

ГЕОХИМИЯ
РУДНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОЦЕССАХ
ВЫВЕТРИВАНИЯ,
ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ
И КАТАГЕНЕЗА

НОВОСИБИРСК—1979

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

3055

ГЕОХИМИЯ
РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОЦЕССАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ,
ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ
И КАТАГЕНЕЗА

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

НОВОСИБИРСК-1979



В статьях этого сборника рассматривается поведение микроэлементов — тантала, ниобия, циркония, гафния, бора, бериллия, урана, тория, меди, цинка, кобальта, никеля и марганца — в процессах гипергенного изменения магматических пород Алтае-Саянской складчатой области и Казахстана. Показаны закономерности распределения радиоактивных элементов в отложениях Западно-Сибирской плиты.

В основу фактического материала положены гамма-спектрометрические, нейтронно-активационные, атомно-абсорбционные и спектрофотометрические анализы, апробированные на стандартных образцах горных пород.

Ответственный редактор
канд. геол.-минерал. наук В.М. Гавшин

Печатается по решению
секции минералогии,
петрографии, геохимии
и рудных месторождений
Ученого совета ИГиГ
СО АН СССР

© Институт геологии
и геофизики СО АН СССР,
1979 г.

Выветривание кристаллических горных пород, оказавшихся на поверхности литосферы, во многом предопределяет дальнейшие пути химических элементов в осадочном процессе. Уже на стадии формирования аллювия начинается отделение растворенных масс от остаточных продуктов, в которых, в свою очередь, уже возникают предпосылки для последующей гранулометрической дифференциации вещества. Последовательное исследование путей химических элементов, начиная от их мобилизации в процессе выветривания до осаждения в зонах осадконакопления и до последующего перераспределения в постседиментационной геологической истории осадочных формаций связано с необходимостью совершенствования аналитической техники и, прежде всего, с введением в практику современных физических методов анализа горных пород и минералов.

В Институте геологии и геофизики СО АН СССР на протяжении ряда лет осваивались способы гамма-спектрометрического анализа радиоактивных элементов, атомно-абсорбционного определения золота, серебра, меди, цинка, кобальта, никеля и марганца, нейтронно-активационного анализа горных пород и минералов на золото, тантал, ниобий, цирконий, гафний и некоторые другие элементы, а также спектрофотометрического определения бора и бериллия. О качестве анализов можно судить по методическим разработкам и результатам исследования стандартных образцов горных пород, опубликованным в сборниках: "Ядерно-физические методы в геологии" (1975 г.), "Ядерно-геохимические методы" (1976 г.), "Физические методы анализа в геохимии" (1978 г.).

Высокая разрешающая способность аналитической техники позволяет получать достаточно надежные статистические оценки распределения микроэлементов в профиле выветривания или в разрезе осадочной толщи. В серии статей этого сборника на большом фактическом материале продемонстрированы закономерности поведения бора и бериллия в процессе формирования кор выветривания на магматических породах кислого и основного состава; оцениваются масштабы выноса ряда химических элементов в связи с изменением щелочности и окислительно-восстановительного потенциала при гипергенном изменении гранитов и, напротив, накопления бора и

марганца вместе с гидроксидами железа в верхних горизонтах алюминия. Рассматривается неодинаковая подвижность и возможности разделения тантала и ниобия, циркония и гафния в профиле выветривания. Вычислены статистические параметры распределения урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты.

Авторы надеются, что публикуемые материалы окажутся полезными для разработки обобщенных моделей эволюции химического состава стратисферы и экзогенного рудообразования.

В.М.Гавшин, Б.Л.Шербов, Ф.В.Сухоруков,
З.В.Малясова, Л.Н.Смергина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПРОФИЛЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ БАРЛАКСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА

Выветривание кристаллических горных пород как первое звено осадочного процесса во многом определяет пути и способы миграции химических элементов на поверхности литосферы, их рассеяние, разделение или сочетание и способы осаждения с возникновением концентраций, отвечающих понятию "руда". Для того, чтобы проследить геохимические связи элементов в элювиальном процессе, необходима достаточно мощная кора выветривания с развитым дифференцированным профилем; этим требованиям в значительной мере удовлетворяет вскрытая буровыми скважинами кора выветривания на гранитах Барлакского массива.

Из керна скважин П.А.Понетаевым через один метр отобраны пробы по всему профилю выветривания от неизмененных гранитов до переотложенных продуктов включительно. Все пробы обследованы в штупах и под микроскопом. Плотность определялась денситометрически, рН суспензии породы — на приборе рН-121. Главные породообразующие элементы определены на квантометре [1], щелочи — методом пламенной фотометрии, бор и бериллий — спектрофотометрически [17], уран — люминесцентным способом, торий — колориметрически, медь, кобальт, никель, цинк и марганец — атомно-абсорбционным методом. О качестве определения микроэлементов можно судить по результатам анализа стандартных образцов горных пород [2,4]. Полагая, что гипергенное преобразование не сопровождалось изменением объема породы, мы будем рассматривать распределение элементов в профиле выветривания, выражая их содержание в г/см³, как это рекомендует Н.А.Лисицына [11].

Барлакский гранитный массив — одно из ряда верхнепалеозойских интрузивных тел, залегающих среди песчано-сланцевых толщ инской серии Колывань-Томской складчатой зоны [13]. Характерной чертой барлакских гранитов так же, как и подобных им колыванских, являются необычно высокие содержания урана и тория. По этому признаку среди гранитоидных тел Западной и Средней Сибири их можно сопоставить лишь с куполами Мунгун-Тайгинского плутона,

едва вскрытого эрозией [14]. Это не просто формальное сопоставление, поскольку многочисленные ксенолиты вмещающих пород в гранитоидах Колывань-Томской складчатой зоны рассматриваются как признак неглубокого эрозийного среза [13].

В пределах Колывань-Томской складчатой зоны широко распространена древняя кора выветривания. Поскольку она перекрывается в разных районах то палеогеновыми или неогеновыми, то четвертичными отложениями, возраст ее не вполне ясен. В южной части региона в отложениях, залегающих на поверхности структурного элювия, были обнаружены органические остатки верхов палеогена, что, по мнению В.П.Казаринова, указывает на верхний возрастной предел гипергенного изменения [8]. По-видимому, одним из проявлений древнего элювиального процесса, охватывающего весь регион, является и кора выветривания на гранитах Барлакского массива [16].

В основании профиля выветривания выделяются исходные породы — серые среднезернистые порфириновые биотитовые граниты. В их составе преобладают ортоклаз и плагиоклазы (в сумме около 60%), кварца содержится 35%, неравномерно распределенного биотита — не более 1-3%. В шлифах наблюдается пелитизация ортоклаза, серпигитизация и незначительная альбитизация плагиоклаза, хлоритизация биотита. Изредка встречаются мелкие зерна циркона, практически отсутствуют непрозрачные рудные минералы. По химическому составу неизменные породы близки щелочноземельным гранитам (по А.Н.Заварицкому) [7].

При первых же макроскопически различимых признаках выветривания гранитов становится заметным существенное изменение их физических свойств и химического состава. Рентгеноструктурным анализом в измененных гранитах обнаруживается до 20% глинистых минералов — примерно поровну каолинита и гидрослюд. Плотность пород понижается от 2,53 до 1,89 г/см³; закисное железо переходит в окисное. В строгом соответствии с падением содержаний кремнезема, кальция и натрия понижаются значения pH суспензии породы (рис.1). Совершенно очевидно, что уменьшение щелочности полностью определяется выносом натрия при гидролитическом разложении плагиоклазов. Высокая щелочность суспензии неизменных гранитов, возникающая при их взаимодействии с водой, указывает на те условия среды, которые существовали в начале процесса вывет-

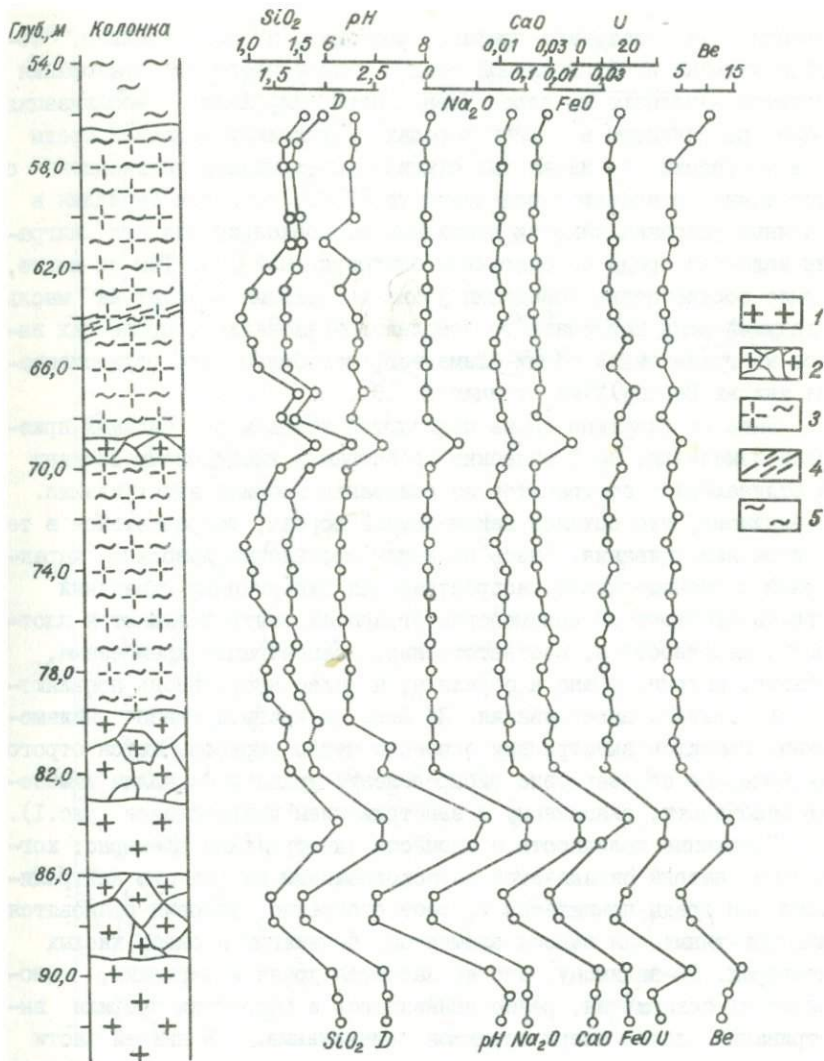


Рис.1. Распределение SiO_2 , CaO , FeO , Na_2O , Be , U величины pH и плотности пород в коре выветривания гранитов Барлакского массива

1-граниты; 2-зона дезинтеграции; 3-зона глин; 4-зона дробления; 5-переотложенные породы. Породообразующие компоненты - в г/см^3 ; микроэлементы - в мг/см^3

ривания. Как показывают графики, щелочные, а следовательно, со-
довые воды на этой начальной стадии гипергенного преобразования
гранитов извлекают из пород уран и бериллий. Если мобилизация
урана, рассеянного в горных породах, в условиях щелочной среды
и, в частности, на начальных стадиях выветривания установлена с
достаточной степенью определенности [3,6], то вынос бериллия в
щелочных условиях кажется неожиданным, поскольку для его мигра-
ции щелочная среда не считается благоприятной [5]. Тем не менее,
полное соответствие поведения урана и бериллия наводит на мысль
о ведущей роли карбонатного комплексобразования в процессах вы-
носа из гранитоидов обоих элементов, тем более, что существование
аниона $\text{Be}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ не отрицается [9].

Выше по скважине снова появляются граниты без видимых при-
знаков изменения, по физическим свойствам и химическому составу
не отличающиеся от гранитов из основания профиля выветривания.
По-видимому, это останец неизменной породы, сохранившейся в те-
ле коры выветривания. Здесь мы видим проявление довольно харак-
терной неравномерности распространения гипергенных изменений
в глубь субстрата. В неизменных гранитах опять повышаются плот-
ность, щелочность и, соответственно, концентрации кремнезема,
кальция, натрия, урана и бериллия, а далее вверх вновь появляйт-
ся все признаки выветривания. На фоне двукратной смены неиз-
менных гранитов выветрелыми особенно четко вырисовывается строго
закономерное соответствие распределений урана и бериллия измене-
нию щелочности, связанному с выветриванием плагиоклазов (рис.1).

Повышение щелочности в процессе выветривания эфемерно: ког-
да весь натрий оказывается израсходованным на реакцию нейтрали-
зации, pH среды понижается и, соответственно, условия становятся
благоприятными для выноса элементов, подвижных в слабо кислых
растворах. По-видимому, это не касается урана и бериллия, по-
скольку их содержания, резко понизившись в основании профиля вы-
ветривания, далее вверх остаются неизменными. В нижней части
коры выветривания с изменением щелочности в какой-то мере согла-
суется также распределение глинозема, кобальта, никеля, марганца
и цинка, хотя и не столь четко, как это наблюдается для урана и
бериллия (рис.2,3).

На уровне завершения выноса натрия содержание калия все еще

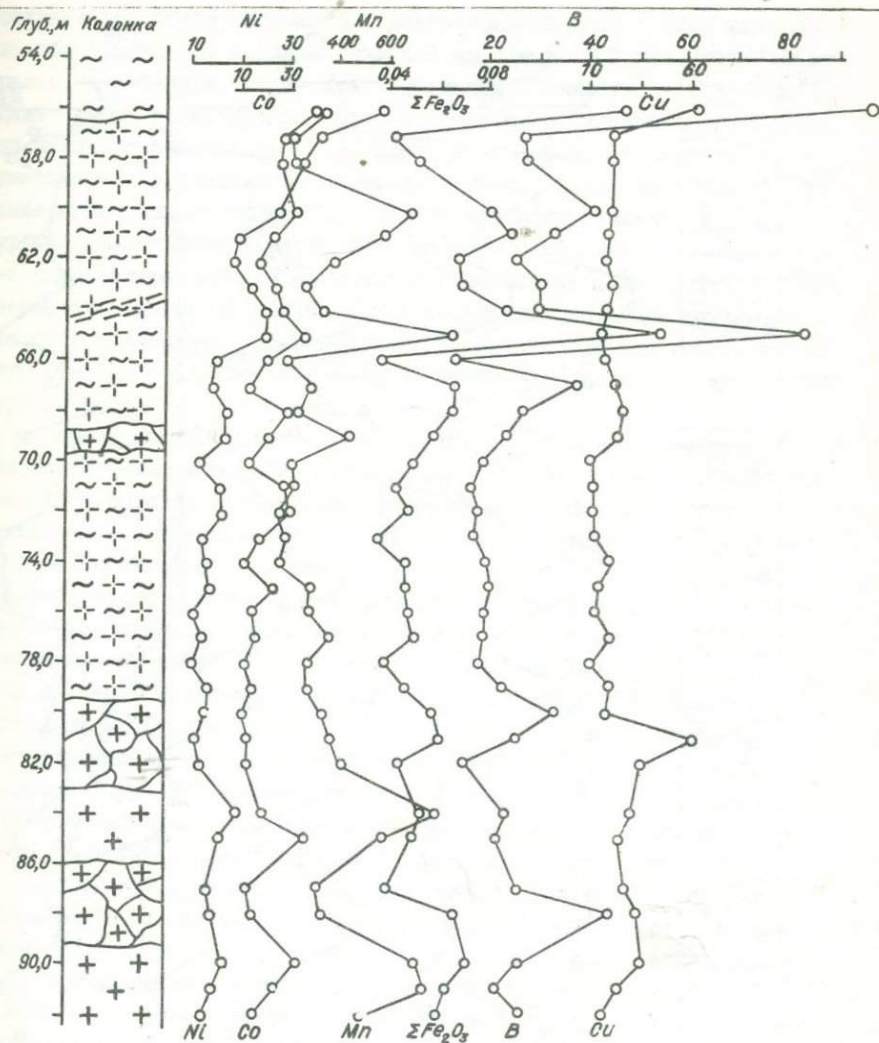


Рис.2. Распределение ΣFe_2O_3 , Mn, B, Ni, Co, Cu в коре выветривания гранитов Барлакского массива
Усл. обозн. см. рис. I

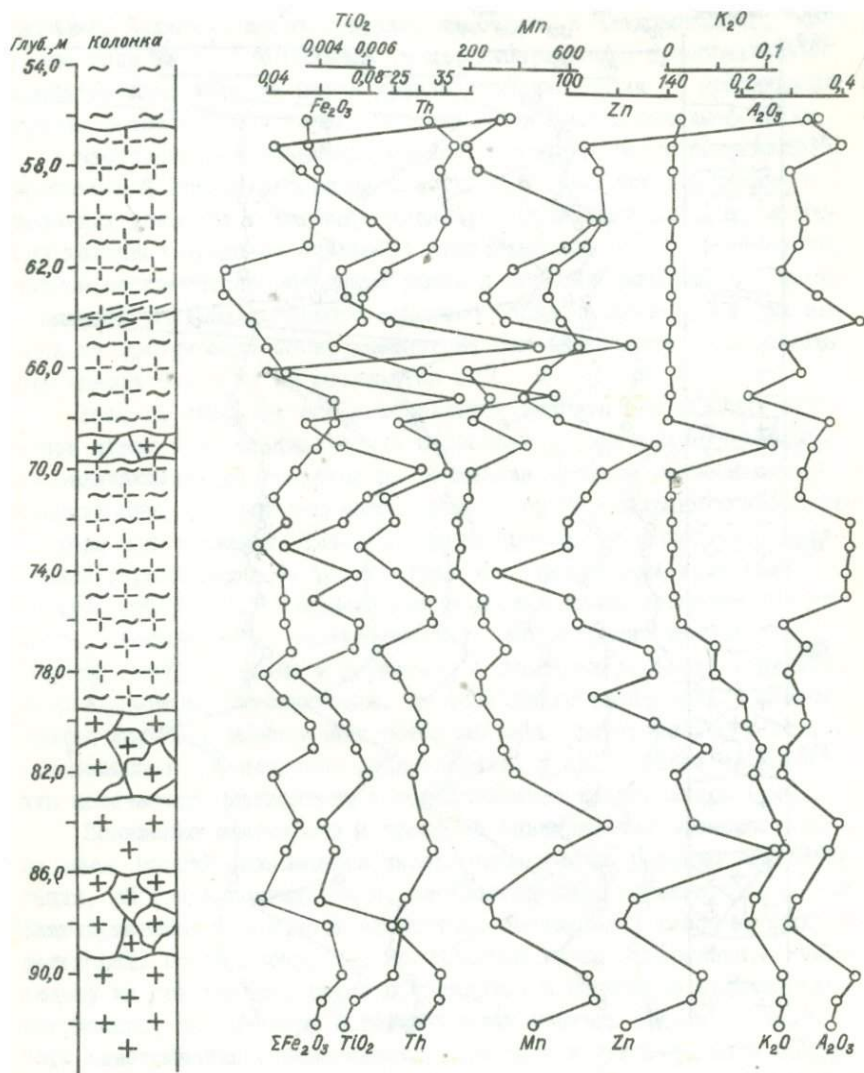


Рис.3. Распределение Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Mn , Th , Zn в коре выветривания гранитов Барлакского массива
Усл. см. рис. I

сохраняется почти неизменным; рентгенографически в этом интервале обнаруживается калиевый полевой шпат и до 30% глинистых минералов, в основном, каолинита, в меньшем количестве — гидрослюд. Далее вверх концентрация калия постепенно понижается, практически никак не сказываясь на щелочности суспензии; параллельно уменьшаются концентрации марганца и цинка, падая до минимума при завершении выноса калия (рис.3). По-видимому, именно на этом уровне заканчивается разложение биотита — основного минерала-концентратора цинка и марганца в гранитоидах [12]. Здесь же завершается окисление железа и возрастает концентрация глинозема за счет кремнезема — это начинается зона каолиновых глин; только тут становится заметным некоторое понижение содержания меди (рис.1,2,3).

Среди каолиновых глин обнаруживается останец гранитов, испытавших начальное выветривание; ниже этого останца содержание железа в породах остается монотонным; сразу же выше останца начинается его возрастание, исключительно за счет окисной формы. Хорошее соответствие с распределением окисного железа в этой верхней части профиля выветривания показывает содержания бора, марганца, кобальта, в меньшей степени — никеля и цинка; здесь же несколько повышаются концентрации урана и меди (рис.1,2,3). Все эти элементы в еще большем количестве содержатся в слое переотложенных продуктов выветривания, что дает основание связывать возрастание их концентраций с инфильтрацией поверхностных вод в верхние горизонты элювия: как указывает В.В.Щербина, бурные железняки могут служить "сорбционным геохимическим барьером" для бора, кобальта, никеля, урана и некоторых других элементов [18].

Если уран, бериллий, кобальт, никель, марганец и цинк выносятся из основания профиля выветривания в соответствии с изменением щелочности, а бор, марганец, кобальт, никель, цинк, уран и медь накапливаются в верхних горизонтах элювия на гидроокислах железа, то титан и торий в обоих случаях индифферентны. В своем распределении они следуют за железом вплоть до того уровня, где начинается накопление лимонита (рис.2). Как известно, среди породообразующих минералов главным концентратором титана и тория является биотит [12]. По-видимому, по этим двум элементам, не склонным к миграции в водных растворах, в какой-то мере можно

судить об изначальном распределении биотита в барлакских гранитах, и особенно по титану, поскольку в породе практически нет рудного минерала.

