0,99	>0,99	0,60

[1] Анализ на редкие щелочи производится методом фотометрии пламени, бериллий и олово определяются количественным или приближенно-количественным спектральным методом, фтор и тантал определяются химическим методом.

диагностировать природу аномалии, в частности различить эндогенный ореол скрытого массива танталоносных апогранитов от купола обычных или слабо измененных гранитов.

Эндогенные геохимические ореолы пегматитовых месторождений тантала

Охарактеризованные выше особенности эндогенных геохимических ореолов танталоносных пегматитов позволяют рекомендовать следующую методику проведения геохимических поисков промышленных пегматитовых месторождений тантала.

Геохимические поисковые работы следует начинать с масштаба 1 : 50 000 (профили через 500 *м*, отбор проб по профилям через 50 *м*). Этот масштаб позволит выявить месторождения с размером пегматитовых свит 500 × 100 *м* (согласные крутопадающие жилы) и 500 × 500 *м* (площадь секущих пологопадающих жил) и гарантирует пересечение выходящих на поверхность ореолов 2—3 профилями, так как размер эндогенных ореолов в первом случае ожидается 1—1,5 *км* по простиранию пород и 300 *м* вкрест простирания, а во втором — площадь ореола будет 0,8—1 × 0,8 — 1 *км*. Сеть опробования позволит охарактеризовать ореол 20—30 пробами, что является достаточным для первой его оценки и рекомендации более детальных геохимических поисков масштаба 1 : 10 000 (сеть 100 × 20 или 100 × 10 *м*).

Поиски отдельных слепых тел на флангах месторождений можно проводить также в масштабе 1 : 10 000.

Рекомендуемый масштаб второго этапа работ (1 : 10 000) позволяет отобрать по каждому ореолу не менее 100 проб, что является достаточным для получения оценок параметров распределения элементов в ореолах с точностью ±30% (Беус, 1966$_1$). При этом учитывается возможный высокий коэффициент вариации содержаний (до 150%) и точность рекомендуемых анализов.

Наибольшие трудности возникают при разделении близких по концентрациям элементов-индикаторов аномалии над берилл-колумбитовыми и танталоносными пегматитами. Произведем сравнение наиболее трудно различимых из всех рассмотренных выше сопоставимых объектов (поперечно секущие пологопадающие жилы в сланцах). Если вероятность появления контрастного содержания цезия 20 *г/т* в зоне 0—50 *м* над танталоносными пегматитами равна 0,72, а в зоне 0—50 *м* над берилл-колумбитовыми пегматитами — 0,26 (см. табл. 67), то уже при объеме выборки в 30 проб 95% доверительных пределов колебаний этих вероятностей не перекрываются (Янко, 1961). Вероятность появления содержания 20 *г/т* цезия в сланцах в зоне 100—250 *м* над танталоносными пегматитами равна 0,44. 95% доверительных пределов колебаний вероятностей 0,26 и 0,44 не перекрываются лишь при объеме выборки 100—110 проб.

Вероятность появления величин отношений лития к цезию — 8 и менее в зоне 0—50 *м* над берилл-колумбитовыми пегматитами равна

0,23, а в зоне 100—250 *м* над танталоносными пегматитами равна 0,48. 95% доверительных пределов колебаний этих вероятностей не перекрываются при объеме выборки 60—70 проб.

Итак, в самом неблагоприятном случае достаточный объем выборки 100 проб. Эти пробы могут быть отобраны на искомой аномалии при масштабе поисков 1 : 10 000.

Все отобранные пробы нужно анализировать на литий и цезий методом фотометрии пламени или приближенно количественным спектральным методом, разработанным ВИТРом. Для детализации и расшифровки выявленных аномалий часть проб анализируется количественным или приближенно количественным спектральным методом на рубидий, бериллий, олово, медь, мышьяк, вольфрам, бор и фтор.

ГЛАВА 4

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА ПО ЭКЗОГЕННЫМ ОРЕОЛАМ РАССЕЯНИЯ

Полевые исследования

Проведение поисков месторождений тантала осуществляется, как правило, на заведомо перспективных площадях. В подобных условиях согласно действующей инструкции (1965) проведение поисков по вторичным ореолам целесообразно проводить в масштабе 1 : 50 000 и крупнее. Выбор масштаба определяется поставленными задачами и размерами ожидаемых месторождений.

При среднемасштабных работах (1 : 50 000) основной задачей является выявление перспективных пегматитовых полей или рудоносных массивов. При этом следует ориентироваться в основном на выявление ореолов рассеяния наиболее подвижных в данных условиях элементов. Так, в пределах таежной и лесостепной зон поиски месторождений тантала лучше производить по таким элементам-спутникам, как бериллий, литий и в меньшей степени олово и свинец, а в условиях степей — по литию и в меньшей степени по бериллию и олову, которые могут выноситься за пределы рудных тел на значительные расстояния. При выявлении аномальных содержаний элементов-индикаторов часть проб необходимо также анализировать на тантал, ниобий, рубидий.

С целью оконтуривания рудных тел и проведения оценки месторождений масштаб работ необходимо увеличить до 1 : 25 000, 1 : 10 000 и в отдельных случаях до 1 : 5 000. При решении подобных задач следует дополнительно использовать ореолы слабо подвижных элементов, таких, как тантал, рубидий и в меньшей степени свинец и рубидий.

Направление профилей опробования зависит в основном от геолого-геоморфологических условий. В районах со слабо развитой речной сетью опробование, по мнению большинства исследователей,

удобнее всего проводить по сети профилей, ориентированной вкрест простирания геологических и рудных структур. В сильно изрезанных районах, где ореолы рассеяния вытянуты вниз по склону вне зависимости от простирания рудных тел, отбор проб следует производить по профилям, совпадающим с изогипсами рельефа.