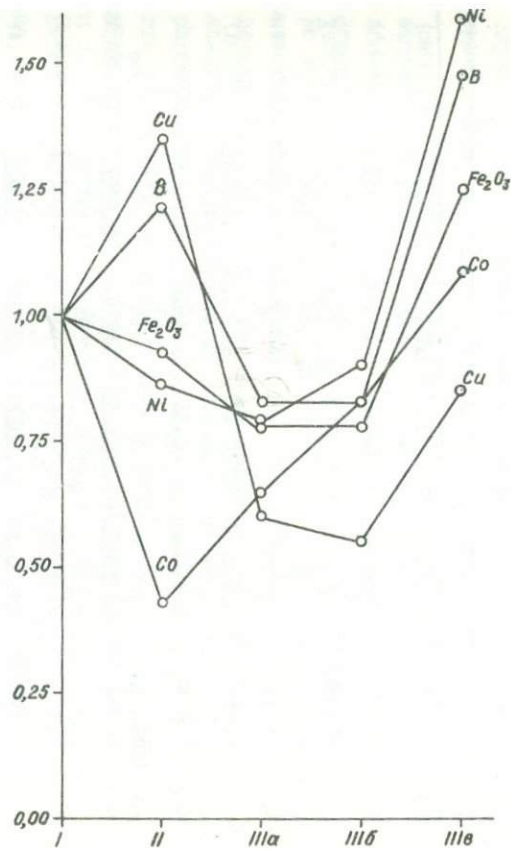
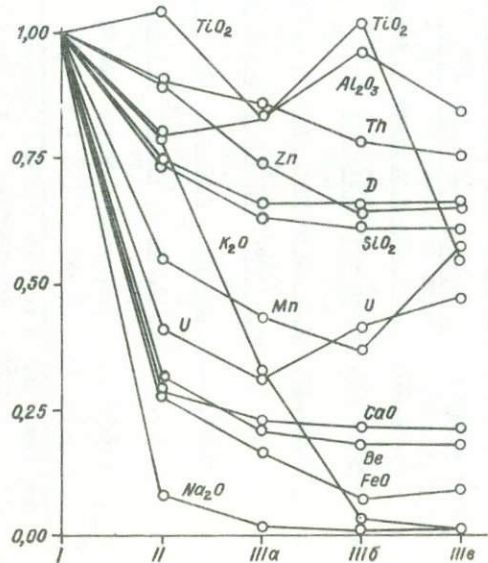
Для того, чтобы в обобщенной форме проследить динамику вовлечения химических элементов в миграцию по мере развития гипергенных изменений, расчленим профиль выветривания на зоны, в соответствии с систематикой Е.Г.Куковского [10]: зону исходных пород, переходную зону (дезинтеграции) и зону конечных продуктов (глин). Такое подразделение естественно возникает при макроскопическом исследовании пород. На основании аналитических данных зону каолиновых глин оказывается целесообразным расчленить на три подзоны: нижнюю (IIIa), в пределах которой еще не закончен вынос калия, среднюю (IIIб), где еще не заметно инфильтрационное обогащение пород окислами железа, и верхнюю (IIIв), в которой наблюдается концентрация целого ряда элементов на гидроокислах железа (рис.4). Усредненные аналитические данные для каждой зоны представлены в таблице I.

В таблице и на графике (рис.4) хорошо видно, что уже в зоне дезинтеграции граниты теряют практически весь натрий, почти три четверти кальция и бериллия, около половины урана, марганца и кобальта, четвертую часть кремнезема и совсем немного никеля. Бора и меди, напротив, в этой зоне содержится больше, чем в исходных породах — возможно, эти два элемента концентрируются гидрослюдами. С дальнейшим нарастанием гипергенного изменения, как было замечено Н.А.Джисциной [11], вынос большинства химических элементов становится значительно менее существенным: заметно уменьшаются лишь содержания кремнезема, калия, марганца, меди и цинка; концентрации остальных элементов либо почти не изменяются, либо даже возрастают. Сравнительно высокая "остаточная" концентрация урана в зоне каолиновых глин, по-видимому, связана с его входением в устойчивые по отношению к выветриванию акцессорные минералы: в гранитах соседнего Колянванского массива с ними связано 69–83% всего количества урана [15].

Накопление бора, никеля, кобальта, меди, урана и марганца в верхних горизонтах профиля выветривания хорошо соответствует привносу общего железа (рис.4). Что касается глинозема, титана и тория, то не вполне ясно, насколько некоторое уменьшение их

Рис.4. Изменение абсолютных масс химических элементов по зонам профиля выветривания. Пояснения в тексте

13



Т а б л и ц а I
Средние содержания породообразующих и малых элементов
в различных зонах профиля выветривания
Барлакского гранитного массива

Элемент	I	II	III ^A	III ^B	III ^B	IV
SiO ₂	71,1(1799)	<u>70,3(1329)</u> 0,74	<u>68,0(1142)</u> 0,63	<u>64,8(1089)</u> 0,61	<u>65,6(1102)</u> 0,61	66,0(1280)
TiO ₂	0,21(5,3)	<u>0,29(5,5)</u> 1,04	<u>0,26(4,4)</u> 0,83	<u>0,32(5,4)</u> 1,02	<u>0,17(2,9)</u> 0,55	0,18(3,5)
Al ₂ O ₃	15,54(393)	<u>16,4(310)</u> 0,79	<u>19,4(326)</u> 0,83	<u>22,4(376)</u> 0,96	<u>19,6(329)</u> 0,84	17,25(335)
ΣFe ₂ O ₃	2,24(56,7)	<u>2,78(52,5)</u> 0,93	<u>2,62(44,0)</u> 0,78	<u>2,55(42,8)</u> 0,78	<u>4,23(71,1)</u> 1,25	7,70(149,4)
Fe ₂ O ₃	0,64(16,2)	<u>2,18(41,2)</u> 2,54	<u>2,20(37,0)</u> 2,28	<u>2,37(39,8)</u> 2,46	<u>4,02(67,5)</u> 4,17	7,26(141)
FeO	1,45(36,7)	<u>0,54(10,2)</u> 0,28	<u>0,38(6,4)</u> 0,17	<u>0,16(2,7)</u> 0,07	<u>0,19(3,2)</u> 0,09	0,40(7,8)
MgO	0,10(2,5)	н/оо	н/оо	н/оо	н/оо	н/оо
MnO	0,025(0,6)	<u>0,018(0,3)</u> 0,50	<u>0,016(0,27)</u> 0,45	<u>0,010(0,17)</u> 0,28	<u>0,024(0,4)</u> 0,67	0,017(0,33)
CaO	1,66(42,0)	<u>0,65(12,3)</u> 0,29	<u>0,58(9,7)</u> 0,23	<u>0,56(9,4)</u> 0,22	<u>0,52(8,7)</u> 0,21	0,75(14,6)
Na ₂ O	3,86(97,7)	<u>0,42(7,9)</u> 0,08	<u>0,10(1,7)</u> 0,02	<u>0,05(0,8)</u> 0,01	<u>0,05(0,8)</u> 0,01	0,28(5,4)
K ₂ O	4,57(115,6)	<u>4,86(91,9)</u> 0,79	<u>2,3(38,6)</u> 0,33	<u>0,17(2,9)</u> 0,03	<u>0,1(1,7)</u> 0,01	0,72(14,0)
B	9,0(0,023)	<u>14,7(0,028)</u> 1,22	<u>11,4(0,019)</u> 0,83	<u>10,2(0,017)</u> 0,83	<u>20,4(0,034)</u> 1,48	50,0(0,097)
Be	5,5(0,014)	<u>2,3(0,0043)</u> 0,31	<u>1,7(0,0029)</u> 0,21	<u>1,5(0,0025)</u> 0,18	<u>1,5(0,0025)</u> 0,18	5,4(0,0105)
U	12,7(0,032)	<u>7,02(0,013)</u> 0,41	<u>6,12(0,010)</u> 0,31	<u>8,06(0,013)</u> 0,41	<u>8,25(0,015)</u> 0,47	2,6(0,017)
Th	25,6(0,065)	<u>31,0(0,059)</u> 0,91	<u>33,4(0,056)</u> 0,86	<u>30,3(0,051)</u> 0,78	<u>29,2(0,049)</u> 0,75	32,0(0,062)
Cu	8,0(0,020)	<u>14,2(0,027)</u> 1,35	<u>7,2(0,012)</u> 0,6	<u>6,4(0,011)</u> 0,55	<u>10,4(0,017)</u> 0,85	27,0(0,052)
Zn	60,4(0,153)	<u>73,0(0,138)</u> 0,90	<u>67,0(0,113)</u> 0,74	<u>58,6(0,098)</u> 0,64	<u>59,3(0,100)</u> 0,65	104,0(0,202)
Co	9,0(0,023)	<u>5,3(0,01)</u> 0,43	<u>8,8(0,015)</u> 0,65	<u>11,4(0,019)</u> 0,83	<u>14,7(0,025)</u> 1,09	21,0(0,041)
Ni	11,4(0,029)	<u>13,2(0,025)</u> 0,86	<u>13,4(0,023)</u> 0,79	<u>15,6(0,026)</u> 0,90	<u>27,6(0,046)</u> 1,59	61,0(0,118)
d	2,58	1,89	1,68	1,68	1,68	1,94
pH	9,2	7,0	6,4	6,3	6,5	6,6
n	5	6	5	5	11	1

Примечание. Число в числителе указывает содержание породообразующих элементов в вес.%, микроэлементов - в г/т. Число в скобках - абсолютное содержание, в мг/см³. Число в знаменателе - коэффициент концентрации элемента (K). d - плотность пород; n - количество анализов

количества вверх по профилю выветривания связано с их выносом и насколько — с изначальной неоднородностью гранитов. Во всяком случае, в итоге аллювиального процесса порода потеряла не более одной четверти алюминия, тория, и, возможно, титана.

Две пробы из коры выветривания были разделены на гранулометрические фракции. Оказалось, что в пробе №17 (из зоны Шб) обломки, крупнее 0,25 мм, представлены, в основном, кварцем, а фракция, мельче 0,001 мм, сложена целиком каолинитом (табл.2). Во всех этих фракциях содержится меньше бора, урана и бериллия, чем в породе в целом. Очевидно, главные конечные продукты выветривания — кварц и в какой-то степени, возможно, каолинит — являются "разбавителями" содержаний этих элементов, а концентрируются они во фракциях с размером зерен от 0,25 до 0,001 мм, где рентгено-структурным анализом устанавливаются гидрослюда и гидроокислы железа. Примерно так же распределяется по фракциям и торий, однако его содержание в каолине остается достаточно высоким (рис.5). Такая же картина обнаруживается и в пробе №25, но здесь в крупные фракции, кроме кварца, попадают каолинит, гидрослюда и сферические охристые стяжения; с увеличением количества гидрослюд и гидроокислов железа резко возрастают содержания бора, урана и в меньшей степени — бериллия и тория (рис.5). Сходство распределений урана и тория в гранулометрическом диапазоне от 0,25 до 0,001 мм позволяет предположить, что именно здесь оказываются устойчивые акцессорные минералы (в основном, циркон), поскольку в гипергенном процессе пути урана и тория обычно неодинаковы.

Авторы признательны Г.М.Комарницкому и П.А.Понетаеву за материал, предоставленный для исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. АРНАУТОВ Н.В. Прямые методы количественного спектрального анализа в геохимии.— В кн.: Физические методы анализа в геохимии. Новосибирск, 1978, с.4—23.
2. ГАВШИН В.М., БОБРОВ В.А., ВЕРТМАН Е.Г., ЖДАНОВА Л.В., МАЛЯСОВА З.В., ПАРХОМЕНКО В.С. Определение радиоактивных элементов в стандартных образцах СТ-1А, СТ-1А и СТД-1А.— Там же, с.38—45.

Минеральный состав гранулометрических фракций пород коры выветривания
гранитов Барлакского массива и содержание в них бора, бериллия, урана и тория

Фракции, мм	Минеральный состав, %	Количество фракции, %	Содержание во фракциях, г/т			
			B	Be	U	Th
Зона каолиновых глин (проба №17)						
>2	Кв(85), К(15), Г(сл)	5,08	4,0	0,8	1,95	8,0
2-1	Кв(90), К(10), Г(сл)	9,54	4,0	0,9	2,23	9,0
1-0,5	Кв(93), К(5), Г+ГО(2)	13,31	7,0	1,0	2,27	11,0
0,5-0,25	Кв(90), К(8), Г+ГО(2)	10,92	7,5	1,4	3,98	29,0
0,25-0,1	Кв(15), К(80), Г+ГО(5)	9,85	20,0	1,5	10,81	70,0
0,1-0,05	Кв(1), К(90), Г+ГО(9)	4,15	22,0	2,5	13,75	65,0
0,05-0,01	Кв(1), К(85), Г+ГО(14)	7,38	25,0	3,2	14,65	51,0
0,01-0,001	Кв(сл), К(90), Г(10), ГО(сл)	24,23	15,0	1,5	9,52	31,0
<0,001	К(100)	15,54	4,0	1,3	3,49	29,0
(проба №24)						
>2	Кв(60), К+Г(38), ГО(2)	3,04	11,0	0,9	-	-
2-1	Кв(75), К+Г(24), ГО(1)	5,90	4,5	0,6	-	-
1-0,5	Кв(65), К(35), Г+ГО+Би(сл)	12,86	4,0	0,6	-	-
0,5-0,25	Кв(55), К(43), Г(2), ГО(сл)	18,95	4,0	0,7	-	-
0,25-0,1	Кв(45), К(53), Г(2), ГО(сл)	20,00	11,0	0,6	-	-
0,1-0,05	Кв(40), К(59), Г(1), ГО(сл)	11,73	8,0	1,2	-	-
0,05-0,01	Кв(30), К(77), Г(3)	12,10	6,0	0,8	-	-
0,01-0,001	Кв(10), К(85), Г(5)	7,90	4,0	1,2	-	-
<0,001	К(100)	7,52	4,0	0,5	-	-
(проба №25)						
>2	Кв(30), К(45), ГО(20), Г(5)	14,00	12,0	2,8	23,85	23,5
2-1	Кв(50), К(39), ГО(10), Г(1)	7,62	29,0	2,3	11,25	23,5
1-0,5	Кв(50), К(49), ГО(1), Г(сл)	14,31	17,0	1,4	5,94	14,5
0,5-0,25	Кв(50), К(50), ГО+Г(сл)	19,68	18,0	1,0	4,92	12,5
0,25-0,1	Кв(35), К(66), ГО+Г(сл)	16,62	16,0	0,8	7,18	20,0
0,1-0,05	Кв(30), К(69), Г(1), ГО(сл)	4,85	15,0	0,9	11,25	32,0
0,05-0,01	Кв(30), К(70), Г(сл)	6,85	20,0	1,0	12,3	35,0
0,01-0,001	Кв(5), К(95)	9,15	16,0	1,5	6,4	30,0
0,001	К(100)	6,92	10,0	1,0	2,23	16,0

Примечание. Кв - кварц; Би - биотит; К - каолинит; Г - гидрослюда; ГО - гидроокислы железа;
(85) - содержание минерала в %; (сл) - следн.

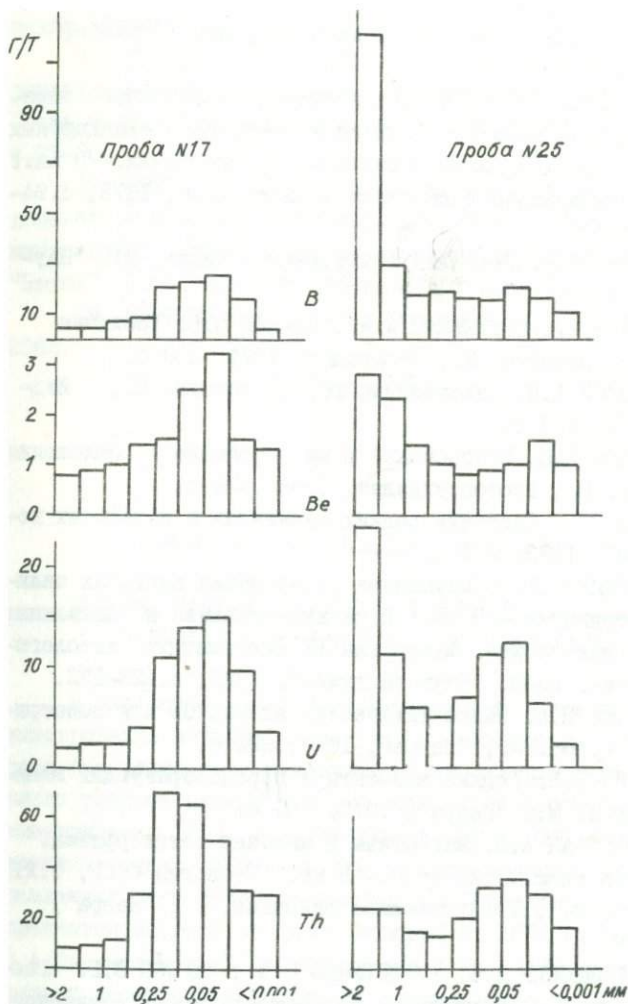


Рис.5. Распределение тория, урана, бериллия и бора по гранулометрическим фракциям элювия

3. ГАВШИН В.М., ВОРОТНИКОВ Б.А., НИКОЛАЕВА Н.М., СМЕРТИНА Л.Н., ШАЛМИНА Г.Г. Содовые воды как фактор мобилизации урана, рассеянного в горных породах.— В кн.: Радиоактивные элементы в геологических процессах. Тезисы докладов. Душанбе, 1975, с.112—114.
4. ГАВШИН В.М., СМЕРТИНА Л.Н. Атомно-абсорбционное определение меди, цинка, кобальта, никеля и марганца в стандартных образцах горных пород в связи с задачами топогеохимии.— В кн.: Физические методы анализа в геохимии. Новосибирск, 1978, с.94—95.
5. ГРИГОРЬЕВ Н.А. Бериллий в экзогенном цикле. М., "Наука", 1978, 163 с.
6. ЕВСЕЕВА Л.С., ПЕРЕЛЬМАН А.И., ИВАНОВ Н.Б. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М., Атомиздат, 1974, 280 с.
7. ЗАВАРИЦКИЙ А.Н. Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1961, 479 с.
8. КАЗАРИНОВ В.П. Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири. М., Гостоптехиздат, 1958, 324 с.
9. КРАЙНОВ С.Р. Геохимия редких элементов в подземных водах. М., "Недра", 1973, 295 с.
10. КУКОВСКИЙ Е.Г. О механизме превращения слоистых силикатов при выветривании.— В кн.: Кора выветривания и связанные с ней полезные ископаемые. Материалы IX Всесоюзного литологического совещания. Киев, "Наукова думка", 1975, с.123—132.
11. Лисицына Н.А. Вынос химических элементов при выветривании основных пород. М., "Недра", 1973, 225 с.
12. ЛЯХОВИЧ В.В. Редкие элементы в породообразующих минералах гранитоидов. М., "Недра", 1972, 199 с.
13. МАТВЕЕВСКАЯ А.Л. Магматизм и явления метаморфизма. Кольвань-Томская складчатая зона.— В кн.: Геология СССР, т. XIV, Западная Сибирь, ч. I. Геологическое описание. М., "Недра", 1967, с.475—479.
14. МИТРОПОЛЬСКИЙ А.С., МЕЛЬГУНОВ С.В., ЧЕРНОВ В.Г. Геохимия урана и тория в гранитоидах и метаморфических комплексах Юго-Восточного Алтая, Западной Тувы и Западного Саяна.— В кн.: Уран и торий в магматических и метаморфических породах. М., "Наука", 1972, с.106—163.

15. РАЕВСКИЙ В.П., ЖДАНОВА Л.В. Уран и торий в процессе гипергенных изменений гранитоидов Кольванского массива.— В кн.: Радиоактивные элементы в геологических процессах. Тезисы докладов. Душанбе, 1975, с.91-93.

16. СЕРДЮК З.Я., РОЕНКО Н.П. Минералогия глин коры выветривания Барлакского района (Новосибирская область).— В кн.: Глины и глинистые минералы Сибири. Новосибирск, "Наука", 1965, с.77-80.

17. СИМОНОВА В.И. Количественный спектральный анализ определения бора в осадочных породах.— В кн.: Количественный анализ минералов и горных пород физическими методами. Новосибирск, "Наука", 1965, с.23-28 (Труды ИГиГ, вып.32).

18. ЩЕРБИНА В.В. Основы геохимии. М., "Недра", 1972. 296с.

В.М.Цибульчик, В.А.Пономарчук, В.А.Трунова

НИОБИЙ, ТАНТАЛ, ЦИРКОНИЙ, ГАФНИЙ В КОРХ Выветривания КОКЧЕТАВСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

В настоящее время поведение редких элементов в процессах выветривания изучено слабо [4,5]. Кокчетавское поднятие, где широко распространены различные магматические образования, в том числе редкометалльные [10], с хорошо сохранившейся на них корой выветривания [20], представляет великолепный полигон для исследования редких элементов при корообразовании. Редкометалльность различных магматических комплексов Северного Казахстана явилась предметом многолетних исследований КазИМСа (Ф.А.Летников, Ю.А.Садовский, А.В.Красильникова и др.). Специальное изучение редких элементов в продуктах выветривания на Кокчетавском поднятии началось недавно. В 1968-1970 гг. здесь были проведены работы по изучению колумбитоносных кор выветривания и продуктов их переотложения сотрудниками ИМГРЭ (Н.А.Солодов, Ф.Н.Борчалин-

ский, С.Б.Бравина, Л.А.Милованова, А.М.Болотов), ВИМСа (С.Н.Калижная, Г.Ф.Тормосова), Северо-Казахстанского геологического управления (Ю.М.Зорин, А.А.Костыгин и др.). Результаты работ изложены в фондовых материалах и опубликованы [3]. Выполненные исследования носили в основном производственный характер; многие вопросы поведения редких элементов в процессах выветривания остались недостаточно освещенными.

В 1968, 1973–1974 гг. в пределах Кокчетавского поднятия авторами изучены разрезы кор выветривания на различных исходных породах: основных (габбро-диориты района г.Кокчетав), кислых (редкометалльные граниты орлиногорского комплекса, граниты Зерендинского массива), щелочных (сиениты Еленовского массива), а также на метаморфических биотит-мусковитовых сланцах кокчетавской свиты. Всего изучено 20 профилей выветривания. Цель работы – рассмотреть поведение ниобия, тантала, циркония, гафния в корях выветривания на различных по составу исходных породах.

О методике отбора и анализа проб

Исходные породы и продукты их выветривания опробованы по керну скважин колонкового бурения. Рыхлый глинистый материал тщательно очищался от остатков бурового раствора. Интервал опробования (0,5–1,0 м) изменялся в зависимости от мощности зон выветривания. Вес проб из выветрелых продуктов 0,3–1,0 кг.

Гранулометрический анализ рыхлых образований кор выветривания выполнен в соответствии с рекомендациями В.А.Новикова [15] и Л.В.Рухина [22]. Глинистые минералы диагностированы рентгено-структурным методом М.В.Новожиловой в ИГиГ СО АН СССР. Породообразующие элементы определены квантометрическим методом на приборе "Квантовак-1500В" М.И.Зеркаловой и Л.Д.Ивановой в лаборатории спектрального анализа того же Института. Все определения тантала и гафния выполнены нейтронно-активационным методом в лаборатории ядерно-геохимических методов анализа при участии В.А.Боброва, В.С.Пархоменко, Ю.Г.Шипицина, С.Т.Шестеля, Т.А.Музязевой. Методика нейтронно-активационного определения изученных редких элементов подробно освещена в специаль-

ных публикациях [18,19]. В коре выветривания крупно- и среднезернистых гранитов орлиногорского комплекса, а также биотит-мусковитовых сланцев кокчетавской свиты ниобий определен химическим методом (аналитик А.В.Сухаренко). В остальных разрезах этот элемент установлен рентгено-радиометрией. Цирконий в профиле выветривания габбро-диоритов определен нейтронно-активационным методом; в остальных разрезах - рентгено-радиометрией. Полученные анализы, по рекомендации Лисицной Н.А. [11], пересчитаны на абсолютные массы ($\text{мг}/\text{см}^3$) с учетом изменения объемного веса исходных пород при выветривании. В изученных профилях выветривания определены также рН водных вытяжек и объемный вес пород. Всем перечисленным сотрудникам Института авторы приносят свою благодарность.

Геологическое строение кор выветривания

В пределах Кокчетавского поднятия изучены разрезы кор выветривания на следующих исходных породах: 1) редкометалльных гранитах орлиногорского комплекса (возраст - средний девон); 2) граносиенитах и кварцевых сиенитах Еленовского массива (средний девон); 3) биотит-роговообманковых гранитах Зерендинского массива (ордовик); 4) габбро-диоритах г.Кокчетав (ордовик); 5) биотит-мусковитовых сланцах кокчетавской свиты (протерозой). В изученных разрезах кор выветривания выделяется две зоны (снизу вверх): а) дезинтеграции, б) глинистого структурного элювия. Верхняя часть зоны глинистого структурного элювия нередко перетолжена (перетолженная кора выветривания в понимании И.И.Гинзбурга [6]). Максимальная мощность коры выветривания 70 м, средняя - 20-30 м. Мощность зоны дезинтеграции обычно не превышает 7,0-10,0 м, зоны глинистого структурного элювия - 20,0-40,0 м. Перетолженная кора выветривания имеет мощность не более 5,0-7,0 м. Возраст кор выветривания определенно не установлен. Как полагает В.Н.Разумова [20], на Кокчетавском поднятии корообразование происходило в несколько эпох от триаса до верхнеолигоценового времени. Коры выветривания обычно перекрыты глинистыми отложениями неогена, а также суглинками четвертичного возраста суммарной мощностью 15,0-20,0 м.

Вещественный состав кор выветривания зависит от состава исходных пород (табл. I). При выветривании гранитов в зоне дезинтеграции наиболее интенсивно преобразуется биотит, замещаясь хлоритом, гидробиотитом и, в конечном счете, каолинитом. По плагиоклазам развивается серицит (гидрослюда), а калиевые полевые шпаты замещаются каолинитом. Вверх по разрезу степень изменения гранитов нарастает, увеличивается количество новообразований, главным образом, за счет появления каолинита. Лишь в редких случаях присутствуют галлуазит, монтмориллонит и другие минералы. В самых верхних горизонтах коры выветривания наиболее распространенным новообразованным минералом является каолинит; гидроокислы железа, монтмориллонит, галлуазит, гидрослюда встречаются редко. Из реликтовых минералов исходных пород в коре выветривания присутствуют: кварц, монацит, циркон, колумбит, касситерит, апатит и другие минералы, характерные для гранитов орлиногорского комплекса.

В коре выветривания сиенитов основным новообразованным минералом во всех зонах является каолинит, развивающийся по калиевым полевым шпатам — главным породообразующим минералам исходных пород. Количество гидрослюд и монтмориллонита, возникающих по плагиоклазам и биотиту в зоне дезинтеграции, невелико. Характерно, что мусковит, являющийся породообразующим минералом сиенитов, сохраняется иногда даже в самых верхних горизонтах выветривания. Реликтовые минералы в коре выветривания сиенитов представлены апатитом, цирконом, ильменитом, рутилом, анатазом, магнетитом, кварцем и др.

В начальные стадии выветривания биотит-роговообманковых гранитов наряду с каолинитом, гидрослюдами и хлоритом нередко в повышенных количествах развивается монтмориллонит. В верхних частях профиля выветривания этот минерал практически исчезает; здесь основным новообразованным минералом является каолинит. Апатит, сфен, магнетит, ильменит, циркон составляют комплекс реликтовых минералов, характерных для исходных пород.

В коре выветривания габбро-диоритов новообразованными минералами являются монтмориллонит, гидрослюда; в верхних горизонтах — каолинит и гидроокислы железа. Из реликтовых минералов распространены ильменит, сфен, лейкоксен, реже — роговая обманка, пироксен.

Т а б л и ц а I

Минеральный состав кор выветривания (по данным рентгеноструктурного анализа)

Выветривающиеся породы	Исходные породы		Зона дезинтеграции		Зона глинистого структурного злювия	
	главные	второстепен.	главные	второстепен.	главные	второстепен.
Редкометалльные граниты орлиногорского комплекса	Кварц, полевой шпат, калиевый полевой шпат	Биотит, гидрослюда	Кварц, полевой шпат, гидрослюда	Хлорит, гидробиотит, каолинит	Каолинит, кварц	Гидрослюда, галлуазит
Граносиениты и кварцевые сиениты Еленовского массива	Калиевый полевой шпат, кварц, мусковит	Плагиоклаз, биотит	Кварц, калиевый полевой шпат, каолинит, мусковит	Гидрослюда, монтмориллонит	Каолинит	Гидрослюда, мусковит
Биотит-роговообманковые граниты Зерендинского массива	Плагиоклаз, роговая обманка	Биотит, кварц	Плагиоклаз, роговая обманка, гидрослюда	Монтмориллонит, хлорит	Каолинит, гидрослюда	Монтмориллонит
Габбро-диориты района г. Кокчетав	Плагиоклаз, роговая обманка	Эпидот, кварц	Плагиоклаз, роговая обманка	Монтмориллонит, гидрослюда	Каолинит, гидрослюда	Монтмориллонит
Биотит-мусковитовые сланцы кокчетавской свиты	Роговая обманка, плагиоклаз, мусковит, кварц, биотит	Хлорит	Роговая обманка, плагиоклаз, мусковит, кварц	Биотит, монтмориллонит, гидрослюда, хлорит, каолинит	Каолинит, кварц	Мусковит, гетит

При выветривании сланцев в нижних горизонтах среди новообразований устанавливаются монтмориллонит, гидрослюда, гидробиотит, хлорит, каолинит; последний существенно преобладает в верхних горизонтах выветривания. Мусковит достаточно устойчив при выветривании и сохраняется даже в верхних частях профиля.

Следует отметить, что изученные разрезы древних кор выветривания практически не преобразованы более поздними гипергенными процессами и не содержат продуктов наложенной минерализации. Вещественный состав перетолженных кор выветривания в значительной мере наследует состав подстилающих их горизонтов глинистого структурного элювия.

Таким образом, в изученных разрезах кор выветривания состав продуктов гипергенного минералообразования в нижних горизонтах может существенно различаться в зависимости от состава исходных пород. В верхних горизонтах кор выветривания преобладающим новообразованным минералом является каолинит.

Распределение главных породообразующих и редких элементов в изученных разрезах кор выветривания

I. Кора выветривания на редкометалльных гранитах орлиногорского комплекса. На Кокчетавской глыбе граниты орлиногорского комплекса характеризуются четко выраженной редкометалльной специализацией. Исследованиями Ф.А.Летникова [10] показано, что по комплексу геолого-геохимических признаков они близки известным колумбито- и оловоносным гранитам плато Джос в Нигерии. Химический состав гранитов орлиногорского комплекса характерен высоким содержанием SiO_2 и очень низким MgO , CaO и TiO_2 . Граниты повсеместно и в различной степени изменены широко проявленными послемагматическими процессами (калципатизация, альбитизация, грейзенизация). Минеральный состав орлиногорских гранитов однообразен и весьма устойчив: плагиоклаз (II, 0–35,9%), калишпат (20,0–46,0%), кварц (I7,8–44,0%), биотит (0,2–9,1%) мусковит (0,3–9,0%). Вариации в содержаниях породообразующих минералов позволяют отнести их к нормальным биотитовым и лейкократовым гранитам [7]. По характеру первичной акцессорно-минеральной

специализации в неизменных разностях пород граниты орлиногорского комплекса относятся к монацит-цирконовому типу. Специальными исследованиями в орлиногорских гранитах обнаружено около 70 акцессорных минералов, из которых подавляющая часть является послемагматическими [8]. Для комплекса акцессорных минералов характерно неравномерное и крайне неравномерное их распределение, что подтверждается высокими значениями коэффициентов вариации (450–850%), а также почти полное отсутствие титансодержащих минералов (ильменита, сфена). Главными минеральными формами для ниобия и тантала в гранитах являются колумбит, танталит, микролит, фергюсонит, стркверит, ильменорутил, для циркония и гафния – циркон, циртолит, малакон [7]. Содержание колумбита, наиболее распространенного минерала ниобия и тантала, изменяется от 1,2 до 250,3 г/т; циркона – от 40 до 340 г/т. Среднее суммарное содержание акцессориев в гранитах орлиногорского комплекса составляет 2763 г/т [7,8]. Изучение баланса распределения ниобия и тантала в орлиногорских гранитах показывает, что основная масса этих элементов (80%) заключена в слюдах (биотите, мусковите). Значительное количество тантала может заключаться также в калишпате (40%), а ниобия не только в биотите, но в кварце и калишпате (50%) [7,9,10]. Появление акцессорного колумбита и других тантало-ниобатов в сильно альбитизированных разностях гранитов существенно не изменяет отмеченный баланс распределения ниобия и тантала в них. Основная масса циркония и гафния в гранитах (50%) связана с минералами циркония – цирконом, циртолитом, малаконом [13].

Изучено II профилей выветривания на редкометалльных гранитах Золотоношского и Лавровского массивов. Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания этих гранитов показано в табл.2. Анализируя данные таблицы, отметим следующее. В неперетолженной коре выветривания гранитов орлиногорского комплекса происходит вынос всех исследуемых элементов, за исключением циркония. Выносимые элементы в соответствии с их коэффициентами концентрации, рассчитанными с учетом изменения объемного веса пород при выветривании, располагаются в следующий ряд:

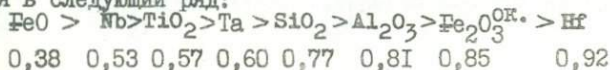


Таблица 2

Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания гранитов орлиногородского комплекса

Элементы	I			II				III				IV				V				
	X	A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Кора выветривания крупно- и среднезернистых гранитов																				
SiO ₂	71,93	1884,0	6	74,66	1672,0	0,88	3	70,50	1310,0	0,69	7	71,75	1478,0	0,75	10	76,08	1557,0	1,10	3	
Al ₂ O ₃	16,23	425,0	6	14,16	317,0	0,74	3	17,64	329,0	0,77	7	16,53	325,0	0,76	10	11,52	238,0	0,73	3	
TiO ₂	0,26	7,0	6	0,15	3,0	0,42	3	0,23	5,7	0,67	7	0,22	4,0	0,57	10	0,16	3,0	0,75	3	
FeO ₂₋₃ ок.	0,98	25,0	6	0,76	17,0	0,68	3	1,94	36,0	1,44	7	1,59	36,0	1,20	10	3,58	74,0	0,46	3	
FeO	1,01	26,0	6	1,04	24,0	0,92	3	0,55	10,0	0,38	7	0,70	14,0	0,53	10	0,28	6,0	0,42	3	
Nb	32,5	0,085	5	33,7	0,074	0,87	3	37,8	0,069	0,81	7	36,6	0,071	0,83	10	27,2	0,055	0,77	3	
Ta	7,4	0,019	35	6,5	0,014	0,74	5	8,8	0,016	0,84	16	8,2	0,015	0,79	21	6,5	0,012	0,80	9	
Rr	6,3	0,016	6	5,0	0,011	0,68	3	7,5	0,014	0,87	7	6,7	0,013	0,81	10	9,4	0,018	1,38	4	
Отношения:																				
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,22			0,18				0,25				0,23					0,15			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,016			0,009				0,014				0,012					0,036			
Nb/Ta	4,5			5,7				4,3				4,7					4,6			
Ti/Nb	49,4			24,3				40,8				33,8					250,9			
Ti/Ta	221,0			138,4				176,2				160,0					1150,0			
Объемный вес; г/см ³																				
	2,61			2,24				1,85				1,97					2,04			
pH водных вытяжек																				
	7,8			7,2				6,9				7,0					7,2			
Кора выветривания мелкозернистых гранитов																				
SiO ₂	73,50	1876,0	4	73,81	1673,0	0,89	7	73,82	1392,0	0,74	23	73,82	1457,0	0,77	30	67,53	1275,0	0,87	3	
Al ₂ O ₃	15,06	384,0	4	16,58	376,0	0,98	7	17,09	320,0	0,83	23	16,97	333,0	0,86	30	20,10	376,0	1,13	3	
TiO ₂	0,22	6,0	4	0,19	4,0	0,66	7	0,22	4,0	0,66	23	0,21	4,0	0,66	30	0,63	11,0	2,75	3	
FeO ₂₋₃ ок.	0,70	17,0	4	0,76	17,0	1,00	7	0,72	13,0	0,76	23	0,73	14,0	0,82	30	2,31	42,0	3,00	3	
FeO	1,00	25,0	4	0,63	14,0	0,56	7	0,46	8,0	0,32	23	0,50	9,0	0,36	30	0,43	8,0	0,88	3	
Nb	57,3	0,146	47	37,0	0,083	0,56	3	40,6	0,076	0,52	9	39,7	0,078	0,53	12	25,0	0,047	0,60	2	
Ta	4,0	0,010	23	7,2	0,015	1,50	5	3,50	0,006	0,50	85	3,8	0,007	0,70	94	2,6	0,005	0,71	14	
Rr	150,5	0,384	2	216,8	0,490	1,27	6	408,1	0,767	2,00	10	344,3	0,878	1,76	15	463,0	0,370	1,26	2	
	4,5	0,011	6	5,4	0,012	1,09	6	6,1	0,011	1,00	28	6,0	0,011	1,00	34	6,4	0,012	1,09	4	
Отношения:																				
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,20			0,22				0,23				0,23					0,29			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,015			0,010				0,012				0,012					0,029			
Nb/Ta	14,6			5,5				12,6				11,1					9,4			
Ti/Nb	24,6			28,9				31,5				30,7					140,4			
Ti/Ta	360,0			180,0				400,0				342,0					1320,0			
Rr/Rr	34,9			40,8				69,7				61,6					72,5			
Объемный вес; г/см ³																				
	2,55			2,26				1,88				1,97					1,88			
pH водных вытяжек																				
	7,8			6,8				6,4				6,6					7,0			

Продолжение табл. 2

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Кора выветривания гранитов орлиногорского комплекса (в целом).																					
SiO ₂	72,55	1880,0	10	74,06	1673,0	0,89	10	73,04	1373,0	0,73	30	73,30	1447,0	0,77	40	71,80	1416,0	0,96	6		
Al ₂ O ₃	15,77	408,0	10	15,85	358,0	0,87	10	17,21	322,0	0,79	30	16,87	331,0	0,81	40	15,81	307,0	0,93	6		
TiO ₂	0,25	7,0	9	0,18	4,0	0,57	10	0,23	4,0	0,57	30	0,22	4,0	0,57	40	0,90	17,0	4,25	6		
Fe ₂ O ₃ ok.	0,86	21,0	10	0,76	17,0	0,81	10	1,00	18,0	0,85	30	0,94	18,0	0,85	40	2,94	58,0	2,73	6		
FeO	1,00	26,0	10	0,75	17,0	0,65	10	0,46	9,0	0,34	30	0,55	10,0	0,38	40	0,35	7,0	0,70	6		
Nb	54,9	0,142	52	35,3	0,079	0,55	6	39,4	0,074	0,52	16	38,3	0,075	0,53	22	26,3	0,052	0,69	5		
Ta	6,0	0,015	56	6,9	0,014	0,93	14	4,3	0,008	0,53	101	4,6	0,009	0,60	115	4,1	0,008	0,74	23		
Zr	134,3	0,348	32	156,3	0,352	1,01	16	240,5	0,452	1,30	74	225,5	0,444	1,27	90	-	-	-	8		
Hf	5,4	0,013	12	5,3	0,012	0,92	9	6,4	0,012	0,92	35	6,2	0,012	0,92	44	7,9	0,015	1,25	8		
Отношения:																					
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,21			0,21			0,23			0,23			0,23			0,21					
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,017			0,011			0,012			0,012			0,012			0,055					
Nb/Ta	9,5			5,8			9,2			8,3			8,3			6,5					
Ti/Nb	29,5			30,3			32,4			32,0			32,0			196,1					
Ti/Ta	280,0			171,4			300,0			300,0			256,6			1275,0					
Zr/Hf	26,7			29,3			37,6			37,6			39,0			-					
Объемный вес; г/см ³	2,59			2,25			1,88			1,97			1,97			1,97					
pH водных вытяжек	7,8			7,0			6,6			6,6			6,8			7,1					

Примечание. Здесь и далее в подобных таблицах: I - исходные породы; II - зона дезинтеграции; III - зона глинистого структурного слезия; IV - непереотложенная кора выветривания (в целом); V - переотложенная кора выветривания; X - среднее содержание породообразующих окислов (%) и редких элементов (г/т); A - то же, мг/см³; K_A - коэффициент концентрации, представляющий отношение средних содержаний окисла или элемента (мг/см³) в зонах II, III, IV к соответствующим содержаниям в зоне I; K_A в зоне V рассчитаны по отношению к средним содержаниям окислов или элементов (мг/см³) в зоне IV; n - количество анализов; прочерк - отсутствие данных. В данной таблице средние содержания нобия для малоконцентрированных гранитов рассчитано с учетом данных Ф.А.Летникова [10]; средние содержания циркония в коре выветривания гранитов орлиногорского комплекса (в целом) получены с использованием результатов Ф.Н.Борчалинского и других [М., ИМГРЭ, 1976].

Для циркония, накапливающегося в продуктах выветривания гранитов, коэффициент концентрации равен 1,27. Характерно, что в указанном ряду подвижности элементов гафний оказывается несколько подвижнее циркония, а ниобий и тантал обладают примерно одинаковой степенью подвижности. Очевидно также, что ниобий и тантал при выветривании орлиногорских гранитов более подвижны, чем гафний и цирконий. Установленный ряд подвижности главных породообразующих и редких элементов для непереотложенной коры выветривания орлиногорских гранитов в целом сохраняется и для непереотложенных продуктов выветривания как крупно- и среднезернистых, так и мелкозернистых гранитов. Некоторые различия в поведении изученных элементов в профилях выделенных разностей гранитов состоят в следующем. В непереотложенной коре выветривания крупно- и среднезернистых гранитов 3^{X} -валентное железо накапливается, гафний имеет тенденцию к выносу ($K=0,81$). В непереотложенных продуктах выветривания мелкозернистых гранитов 3^{X} -валентное железо выносится, а коэффициент концентрации гафния равен 1,00. В зоне дезинтеграции этих гранитов устанавливается накопление тантала ($K=1,50$), что может быть связано с чрезвычайно неравномерным распределением этого элемента в исходных породах [10]. Динамика выноса ниобия, тантала, а также породообразующих элементов из продуктов выветривания в общей схеме характеризуется возрастанием степени их подвижности в направлении от зоны дезинтеграции к зоне глин, о чем свидетельствуют соответствующие значения коэффициентов концентрации. Во всех изученных профилях выветривания орлиногорских гранитов значения отношения Zr/Hf всегда выше, чем в исходных породах. Величина отношения Nb/Ta в продуктах выветривания крупно- и среднезернистых гранитов несколько выше, а в коре выветривания мелкозернистых гранитов и гранитов орлиногорского комплекса (в целом) ниже величин этого отношения в исходных породах. Это обстоятельство свидетельствует о разделении геохимически родственных пар редких элементов ($Nb - Ta$; $Zr - Hf$) при выветривании изученных гранитов. В этом процессе происходит также отделение ниобия и тантала от титана, что подтверждается различием величин отношений Ti/Nb и Ti/Ta в продуктах выветривания и в коренных породах. В перестроенной коре выветривания происходит вынос:

	Nb	>	FeO	>	Ta	>	Al ₂ O ₃	>	SiO ₂
	0,69		0,70		0,74		0,93		0,98
и накопление:	TiO ₂	>	Fe ₂ O ₃ ^{ок.}	>	Hf				
	4,25		2,73		1,25				

Таким образом, переотложенные продукты выветривания характеризуются резким накоплением титана и 3^x-валентного железа; распределение остальных элементов в них в общем наследуется от подстилающей непереотложенной коры выветривания. Средние содержания изученных редких элементов в продуктах выветривания гранитов орлиногорского комплекса составляют: для непереотложенной коры выветривания - Nb 38,3 г/т (0,075 мг/см³) (22 определения), Ta 4,6 г/т (0,009 мг/см³) (115 определений), Zr 225,5 г/т (0,444 мг/см³) (90 определений), Hf 6,2 г/т (0,012 мг/см³) (44 определения); для переотложенных выветрелых продуктов - Nb 26,3 г/т (0,052 мг/см³) (5 определений), Ta 4,1 г/т (0,008 мг/см³) (23 определения), Hf 7,9 г/т (0,015 мг/см³) (8 определений).

Анализ данных таблицы 3 позволяет отметить следующие особенности распределения тантала и гафния, а также главных породообразующих элементов во фракциях продуктов выветривания орлиногорских гранитов. В непереотложенной коре выветривания, а также в переотложенных глинах максимальное содержание тантала устанавливается во фракции 0,05-0,01 мм (до 55,7 г/т). С уменьшением крупности фракций содержания тантала в них постепенно понижаются. Характерно, что во всех продуктах выветривания, за исключением переотложенной коры выветривания на мелкозернистых гранитах, концентрация тантала в самой мелкой фракции (<0,001 мм), сложенной главным образом каолинитом, в 1,2-5,0 раз выше, чем в исходных пробах. Это, очевидно, свидетельствует о сорбции этого элемента глинистым веществом продуктов выветривания. Максимальное содержание тантала во фракции 0,05-0,01 мм следует связывать не только с явлениями сорбции, но также с тем обстоятельством, что именно в этой фракции концентрируется основная масса собственных минералов тантала и ниобия (колумбита и др.). Количество тантала в самой крупной фракции (>0,05 мм), сложенной породообразующими минералами (кварцем, полевыми шпатами, биотитом), близко к содержанию этого элемента в исходных пробах.