Определение густоты опробования, т. е. точек отбора проб на единицу площади, в зависимости от масштаба проводимых работ регламентировано специальной инструкцией (1965). Однако анализ фактического материала свидетельствует, что эти требования к густоте почвенного опробования несколько завышены. Фактически шаг опробования выбирается с таким расчетом, чтобы не пропустить аномалий и отобрать с них достаточное количество проб, необходимое для их полной характеристики. Определить его и обосновать можно математическим путем.

Пример. Известно, что в пределах экзогенных ореолов в почвах над танталоносными апогранитами вероятность появления проб с аномальными содержаниями по всем элементам, как правило, не ниже 30% (см. часть II). Это означает, что для того, чтобы с вероятностью 0,98 в выборке, отобранной в пределах аномалии, не менее трех проб имело содержание выше минимально-аномального, объем выборки должен составлять 12 проб (Черницкий, 1957).

Принимая за геохимическую выборку серию проб, отобранных по профилю, и учитывая, что мощность экзогенных ореолов массивов апогранитов обычно не снижается менее 1000 *м*, расстояние в 100 *м* между пробами по профилю при поисках массивов танталоносных апогранитов на первом этапе поисков является вполне достаточным. При сети 100 × 400 *м* из ореола каждого массива по 3—4 профилям будет отобрано не менее 30—40 проб, что вполне достаточно для однозначной оценки ореола.

На примере месторождения апогранитового типа с высокими содержаниями тантала (массив 1), площадь которого составляет около 1,5 *км*, статистически с помощью критерия χ^2 с 5%-ным уровнем значимости установлена равноценность сетей опробования 50 × 100 *м*, 50 × 200 *м*, 50 × 400 *м*, 100 × 200 *м* и 100 × 400 *м*. Расчет производился по ниобию, олову, бериллию и литию по горизонтам *B* и *BC*.

Для оконтуривания рудных тел или зон в апогранитах опробование необходимо проводить более детально с учетом их параметров (по сеткам 50 × 100 *м* и 25 × 100 *м*).

При оценке пегматитовых полей, характеризующихся иными параметрами, т. е. сравнительно малыми размерами рудных тел по мощности, но нередко значительной протяженностью (тел и рудных зон в целом), шаг опробования следует сгущать до 10—20 *м* у пегматитовых жил и до 50 *м* между ними. Расстояние между профилями опробования достаточно в 200—400 *м*. Такая сеть при правильном расположении профилей дает возможность достаточно точно оконтурить рудные зоны и даже отдельные практически интересные тела, особенно по таким слабо подвижным элементам,

как тантал, ниобий, и в меньшей степени олово, бериллий и рубидий.

Наиболее представительными и в то же время легко доступными горизонтами опробования, отражающими закономерности распределения тантала и элементов-индикаторов его оруденения в коренных породах, являются:

1) в горных мерзлотно-таежных и лесостепных ландшафтах — горизонт *B* (на глубине около 40—60 *см*);

2) в степных ландшафтах — горизонт *A* (на глубине около 20—30 *см*).

В районах, отличающихся по природным условиям от упомянутых, пробы до выяснения закономерностей распределения элементов-индикаторов следует отбирать из обоих горизонтов.

На опорных профилях с целью изучения закономерностей распределения элементов опробованию подвергается каждый генетический горизонт, а также элювиально-делювиальные образования и кора выветривания. В этом случае пробы отбираются непрерывной вертикальной бороздой. Вес пробы во влажном состоянии равен обычно 150—200 *г* и определяется с таким расчетом, чтобы из нее после просушивания и просеивания можно было бы отобрать 2—3 навески по 20—30 *г* фракции 1 *мм* и дубликат. При тонкоизмельченном материале вес навески может быть уменьшен до 10—15 *г* (Хокс, Уэбб, 1964).

Опробование почв сопровождается документацией, включающей морфологическую характеристику почв, глубину отбора, местонахождение пункта опробования, рельеф, экспозицию, растительность, а также изучением геологических и геоморфологических особенностей участка. В результате этих исследований составляют схематические карты геохимических ландшафтов, на которые затем наносят контуры аномалий.

Интерпретация данных геохимического опробования

Основными задачами при интерпретации данных геохимического опробования являются: правильное определение геохимического фона и минимально-аномальных значений и оценка аномалий с целью выбора среди них объектов, заслуживающих дальнейших более детальных работ.

При определении фоновых и соответственно пороговых (критических) значений содержания элементов-индикаторов необходимо учитывать, что эти величины определяются не только геологическими, но также геоморфологическими и климатическими особенностями района. В связи с этим необходимо составлять схематические ландшафтные карты, на которых выделяются геохимически однородные участки (составляющие геохимический ландшафт), и для каждого из них определять фоновые и пороговые (критические) значения содержаний. Если эти значения будут между собой отличаться, тогда и выделение аномалий следует производить раздельно для

каждого ландшафта. Такой дифференцированный подход даст возможность выявить даже слабо контрастные аномалии, которые могут оказаться перспективными.

Присутствие повышенных концентраций тантала в почвах ($\geqslant 10$ *г/т*) является наиболее прямым однозначным критерием при поисках танталовых месторождений по экзогенным ореолам рассеяния. Однако в связи с малой подвижностью тантала его вторичные ореолы обычно не выходят за пределы рудной зоны и занимают сравнительно небольшие площади, что затрудняет выявление месторождений при мелко- и среднемасштабных поисках. Поэтому наряду с выявлением экзогенных ореолов тантала, необходимо также изучать и ореолы его элементов-спутников, образующих, как правило, значительно более широкие ореолы рассеяния.