Таблица 3

Распределение по фракциям главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания гранитов орлиногорского комплекса

Зоны выветривания	Радиовые пробы; фракция, мм	Что-до проба	Содержания							Отношения		
			%					г/г		Al ₂ O ₃	TiO ₂	Ti
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^{ок}	FeO	TiO ₂	Ta	Hf	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ta
Кора выветривания крупнозернистых гранитов.												
II	Вал.	I	74,00	15,10	0,42	0,84	0,08	6,0	5,7	0,20	0,005	80,0
	>0,05		74,88	14,49	0,30	0,83	0,07	4,4	5,2	0,19	0,004	95,4
	0,05-0,01		49,50	30,00	3,12	1,24	0,34	55,7	25,0	0,60	0,011	36,6
	0,01-0,001		58,50	27,00	4,95	1,30	0,40	50,5	12,2	0,46	0,014	47,5
	<0,001		45,60	38,50	2,89	0,09	0,20	29,4	13,4	0,84	0,005	40,8
III	Вал.	7	70,50	17,63	1,94	0,55	0,25	8,8	7,5	0,25	0,014	170,4
	>0,05		79,75	11,55	1,34	0,71	0,18	5,4	5,4	0,15	0,015	200,0
	0,05-0,01		55,49	26,31	3,22	0,35	0,45	23,8	20,2	0,47	0,017	113,4
	0,01-0,001		55,00	27,57	3,40	0,32	0,48	19,7	8,6	0,50	0,017	146,2
	<0,001		48,14	33,13	3,19	0,02	0,18	19,6	12,4	0,68	0,005	55,1
IV	Вал.	8	70,93	17,31	1,75	0,58	0,23	8,5	7,3	0,24	0,013	162,3
	>0,05		79,14	11,92	1,21	0,73	0,16	5,2	5,3	0,16	0,013	184,6
	0,05-0,01		54,74	26,77	3,20	0,46	0,43	27,8	20,8	0,49	0,016	92,8
	0,01-0,001		55,43	27,50	3,60	0,44	0,47	23,5	9,1	0,49	0,016	120,0
	<0,001		47,81	33,80	3,15	0,03	0,18	20,8	12,5	0,70	0,005	51,9
V	Вал.	3	76,08	11,52	3,58*	0,28	1,16	6,5	9,4	0,15	0,100	1070,7
	>0,05		78,68	9,56	3,38	0,42	1,06	3,76	3,16	0,12	0,110	1691,5
	0,05-0,01		80,33	8,23	4,54	0,09	1,58	19,8	33,1	0,10	0,191	478,7
	0,01-0,001		81,16	8,63	2,94	0,05	1,72	12,2	15,6	0,11	0,199	845,9
	<0,001		53,50	27,10	6,38	0,02	0,99	7,9	9,6	0,50	0,036	751,9
Кора выветривания мелкозернистых гранитов.												
III	Вал.	10	73,36	17,29	0,61	0,42	0,22	4,2	6,1	0,23	0,012	314,3
	>0,05		83,01	10,58	0,35	0,49	0,27	3,0	3,4	0,12	0,025	540,0
	0,05-0,01		52,80	32,13	1,22	0,04	0,60	6,7	18,1	0,60	0,018	537,3
	0,01-0,001		51,44	33,60	1,17	0,05	0,38	4,6	9,6	0,65	0,011	495,6
	<0,001		47,05	34,80	1,88	0,06	0,20	4,6	10,8	0,74	0,005	260,8
V	Вал.	2	62,92	22,07	3,15	0,45	0,87	2,8	6,2	0,35	0,039	1864,2
	>0,05		74,86	14,31	1,75	1,00	1,46	4,2	1,3	0,19	0,102	2085,7
	0,05-0,01		63,00	21,50	3,46	0,12	1,35	2,8	14,3	0,34	0,062	2892,8
	0,01-0,001		52,00	29,15	3,50	0,08	0,88	0,7	8,2	0,56	0,030	7542,8
	<0,001		50,00	29,15	5,52	0,11	0,12	0,6	6,2	0,58	0,004	1200,0

Гафний определенно концентрируется во фракции 0,05–0,01 мм (до 33,1 г/т), где сосредотачиваются основные количества циркона, малакона, циртолита. В общем, картина распределения этого элемента по фракциям выветрелого материала такая же, как и у тантала. Из породообразующих элементов только титан распределяется по фракциям примерно так же, как тантал и гафний. Содержания 2⁺-валентного железа довольно резко снижаются с уменьшением крупности фракций. В распределении кремния и алюминия обнаруживается противоположная тенденция: с уменьшением крупности выветрелого материала содержания кремния понижаются, а алюминия — возрастают. Изменения величин отношений между геохимически родственными элементами отражают характер их распределения по фракциям. Как весьма характерную особенность отметим, что величина отношения Ti/Ta во всех продуктах выветривания гранитов всегда минимальна в самой мелкой фракции < 0,001 мм и обычно в 1,5–3,5 ниже величины этого отношения в исходных пробах. Имея в виду в общем одинаковую тенденцию в распределении этих элементов по фракциям, можно думать, что тантал концентрируется (сорбируется) глинистым веществом предпочтительнее, чем титан. Таким образом, в продуктах выветривания орлиногорских гранитов основными фракциями — концентраторами тантала и гафния являются фракции с размерностью 0,05–0,01 мм и в меньшей мере — более мелкие фракции.

Расчет количества тантала и гафния во фракциях с учетом их выхода (табл.4) и содержания этих элементов в них (табл.3) показывает (табл.4), что в непереотложенных продуктах выветривания во фракции 0,05–0,01 мм, концентрирующей тантал и гафний, заключено не более 40% каждого из этих элементов. Основными фракциями — носителями этих элементов в непереотложенных корах выветривания орлиногорских гранитов являются фракции крупнее 0,01 мм (0,05–0,01 мм и > 0,05 мм). С этими фракциями как в зоне дезинтеграции, так и в зоне глин крупно- и мелкозернистых гранитов связано 64,8–90,4% тантала и 79,2–96,7% гафния. С самой мелкой фракцией (< 0,001 мм) связано не более 21,7% тантала и 11,9% гафния. Полученные выводы по балансу распределения тантала во фракциях продуктов выветривания гранитов не совпадают с результатами исследований Ф.Н.Борчалинского и других (М.,

Т а б л и ц а 4

Количество тантала и гафния во фракциях продуктов выветривания гранитов орлиногорского комплекса

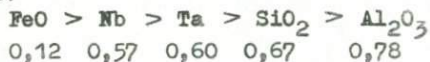
Зона выветривания	Число проб	Выход фракций (мм), %				Количество тантала во фракциях, %				Количество гафния во фракциях, %			
		>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001	>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001	>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001
Продукты выветривания крупнозернистых гранитов													
П	1	93,3	2,2	0,7	0,8	70,5	19,9	5,6	3,9	87,4	9,3	1,4	1,8
Ш	6	67,3	14,1	7,1	11,4	35,7	29,1	13,3	21,7	44,1	35,1	8,8	11,9
У	3	58,1	6,5	20,4	15,0	36,1	17,6	28,1	18,2	25,1	23,7	32,3	18,1
Продукты выветривания мелкозернистых гранитов													
Ш	10	68,9	19,9	6,0	5,1	47,0	38,9	8,4	5,7	42,5	40,0	8,1	9,3
У	2	38,5	24,4	12,0	25,0	68,0	26,0	3,2	3,0	9,4	56,4	22,3	11,8

ИМГРЭ, 1970). Во фракциях переротложенной коры выветривания количество тантала и гафния может распределяться более равномерно. Так, в переротложенной коре выветривания крупнозернистых гранитов с тонкими фракциями (0,01-0,001 мм и < 0,001 мм) связано 46,3% тантала и 51,1% гафния.

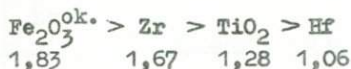
2. Кора выветривания на граносиенитах и кварцевых сиенитах Еленовского массива. Интрузивные образования массива, являющиеся субстратом для коры выветривания, детально и всесторонне изучались рядом исследователей [7,8,9,10]. Основные особенности геохимии изучаемых редких элементов в породах массива состоят в следующем. Сиениты Еленовского массива содержат повышенные количества ниобия, циркония, тантала. Характерно существенное преобладание ниобия над танталом. Собственные минералы этих элементов (колумбит и другие) обычно появляются на участках проявления постмагматических процессов (окварцевание, альбитизация). В породах массива установлено 52 аксессуарных минерала. Из аксессуариев магматического происхождения наиболее распространены циркон (270-1300 г/т) и апатит (до 550 г/т), в меньшей

мере — ильменит (I—I4 г/т), сфен (I—I2 г/т), монацит (0,3—9,0 г/т), торит (знаки — 5,7 г/т). Постмагматические аксессуарии представлены колумбитом, касситеритом, рутилом (анатазом, брукситом), магнетитом. Для пород массива характерно невысокое содержание магматических титансодержащих минералов, а также неравномерное распределение всех аксессуарных минералов. Как и в гранитах орлиногорского комплекса, основная масса (до 70—80%) тантала и ниобия в сиенитах Еленовского массива заключена в слюдах (биотите, мусковите). Значительные количества тантала (20—40%) могут быть связаны также с калиевым полевым шпатом. При появлении повышенных количеств колумбита до 50—70% ниобия сосредоточивается в этом минерале. Кроме того, тантал и ниобий присутствуют практически во всех постмагматических аксессуариях. Цирконий и гафний связаны главным образом (80—90%) с цирконом и циртолитом.

В непрерывно сложенной коре выветривания граносиенитов и кварцевых сиенитов, по результатам изучения 3 профилей (табл.5), происходит вынос:



и накопление:



В отличие от рассмотренных профилей орлиногорских гранитов, при выветривании сиенитов 3^x-валентное железо и титан определенно накапливаются. Возрастание содержаний окисного железа связано с окислением значительных количеств закисной его формы в исходных породах. Накопление титана происходит за счет присутствия в продуктах выветривания устойчивых минералов этого элемента: ильменита, рутила, анатаза. Характерно, что при выветривании сиенитов, также как и орлиногорских гранитов, ниобий и тантал почти одинаково подвижны. Цирконий и гафний концентрируются в выветрелых продуктах. Кроме того, как и в профилях выветривания гранитов, в выветрелых сиенитах величина отношения Nb / Ta (18,4) несколько ниже соответствующей величины в исходных породах (19,0), что свидетельствует о тенденции разделения ниобия и тантала при выветривании этих пород. При этом происходит также

Таблица 5

Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания граносиенитов и кварцевых сиенитов Еленовского массива

Элементы	I			II				III				IV				V			
	\bar{X}	Δ	n	\bar{X}	Δ	K_{Δ}	n	\bar{X}	Δ	K_{Δ}	n	\bar{X}	Δ	K_{Δ}	n	\bar{X}	Δ	K_{Δ}	n
SiO ₂	55,22	1493,0	4	49,88	1157,0	0,77	9	52,55	851,0	0,57	8	51,13	1013,0	0,67	17	57,40	1159,0	1,14	5
Al ₂ O ₃	19,27	522,0	4	18,31	425,0	0,81	9	23,31	377,0	0,72	8	20,66	411,0	0,78	17	16,14	326,0	0,79	5
TiO ₂	0,53	25,0	4	1,58	36,0	1,44	9	1,71	27,0	1,08	8	1,64	32,0	1,28	17	0,96	19,0	0,59	5
Fe ₂ O ₃ ^к	2,41	66,0	4	7,16	166,0	2,51	9	4,91	79,0	1,19	8	6,10	121,0	1,83	17	5,96	120,0	0,99	5
FeO	4,27	116,0	4	1,22	26,0	0,24	9	0,10	1,6	0,01	8	0,69	14,0	0,12	17	0,05	1,0	0,07	5
Nb	66,2	0,179	5	49,1	0,114	0,63	9	55,1	0,089	0,50	9	52,1	0,103	0,57	18	27,2	0,055	0,53	4
Ta	3,5	0,0094	18	1,8	0,0042	0,45	10	3,8	0,0062	0,66	10	2,8	0,0056	0,60	20	1,4	0,0028	0,50	6
Zr	221,4	0,600	5	379,2	0,880	1,46	9	631,7	1,023	1,70	9	505,4	1,005	1,67	18	498,8	1,007	1,00	4
Hf	6,4	0,017	7	7,6	0,017	1,00	6	16,0	0,026	1,53	1	8,8	0,018	1,06	7	10,9	0,022	1,22	5
Отношения:																			
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,35			0,36				0,44				0,40				0,28			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,047			0,084				0,071				0,077				0,058			
Nb/Ta	19,0			27,1				14,4				18,4				19,7			
Ti/Nb	83,8			189,4				182,0				186,4				207,2			
Ti/Ta	1595,7			5142,8				2612,9				3428,5				4071,4			
Zr/Hf	35,3			51,7				39,3				55,8				45,7			
Объемный вес, г/см ³	2,71			2,32				1,62				1,99				2,02			
pH водных вытяжек	9,0			8,0				6,6				7,3				7,7			

отделение этих элементов от титана, что подтверждается возрастанием величин отношений Ti/Nb (186,4) и $Ti-Ta$ (3428,5) в продуктах выветривания в сравнении с исходными породами (83,8 и 1595,7 соответственно). В выветрелых сиенитах значение отношения Zr/Hf (55,8) выше, чем в исходных породах (35,3). При переотложении коры выветривания сиенитов происходит некоторое накопление кремния ($K = 1,14$), вероятно, за счет концентрации зерен кварца исходных пород, а также снижение содержаний титана ($K = 0,59$), что связано, по-видимому, со значительным разубоживанием концентраций устойчивых титановых минералов глинистым веществом. Распределение остальных, в том числе редких, элементов в продуктах переотложения наследуется от подстилающей непереотложенной коры выветривания. Средние содержания изученных редких элементов в продуктах выветривания сиенитов Еленовского массива составляют: для непереотложенной коры выветривания — Nb 52,1 г/т (0,103 мг/см³) (18 определений), Ta 2,8 г/т (0,0056 мг/см³) (20 определений), Zr 505,4 г/т (1,005 мг/см³) (18 определений), Hf 8,8 г/т (0,018 мг/см³) (7 определений); для переотложенной коры выветривания — Nb 27,2 г/т (0,055 мг/см³) (4 определения), Ta 1,4 г/т (0,0028 мг/см³) (6 определений), Zr 498,8 г/т (1,007 мг/см³) (4 определения), Hf 10,9 г/т (0,022 мг/см³) (5 определений).

Характер распределения тантала и гафния, а также породообразующих элементов по фракциям, описанный для коры выветривания орлиногорских гранитов, в продуктах выветривания сиенитов в общем сохраняется (табл.6). Особенности распределения тантала по фракциям из материала выветривания сиенитов состоят в том, что этот элемент относительно равномерно присутствует во всех выделенных фракциях, причем максимальные его концентрации во фракции 0,05–0,01 мм (4,5 г/т) превышают содержания в исходных пробах не более, чем в 1,6–2,0 раза. Содержания тантала в самой мелкой фракции (<0,001 мм) минимальны (1,1–1,3 г/т) и, как правило, ниже, чем в исходных пробах. Эти особенности распределения тантала по фракциям продуктов выветривания обусловлены характером его распределения в исходных породах, где основная масса этого элемента связана, главным образом, с породообразующими минералами — слюдами (биотитом, мусковитом), калиевым по-

Т а б л и ц а 6

Распределение по фракциям главных породообразующих и редких элементов
в продуктах выветривания кварцевых сиенитов Еленовского массива

Зоны вы- вет- рива- ния	Валовые пробы; фракции, мм	С о д е р ж а н и я							О т н о ш е н и я		
		%					г/т		Al ₂ O ₃	TiO ₂	Ti
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^{ок}	FeO	TiO ₂	Ta	Hf	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ta
II	вал. (3)*	48,62	18,28	6,0I	0,80	2,05	1,9	6,4	0,37	0,112	6473,6
	>0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,05-0,0I	50,16	18,58	10,33	0,77	1,35	1,8	14,4	0,37	0,072	4500,0
	0,0I-0,00I	46,66	21,73	11,79	0,66	1,33	1,9	9,0	0,46	0,06I	4200,0
<0,00I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III	вал. (5)	54,36	23,94	4,33	0,15	1,86	2,8	16,0	0,44	0,077	3985,7
	>0,05	58,79	18,38	3,36	0,23	2,93	2,9	20,3	0,3I	0,159	6062,1
	0,05-0,0I	52,60	25,90	4,74	0,20	2,11	4,5	11,6	0,49	0,08I	2813,3
	0,0I-0,00I	49,70	29,30	4,09	0,07	1,35	2,4	13,4	0,58	0,046	3375,0
	<0,00I	50,00	29,14	5,12	0,06	0,55	1,1	7,7	0,58	0,018	3000,0
IV	вал. (8)	52,20	21,8I	4,96	0,39	1,93	2,4	12,4	0,4I	0,088	4825,0
	>0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,05-0,0I	51,68	23,15	6,83	0,4I	1,82	3,5	12,6	0,44	0,078	3120,0
	0,0I-0,00I	48,56	26,46	6,97	0,29	1,34	2,2	11,7	0,54	0,050	3654,5
<0,00I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
V	вал. (4)	64,03	17,20	6,11	0,06	1,10	1,5	10,9	0,26	0,063	4400,0
	>0,05	65,00	12,64	11,09	0,15	1,15	1,7	10,3	0,19	0,090	4058,0
	0,05-0,0I	86,75	3,06	4,66	0,03	1,43	2,3	26,0	0,03	0,467	3730,4
	0,0I-0,00I	82,00	8,60	2,55	0,06	1,84	3,0	15,0	0,10	0,213	3680,0
	<0,00I	51,75	26,75	4,8I	0,02	0,79	1,3	5,7	0,5I	0,029	3646,1

Примечание: * (3) - число проб.

левым шпатом, а также с неустойчивым к выветриванию сфеном. Максимальные концентрации гафния устанавливаются в наиболее крупных из выделенных фракций ($>0,05$ и $0,05-0,01$ мм), где сосредоточивается главный минерал – концентратор этого элемента – циркон.

Как и в профилях выветривания орлиногорских гранитов, основными фракциями – носителями тантала и гафния в непереотложенных корах выветривания сиенитов Еленовского массива являются фракции крупнее $0,01$ мм ($>0,05$ мм, $0,05-0,01$ мм). С этими фракциями в зонах дезинтеграции и глин связано 79,2–96,7 % тантала и 79,8–94,2 % гафния. В переотложенной коре выветривания сиенитов в связи с повышенным выходом тонких фракций ($0,01-0,001$ мм и $<0,001$ мм) в них концентрируется до 51,0% тантала и до 38,3% гафния (табл.7).

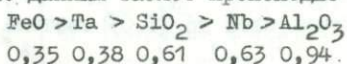
Таблица 7
Количество тантала и гафния во фракциях продуктов выветривания кварцевых сиенитов Еленовского массива

Зоны выветривания	Число проб	Выход фракций (мм), %				Количество тантала во фракциях, %				Количество гафния во фракциях, %			
		$>0,05$	$0,05-0,01$	$0,01-0,001$	$<0,001$	$>0,05$	$0,05-0,01$	$0,01-0,001$	$<0,001$	$>0,05$	$0,05-0,01$	$0,01-0,001$	$<0,001$
II	I	84,6	12,0	2,5	0,9	85,0	11,7	2,6	0,7	68,7	25,5	4,5	1,3
III	4	48,1	25,5	21,2	5,2	41,4	37,8	19,0	1,7	61,0	18,8	17,7	2,5
У	4	31,6	13,4	11,0	44,0	39,1	9,0	19,4	32,5	29,8	31,9	15,3	23,0

3. Кора выветривания на биотит-роговообманковых гранитах Зерендинского массива. Геология, петрология, минералогия, а также геохимия редких элементов сложно построенного Зерендинского плутона весьма обстоятельно изучены рядом исследователей 7,8, 9,10,14,23. Биотит-роговообманковые граниты, на которых распространена кора выветривания, слабо изменены постмагматическими процессами (калципатизация). По характеру первичной акцессорно-минералогической специализации граниты относятся к сфенциркон-апатитовому типу. Наиболее распространенными магматичес-

кими аксессуориями в них являются сфен (30–3608 г/т); ильменит (5–40 г/т); апатит (140–215 г/т); циркон (45–215 г/т); постмагматические – магнетит (до 1264 г/т), рутил, флюорит, турмалин, топаз. Характерно, что в связи с рассеянием в титановых минералах ниобий и тантал не образуют собственных минералов. Основная масса ниобия и тантала (50–70 %) биотит–роговообманковых гранитов заключена в сфене; кроме того, эти элементы в незначительных количествах сосредотачиваются в биотите (до 4–15%), амфиболе, ильмените, цирконе. Цирконий и гафний концентрируются в цирконах.

В непереотложенной коре выветривания биотит–роговообманковых гранитов по данным табл.8 происходит вынос:



и накопление: $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{ок}}$; $\text{Hf} > \text{Zr} > \text{TiO}_2$

$$1,79 \quad 1,22 \quad 1,15 \quad 1,14$$

Характерная особенность поведения ниобия и тантала в изученном профиле выветривания состоит в том, что эти элементы относятся к легкоподвижным, причем тантал оказывается заметно подвижнее ниобия. Такую особенность поведения ниобия и тантала при выветривании следует объяснять характером распределения этих элементов в исходных породах, где они не образуют собственных минералов и концентрируются в неустойчивых к выветриванию аксессуориях (сфене), а также в породообразующих минералах (биотите, амфиболе). Как и в вышеописанных профилях выветривания, в выветрелых биотит–роговообманковых гранитах также происходит отделение ниобия и тантала от титана, о чем свидетельствует возрастание величин отношений Ti/Nb (123,8) и Ti/Ta (4476,9) в продуктах выветривания по сравнению со значением этих отношений в исходных породах (68,9 и 1500,0 соответственно). Заметного разделения циркония и гафния в изученном профиле выветривания не происходит. В продуктах перестроения коры выветривания в связи с возможным приносом тантало–ниобатов (колумбита) фиксируются более высокие содержания ниобия и тантала; распределение остальных элементов наследуется от подстилающей непереотложенной коры выветривания. Средние содержа-

Таблица 8

Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания
биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива

Элементы	I			II				III				IV				V			
	X	A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n
SiO ₂	72,75	1935,0	2	69,25	1551,0	0,80	4	61,33	1086,0	0,56	12	63,30	1190,0	0,61	16	51,00	979,0	0,82	I
Al ₂ O ₃	15,25	406,0	2	16,42	368,0	0,90	4	21,77	385,0	0,94	12	20,43	384,0	0,94	16	20,50	394,0	1,02	I
TiO ₂	0,32	8,5	2	0,31	6,9	0,81	4	0,60	10,6	1,24	12	0,52	9,7	1,14	16	1,14	22,0	2,26	I
Fe ₂ O ₃ ок.	1,10	29,0	2	2,06	46,0	1,58	4	3,01	53,0	1,82	12	2,77	52,0	1,79	16	7,00	134,0	2,57	I
FeO	1,18	30,0	2	0,83	19,0	0,63	4	0,49	8,7	0,29	12	0,57	10,7	0,35	16	0,18	3,4	0,31	I
Nb	28,0*	0,074	10	13,0	0,029	0,39	1	27,2	0,048	0,65	6	25,1	0,047	0,63	7	24,1	0,046	1,00	I
Ta	1,3	0,0034	4	0,4	0,0009	0,26	9	1,0	0,0017	0,50	14	0,7	0,0013	0,38	23	0,9	0,0017	1,30	I
Zr	160,0	0,425	2	249,0	0,557	1,31	3	263,5	0,466	1,10	12	260,6	0,490	1,15	15	255,0	0,490	1,00	I
Hf	6,9	0,018	1	7,9	0,018	1,00	2	13,8	0,024	1,33	4	11,8	0,022	1,22	6	-	-	-	-
Отношения:																			
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,20			0,23				0,35				0,32				0,40			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,020			0,018				0,027				0,025				0,055			
Nb/Ta	21,7			32,3				28,3				36,1				27,0			
Ta/Nb	68,9			142,7				132,5				123,8				286,9			
Ti/Ta	1500,0			4600,0				3741,1				4476,9				7764,7			
Zr/Hf	23,6			30,9				19,4				22,2				-			
Объемный вес; г/см ³	2,66			2,24				1,77				1,88				1,92			
pH водных вытяжек	7,0			6,9				6,2				6,4				7,6			

* Примечание: среднее содержание ниобия в исходных породах рассчитано с учетом данных Ф.А.Летникова [10].

ния изученных редких элементов в продуктах выветривания биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива составляют: для непереотложенных выветрелых продуктов - № 25, I г/т (0,047 мг/см³ (7 определений), Та 0,7 г/т (0,0013 мг/см³) (23 определения), Zr 260,6 г/т (0,490 мг/см³) (15 определений), Hf II,8 г/т (0,022 мг/см³) (6 определений); для продуктов переотложения - № 24, I г/т (0,046 мг/см³) (I определение), Та 0,9 г/т (0,0017 мг/см³) (I определение), Zr 255,0 г/т (0,490 мг/см³) (I определение).

Для непереотложенных продуктов выветривания изученного разреза особенность распределения тантала по фракциям (табл.9), в отличие от вышеописанных профилей, состоит в том, что этот элемент концентрируется в самой крупной из выделенных фракций (>0,05 мм). В зоне глин и коре выветривания (в целом) содержания тантала в этой фракции (I,3-I,2 г/т) примерно в 2-3 раза выше, чем в более мелких фракциях, где этот элемент распределяется равномерно, и в I,3 раза выше, чем в исходных пробах. Эту особенность распределения тантала следует объяснять сосредоточением во фракции > 0,05 мм титановых минералов (сфена, ильменита), концентрирующих этот элемент. В переотложившей коре выветривания, в связи с привнесением тантало-ниобатов (колумбита), фракциями-концентраторами тантала, как и в вышеописанных профилях выветривания, являются фракции 0,05-0,01 мм и 0,01-0,001 мм. Гафний в продуктах выветривания биотит-роговообманковых гранитов определенно концентрируется во фракции 0,05-0,01 мм, где сосредоточивается основная масса циркона - минерала-концентратора этого элемента. Характер распределения по фракциям породобразующих элементов аналогичен описанному в предыдущих профилях выветривания.

В непереотложившей коре выветривания исходных гранитов как в зоне дезинтеграции, так и в зоне глин (аналогично описанным разрезам) фракциями - носителями тантала и гафния являются фракции крупнее 0,01 мм (> 0,05 мм и 0,05-0,01 мм). С ними связано 82,0-89,1% тантала и 93-95% гафния. (табл.10). В более глинистом переотложившем материале основная масса тантала (84,6%) концентрируется в тонких классах (0,01-0,001 и <0,001 мм).

Таблица 9

Распределение по фракциям главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива

Соны выветривания	Валовые пробы; фракции, мм	Содержания							Отношения		
		%					г/т		Al ₂ O ₃	TiO ₂	Ti
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^{ок}	FeO	TiO ₂	Ta	Hf	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ta
II	вал. (I) ^ж	71,00	16,10	2,52	0,61	0,40	0,36	7,9	0,22	0,024	6666,6
	>0,05	76,32	13,05	1,95	0,79	0,29	0,35	6,6	0,17	0,022	4857,1
	0,05-0,01	61,00	21,50	3,27	0,11	0,40	0,29	23,0	0,35	0,018	8275,8
	0,01-0,001	52,00	27,50	4,24	0,05	0,96	0,41	3,3	0,52	0,034	13902,4
	<0,001	45,00	29,30	8,96	0,03	0,78	0,45	4,1	0,65	0,026	10222,2
III	вал. (I2)	61,33	21,77	3,01	0,49	0,60	1,0	13,8	0,35	0,027	3600,0
	>0,05	71,04	16,08	2,44	0,90	0,66	1,3	16,3	0,22	0,041	3046,1
	0,05-0,01	50,09	30,43	3,63	0,11	0,43	0,6	20,7	0,60	0,014	4300,0
	0,01-0,001	47,45	31,74	3,43	0,09	0,55	0,5	2,5	0,67	0,017	6600,0
	<0,001	45,50	30,51	5,48	0,03	0,38	0,4	2,9	0,67	0,012	5700,0
IV	вал. (I3)	62,07	21,33	2,97	0,50	0,58	0,9	13,3	0,34	0,027	3866,6
	>0,05	71,44	15,84	2,40	0,89	0,63	1,2	15,5	0,22	0,039	3150,0
	0,05-0,01	50,92	29,74	3,60	0,11	0,42	0,5	20,8	0,58	0,014	5040,0
	0,01-0,001	47,80	31,41	3,49	0,08	0,58	0,5	2,5	0,65	0,018	6960,0
	<0,001	45,46	30,41	5,74	0,03	0,41	0,4	3,0	0,66	0,013	6150,0
V	вал. (I)	54,06	21,73	7,00	0,18	1,21	0,9	-	0,40	0,055	8066,0
	>0,05	32,68	47,63	5,06	0,71	3,03	0,3	-	-	0,063	60600,0
	0,05-0,01	81,00	6,70	2,48	0,01	1,40	1,8	34,9	0,08	0,208	4666,0
	0,01-0,001	75,00	5,60	2,62	0,07	1,55	1,7	12,2	0,07	0,276	5470,5
	<0,001	54,00	17,80	9,37	0,02	0,40	0,8	4,3	0,32	0,022	3000,0

Примечание: ж (I) - число проб.

4. Кора выветривания на габбро-диоритах района г.Кокчетав. Габбро-диориты, на которых исследованы три профиля выветривания, относятся к широко распространенному на Кокчетавской глыбе крык-кудукскому комплексу средних и основных пород. Изученные габбро-диориты представлены мелкозернистыми разностями, сложенными в основном плагиоклазом (60%) и роговой обманкой (40%); количество биотита в них невелико. Наиболее распространенные акцессории представлены магнетитом (9000 г/т), сфеном (1000 г/т), апатитом

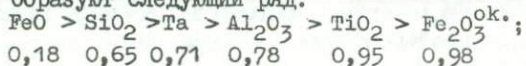
Т а б л и ц а 10

Количество тантала и гафния во фракциях продуктов выветривания
биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива

Зоны выветривания	Число проб	Выход фракций (мм), %				Количество тантала во фракциях, %				Количество гафния во фракциях, %			
		>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001	>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001	>0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,001
II	I	74,7	10,8	12,5	2,0	72,6	9,4	14,9	3,1	62,4	31,4	5,2	1,0
III	II	61,4	15,2	17,9	5,4	78,4	10,7	8,5	2,4	72,5	22,8	3,6	1,1
У	I	21,7	3,9	17,3	57,1	7,5	7,9	31,9	52,7	-	-	-	-

(90 г/т), цирконом (40 г/т) [14]. Для габбро-диоритов характерны весьма низкие содержания редких элементов: Та 0,05 г/т, Zr 52,0 г/т, Hf 0,86 г/т. Ниобий и тантал не образуют собственных минералов, рассеиваясь главным образом в сфене и биотите. Цирконий и гафний концентрируются в цирконе.

При выветривании габбро-диоритов происходит вынос породообразующих и редких элементов, за исключением циркония и гафния (табл. II). В соответствии с коэффициентами концентрации выносимые элементы образуют следующий ряд:



накапливаются: Zr > Hf

$$1,27 \quad 1,08$$

Динамика выноса элементов из продуктов выветривания характеризуется возрастанием степени их подвижности в направлении от зоны дезинтеграции к зоне глин, что подтверждается соответствующими значениями коэффициентов концентрации. Как и в вышеописанных профилях, величина отношения Zr / Hf в выветрелых продуктах (70,4) выше, чем в исходных габбро-диоритах (59,6), что свидетельствует о разделении циркония и гафния при выветривании этих пород. При этом происходит также разделение тантала и титана. Средние содержания изученных редких элементов в непереотложен-

Таблица II
 Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах
 выветривания габбро-диоритов района г.Коччетая

Элементы	I				II				III				IV			
	\bar{X}	A	n	\bar{X}	A	K_A	n	\bar{X}	A	K_A	n	\bar{X}	A	K_A	n	
SiO ₂	48,48	1328,0	I	43,00	1075,0	0,81	3	48,43	765,0	0,57	9	46,80	866,0	0,65	12	
Al ₂ O ₃	19,69	540,0	I	21,13	528,0	0,98	3	23,44	370,0	0,69	9	22,75	421,0	0,78	12	
TiO ₂	0,75	21,0	I	1,13	28,0	1,33	3	1,14	18,0	0,85	9	1,14	20,0	0,95	12	
Fe ₂ O ₃ ^{ок.}	3,87	108,0	I	7,07	176,0	1,66	3	5,00	79,0	0,75	9	5,62	104,0	0,98	12	
FeO	6,14	168,0	I	4,56	114,0	0,68	3	0,42	6,6	0,04	9	1,66	31,0	0,18	12	
Ta	0,05	0,00014	2	0,05	0,00015	1,07	3	0,05	0,00008	0,57	7	0,05	0,00010	0,71	10	
Zr	52,0	0,143	I	64,8	0,206	1,44	3	116,3	0,184	1,28	6	99,1	0,183	1,27	9	
Hf	0,86	0,0024	2	1,4	0,0035	1,45	3	1,4	0,0022	0,92	7	1,4	0,0026	1,08	10	
Отношения:																
Al ₂ O ₃ /SiO ₂		0,40			0,49				0,48				0,48			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃		0,039			0,053				0,051				0,051			
Zr/Hf		59,6			58,9				83,6				70,4			
Объемный вес; г/см ³		2,74			2,50				1,58				1,85			
pH водных вытяжек		9,1			8,4				8,1				8,2			

ной коре выветривания габбро-диоритов составляют: Та 0,05 г/т (0,0001 мг/см³) (10 определений); Zr 99,1 г/т (0,183 мг/см³) (9 определений); Hf 1,4 г/т (0,0026 мг/см³) (10 определений).

Распределение редких элементов по фракциям в продуктах выветривания габбро-диоритов (табл.12), как и в вышеописанных

Т а б л и ц а 12
Распределение по фракциям редких элементов в продуктах выветривания габбро-диоритов района г.Кочкетова

Зоны выветривания	Исходные пробы; фракции, мм	Число проб	С о д е р ж а н и я, г/т			О т н о ш е н и я	
			Та	Zr	Hf	Zr	Hf
II	Исходные пробы.	I	0,05	135,0	1,8	75,0	
	>0,05		0,06	-	1,7	-	
	0,05-0,01		0,03	100,0	1,8	55,5	
	0,01-0,001		0,04	79,0	2,2	35,9	
	<0,001		0,03	-	1,6	-	
III	Исходные пробы.	7	0,05	116,3	1,4	83,1	
	>0,05		0,04	185,1	1,6	115,7	
	0,05-0,01		0,06	87,1	1,6	54,4	
	0,01-0,001		0,05	90,0	1,2	75,0	
	<0,001		0,02	67,1	0,9	74,5	
IV	Исходные пробы.	8	0,05	118,6	1,5	79,1	
	>0,05		0,04	185,1	1,6	115,7	
	0,05-0,01		0,05	88,7	1,6	55,4	
	0,01-0,001		0,05	88,6	1,3	68,1	
	<0,001		0,02	67,1	1,0	67,1	

профилях, определяется формами нахождения этих элементов в исходных породах. Тантал, присутствующий в них в рассеянной форме, не концентрируется ни в одной из выделенных фракций. Содержания его в самой мелкой фракции (< 0,001 мм) минимальны (0,025-0,030 г/т) и ниже содержаний в исходных пробах примерно в два раза. Цирконий и гафний, связанные главным образом в цирконе, концентрируются во фракциях >0,05 мм и 0,05-0,01 мм, где сосредоточивается основная масса этого минерала.

В зоне дезинтеграции габбро-диоритов фракциями-носителями изученных редких элементов являются фракции крупнее 0,01 мм

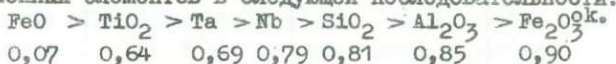
(0,01–0,05 мм и > 0,05 мм). С ними связано 87% тантала и 78,9% гафния. В зоне глин в связи с повышенным выходом тонких фракций (0,01–0,001, < 0,001 мм) в них концентрируются до 44,7% тантала, 33% циркония, 36,5% гафния (табл. I3).

Таблица I3
Количество тантала, циркония и гафния во фракциях продуктов выветривания
габбро-диоритов района г. Кокчетав

Зоны выветривания	Число проб	Выход фракций (мм), %				Количество тантала во фракциях, %				Количество циркония во фракциях, %				Количество гафния во фракциях, %			
		>0,05 -0,01	0,05 -0,01	0,01 -0,001	<0,001	>0,05 -0,01	0,05 -0,01	0,01 -0,001	<0,001	>0,05 -0,01	0,05 -0,01	0,01 -0,001	<0,001	>0,05 -0,01	0,05 -0,01	0,01 -0,001	<0,001
II	I	64,2	18,0	15,9	1,9	76,6	10,4	11,9	1,1	-	13,3	9,3	-	60,6	18,3	19,4	1,7
III	7	30,1	25,5	37,5	6,9	24,7	30,6	41,2	3,5	47,9	19,1	29,0	4,0	34,4	29,1	32,1	4,4

5. Кора выветривания на биотит-мусковитовых сланцах. Биотит-мусковитовые сланцы входят в состав осадочно-метаморфической толщи кокчетавской свиты протерозойского возраста, вмещающей Лавровский гранитный массив. Сланцы сложены в основном биотитом и мусковитом (45–47%), кварцем (35–40%), а также андалузитом, кордиеритом, силлиманитом (13–15%). Изученные редкие элементы присутствуют в них в незначительных количествах (табл. I4). Характерно, что ниобий и тантал не образуют собственных минералов, рассеиваясь в сфене, биотите, ильмените. Цирконий и гафний концентрируются, главным образом, в цирконе.

На биотит-мусковитовых сланцах изучено два профиля выветривания. По результатам исследований, представленным в табл. I4, устанавливается, что при выветривании сланцев происходит вынос всех изученных элементов в следующей последовательности:



0,07 0,64 0,69 0,79 0,81 0,85 0,90

Характерно, что ниобий и тантал, как и в вышеописанных профилях, являются элементами подвижными, причем тантал оказывается более миграционноспособным, чем ниобий. Динамика выноса элементов из продуктов выветривания сланцев в общей схеме также характеризуется возрастанием степени их подвижности в направлении от зоны дезинтеграции к зоне глин, о чем свидетельствуют соот-

Таблица I4

Распределение главных породообразующих и редких элементов в продуктах выветривания
слютит-мусковитных сланцев

Элементы	I			II				III				IV			
	X	A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n	X	A	K _A	n
SiO ₂	61,00	1696,0	I	69,33	1695,0	0,94	4	66,16	1211,0	0,71	5	67,56	1378,0	0,81	9
Al ₂ O ₃	15,80	439,0	I	16,95	390,0	0,89	4	19,72	361,0	0,82	5	18,49	377,0	0,85	9
TiO ₂	1,21	34,0	I	1,15	26,0	0,76	4	1,03	19,0	0,56	5	1,08	22,0	0,64	9
Fe ₂ O ₃ ^{ок.}	1,96	55,0	I	3,32	76,0	1,38	4	1,79	33,0	0,60	5	2,47	50,0	0,90	9
FeO	7,69	214,0	I	1,20	27,0	0,12	4	0,40	7,0	0,03	5	0,75	15,0	0,07	9
Nb	44,8	0,124	I	37,4	0,066	0,69	4	56,6	0,104	0,84	5	48,0	0,098	0,79	9
Ta	0,83	0,0023	7	0,76	0,0017	0,74	7	0,80	0,0014	0,61	6	0,78	0,0016	0,69	13
Отношения:															
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,26			0,24				0,30				0,27			
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,077			0,066				0,052				0,058			
Nb/Ta	53,9			50,6				74,3				61,2			
Ti/Nb	164,5			181,4				109,6				134,6			
Ti/Ta	8869,5			9176,4				8142,8				8250,0			
Объемный вес; г/см ³	2,78			2,30				1,83				2,04			
pH водных вытяжек	7,8			7,5				6,5				7,0			

ветствующие значения коэффициентов концентрации. В изученных профилях выветривания происходит, кроме того, отмечавшееся выше разделение ниобия и тантала, а также отделение этих редких элементов от титана, что подтверждается изменением величин отношений Nb/Ta , Ti/Nb и Ti/Ta в исходных сланцах и их выветрелых продуктах. Средние содержания изученных редких элементов в продуктах выветривания сланцев составляют: Nb 48,06 г/т (0,098 мг/см³) (9 определений), Ta 0,78 г/т (0,0016 мг/см³) (13 определений).

Заключение и выводы

1. В изученных разрезах кор выветривания на Кокчетавской глыбе гипергенное минералообразование в нижних горизонтах может значительно различаться в зависимости от состава исходных пород; в верхних горизонтах выветривания преобладающим новообразованным минералом является каолинит. Процесс гипергенного преобразования исходных пород протекает в обстановке смены щелочной среды выветривания в низах разрезов на кислую в верхних горизонтах. Характерная особенность исследованных кор выветривания состоит в том, что они слабо преобразованы более поздними гипергенными процессами и практически не содержат продуктов наложенной минерализации.

2. Ниобий и тантал во всех изученных разрезах непереотложенной коры выветривания относятся к подвижным элементам. Коэффициенты концентрации этих редких элементов, рассчитанные с учетом изменения объемного веса исходных пород при выветривании, как в зонах дезинтеграции, так и в зонах глин обычно изменяются в пределах 0,4–0,8. Установленный случай накопления тантала в зоне дезинтеграции мелкозернистых гранитов орлиногорского комплекса ($K = 1,5$) следует связывать с крайне неравномерным распределением этого элемента в исходных породах. Максимальный вынос тантала (62%) отмечен в непереотложенных выветрелых продуктах биотит–роговообманковых гранитов Зерендинского массива, где этот элемент концентрируется в неустойчивых к выветриванию аксессуориях (сфене), а также в породообразующих

минералах (биотите, амфиболе). В непереотложенных выветрелых продуктах изученных профилей значения отношений Nb /Ta в сравнении с таковыми в исходных породах изменяются, что свидетельствует о разделении геохимически родственных ниобия и тантала при выветривании на Кокчетавской глыбе. Максимальное разделение этих элементов устанавливается в профилях выветривания на тех коренных породах, где ниобий и тантал не образуют собственных минералов. В этих профилях отмечается также большая подвижность тантала по сравнению с ниобием. В изученных профилях происходит также отделение ниобия и тантала от титана, что подтверждается различием величин отношений Ti /Nb и Ti /Ta в продуктах выветривания и исходных породах. Динамика выноса указанных редких элементов из непереотложенных выветрелых продуктов в общей схеме характеризуется возрастанием степени их подвижности в направлении от зоны дезинтеграции к зоне глин, о чем свидетельствуют соответствующие значения коэффициентов концентрации. Можно думать, что такая динамика процесса выноса ниобия и тантала обусловлена характером распределения этих элементов в исходных породах. В них ниобий и тантал связаны главным образом не с собственными минералами, а сосредоточены в неустойчивых к выветриванию породообразующих минералах (слюдах, роговой обманке, калиевом полево шпате) и аксессуарных титановых минералах (сфене). Мобилизация этих элементов из неустойчивых минералов-концентраторов, начавшаяся в зоне дезинтеграции, возрастает в зоне глин, где степень минеральных преобразований выше, чем в продуктах дезинтеграции. Полученные результаты не всегда совпадают с выводами исследователей, изучавших поведение ниобия и тантала в корах выветривания на Кокчетавской глыбе [3] и в других районах [1,2,16,17,21].