Выяснено, что ассоциация рудных элементов в почвах не зависит от ландшафтно-геохимических условий и полностью определяется присутствием их в коренных породах, т. е. зависит от геохимических особенностей месторождений. Так, например, танталоносные апограниты с промышленной концентрацией тантала сопровождаются четкими аномалиями в почвах тантала, ниобия, лития, рубидия, бериллия, олова, иногда свинца. Апограниты того же типа, не содержащие больших количеств тантала, сопровождаются экзогенными ореолами тех же элементов, но характеризуются более низкими их содержаниями. Для бериллоносных апогранитов, отличающихся кларковыми содержаниями тантала, характерны аномалии в почвах только по бериллию.

Пегматитовые месторождения тантала сопровождаются ореолами рассеяния тантала, ниобия, лития, рубидия, бериллия, олова, т. е. в отличие от танталоносных апогранитов здесь, как правило, отсутствует свинец.

Вероятность появления проб с содержаниями, превышающими минимально-аномальные (максимальные фоновые) содержания в пределах ореолов представлена в табл. 132.

Таблица 132

Вероятность появления проб с аномальными содержаниями элементов-индикаторов в экзогенных ореолах рассеяния месторождений тантала

Элемент	Танталоносные апограниты			Пегматиты
	Таежная зона		Лесостепная зона	Степная зона
	Массив 1	Массив 2		
Nb	0,84	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Sn	0,57	0,48	0,34	0,86
Be	0,65	0,59	Не опр.	0,83
Li	0,98	0,89	0,65	0,95
Rb	0,98	0,64	0,46	0,56
Pb	0,86	Не опр.	0,50	Не опр.

При наличии в почвах аномальных содержаний тантала вопрос оценки аномалий решается в общем сравнительно просто.

Некоторые критерии оценки месторождений тантала по его вторичным ореолам приведены в табл. 133.

Таблица 133

Параметры ореолов рассеяния тантала некоторых месторождений

Породы	Горизонт	Среднее содержание тантала по аномалиям, *г/т*	Коэффициент контрастности	Площадь аномалии, *км²*	Ta : Nb
Танталоносные апограниты с высокими содержаниями тантала (таежная зона)	*B*	70	7	1,0	1 : 1,5
Танталоносные апограниты с высокими содержаниями тантала (лесостепная зона)	*B*	60	6	0,6	1 : 1,2
Танталоносные апограниты с низкими содержаниями тантала (таежная зона) . .	*B*	23	2,3	0,8	1 : 3,5
Танталоносные мусковит-альбитовые и сподумен-альбитовые пегматиты с низкими содержаниями тантала (степная зона) . .	*A*	23	2,3	От 0,1 до 0,4	1 : 2,3

Из этой таблицы видно, что концентрация тантала в почвах над промышленными месторождениями по сравнению с непромышленными выше в несколько раз и составляет в среднем 60—70 *г/т*, коэффициент контрастности не ниже 6. Площадь аномалий может быть различной.

Низкая миграционная способность тантала позволяет (при определенном положении рудных тел в рельефе) по данным почвенного опробования произвести приближенное оконтуривание участков с промышленно интересной концентрацией металла в коренных породах.

По содержанию тантала в почвах можно ориентировочно определить его концентрацию в коренных рудоносных породах, так как известно, что содержание его в коренных породах и в почвах (по горизонту *A* — для степных ландшафтов и по горизонту *B* — для таежных и лесостепных) отличается в среднем не более чем в 2 раза. Зная площадь экзогенных аномалий и среднее содержание в них металла, можно произвести ориентировочную оценку месторождения.

Интерпретировать аномалии по элементам-индикаторам танталового оруденения значительно сложнее. Для этого должны использоваться статистически обработанные данные по комплексу элементов-

индикаторов, оценки параметров распределения которых в пределах ореолов рассматривались выше (см. часть II, глава 3).

При оценке аномалий необходимо также иметь в виду, что в пределах ореолов рассеяния, связанных с месторождениями тантала, имеет место корреляционная связь почти между всеми рудными элементами (см. часть II, глава 3). В пределах геохимического фона такая связь, как правило, отсутствует.

Для более достоверной оценки экзогенных аномалий во всех случаях необходимо производить отбор и анализ проб из коренных рудоносных пород по опорным профилям.

Биогеохимический метод поисков

Биогеохимический метод поисков рудных месторождений может быть рекомендован к использованию в ландшафтно-геохимических условиях, в которых почвенное опробование не дает положительных результатов. Применение этого метода при поисках месторождений тантала целесообразно в условиях заболоченных площадей, особенно при наличии мощного (более 3 *м*) покрова дальнеприносных отложений. Метод может оказаться весьма эффективным также в условиях закрытых сухих степей со слабо развитым почвенным слоем, перекрывающим толщу дальнеприносных отложений.

Наиболее эффективно применение биогеохимического метода при поисках месторождений тантала и бериллия в условиях лесной заболоченной зоны Сибири, лесостепной зоны Сибири и зоны сухих степей Казахстана и Средней Азии.

В условиях лесной заболоченной зоны Сибири, где в силу большого развития болот отбор почвенных проб связан с большими трудностями, отбор проб растений очень прост. Биогеохимические ореолы элементов-индикаторов по сравнению с почвенными, как правило, более четко фиксируют рудные тела и месторождения.

В условиях зоны сухих степей корневая система растений проникает на большую глубину — до 20—25 *м*, помимо этого она способствует поднятию грунтовых вод. Почвенный покров здесь весьма незначительный и легко смещается. Если между содержанием микроэлементов в растениях и концентрацией их в коренных породах наблюдается наличие корреляционной зависимости, то между содержанием их в почве и породе, в растениях и почве она часто отсутствует. Исключение составляет только литий, между содержанием которого в растениях, почве и породе наблюдается прямая положительная корреляционная связь.

Сеть биогеохимического опробования в зависимости от масштаба и задач работ определяется на основе Инструкции по геохимическим методам поисков рудных месторождений (1965).

При этом необходимо иметь в виду.

1. Опробоваться должна всегда одна и та же часть растения. У древесных пород лучше всего отбирать пробы 2—3 годичных ветвей с листьями или хвоей деревьев, стебли и листья трав и кустарников. Отбирать пробы корневой системы растений и коры деревьев, несмотря на лучшую концентрацию ими некоторых элементов, не следует. Во-первых, это очень трудоемкая операция, а, во-вторых, корни необходимо тщательно очищать от почвы.

2. При отборе проб древесных пород необходимо учитывать их возраст. Опробоваться должны деревья одного возраста (примерно одной высоты и одного диаметра ствола).

3. Во избежание влияния степени освещенности деревьев солнцем на содержания в них микроэлементов, в пробы должны входить ветки с хвоей или листьями, отобранные равномерно со всех четырех сторон опробуемого дерева.

4. Во избежание сезонных влияний на концентрацию микроэлементов растениями опробование лучше проводить в более сжатые сроки, в период их массового цветения. Лучшим временем для проведения биогеохимических поисков в ландшафтно-геохимических условиях лесной заболоченной зоны являются июль — август; лесной, лесостепной и степной зон — июнь — август и зоны сухих степей — май и сентябрь месяцы.

5. При проведении биогеохимических поисков ввиду различия в степени концентрации микроэлементов растениями опробоваться должен один и тот же вид растения по всей исследуемой площади. Если это невозможно, то надо опробовать растения, характеризующиеся одинаковой степенью концентрации ими микроэлементов. Если и это невозможно, то при обработке результатов анализов необходимо пользоваться уравнением регрессии.

6. Выбор растений для опробования производится с учетом ландшафтно-геохимических условий района и физиологических особенностей растений.

а) при проведении биогеохимических поисков литионит-амазонит-альбитовых апогранитов и мусковит-альбитовых апогранитов в условиях лесной зоны Сибири можно опробовать лиственницу (*Larix dahurica*), бруснику (*Vaccinium vitis idaea*), багульник (*Ledum palustre*), березу бородавчатую (*Betula verrucosa*), сосну (*Pinus silvestris*), мхи и лишайники;

б) при проведении биогеохимических поисков литионит-амазонит-альбитовых апогранитов в условиях лесостепной зоны можно опробовать лиственницу (*Larix dahurica*), сосну (*Pinus silvestris*); бобовые травы [1]: вику однопарную (*Vicia unijuga*), горошек ложносечевичниковый (*Vicia pseudorobus*), горошек красивый (*Vicia amoena*), клевер люпиновый (*Trifolium lupinaster*), астрагал перепончатый (*Astragalus membranaceus*); злаки [2]: вейники (*Calamagrostis epigeios*, *C. Langsdorfii*), мятлик (*Poa pratensis*); растения группы разнотравья: прострел (*Pulsatilla patens*), лапчатку пижмолистную (*Potentilla tanacetifolia*), полынь Гмелина (*Artemisia Gmelini*), горицвет

[1] Все перечисленные виды бобовых трав характеризуются одинаковой степенью концентрации ими лития, бериллия, тантала, ниобия, олова и свинца.

[2] Все перечисленные виды злаковых трав содержат одинаковые количества лития, бериллия, тантала, ниобия, олова и свинца.

амурский (*Adonis amurensis*), стеллеру карликовую (*Stellera chamaejasme*), пижму сибирскую (*Tanacetum sibiricum*);

в) при проведении биогеохимических поисков месторождений тантала типа сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов в условиях лесостепной зоны Сибири можно опробовать виды трав, перечисленные в пункте 6б. Деревья опробовать в данных ландшафтно-геохимических условиях нельзя. Биогеохимические ореолы по содержанию элементов-индикаторов в деревьях смещаются на очень большое расстояние от месторождения (400—500 *м*), в то время как биогеохимические ореолы по травам четко фиксируют рудные зоны; максимальные смещения при крутизне склонов 30—40° не более 30 *м*;

г) при проведении биогеохимических поисков месторождений тантала типа сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов в ландшафтных условиях степной зоны Сибири лучше всего опробовать пижму сибирскую (*Tanacetum sibiricum*), горицвет амурский (*Adonis amurensis*), полынь холодную (*Artemisia frigida*), полынь Гмелина (*Artemisia Gmelini*), ковыль (*Stipa capillata*);

д) при проведении биогеохимических поисков в условиях зоны сухих степей Казахстана опробуются ковыли (*Stipa sareptana*, *St. capillata*), типчак (*Festuca sulcata*), полыни (*Artemisia communtata*, *Art. globellia*, *Art. frigida*, *Art. Gmelini*, *Art. sublessingiana*, *Art. marschalian*, *Art. austriaca*).

7. Вес растительных проб с учетом всех видов анализов (спектральных, химических) и их контроля 400—500 *г* на зеленую массу растений в сыром состоянии.

8. Проведение биогеохимических поисков должно сопровождаться геоботаническими наблюдениями, заключающимися в характеристике растительности исследуемого района (описывается тип растительности, ее видовой состав, соотношение видов в травостое или древостое, плотность травостоя и древостоя, проективное покрытие, ярусность растительного покрова, фазы развития, а также отмечаются различного рода отклонения от нормального роста и развития трав).