Цирконий и гафний в изученных разрезах непереотложенной коры выветривания, в отличие от ниобия и тантала, являются элементами практически неподвижными. Их коэффициенты концентрации обычно близки к единице или выше. Таким образом, цирконий и гафний, как правило, не выносятся из продуктов выветривания. Характерно, что минимальные значения коэффициентов концентрации циркония (1,01) и гафния (0,68-0,87) устанавливаются в непереотложенной коре выветривания орлиногорских

гранитов и их крупно- и среднезернистых разностей. Вероятно, это следует связывать с тем обстоятельством, что эти редкие элементы в гранитах орлиногорского комплекса концентрируются не только в устойчивом к выветриванию цирконе, но и в слабо устойчивых при гипергенезе циртолите и малаконе, из которых цирконий и гафний легче переходят в миграционноспособное состояние. Весьма характерно также, что в изученных разрезах непереотложенных продуктов выветривания отношение Zr / Hf выше, чем в исходных породах. Это свидетельствует о тенденции разделения этих двух геохимически родственных элементов в процессе выветривания при большей миграционной способности гафния. Тенденция к дифференциации циркония и гафния в процессе выветривания при большей стабильности гафния устанавливается исследованиями В.В.Буркова и Е.Г.Чеховских [5].

3. Переотложенные коры выветривания в изученных разрезах сформированы, главным образом, в процессе ближнего переотложения нижезалегавших непереотложенных выветрелых продуктов. Поэтому ниобий, тантал, цирконий и гафний в переотложенных продуктах, как правило, наследуют характер распределения, свойственный нижезалегавшей непереотложенной коре выветривания. Однако в процессе ближнего переотложения рыхлого материала возможен привнос минералов-концентраторов редких элементов (колумбита, ильменита, циркона), либо обогащение этими минералами. Вероятно, поэтому в переотложенной коре выветривания Зерендинского массива фиксируется повышение содержаний ниобия и тантала и резкое возрастание коэффициентов концентрации этих элементов. Цирконий и гафний в переотложенных выветрелых продуктах определенно накапливаются.

4. Распределение редких элементов по фракциям в изученных разрезах выветривания определяется формами их нахождения в исходных породах, а также минералогией гипергенных новообразований.

Т а н т а л в продуктах выветривания гранитов орлиногорского комплекса и сиенитов Еленовского массива концентрируется во фракциях 0,05–0,01 мм, где сосредоточивается основная масса тантало-ниобатов (колумбита) и других минералов-концентраторов этого элемента (минералы титана, циркон). В коре выветривания

биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива фракцией-концентратором этого элемента является самая крупная фракция $>0,05$ мм, обогащенная титановыми минералами (ильменитом, сфеном), в которых сосредоточена преобладающая масса тантала исходных пород. В профиле выветривания габбро-диоритов тантал не концентрируется ни в одной из выделенных фракций. Это связано с рассеянной формой нахождения этого элемента в исходных породах.

В непереотложенных корах выветривания как в зонах дезинтеграции, так и в зонах глин фракциями - носителями тантала являются фракции крупнее $0,01$ мм ($0,01-0,05$ мм, $>0,05$ мм). С ними связано от 55,3 до 96,7 этого элемента (от исходного). Максимальное количество тантала (44,7%), связанное с тонкими фракциями ($0,01-0,001$ мм, $<0,001$ мм), устанавливается в зоне глин на габбро-диоритах. Таким образом, рассеянная форма нахождения тантала в исходных породах благоприятствует концентрации этого элемента в глинистых продуктах выветривания, что подтверждается рядом исследований [1, 2, 3, 4]. В переотложенных корах выветривания в связи с повышением "глинистости" материала доля тантала, связанная с тонкими фракциями, обычно выше, чем в непереотложенных выветрелых продуктах, и может достигать 84,6% (переотложенная кора выветривания биотит-роговообманковых гранитов Зерендинского массива).

Цирконий и гафний в изученных разрезах непереотложенных и переотложенных кор выветривания определенно концентрируются во фракциях $>0,05$ мм и $0,05-0,01$ мм, где сосредоточивается основная масса минералов-концентраторов этих элементов - циркона, цирколита, малакона. В непереотложенных выветрелых продуктах эти же фракции являются также фракциями - носителями циркона и гафния, сосредоточивая 63,5-96,7% этих элементов. В выветрелом переотложенном материале с повышением его "глинистости" доля гафния, связанная с тонкими фракциями ($0,01-0,001$ мм и $<0,001$ мм), достигает 51,1% (переотложенная кора выветривания крупнозернистых гранитов орлиногорского комплекса).

5. Фракции $<0,001$ мм, по данным рентгеноструктурного анализа, во всех изученных разрезах сложены практически только глинистыми минералами (каолинитом, гидрослюда, монтмориллонитом).

том) в различных количественных соотношениях. Анализ соотношений редких элементов и титана в этих фракциях в сопоставлении с исходными пробами (табл. 15) по изученным профилям выветривания позволяет отметить следующее. Степень концентрации тантала и гафния во фракциях $< 0,001$ мм определяется содержанием этих элементов в исходных пробах. Поэтому максимальная концентрация тантала и гафния в самых тонких фракциях устанавливается в профилях выветривания гранитов орлиногорского комплекса, обогащенных этими элементами: здесь отношение содержаний тантала и гафния во фракциях $< 0,001$ мм к их содержанию в исходных пробах всегда больше единицы. В изученных профилях выветривания наибольшее накопление Ti , Ta , Zr и Hf во фракциях $< 0,001$ мм происходит в зонах дезинтеграции. Именно в этих зонах отношение содержаний указанных элементов во фракциях $< 0,001$ мм к их содержаниям в исходных пробах максимальны. Это следует связывать с тем обстоятельством, что в зонах дезинтеграции самые тонкие фракции ($< 0,001$ мм) сложены в значительной части не только каолинитом, но гидрослюдой или монтмориллонитом, сорбционная способность которых выше, чем у каолинита [12]. Отношения Ti/Ta и Zr/Hf во фракциях $< 0,001$ мм обычно ниже, чем в исходных пробах, что свидетельствует о разделении титана и тантала, циркония и гафния при образовании тонких глинистых продуктов в изученных профилях выветривания. Максимальные количества тантала (4,9% от исходного) и гафния (2,3% от исходного), приходящиеся на 1% выхода фракции $< 0,001$ мм, устанавливаются в профилях выветривания редкометалльных гранитов орлиногорского комплекса и характерны в целом для зон дезинтеграции во всех изученных разрезах выветривания.

Изложенный материал позволяет сделать следующие основные выводы:

- 1) В условиях выветривания на Кокчетавской глыбе поведение изученных редких элементов (Nb , Ta , Zr , Hf) в значительной мере определяется минеральными формами их нахождения в исходных породах.
- 2) Во всех изученных профилях выветривания на основных, кислых и щелочных породах ниобий и тантал являются подвижными элементами. При формировании исследованных кор выветривания происходит разделение указанной геохимически родственной пары

Таблица 15

Соотношения Ti и Ta, Zr и Hf в исходных пробах и фракциях <0,001 мм из разрезов кор выветривания Кокчетавского подъятия

Исходные породы	Зоны выветривания	Число проб	Содержание Ti (%) и отношение			Содержание Ta (г/т) и отношение			Содержание Zr (г/т) и отношение			Содержание Hf (г/т) и отношение		
			Исх. пробы	Фр. <0,001	<0,001 / Исх. пробы	Исх. пробы	Фр. <0,001	<0,001 / Исх. пробы	Исх. пробы	Фр. <0,001	<0,001 / Исх. пробы	Исх. пробы	Фр. <0,001	<0,001 / Исх. пробы
Крупнозернистые граниты орлиногорского комплекса	II	7	0,05	0,12	2,5	6,0	29,4	4,9	-	-	-	5,7	13,4	2,3
	III	8	0,15	0,10	0,6	8,8	19,6	2,2	-	-	-	7,5	12,4	1,6
	IV	3	0,13	0,10	0,7	8,5	20,8	2,4	-	-	-	7,3	12,5	1,7
Мелкозернистые граниты орлиногорского комплекса	II	10	0,13	0,12	0,9	4,2	4,6	1,1	-	-	-	6,1	10,8	1,7
	III	2	0,52	0,07	0,1	2,8	0,6	0,2	-	-	-	6,2	6,2	1,0
	IV	3	0,70	0,59	0,8	6,5	7,9	1,2	-	-	-	9,4	9,6	1,0
Кварцевые сyenиты Еленовского массива	II	3	1,23	-	-	1,9	1,3	0,7	-	-	-	6,4	8,9	1,4
	III	5	1,11	0,33	0,3	2,8	1,7	0,4	-	-	-	16,0	7,7	0,5
	IV	8	1,16	0,33	0,3	2,4	1,1	0,5	-	-	-	10,4	7,7	0,6
Бiotит-рогообманковые граниты Зерендинского массива	II	1	0,24	0,46	1,9	0,4	0,5	1,2	-	-	-	7,9	4,1	0,5
	III	12	0,36	0,23	0,6	1,0	0,4	0,4	-	-	-	13,8	2,9	0,2
	IV	13	0,35	0,24	0,6	0,9	0,4	0,4	-	-	-	13,3	3,0	0,2
Габбро-диориты района г. Кокчетав	II	1	-	-	-	0,05	0,03	0,5	135,0	-	-	1,8	1,6	0,8
	III	7	-	-	-	0,05	0,02	0,5	116,3	67,1	0,5	1,4	0,9	0,5
	IV	8	-	-	-	0,05	0,02	0,5	118,6	67,1	0,6	1,5	1,0	0,6

Продолжение табл. 15

Исходные породы	Зоны выветр.	Число проб	Ti / Ta		Zr / Hf		Выход фр. <0,001, %	Содержание во фр. <0,001 мм, %			Количество на 1% выхода фр. <0,001 мм, %		
			Исх. пробы	Фр. <0,001	Исх. пробы	Фр. <0,001		Ta	Zr	Hf	Ta	Zr	Hf
Крупнозернистые граниты орлиногорского комплекса	П	1	80,0	40,8	-	-	0,8	3,9	-	1,8	4,9	-	2,3
	Ш	7	170,4	55,1	-	-	11,4	21,7	-	11,9	1,9	-	1,0
	У	8	162,3	51,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	У	3	1070,7	751,9	-	-	15,0	18,2	-	18,8	1,2	-	1,3
Мелкозернистые граниты орлиногорского комплекса	Ш	10	314,3	260,8	-	-	5,1	5,7	-	9,3	1,1	-	1,8
	У	2	1864,2	1200,0	-	-	25,0	3,0	-	11,8	0,1	-	0,4
Кварцевые слениты Еленовского массива	П	3	6473,6	-	-	-	0,9	0,7	-	1,3	0,8	-	1,4
	Ш	5	3985,7	3000,0	-	-	5,2	1,7	-	2,5	0,3	-	0,5
	У	8	4825,0	3000,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	У	4	4400,0	3646,1	-	-	44,0	32,5	-	23,0	0,7	-	0,5
Бютит-роговообманковые граниты Зерендинского массива	П	1	6666,6	10222,2	-	-	2,0	3,1	-	1,0	1,5	-	0,5
	Ш	12	3600,0	5700,0	-	-	5,4	2,4	-	1,1	0,4	-	0,2
	У	13	3866,6	6150,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	У	1	8066,6	3000,0	-	-	57,1	52,7	-	-	0,9	-	-
Габбро-диориты района г.Кокчетав	П	1	-	-	75,0	-	1,9	1,1	-	1,7	0,6	-	0,8
	Ш	7	-	-	83,1	74,5	6,9	3,5	4,0	4,4	0,5	0,5	0,6
	У	8	-	-	79,1	67,1	-	-	-	-	-	-	-

редких элементов. Максимальное разделение ниобия и тантала при более высокой подвижности последнего устанавливается в профилях выветривания на коренных породах, в которых эти элементы не образуют собственных минералов. В изученных профилях происходит также отделение ниобия и тантала от титана.

3). Цирконий и гафний в изученных разрезах выветривания оказываются элементами значительно более неподвижными, чем ниобий и тантал. Тем не менее, цирконий и гафний также обнаруживают при выветривании тенденцию к разделению при большей миграционной способности гафния.

4). Процессы ближнего сноса выветрелого материала, формирующие в изученных разрезах переотложенную кору выветривания, вносят изменения в распределение редких элементов, способствуя их концентрации или разубоживанию.

5). В исследованных разрезах кор выветривания основными фракциями-концентраторами и носителями редких элементов являются фракции $> 0,05$ мм и $0,05-0,01$ мм. В переотложенных продуктах выветривания в связи с повышением их "глинистости" роль тонких фракций ($0,01-0,001$ мм и $< 0,001$ мм) как носителей редких элементов возрастает.

6). Характер гипергенного минералообразования также влияет на распределение редких элементов в выветрелых продуктах. Гидрослюда и монтмориллонит, обладающие большей сорбционной способностью, чем каолинит, способствуют накоплению редких элементов в глинистом материале кор выветривания.

ЛИТЕРАТУРА

1. БОЙКО Т.Ф. Распределение редких элементов в профилях выветривания пород и активность их водной миграции. - В кн.: Материалы семинара по геохимии гипергенеза и коры выветривания. Минск, 1969, с.27-31.

2. БОЙКО Т.Ф., БОЛОТОВ А.М. Геохимия тантала и ниобия в корях выветривания и промышленные россыпи тантало-ниобатов. - Там же, с.31-34.

3. БОЛОТОВ А.М., БРАВИНА С.Б. Редкометалльные коры выветри-

- вания Приазовья и Кокчетавской глыбы.— В кн.: Рудоносные коры выветривания. М., Наука, 1974, с.234–240.
4. БУРКОВ В.В., ПОДПОРИНА Е.К. Геохимия и месторождения малых и редких элементов в коре выветривания.— В кн.: Материалы семинара по геохимии гипергенеза и коры выветривания. Минск, 1969, с.47–51.
5. БУРКОВ В.В., ЧЕХОВСКИХ Е.Г. Редкие и малые элементы в корях выветривания и бокситах.— В кн.: Латеритные коры выветривания КМА и их редкометальность. М., Недра, 1976, с.84–128.
6. ГИНЗБУРТ И.И., КАЦ А.А., КОРИН И.З., ПОПКОВ В.Ф., САВЕЛЬЕВ И.И., ТРУБИНА К.Н. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала. ч.1. Типы и морфология древней коры выветривания. Л., Изд-во АН СССР, 1946. 147 с. (Труды Института геологических наук, вып.80).
7. КРАСИЛЬНИКОВА А.В. Акцессорные минералы в колумбитоносных гранитоидах Кокчетавской глыбы и в корях выветривания, с ними связанных. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. геол.-мин. наук, Алма-Ата, 1971. 20 с.
8. КРАСИЛЬНИКОВА А.В., ЛЕТНИКОВ Ф.А. Акцессорные минералы гранитоидных комплексов Кокчетавской глыбы и их металлогения. — В кн.: Акцессорные минералы в решении вопросов металлогении и происхождения магматических комплексов. М., ИМГРЭ, 1969, с. 95–102.
9. КРАСИЛЬНИКОВА А.В., ЛЕТНИКОВ Ф.А. Редкие элементы в акцессорных минералах гранитоидов Кокчетавской глыбы.— Там же, с.315–319.
10. ЛЕТНИКОВ Ф.А. Гранитоиды глыбовых областей. Новосибирск, Наука, 1975. 213 с.
11. ЛИСИЦЫНА Н.А. К методике геохимического изучения кор выветривания.—Литология и полезные ископаемые, 1966, № 1, с. 3–19.
12. ЛУКАШЕВ К.И., КУЗНЕЦОВ В.А., ЛУКАШЕВ В.К. Геохимическое изучение земной коры. Минск, Наука и техника, 1977. 175 с.
13. ЛЯХОВИЧ В.В. Акцессорные минералы. М., Наука, 1968, 275 с.
14. МАРИН Ю.Б. Акцессорные минералы каледонских гранитоидных формаций северного Казахстана.— В кн.: Минералы и парагенезисы минералов горных пород. Л., Наука, 1973, с.61–70.

15. НОВИКОВ В.А. Гранулометрическое разделение материала коры выветривания.— В кн.: Кора выветривания, вып. I, М., Изд-во АН СССР, 1952, с.193—212.

16. ПАЧАДЖАНОВ Д.Н. Основные черты геохимии ниобия и тантала в осадочном процессе. Душанбе, Дониш, 1975. 201 с.

17. ПОГРЕБНОЙ В.Т., ДОДАТКО А.Д., ХОРОШЕВА Д.П., ЭЛБЯНОВ М.Д. Некоторые данные о поведении микроэлементов в коре выветривания кристаллических пород Приднестровья и Приазовья. — В кн.: Кора выветривания на территории УССР, ч.2, Киев, Наукова думка, 1971, с.44—59.

18. ПОНОМАРЧУК В.А., ШИПИЦЫН Ю.Г., ЦИБУЛЬЧИК В.М. Определение тантала в корях выветривания инструментальным нейтронно-активационным методом.— В кн.: Ядерно-геохимические методы. Новосибирск, 1976, с.28—44.

19. ПОНОМАРЧУК В.А., ШИПИЦЫН Ю.Г., ЦИБУЛЬЧИК В.М. Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) гафния и циркония в экзогенных образованиях.— Там же, с.45—54.

20. РАЗУМОВА В.Н. Кора выветривания северо-западной части Казахского нагорья.— В кн.: Кора выветривания, вып.2. М., Изд-во АН СССР, 1956, с.272—298.

21. РОНОВ А.Б., МИГДИСОВ А.А. Основные черты геохимии элементов-гидролизатов в процессах выветривания и осадконакопления.— Геохимия, 1965, № 2, с.131—157.

22. РУХИН Л.Б. Гранулометрический анализ рыхлых и слабоцементированных осадочных пород.— В кн.: Методы изучения осадочных пород, т. I, М., Госгеолтехиздат, 1957, с.314—344.

23. СЕРЫХ В.И. Геология и геохимия позднекаледонских гранитов юго-восточной части Кокчетавского массива (Северный Казахстан). Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. геол.-мин. наук. М., 1966. 35 с.

БОР И БЕРИЛЛИЙ В КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

На территории Красноярского края широко распространены коры выветривания неоген-четвертичного возраста. Они сформировались в обстановке постепенной смены субтропического климата палеогена более умеренными климатическими условиями неогена и четвертичного времени. По данным В.П.Казаринова [11], выветривание в Западной Сибири и прилегающих районах происходило одновременно с эрозией. Вероятно, поэтому в подавляющем большинстве изученных разрезов отсутствует зона глин, и образования коры выветривания представлены, в основном, продуктами начальных стадий гипергенного преобразования пород (зоны дезинтеграции).

Большая часть кор выветривания характеризуется площадным развитием, однако нередко исходные породы претерпевали гидротермальную или тектоническую подготовку, обусловившую развитие линейного типа коры.

Все изученные разрезы представляют собой несомненно структурный элювий нижележащих исходных пород, к которым относятся: Таракские граниты и граниты р-на г.Уяра (Енисейский край), граниты, плагиограниты и гранодиориты Ольховско-Чибижского интрузивного комплекса (Вост.Саян), а также диабазовые порфириты района г.Ачинска. Минеральный состав, строение и полезные ископаемые кор выветривания Красноярского края освещены в работах В.П.Казаринова, А.М.Цехомского, Д.И.Карстенса, Р.А.Цыкина и других исследователей.

Методики анализа и отбора проб

Приводимые в работе разрезы опробованы, главным образом, в естественных обнажениях, шурфах, вырытых для этих целей, и, в меньшей степени, по керну скважин. Пробы отобраны через равные промежутки (0,5-1,0 м) в зависимости от мощности зон и строения профиля выветрелых пород. Вес проб колеблется от 300 до 1000 г и обусловлен целями их отбора. При изучении кор выветривания по

скважинам керн глинистых пород тщательно очищался от остатков бурового раствора.

Из исходных пород, а иногда и из зоны дезинтеграции отбирались пробы весом 1,5–10 кг для изучения минерального состава. Количественные соотношения минералов определены в шлифах и гранулометрических фракциях под бинокуляром. Мономинеральные фракции выделены вручную под бинокуляром.

Гранулометрический анализ рыхлых образований кор выветривания проведен в соответствии с рекомендациями М.Ф.Викуловой [6] и других исследователей.

С целью изучения реальной картины поведения бора, бериллия и породообразующих элементов в процессе выветривания все анализы пересчитаны на абсолютные массы с учетом изменения объемного веса пород.

Количественные спектральные определения бора и бериллия выполнены Г.В.Еремеевой в лаборатории геохимии золота и редких элементов ИГиГ СО АН СССР на приборе КСА-1 и ДФС-8 по методике В.И.Симоновой [19]. Минеральный состав глинистых образований определен Э.П.Солотчиной в лаборатории рентгено-структурного анализа ИГиГ. Химический состав пород различных зон кор выветривания определен М.И.Зеркаловой и Л.Д.Ивановой квантометрическим методом на приборе "Квантовак-1500В" в лаборатории спектрального анализа того же института.

Изучение удельной поверхности частиц, слагающих различные гранулометрические фракции выветрелых пород, сделано Л.П.Пантюковой хроматографическим методом тепловой десорбции аргона [4] в лаборатории разделения минералов ИГиГ. Всем перечисленным товарищам авторы приносят свою благодарность.

Распределение бора и бериллия в профилях выветривания и продуктах переотложения

К о р а в ы в е т р и в а н и я т а р а к с к и х
г р а н и т о в изучена нами в пределах водоразделов рек Ку-
рыш-Тарака-Казачья в районе пос.Таежный. Исходными породами ко-
ры выветривания на данной площади являются граниты архейского

возраста, слагающие громадный плутон, вытянутый в северо-западном направлении на 120 км [13].

Граниты имеют серый цвет, преимущественно грубозернистое порфировидное сложение (размер вкрапленников полевого шпата достигает 5 см в длину) и состоят из кварца (30%), калиевого шпата (до 50%) и плагиоклаза (10–20%), около 5% приходится на биотит, мусковит, и аксессуарные (циркон, апатит, монацит). Характерной чертой гранитов является прекрасная сохранность микроклина и полное отсутствие рудного. В наименее измененных разновидностях гранитов плагиоклаз нередко серицитизирован, кварц трещиноват и имеет волнистое угасание, биотит без видимых изменений. Граниты часто грейзенизированы и окварцованы, в них встречаются участки пегматоидных обособлений и повышенной гранатовой минерализации.