9. Все отобранные растительные пробы высушиваются на воздухе или в теплом помещении, измельчаются и озоляются. Озоление можно проводить в два приема, вначале в огнеупорной посуде пробы озоляются до черной золы, затем черная зола в муфельной печи при температуре 400—500° С доводится до белой. Озоление до черной золы можно проводить путем мгновенного озоления пламенем.

10. Результаты анализов растительных проб с целью наиболее точного определения фоновых и аномальных содержаний микроэлементов в растениях и наиболее точного выделения биогеохимических аномалий должно обрабатываться методами математической статистики (Беус и др., 1965).

Элементами-индикаторами биогеохимических поисков месторождений тантала типа литионит-амазонит-альбитовых апогранитов в ус-

ловиях таежной зоны Сибири являются литий, тантал, ниобий и олово; в лесостепной — литий и рубидий.

На наличие массивов литионит-амазонит-альбитовых апогранитов с промышленными содержаниями тантала указывает повышение концентрации в золе лиственницы (ветки, хвоя) лития, тантала, ниобия, олова и в золе перечисленных выше видов бобовых трав лития и рубидия в 3—10 раз и более по сравнению с местным биогеохимическим фоном. Повышенные концентрации лития в лиственнице от 2 до 40 *г/т* и в березе от 3 до 12 *г/т* на золу веток с хвоей (листьями) может указывать на наличие непромышленной ниобиево-танталовой минерализации.

В качестве элементов-индикаторов биогеохимических поисков месторождений тантала типа литионит-амазонит-альбитовых апогранитов в условиях таежной зоны Сибири можно использовать также бериллий и свинец. Повышенные содержания этих элементов в лиственнице (*Laris dahurica*), превышающие местный биогеохимический фон в среднем в 2—2,5 раза, четко оконтуривают зону экзоконтактов рудоносных массивов апогранитов.

В качестве косвенного элемента-индикатора биогеохимических поисков литионит-амазонит-альбитовых апогранитов в ландшафтных условиях таежной зоны Сибири можно использовать также рубидий. Под рудными площадями содержание этого элемента в растениях минимальное. Причем минимальным концентрациям рубидия в лиственнице в данных ландшафтно-геохимических условиях соответствуют максимальные содержания лития, олова и бериллия.

Элементами-индикаторами биогеохимических поисков месторождений тантала типа сподумен-альбитовых и лепидолит-альбитовых пегматитов являются литий, бериллий, тантал и ниобий. Увеличение концентрации этих элементов в растениях в 3—10 раз и более по сравнению с фоновыми содержаниями указывает на наличие рудных пегматитовых жил.

Критерием, используемым при биогеохимических поисках месторождений тантала типа литионит-амазонит-альбитовых апогранитов, может служить также величина дисперсии содержаний в растениях лития, бериллия, рубидия.

Величина дисперсии содержаний лития в выборках проб лиственницы даурской (*Larix dahurica*), березы бородавчатой (*Betula verrucosa*), бобовых трав соответственно в 12,3 и 1,5 раза выше, чем в выборках проб этих же видов растений, отобранных над массивом апогранитов с непромышленным содержанием тантала. Дисперсия содержаний бериллия в выборках проб лиственницы с рудных массивов танталоносных апогранитов в 3—5 раз выше, чем в выборках проб с фоновых площадей.

Что касается рубидия, то величина дисперсии его содержаний в выборках проб лиственницы с рудных массивов в 30—40 раз меньше, чем с фоновых площадей (таежная зона Сибири).

Таким образом, при выделении биогеохимических аномалий помимо абсолютного содержания элементов-индикаторов Li, Rb,

Be, (Ta), (Nb), Sn, Pb в растениях необходимо обращать внимание на величину дисперсии и отношения содержаний элементов-индикаторов в растениях различного вида.

Наиболее надежные результаты получаются при использовании всех поисковых критериев биогеохимического метода.

Гидрогеохимические методы поисков [1]

Гидрогеохимические поиски месторождений тантала проводятся в соответствии с инструкцией о проведении геохимических поисков рудных месторождений (1965) на первом этапе поисковых работ, когда в задачу поисков ставится выявление перспективных участков для постановки более детальных исследований. В процессе поисковых работ производится отбор проб вод и донных осадков, если опробуются поверхностные водотоки.

Наиболее рационально проведение гидрогеохимических поисков в масштабе 1 : 200 000 — 1 : 50 000, при этом максимальный эффект может быть получен при масштабе 1 : 50 000.

В условиях Сибири лучшим периодом для проведения гидрогеохимических поисков является конец лета и осень, когда происходит полное протаивание деятельного слоя и наблюдению становятся доступны более глубокие водоносные горизонты (Тихонова, Шрамко, 1966).

При расстоянии между точками отбора проб в среднем 500—600 *м* следует в качестве индикаторов в основном ориентироваться на литий и фтор. В перспективных участках для выявления зональности ореола отбор проб производится через 100—200 *м*. Эти пробы должны обязательно анализироваться также на бериллий и ниобий.

Анализы водных проб с целью определения общего солевого состава, а также анализы на фтор, ниобий, молибден и сумму тяжелых металлов целесообразно выполнять в полевой лаборатории. Здесь же производится соосаждение бериллия с сульфидом кадмия и концентрирование вод для определения лития и натрия. Из полученных концентратов бериллий определяется приближенно количественным или количественным спектральным методом, а литий и натрий — методом фотометрии пламени.

При залегании рудных тел выше местных базисов эрозии, а также при пересечении этих тел глубокими тектоническими нарушениями, выводящими на поверхность трещинные воды, образуются открытые гидрогеохимические ореолы и потоки рассеяния. Ореолы подобного типа четко фиксируются в поверхностных водотоках и различных очагах разгрузки подземных вод. В указанных случаях эффективно проведение гидрогеохимических поисков по поверхностным водотокам.

Наиболее благоприятными для применения гидрогеохимических методов поисков месторождений тантала, залегающих выше

[1] Раздел составлен в основном по опубликованным материалам Н. В. Тихоновой и И. А. Шрамко.

Таблица 134

Условия применения различных методов геохимических поисков эндогенных месторождений тантала

Методы	Масштаб поисков		
	1 : 200 000	1 : 50 000	1 : 10 000 и крупнее
Оценка потенциальной танталоносности гранитоидов	Проводится параллельно с геологической съемкой или специально в перспективных районах, ранее покрытых съемкой		—
Опробование донных осадков	« » « »		—
Опробование природных вод	Применяется в случаях невозможности отбора проб донных осадков		—
Литогеохимическое опробование элювиально-делювиальных отложений почв при поисках вторичных ореолов рассеяния	—	Применяется в закрытых или частично закрытых районах с целью выявления вторичных литогеохимических ореолов в пределах перспективных площадей, выделенных предыдущими методами. Обычно эффективно при мощности рыхлых отложений до 5 *м*	Применяется в закрытых или частично закрытых районах с целью оконтуривания и предварительной оценки выявленных аномалий. Обычно эффективно при мощности рыхлых отложений до 5 *м*
Литогеохимическое опробование коренных пород при поисках эндогенных ореолов	—	Применяется только для поисков скрытых апогранитовых месторождений в перспективных районах, с удовлетворительной обнаженностью, выявленных при оценке потенциальной танталоносности гранитов, или при опробовании донных осадков или природных вод	Применяются для поисков слепых рудных тел в районах с удовлетворительной обнаженностью, а также для оценки перспектив вторичных аномалий, вскрываемых скважинами и горными выработками
Биогеохимическое опробование	—	Применяется в закрытых районах, когда литогеохимическое опробование неэффективно (при мощности рыхлых отложений 5—20 *м*, в условиях заболоченности, при наличии выщелоченных верхних горизонтов почв и т. д.)	

местных базисов эрозий, являются районы с среднегорным рельефом и хорошо развитой сетью мелких речных долин, дренирующих небольшие водосборные площади.

Сплошное развитие многолетней мерзлоты не является препятствием для применения гидрогеохимического метода поисков. Более того, в условиях сильной заболоченности, связанной с повсеместным развитием многолетней мерзлоты, данный метод наряду с биогеохимическим является единственно применимым.

Для рудных тел, залегающих ниже местных базисов эрозии, в слабо расчлененных предгорных и равнинных областях характерны закрытые гидрогеохимические ореолы. Указанные водные ореолы рассеяния не вскрываются современными эрозионными формами рельефа, поэтому в поверхностных водотоках они не обнаруживаются. Ореолы таких месторождений могут быть зафиксированы в участках разгрузки вод глубокой циркуляции, расположенных иногда на значительном удалении от источника насыщения. Выявление закрытых гидрогеохимических ореолов возможно только путем отбора проб воды из горных выработок и водозаборных сооружений (шахт, штолен, шурфов, скважин, колодцев и т. д.).

Основным недостатком гидрогеохимического метода является трудность интерпретации гидрогеохимических аномалий в связи с необходимостью учитывать большое количество геологических, гидрогеологических, физико-химических и других факторов. В частности, при гидрогеохимических поисках месторождений возможно обнаружение не только водных ореолов и потоков рассеяния месторождений, но и ложных ореолов, не связанных с конкретным месторождением. Формирование ложных аномалий может быть обусловлено целым рядом факторов:

1) выносом водами элементов-индикаторов из регионально обогащенных ими литологических комплексов пород;

2) выносом трещинными водами рудных элементов-индикаторов из обогащенных ими зон тектонических нарушений;

3) накоплением элементов в грунтовых и поверхностных водах аридной зоны;

4) накоплением элементов в поверхностных водоемах;

5) искусственным загрязнением природных вод и донных осадков рудничными водами и материалом из хвостов обогатительных фабрик и т. д.

Все вышесказанное следует учитывать при интерпретации гидрогеохимических аномалий. Следует подчеркнуть, что до настоящего времени не проведен сравнительный анализ эффективности гидрогеохимического метода и метода донных осадков. Вероятно, в поверхностных водотоках метод донных осадков является более простым и эффективным.

Условия применения различных методов геохимических поисков эндогенных месторождений тантала обобщены в табл. 134.

ЛИТЕРАТУРА

Беус А. А. Геохимия грейзеновых месторождений и закономерности распределения в них редких элементов. Госгеолтехиздат, 1960. (Междунар. геол. конгресс. XXI сессия. Докл. сов. геологов. Проблема 1.)

Беус А. А. Режим кислотности — щелочности как фактор концентрации редких элементов в процессах метасоматоза. В кн.: «Физико-химические проблемы горных пород и руд». Изд-во АН СССР, 1961.

Беус А. А. О распределении лития в магматических породах. «Геохимия», 1964, № 8.

Беус А. А. Принципы геохимической прогнозной оценки потенциальной рудоносности магматических комплексов. В кн.: «Вопросы прикладной геохимии». Изд-во «Недра», 1966_1.

Беус А. А. Распределение тантала и ниобия в мусковитах из гранитных пегматитов. «Геохимия», 1966_2, № 10.

Беус А. А., Британев М. Д., Гречухин Н. А. Методические указания по проведению геологоразведочных работ на месторождениях бериллия, тантала и ниобия. Госгеолтехиздат, 1957.