Данные таблицы I показывают, что таракские граниты по своему химическому составу близки к гранитам среднего типа, по А.Н.Заварицкому [10]. Содержание бора в них составляет 5,5 г/т, что значительно ниже кларка для кислых пород [7]. Бериллий в гранитах обнаружен в количестве 2 г/т.

Кора выветривания характеризуется сокращенным профилем и представлена, главным образом, дресвяниками, в меньшей степени — каолинизированными дресвяниками. Мощность выветрелых образований колеблется от первых десятков см до 10 м. Развита она плащеобразно, реже — линейно. Наиболее полно кора выветривания сохранена на пологих склонах и выравненных участках. В понижениях рельефа нередко наблюдаются пестроцветные переотложенные продукты кор выветривания.

Начальные стадии выветривания характеризуются интенсивным образованием гидрослюд по плагиоклазу и, отчасти, по микроклину. Плотность пород падает с 2,64 до 2,10 г/см³. Из пород интенсивно выносятся Na и Ca, в меньшей степени Mn, Si, Al, Be. Содержание Fe, Mg, Ti, K и B остается без изменений или даже несколько увеличивается (табл. I).

Дальнейшие изменения приводят к осветлению пород, почти полному замещению плагиоклаза гидрослюдисто-каолининовым агрегатом и сплошному замутнению щелочного полевого шпата. Биотит и мусковит остаются практически без изменений. Рентгеноструктур-

Т а б л и ц а I

Распределение главных породообразующих элементов, бора и бериллия
в коре выветривания таракских гранитов

n	d	pH	B	Be	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂ Al ₂ O ₃	B Be
И с х о д н ы е п о р о д ы																	
13	2,64	7,1	5,5 0,0145	2,0 0,0053	70,05 1649,0	15,9 420,0	3,10 82,0	1,93 51,0	0,96 25,0	1,0 26,0	0,11 3,0	0,32 8,4	2,35 62,0	3,39 89,0	3,27 86,0	4,4	1,3
З о н а д р е с в я н и к о в																	
11	2,10	6,8	7,5 0,0157 1,08	2,0 0,0042 0,79	67,5 1418,0 0,77	15,6 327,0 0,78	4,22 88,0 1,07	1,89 40,0 0,78	2,12 44,0 1,76	1,4 29,0 1,12	0,11 2,3 0,77	0,49 10,0 1,19	1,47 31,0 0,5	1,25 26,0 0,29	4,39 92,0 1,07	4,3	1,7
З о н а к а о л и н и з и р о в а н н ы х п о р о д																	
8	1,84	6,9	12,0 0,0221 1,53	2,4 0,0044 0,83	62,31 1146,0 0,62	16,65 306,0 0,73	4,10 75,0 0,91	1,28 24,0 0,47	2,68 49,0 1,96	1,41 26,0 1,0	0,12 2,2 0,73	0,51 9,4 1,12	3,21 59,0 0,95	0,51 9,4 0,11	3,74 69,0 0,80	3,7	2,3
З о н а п е р е о т л о ж е н н ы х п о р о д																	
3	2,05	6,6	54,0 0,1110 5,05	3,0 0,0061 1,39	64,25 1317,0 1,15	15,55 318,0 1,04	5,75 118,0 1,57	1,77 36,0 1,5	3,79 78,0 1,6	1,87 38,0 1,46	0,11 2,3 1,05	0,53 11,0 1,16	1,72 35,0 0,59	1,66 34,0 3,6	2,66 55,0 0,80	4,1	18,2

Примечание. Первая строка указывает содержание элемента в вес %, B и Be в г/т; вторая строка - абсолютные содержания на 1 см³ породы (мг/см³); третья строка - коэффициент концентрации (K) элемента относительно его содержания в исходной породе. Коэффициенты концентрации для перерожденных продуктов посчитаны относительно содержания элементов в зоне каолинизированных пород.

ными исследованиями в тонких фракциях (0,01 мм и менее), содержащих 15–25% выветрелых пород, устанавливается неупорядоченный каолинит (около 60–70%), гидрослюда (до 30%) и следовые количества монтмориллонита. Тенденции в поведении породообразующих и редких элементов остаются в основном теми же, что и в зоне дезинтеграции. Количество бора в сравнении с исходными породами увеличилось почти в 1,5 раза, количество бериллия уменьшилось на 17%.

На рис. I приведена зарисовка–схема одной из стенок шурфа, вырытого в выветрелых породах в р-не пос. Таежный, и распределение в них бора и бериллия. Под почвенным слоем вскрыты краснокоричневые переотложенные пластичные глины, содержащие незначительное количество неокатанного кварца, гидроокислов железа, полевых шпатов и биотита. Мощность глин около 0,5 м. Содержание бора в них достигает иногда 84 г/т, составляя в среднем 54 г/т. Такими же содержаниями бора характеризуются и почвы, образованные на гранитных дресвяниках. Бериллий в переотложенных глинах обнаружен в количестве 3 г/т.

Ниже переотложенных глин идут каолинизированные дресвяники, полностью сохраняющие структурно–текстурные особенности порфириовидных гранитов. На глубине около 2 м отмечается зона интенсивной каолинизации и отбеливания пород, возникновение которой, на наш взгляд, обусловлено тектонической или гидротермальной подготовкой исходных пород. В этом участке наблюдается незначительное уменьшение количеств бора и бериллия в сравнении с выше и ниже лежащими дресвяниками.

Графики распределения бора, бериллия и значений pH суспензий пород показывают некоторую обратную зависимость между содержанием бора и величиной pH*. Для бериллия такой зависимости не устанавливается.

Полученные значения pH суспензий мы не считаем прямым показателем физико–химической обстановки времени формирования коры выветривания, так как не всегда возможно учесть влияние наложенных процессов. Но поскольку определяющим фактором для его величины является степень приспособления исходного субстрата к физико–химическим условиям корообразования, постольку величина

* Измерение pH проводилось на приборе pH–121 в соответствии с рекомендациями Л. В. Пустовалова и Е. И. Соколовой [18] и др.

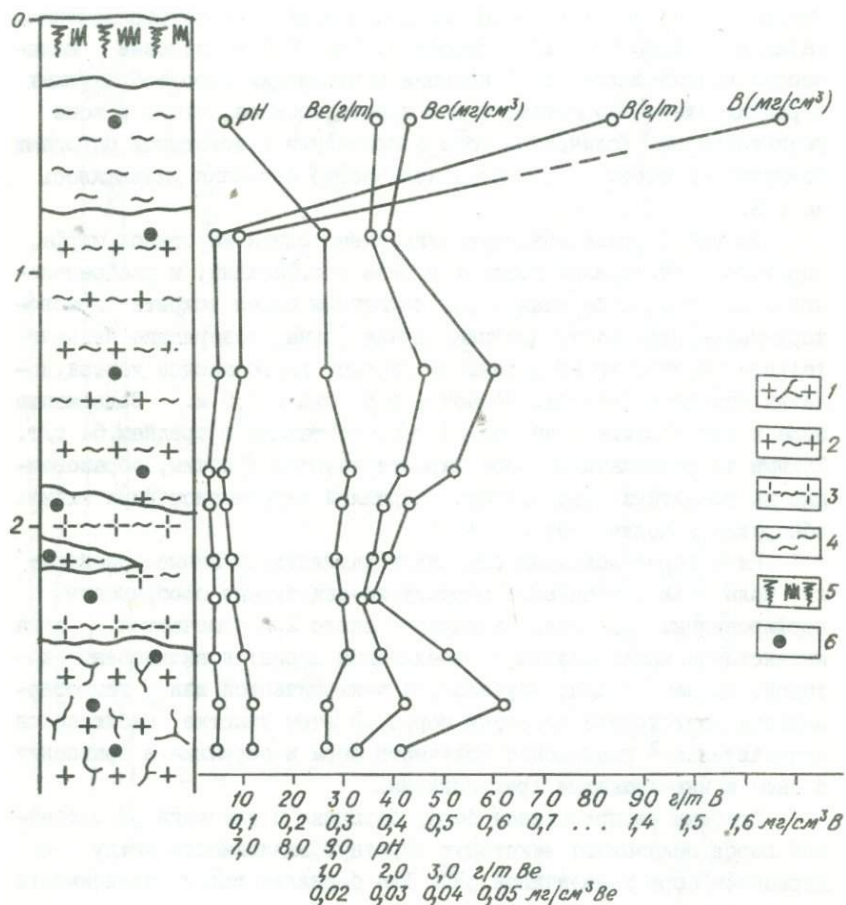


Рис. I. Распределение бора, бериллия и величины pH в коре выветривания тараских гранитов

1—дезинтегрированные граниты; 2—слабо каолинизированные граниты; 3—существенно каолинизированные граниты; 4—переотложенные глины; 5—почвенный слой; 6—места опробования

pH может быть использована в качестве индикатора среды, в которой происходила гипергенная мобилизация элементов.

Ряды подвижности основных породообразующих элементов, бора и бериллия, построенные на сравнении их абсолютных содержаний в зонах коры выветривания и исходных породах, в общем, не противоречат закономерностям, установленным ранее для кор выветривания других районов [16]:

I. Зона дезинтеграции

Вносятся: $Na > Ca > Mn, Si > Al, > Be$
 $K = 0,29 \quad 0,5 \quad 0,77 \quad 0,78 \quad 0,79^*$

накапливаются: $Ti > Mg > B > Fe, K$
 $1,19 \quad 1,12 \quad 1,08 \quad 1,07$

2. Зона каолинизированных пород

Вносятся: $Na > Si > Al, \quad Mn > K > Be > Fe > Ca$
 $0,11 \quad 0,62 \quad 0,73 \quad 0,8 \quad 0,83 \quad 0,91 \quad 0,95$

накапливаются $B > Ti$; для $Mg \quad K=1$
 $1,53 \quad 1,12$

Особенностью выветривания таракских гранитов является почти полное отсутствие выноса традиционно весьма активного мигранта — Ca. Причину этого, по-видимому, следует искать в образовании огромного числа трубчатых агрегатов кальцит-каолинитового состава, которые возникают в результате жизнедеятельности растений (рис.2). Они обнаружены на глубине 1,5–2 м в каолинизированных дресвяниках. Внутри некоторых из них сохраняются остатки корней. Содержание бора в кальцит-каолинитовых стяжениях составляет 7,7 г/т, что в 2,5 раза выше, чем во фракции, из которой они отобраны (2-I и I-0,5 мм). Глинистая составляющая этих пород (фракция $\leq 0,001$ мм) содержит 21 г/т бора. Известно, что между корнями растений и минералами почв осуществляется катионный обмен. Корни отдают водород и поглощают из неорганических веществ необходимые растениям компоненты [12], в том числе и бор, как один из самых необходимых для жизнедеятельности микроэлементов. Очевидно, этим объясняется пониженное содержание бора в трубчатых новообразованиях по сравнению с каолинитом. Кроме того, карбонаты, как правило, не концентрируют бор, и это также является причиной обеднения им карбонатно-каолинитовых агрегатов. Бериллий в них не определялся.

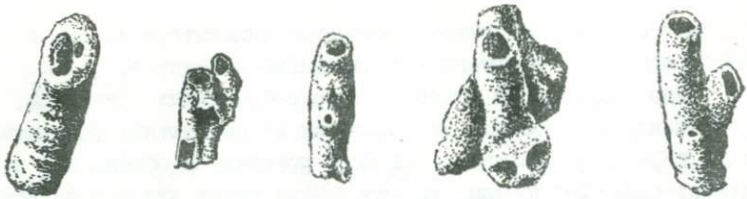


Рис.2. Карбонатно-каолинитовые образования вокруг корней растений в коре выветривания таракских гранитов. Глубина I-I,5 м. Ув. 10-15 раз.

Анализ данных по распределению бора и бериллия в гранулометрических фракциях пород коры выветривания таракских гранитов (табл.2) показывает, что:

а) содержание бора и бериллия возрастает с уменьшением размерности фракций и самые высокие концентрации их наблюдаются во фракциях, меньше 0,05 мм. В этом же направлении происходит рост количеств глинистых минералов (главным образом, каолинита, в меньшей степени гидрослюда и монтмориллонита);

б) на распределение бора и бериллия в породе по фракциям большее влияние оказывает количество фракции, а не содержание в ней бора (рис.3). В/Ве отношения увеличиваются в тонких фракциях и наивысшего своего значения достигают в частицах, менее 0,001 мм.

Главными резервуарами бора и бериллия в породах коры выветривания таракских гранитов являются фракции 0,05-0,01, 0,01-0,001 и <0,001, в которых сосредоточено более половины всего бора пород и около 50% бериллия. Нарастание количеств бора с уменьшением размера гранулометрических фракций идет энергичнее в сравнении с ростом содержания бериллия. В гранулометрических классах наблюдается отчетливая прямая связь содержания бора с величиной удельной поверхности зерен, слагающих эти классы (рис.3а). Для бериллия эта зависимость проявлена менее четко.

Таблица 2

Минеральный состав гранулометрических фракций пород коры выветривания
гаракских гранитов и содержание в них бора и бериллия

Фракция	Количество фракции, %	Содержание в породе, г/т		Минеральный состав	Содержание во фракции, г/т		Количество в породе за счет фракции, вес%		Обнаружено относительно валового содержания, %		В/Ве
		В	Ве		В	Ве	В	Ве	В	Ве	
Зона каолинизированных пород											
>2 мм	27,85	II,4	2,0	Кв(55), III(38), Би(7), К+Г(зн)	4,65	0,93	II,36	12,95	89,95	93,27	5,0
2-1	II,08			Кв(60), III(35), Би(5), К+Г(зн)	5,31	0,96	5,16	5,32			5,5
1-0,5	5,74			Кв(54), III(35), Би(10), К+Г(1)	5,98	1,30	3,01	3,73			4,6
0,5-0,25	6,3			Кв(30), III(32), Би(33), К+Г(5)	7,06	2,20	3,90	6,93			3,2
0,25-0,1	7,46			Кв(15), III(20), Би(55), К+Г(10)	9,67	2,58	6,33	9,62			3,7
0,1-0,05	4,62			Кв+III(30), Би(50), К+Г(20)	9,70	2,37	3,93	5,47			4,1
0,05-0,01	16,17			Кв+III(20), Би(30), К+Г(50)	14,63	2,54	20,75	20,54			5,8
0,01-0,001	17,20			К(90), Г+М(10), Кв+III+Би(сл)	18,65	2,83	28,14	24,34			6,6
<0,001	3,58				23,48	2,44	7,37	4,37			9,6
Продукты перерождения											
>2 мм	8,55	54,0	2,7	Кв(60), III(25), Г(15)	9,0	1,40	1,42	4,44	87,24	91,85	6,4
2-1	II,30			Кв(25), III(5), Г+К(70)	31,0	2,70	6,50	11,78			11,5
1-0,5	8,35			Кв(15), III(5), Г+К(80)	40,0	1,80	6,18	5,56			22,2
0,5-0,25	II,2			Кв(10), III(зн), К+Г(90), Р(зн)	43,0	2,40	8,92	10,0			17,9
0,25-0,1	7,1			Кв(5), III(зн), К+Г(90) Р+Г+Би+Му(зн)	45,0	2,90	5,92	7,78			15,5
0,1-0,05	3,11			Г(80), К+Г(20), Би+Му+Кв+ III(зн)	52,0	2,80	3,00	3,33			18,6
0,05-0,01	12,71			К(90), Г(10), Г+Кв+III+Би(зн)	53,0	2,60	12,46	12,22			20,4
0,01-0,001	18,06			К(80), Г(20), М+Х(зн)	54,0	2,80	18,05	18,89			19,3
<0,001					68,0	2,5	24,79	18,15			27,2

Примечание. Кв - кварц, III - полевые шпаты, Би - биотит, К - каолинит, Г - гидрослюда, ГЮ - гидроксиды железа, Р - рудный, М - монтмориллонит, Х - хлорит.

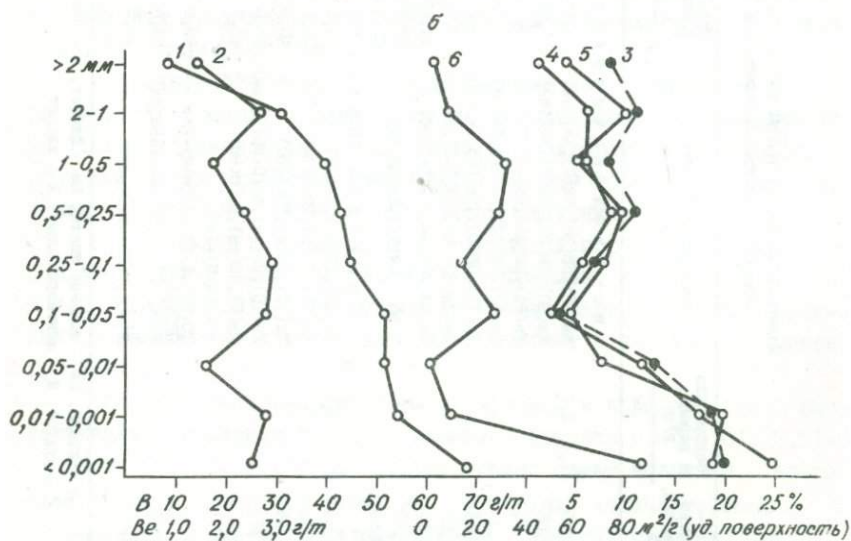
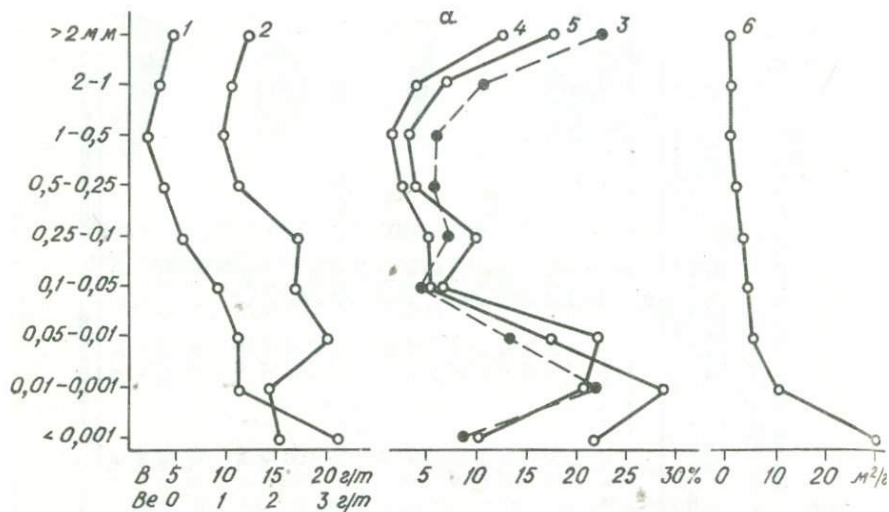


Рис.3. Распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях пород коры выветривания таракских гранитов
 1—содержание бора; 2—содержание бериллия; 3—количество фракции;
 4—содержание бора в породе за счет фракции; 5—содержание бериллия в породе за счет фракции; 6—удельная поверхность

Аналогичное распределение элементов по фракциям и связь их содержаний с удельной поверхностью частиц устанавливается и для перетолженных продуктов коры выветривания района (рис.3б). При отмучивании тонких гранулометрических фракций в водной среде породы теряют 10–15% бора и 1–8% бериллия. Это скорее всего свидетельствует в пользу нахождения части элементов в сорбированном состоянии и десорбции ее в процессе отмучивания (табл.2).

В районе г. Уяра исследована неоген-четвертичная кора выветривания, образованная на гранитах протерозойского возраста и представленная продуктами начальных стадий гипергенного преобразования – дресвяниками. Исходными породами служат крупнозернистые лейкократовые и мелкозернистые биотит-роговособманковые граниты. Мелкозернистая разность слагает основную часть массива и состоит из плагиоклаза (50%), кварца (25%), биотита и роговой обманки (23%), а также сфена и магнетита (не более 2%). В самых неизменных породах плагиоклаз значительно серицитизирован в центральных частях зерен, темнокрасные минералы почти не изменены, лишь роговая обманка слегка хлоритизирована. Среднее содержание бора и бериллия в мелкозернистых гранитах составляет 8 и 0,9 г/т соответственно. Химический состав гранитов приведен в табл.3.

Выветривание приводит к почти полному замещению плагиоклазов гидрослюдисто-каолинитовым агрегатом, а роговой обманки – хлоритом и монтмориллонитом. Биотит осветляется. Особенностью изменения гранитов является весьма незначительный вынос большинства породообразующих элементов в зоне дезинтеграции. Содержание же таких активных мигрантов, как Ca и Mg, увеличивается в 3–4 раза (табл.3). Бор практически не выносится ($K=0,94$), а бериллий слегка накапливается ($K=1,17$). Ряд подвижности элементов при выветривании мелкозернистых гранитов выглядит не совсем обычно:

вносятся: $K > Si > B$
 0,49 0,7 0,94⁹

накапливаются: $Mg > Ti > Ca > Fe > Mn > Al > Be$
 4,77 4,1 3,57 3,18 1,18 1,18 1,17

Крупнозернистые граниты образуют серию даек и тел неправильной формы в мелкозернистых гранитах, т.е. по времени являются более молодыми. Сложны они кварцем (45%), калиевым поле-

Таблица 3

Распределение главных породообразующих элементов, бора и бериллия в коре выветривания гранитов района г.Уяра

п	d	рН	В	Ве	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SIO ₂	
																Al ₂ O ₃	Ве
Мелкозернистые граниты																	
2	2,53	7,3	8,0 0,0202	0,87 0,0023	72,5 1834,0	13,82 350,0	2,19 55,0	1,23 31,0	0,83 21,0	0,51 13,0	0,08 2,0	0,22 5,6	1,32 33,0	3,4 86,0	4,98 126,0	5,24	8,8
Зона дресвяников																	
5	2,28	6,6	8,2 0,019 0,94	1,2 0,0027 1,17	56,2 1280,0	18,1 413,0	7,68 175,0	1,43 32,0	0,69 139,0	2,71 62,0	0,16 3,6	1,01 23,0	5,16 118,0	3,95 90,0	2,73 62,0	3,09	7,04
Крупнозернистые граниты																	
4	2,60	7,02	6,7 0,017	1,3 0,0034	71,6 1862,0	15,8 411,0	1,64 42,6	0,86 22,0	0,69 18,0	0,32 8,3	0,11 2,9	0,24 6,2	1,0 26,0	3,93 102,0	4,99 130,0	4,5	5,0
Зона дресвяников																	
4	2,47	7,46	9,0 0,022 1,29	0,9 0,0022 0,65	69,7 1721,0	14,95 369,0	1,79 44,0	0,93 23,0	0,76 19,0	0,86 21,0	0,08 2,0	0,34 8,3	1,99 49,0	3,37 83,0	3,5 86,0	4,7	10
Гидротермальные глины																	
3	1,87	5,8	6,6 0,012	0,1 0,0002	49,0 915,0	14,5 270,0	5,93 110,0	5,21 96,0	0,15 9,0	2,67 50,0	0,96 18,0	0,69 15,0	1,98 37,0	0,36 7,0	1,05 20,0	3,4	60

Примечание. Первая строка указывает содержание элемента в вес %, В и Ве в г/т; вторая строка - абсолютные содержания на 1 см³ породы (мг/см³); третья строка - коэффициент концентрации (К) элемента относительно его содержания в исходной породе.