Беус А. А., Залашкова Н. Е. О процессах высокотемпературного послемагматического метасоматоза в гранитоидах. «Изв. АН СССР. Серия геол.», 1962, № 4.

Беус А. А., Залашкова Н. Е. О танталитовой минерализации в метасоматически измененных гранитах (апогранитах). «Геология рудных м-ний», № 6, 1965.

Беус А. А., Северов Э. А., Ситнин А. А., Субботин К. Д. Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). Изд-во АН СССР, 1962.

Беус А. А., Ситнин А. А. Микролитсодержащие граниты — новый перспективный тип месторождений тантала. «Разведка и охрана недр», 1960, № 10.

Беус А. А., Ситнин А. А. К геохимии тантала и ниобия в гидротермально-пневматолитическом процессе. «Геохимия», 1961, № 3.

Беус А. А., Ситнин А. А. Распределение петрогенных элементов в гранитоидах. В кн.: «Проблемы геохимии», Изд-во «Наука», 1965.

Беус А. А., Ойзерман М. Т. О распределении рубидия в магматических породах и корреляционной связи между рубидием и калием. «Геохимия», 1965, № 11.

Беус А. А., Григорян С. В., Ойзерман М. Т. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. Изд-во «Недра», 1965.

Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. «Геохимия», 1956, № 1.

Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. Изд-во АН СССР, 1957.

Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород Земной коры. «Геохимия», 1962, № 7.

Власов К. А., Еськова Е. М., Кузьменко М. В. Ловозерский щелочной массив. Изд-во АН СССР, 1959.

Герасимовский В. И., Кахана М. М., Родионова Л. М. Геохимия тантала и ниобия в нефелиновых сиенитах Ловозерского массива. «Геохимия», 1957, № 5.

Герасимовский В. И., Карпушина В. А. О соотношении ниобия и тантала в магматических породах. «Геохимия», 1965, № 6.

Гинзбург А. И. Поисковые признаки редкометальных пегматитов. «Разведка недр», 1948, № 3.

Гинзбург А. И. О минералах — геохимических индикаторах — и их значении при поисках редких металлов в пегматитах. Докл. АН СССР, т. 98, № 2, 1954.

Гинзбург А. И. О некоторых особенностях геохимии тантала и типах танталового оруденения. «Геохимия», 1956, № 3.

Гинзбург А. И. Типы редкометальных месторождений, генетически связанные с различными интрузивными комплексами. В кн.: «Магматизм и связь с ним полезных ископаемых». Госгеолтехиздат, 1960.

Гинзбург А. И., Родионов Г. Г. Поисковые критерии редкометальных пегматитов. Госгеолтехиздат, 1961. (Геология м-ний редких элементов, вып. 14.)

Говоров И. Н. Грейзенизация карбонатных пород. Изд-во АН УССР, Киев, 1960. (Междунар. геол. конгресс, XXI сессия. Докл. сов. геологов. Проблема 1.)

Говоров И. Н. Геохимические этапы рудного процесса гранитных интрузий. Изд-во «Недра», 1964. (Междунар. геол. конгресс, XXII сессия. Докл. сов. геологов. Проблема 15.)

Грабовская Л. И., Астрахан Е. Д. Биогеохимические и геоботанические исследования при поисках редкометальных месторождений. Госгеолтехиздат, 1963. (Геология м-ний редких элементов, вып. 19.)

Губерман Ш. А., Извекова М. Л., Холин А. И. Использование алгоритма распознавания образов для решения задач промысловой геофизики. Докл. АН СССР, т. 154, № 5, 1964.

Еськова Е. М., Мухитдинов Г. М., Халезова Е. Б. Некоторые особенности химико-минералогического состава щелочных пород Вишневых гор. Изд-во АН СССР, 1959. (Тр. ИМГРЭ, вып. 3.)

Знаменский Е. Б. К вопросу о средних содержаниях ниобия и тантала в изверженных горных породах в земной коре. «Геохимия», 1957, № 8.

Знаменский Е. Б., Родионова Л. М., Кахана М. М. О распределении ниобия и тантала в гранитах. «Геохимия», 1957, № 3.

Знаменский Е. Б., Конусова В. В. и др. Распределение титана, ниобия и тантала в сфенсодержащих гранитоидах. «Геохимия», 1962, № 9.

Знаменский Е. Б. Относительно средних содержаний ниобия и тантала в гранитоидах. В кн.: «Химия земной коры», т. 2, Изд-во «Наука», 1964.

Знаменский Е. Б., Цыханский В. Д., Конусова В. В. Распространенность ниобия и тантала в траппах. В кн.: «Проблемы геохимии». Изд-во «Наука», 1965.

Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1965.

Канищев А. Д. О связи гидрогеохимических аномалий бериллия с проявлениями эндогенной бериллиевой минерализации. В кн.: «Вопросы прикладной геохимии». Изд-во «Недра», 1966.

Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1965.

Кудрин В. С., Кудрина М. А. Редкометальные метасоматические образования, связанные с субщелочными гранитоидами. Изд-во «Недра», 1965. (Геология м-ний редких элементов, вып. 25.)

Ногина Н. А. Почвы Забайкалья. Изд-во «Наука», 1964.

Павлова Н. Н. Определение малых содержаний тантала. В кн.: «Вопросы прикладной геохимии». Изд-во «Недра», 1966.

Подольский А. М. и др. Тантал в аляскитах и субщелочных гранитах восточной части Центрального Казахстана. «Геохимия», 1965, № 5.

Пополитов Э. И. и др. Распределение ниобия и тантала в кислых и щелочных породах Северо-Восточной Тувы. В кн.: «Вопросы геохимии изверженных горных пород и рудных месторождений Восточной Сибири». Изд-во «Наука», 1965.

Родионов Д. А. О внешнем контроле результатов анализов при подсчете запасов рудных месторождений. «Разведка и охрана недр», 1964, № 5.

Ситнин А. А., Разина И. С. О химическом составе литиевых слюд из метасоматически измененных гранитов. «Геохимия», 1963, № 7.

Ситнин А. А. О содержании тантала и ниобия в слюдах из гранитоидов СССР. «Геохимия», 1966, № 9.

Ситнин А. А. и Сункинзян В. В. О вертикальной геохимической зональности массива танталоносных апогранитов. Мат-лы II конфер. по околорудному метасоматизму. Л., 1966.

Солодов Н. А. Внутреннее строение и геохимия редкометальных гранитных пегматитов. Изд-во АН СССР, 1962.

Соловов А. П. Классификация ореолов рассеяния рудных месторождений. В кн.: «Глубинные поиски рудных месторождений». Госгеолтехиздат, 1963.

Толстой М. И. Некоторые вопросы оценки металлоносности геологических образований и обнаружения эндогенных геохимических ореолов. Изд. Киевского ун-та, 1964.

Темников Ю. Н., Тунин Б. М. Поисковые признаки редкометальных месторождений гранитоидов. «Разведка и охрана недр», 1965, № 2.

Тихонова Н. В., Шрамко И. А. Опыт разработки гидрогеохимического метода поисков месторождений редких элементов. В кн.: «Вопросы прикладной геохимии». Изд-во «Недра», 1966.

Флейшер М., Чао Э. К. Т. Некоторые проблемы подсчета среднего содержания элементов в земной коре. Изд-во «Мир», 1964. (Междунар. геол. конгресс, XXI сессия, вып. 3.)

Хокс Х. Е., Уэбб Д. С. Геохимические методы поисков минеральных месторождений. Изд-во «Мир», 1964.

Черницкий П. И. Таблицы вероятностей. Изд-во Министерства обороны, 1957.

Четырбоцкая И. И. Танталоносность вольфрамитов и касситеритов. Геология рудных м-ний, 1966, т. VIII, вып. 3.

Шарапов И. П. Применение математической статистики в геологии. Изд-во «Недра», 1965.

Янко Я. Математико-статистические таблицы. Госстатиздат, 1961.

Atkins D. N., Smales A. A. The determination of tatalum and tungsten in roks and meteorites by neutron aktivation analisis. Analyt. Chem. Acta, vol. 22, No. 5, 1960.

Goldshmidt V. M. Geochemistry. New York, 1954.

Mason Br. Principles of the Geochemistr, New York, 1957.

Rankama K. The niobium and tantalum content of three finish archean granites. Bull. Commis. Geol. Finlande, No. 128, 1943.

Rankama K. On the geochemistry of tantalum. Bull. Commiss. Geol. Finlande, 1944.

Rankama K., Sahama T. Geochemistry. Chicago, 1950.

Steyens R. E. Second report on a Cooperative investigation of the composition of two silicate roks. Geol. surv. bull. 113, Washington, 1960.

Turekiana K. K., Wedepohl K. H. Distribution of the Elements in some major units of the Earth's crust. Geol. Soc. of Amer. vol. 72, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

ЧАСТЬ I. ГЕОХИМИЯ ТАНТАЛА И ТИПЫ ЕГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Глава 1. **Геохимические особенности распределения тантала в земной коре** (А. А. Беус, А. А. Ситнин) 5

Глава 2. **Типы промышленных месторождений собственно танталовых руд** (А. А. Беус, А. А. Ситнин) 13

Глава 3. **Основные черты геохимии тантала в послемагматических процессах** (А. А. Беус, А. А. Ситнин) 56

ЧАСТЬ II. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА

Глава 1. **Геохимические критерии оценки потенциальной танталоносности гранитоидных комплексов** (А. А. Беус, А. А. Ситнин) 60

Глава 2. **Эндогенные геохимические ореолы месторождений тантала** . . 75

Эндогенные геохимические ореолы апогранитовых месторождений тантала (А. А. Беус, Л. А. Леонтьева) 75

Эндогенные геохимические ореолы пегматитовых месторождений тантала (Г. Г. Кочемасов) 99

Глава 3. **Экзогенные геохимические ореолы рассеяния месторождений тантала** 144

Вторичные (экзогенные) литогеохимические ореолы рассеяния месторождений тантала (В. В. Беренгилова) 144

Биогеохимические ореолы рассеяния месторождений тантала (Л. И. Грабовская) 183

Гидрогеохимические ореолы месторождений тантала 231

ЧАСТЬ III. МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОБСТВЕННО ТАНТАЛОВЫХ РУД

Глава 1. **Комплексирование и условия применения геохимических методов при поисках месторождений тантала** (А. А. Беус) 237

Глава 2. **Геохимические методы оценки потенциальной танталоносности гранитоидов при поисках масштаба 1 : 50 000—1 : 200 000** (А. А. Беус, А. А. Ситнин) 239

Глава 3. **Методы поисков месторождений тантала по эндогенным геохимическим ореолам** (А. А. Беус, Г. Г. Кочемасов) 245

Эндогенные геохимические ореолы танталоносных апогранитов 245

Эндогенные геохимические ореолы пегматитовых месторождений тантала 248

Глава 4. **Методика геохимических поисков месторождений тантала по экзогенным ореолам рассеяния** (В. В. Беренгилова, Л. И. Грабовская) 249

Биогеохимический метод поисков 254

Гидрогеохимический метод поисков 258

Литература 261

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
65	1 сверху	образцов	образов
248	7—8 снизу	95% доверительных пределов	95%-ные доверительные пределы
»	4 снизу		
249	2 сверху		

Заказ 1355.