вым шпатом (35%) и плагиоклазом (20%). Редкими зернами присутствуют биотит и магнетит. Плагиоклаз незначительно серицитизирован, все остальные минералы сохраняют свой первоначальный вид. По химическому составу крупнозернистые граниты весьма близки своему мелкозернистому аналогу (см. табл.3). Среднее содержание бора в них составляет 6,7 г/т, бериллия - 1,3 г/т.

Выветрелые породы полностью сохраняют текстурные особенности гранитов. Плагиоклаз в них почти полностью замещается гидрослюдисто-каолинитовым агрегатом, калиевый полевой шпат замутняется. В тонких фракциях пород коры выветривания данного участка доминирует каолинит при резко подчиненном количестве гидрослюда и следовых содержаниях монтмориллонита. Выветривание крупнозернистых гранитов приводит к незначительному накоплению бора ($K = 1,29$) и выносу бериллия ($K = 0,65$). Распределение породообразующих элементов, как и в случае мелкозернистых гранитов, не совсем обычно:

выносятся	$Be > K > Mn > Na > Al > Si$					
	0,65	0,66	0,69	0,81	0,90	0,92 ²
накапливаются	$Mg > Ca > Ti > B > Fe(об)$					
	2,5	1,88	1,34	1,29	1,03	

Такое специфическое поведение элементов в коре выветривания гранитов района не может быть удовлетворительно объяснено одними лишь поверхностными экзогенными процессами. Скорее всего особенности эти обусловлены гидротермальной подготовкой пород, предшествовавшей корообразованию на данном участке, доказательством чему служит широкое распространение линейных кор в миниатюре. Существенное различие минерального и гранулометрического состава глин наряду с формой залегания несомненно свидетельствует о сложном гидротермально-экзогенном их генезисе. Одна из таких микролинейных кор выветривания представлена на рис.4. Сложена она цветными глинами, образующими субвертикальную зону, мощностью от 2-3 см до 0,5 м. Внутри зоны визуально, благодаря различной окраске глин легко выделяются три подзоны: I) Подзона темно-сиреневых глин, сложенных каолинитом, монтмориллонитом и гидрокислами железа. Во фракции менее 0,001 мм рентгеноструктурным анализом устанавливается только каолинит и монтмориллонит. Эти глины содержат 5 г/т бора и следовые количества берил-

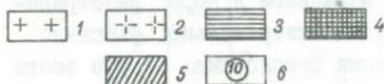
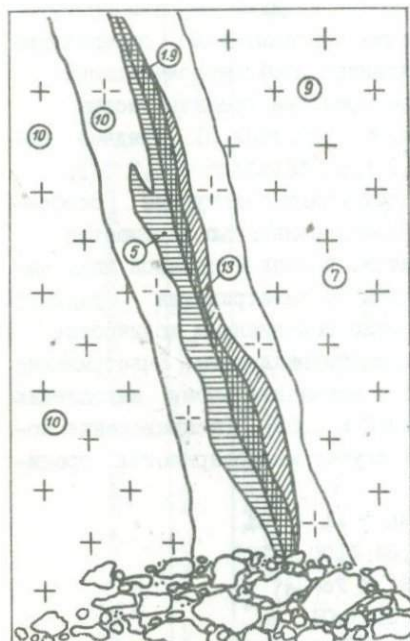


Рис. 4. Схематическая зарисовка зоны глин гидротермально-экзогенного происхождения в р-не г.Уяра.

1 — мелкозернистые граниты; 2 — существенно каолинизированные граниты; 3 — глины сиреневые; 4 — глины желтовато-зеленые; 5 — глины охристые; 6 — содержания бора (г/т)

вами характеризуется класс $<0,001$ мм, содержание бериллия очень низко и повышается в более тонких фракциях (см. табл.4). Между

лия. 2) Подзона желтовато-серых глин, представленных каолинитом, гидрослюдай, гидроокислами железа и марганца, с незначительной примесью биотита. Тонкие гранулометрические классы этих глин ($<0,01$ мм) состоят из каолинита и гидрослюда. Содержание бора и бериллия в породах составляет 12 и 0,8 г/т соответственно. 3) Подзона глин охристого цвета, содержащих значительное количество марганцовистых стяжений. Состав глин каолинит-монтмориллонит-гидрослюдистый с небольшим количеством гидроокислов Fe, полевых шпатов и биотита. Бор в них обнаружен в количестве 13 г/т, бериллий — 0,3 г/т.

В грубых фракциях всех глин присутствует от 20 до 60% зерен кварца, чаще всего корродированных.

Распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях глинистых пород гидротермально-экзогенного происхождения имеет свой специфический характер. Во всех трех случаях содержание бора равномерно понижается с уменьшением размерности фракции и самыми низкими его количествами

Таблица 4

Минеральный состав граукометрических фракций пород коры выветривания гранитов р-на г.Улья
и содержание в них бора и бериллия

Фракции	Колл- чество фракции %	Содержание в породе, г/т		Минеральный состав	Содержание во фракции, г/т		Количество в породе на счет фракции, %		Обнаружено относитель- но валового содержания, %		В/Ве
		В	Ве		В	Во	В	Ве	В	Ве	
Структурная эльвия											
>2 мм	0,15	16,0	0,5	Kв(80), Бм(20)	-	0,42	-	0,12	68,5	83,2	-
2-1	2,10			Kв(80), Бм(10), III(10)	11,0	0,36	1,44	4,52			30,5
1-0,5	2,70			Kв(70), Бм(10), III(20)	16,0	0,38	3,75	4,40			42,1
0,5-0,25	2,75			Kв(30), Бм(28), III(30), Г(ан)	16,0	0,48	26,85	21,20			31,2
0,25-0,1	38,60			Kв(30), Бм(40), III(30), Г(ан)	9,2	0,39	22,18	31,20			23,6
0,1-0,05	14,33			Kв(30), Бм(39), III(30), К+Г(1)	7,4	0,45	6,62	12,80			15,1
0,05-0,01	9,23			Kв+III(60), Бм(19), К(20), Г(ан)	9,7	0,49	5,62	9,0			19,8
0,01-0,001	3,25			Б(80), Г(20), М(сх)	11,0	0,62	2,25	4,0			17,7
<0,001	0,54			К(80), Г(20), М(сх)	-	-	-	-			-
Глины гидротермально-эксогенного происхождения											
1) Ферроспеленные глины											
>2 мм	0,9	5,0	сх	Kв(60), К+М(40)	5,6	сх	1,0	-	99,4	-	-
2-1	5,0			Kв(50), К+М(50)	6,0	сх	6,0	-			-
1-0,5	10,6			Kв(10), К+М(90)	4,6	сх	9,8	-			-
0,5-0,25	16,55			Kв(ан), К+М(100)	4,7	сх	15,6	-			-
0,25-0,1	17,75			К(40), М(60), Г(сх), Кв(сх)	4,3	сх	15,2	-			-
0,1-0,05	14,5			К(30), М(70), Г(сх)+Кв+Г(сх)	4,0	сх	11,8	-			-
0,05-0,01	23,2			К(20), М(80), Г(сх)+Кв+Г(сх)	4,3	сх	21,6	-			-
0,01-0,001	23,52			М(99), К+Г(сх)+Кв(сх)	3,2	сх	15,0	-			-
<0,001	5,98			М(100), Г(сх)+Кв(сх)	3,0	сх	3,6	-			-
2) Беловато-серые глины											
>2 мм	2,2	1,9	сх	Мн(60), Кв(10), К(20), Г(10)	2,0	сх	2,32	-	82,5	-	-
2-1	2,9			Мн(15), Кв(5), К+Г(5), Г(20)	1,3	сх	4,2	-			-
1-0,5	8,5			К+М(80), Г(10), Г(8), Мн(2), Кв+Бм(ан)	1,6	сх	6,9	-			-
0,5-0,25	16,7			К+М(80), Г(15), Г(5), Бм(ан)	1,9	сх	16,33	-			-
0,25-0,1	16,6			М(50), Г(5), К(10), Г(сх)+Бм(ан)	1,9	сх	16,7	-			-
0,1-0,05	7,9			М(85), Г(сх)+Бм(15)	1,6	сх	6,2	-			-
0,05-0,01	20,2			М(30), Г+Г(сх)+Бм(10)	1,4	сх	15,3	-			-
0,01-0,001	18,25			М(99), Г+Г(1)	1,2	сх	11,45	-			-
<0,001	4,25			М(99), Г(1)	1,2	сх	2,56	-			-
3) Охристые глины											
>2 мм	15,3	13,0	0,3	Мн(70), Кв(10), III(15), Г(5)	10	0,2	11,76	10,3	76,5	92,3	50,0
2-1	9,0			Мн(40), Кв(10), III(ан), Г(30)	12	0,2	8,3	7,7			60,0
1-0,5	8,5			М+Г(20)							
				Мн(5), Кв(5), М+Г(70), Г(20), III, Бм(3Н)	13	0,2	8,53	5,7			65,0
0,5-0,25	15,3			Мн(1) М+Г(80), Г(20), Бм+Кв(ан)	13	0,2	15,3	10,3			65,0
0,25-0,1	16,9			Мн(10), Кв(5), Г(8), Бм(2), Кв(ан)	12	0,2	15,53	11,3			60,0
0,1-0,05	9,54			М+Г(95), Г(сх)+Бм(5), Кв(ан)	11	0,2	8,07	6,3			55,0
0,05-0,01	13,94			М+Г(95), Г(сх)+Бм+Г(5)	10	0,42	10,69	19,7			23,8
0,01-0,001	8,86			М+Г(100), Г(сх)+Бм(ан)	9,6	0,58	6,53	17,0			16,6
0,001	2,76			М+Г(100)	8,8	0,45	1,84	4,0			19,6

Примечание: Кв - кварц; Бм - биотит; III - полевой шпат; К - каолинит; М - монтмориллонит; Г - гидрослюда; Г(сх) - гидроксиды
и гидроксиды магнезия; Р - рудный.

содержаниями бора и бериллия во фракциях и удельной поверхностью частиц, слагающих эти фракции, не наблюдается никакой связи (рис.5).

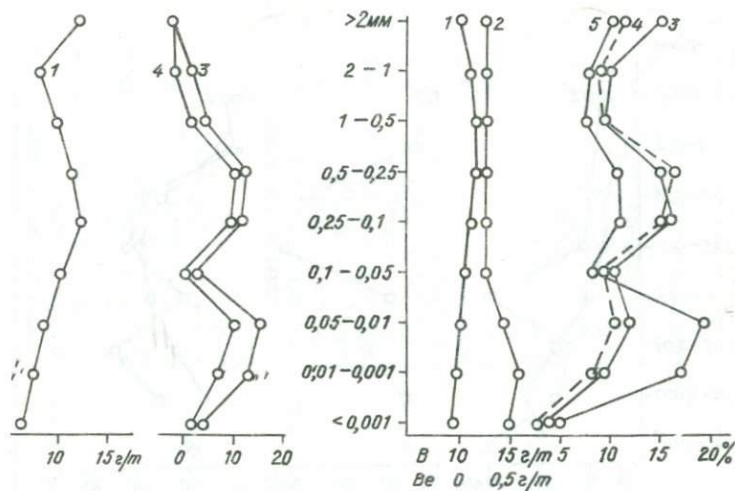
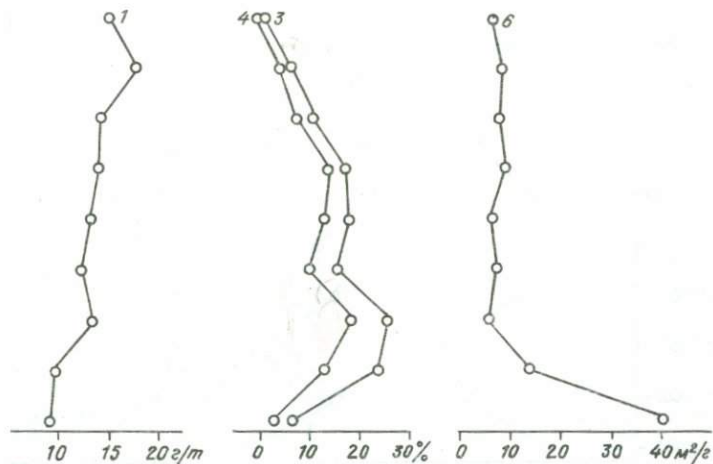
Переотложенные продукты кор выветривания района представлены, главным образом, серыми и светло-серыми глинами и нелигифицированными песчаниками мезо-кайнозойского возраста [11]. Содержание бора в глинистых породах достигает иногда 60 г/т. Глины, содержащие большое количество песчаного материала, существенно обеднены бором (17--22 г/т). Бериллий и в тех, и в других породах обнаружен в количестве 1 г/т.

Анализ гранулометрического состава переотложенных пород показывает, что бор и бериллий распределены по фракциям неравномерно (рис.6). В плохо сортированных породах фракция $<0,001$ мм характеризуется самым высоким содержанием бора, а в породах, содержащих значительные количества песчаного материала, она обеднена бором в сравнении с более крупными классами (рис.6а и б). Однако в обоих случаях фракция $<0,001$ мм содержит очень близкие количества бора (31 и 36 г/т), несмотря на то, что глинистые породы в среднем в 3--3,5 раза богаче бором в сравнении с породами песчано-глинистого состава. Содержания бериллия возрастают от крупных к более мелким фракциям, достигая максимума в классе 0,01--0,001 мм.

Распределение бора во фракциях хорошо сортированных пород не обнаруживает связи с удельной поверхностью частиц (рис.6а). Это, по-видимому, служит свидетельством отсутствия процессов сорбции бора при переотложении продуктов кор выветривания в данном районе.

Увеличение содержания бора в более крупных фракциях (фр. 2--1 мм в пробе 75, или фр. 0,1--0,05 мм пробы 76) скорее всего объяснано присутствием редких зерен турмалина, которые отмечались нами при изучении минерального состава пород под бинокуляром (табл.5).

Кора выветривания р-на г. Артемовска и пос. Чибжек (Вост.Саян) характеризуется, в основном, линейным типом развития. В меньшей степени распространены площадные коры. Возраст коры неоген-четвертичный. По данным А.Я.Булыникова [2] и других исследователей, мощ-



аспределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях глин гидротермально-экзогенного происхождения

1—содержание бора во фракциях; 2—содержание бериллия во фракциях; 3—содержание бора в породе за счет фракции; 4—содержание бериллия в породе за счет фракции; 5—удельная поверхность

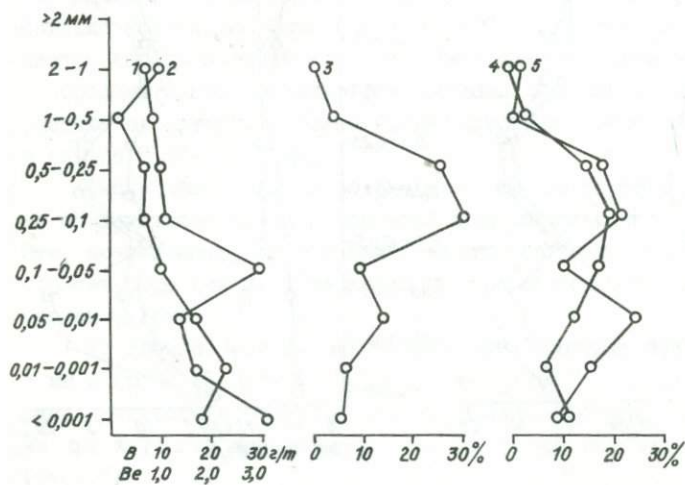
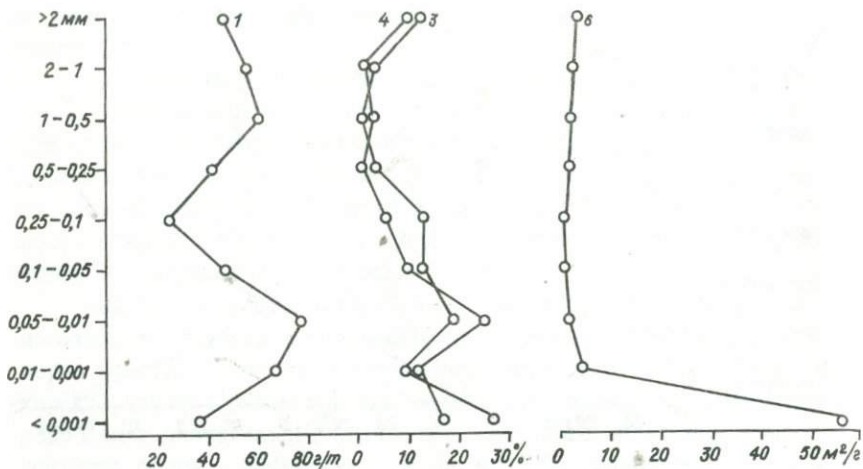


Рис.6. Распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях переотложенных пород р-на г.Уяра
 1—содержание бора; 2—содержание бериллия; 3—количество фракции; 4—количество бора в породе за счет фракции; 5—количество бериллия в породе за счет фракции; 6—удельная поверхность

Минеральный состав гранулометрических фракций переотложившихся пород района г.Уяра
и содержание в них бора и бериллия

Т а б л и ц а 5

Фракция	Количество фракции, %	Содержание в породе, г/т		Минеральный состав	Содержание во фракции, г/т		Количество в породе за счет фракции, %		Обнаружено относительно валового содержания, %		В/Ве
		В	Ве		В	Ве	В	Ве	В	Ве	
Хорошо сортированные переотложившиеся породы (пр.73)											
>2 мм	12,6	68,0 н/опр		Оп+Хц+Кв(70), К(30)	47,0	н/опр	10,73	-	84,8	-	-
2-1	2,7			Оп+Хц(50), К(50), Кв(зн)	55,0	-	2,57	-	-	-	-
1-0,5	1,7			Оп+Хц(30), К(70), Кв(зн)	60,0	-	1,75	-	-	-	-
0,5-0,25	2,3			К(80), Оп(20), Хц+Р(зн)	42,0	-	1,66	-	-	-	-
0,25-0,1	13,25			К(50), Кв+Оп(50), Р(зн)	24,0	-	5,48	-	-	-	-
0,1-0,05	12,35			К(50), Кв(50), Би+Р+ГО(зн)	47,0	-	10,0	-	-	-	-
0,05-0,01	19,0			К+Г(90), Кв(10), Р+ГО(зн)	77,0	-	25,22	-	-	-	-
0,01-0,001	9,5			К+Г(100), Кв+Р(зн)	67,0	-	10,97	-	-	-	-
<0,001	26,6			К+Г(100)	37,0	-	16,96	-	-	-	-
Плохо сортированные переотложившиеся породы (пр.75)											
>2 мм	5,2	22,0 н/опр		Кв+Хц+Оп(100), ГО+К(зн)	15,0	-	3,54	-	68,4	-	-
2-1 мм	6,0			Кв(90), Оп(2), ГО(5), К(3)	54,0	-	14,72	-	-	-	-
1-0,5	16,9			Кв(90), Оп(1), ГО(3), К(6)	12,0	-	9,22	-	-	-	-
0,5-0,25	43,2			Кв(95), К(5), ГО+Р(зн)	9,4	-	18,45	-	-	-	-
0,25-0,1	8,9			Кв(50), К(46), ГО+Му+Р(4)	14,0	-	5,66	-	-	-	-
0,1-0,05	3,65			К(60), I(30), Му+Кв+Р(10)	17,0	-	2,82	-	-	-	-
0,05-0,01	5,66			К(90), Г(5), Му(5), Р(зн)	21,0	-	5,4	-	-	-	-
0,01-0,001	4,8			К+Г(100)	12,0	-	2,61	-	-	-	-
<0,001	5,7			К+Г(100)	23,0	-	5,95	-	-	-	-
пр.76											
2-1 мм	0,6	17,0 I,0		Кв(97), К(3), Р(зн)	8,0	0,9	0,29	0,5	85,5	100,7	8,9
1-0,5	4,8			Кв(95), К(5), Р(зн)	8,8	0,1	2,47	0,5	-	-	88,0
0,5-0,25	26,2			Кв(95), К(3), Р(2)	10,0	0,7	15,41	18,0	-	-	14,3
0,25-0,1	30,9			Кв(95), К(5), Р(зн)	11,0	0,7	20,0	21,0	-	-	15,7
0,1-0,05	10,05			Кв(5), К(80), Му+Би(15)	30,0	1,0	17,76	10,0	-	-	30,0
0,05-0,01	14,55			К(98), Г(2), Му+Би+Кв(зн)	14,0	1,7	12,0	24,7	-	-	8,2
0,01-0,001	6,95			К+Г(100), Му+Би(зн)	17,0	2,3	6,94	16,0	-	-	7,4
<0,001	5,85			К+Г(100)	31,0	1,8	10,65	10,0	-	-	17,2

Примечание: Оп - опал; Хц - халцедон; Кв - кварц; К - каолинит; Р - рудный; ГО - гидроксиды Fe; Му - мусковит; Би - биотит; Г - гидрослюда; цифра в скобках означает содержание минерала в %; зн - знаки.

ность выветрелых образований колеблется в широких пределах от 0,5 до 100–120 м. Представлена она, главным образом, продуктами начальных стадий изменения – серыми и светлосерыми дресвяниками с полностью сохранившейся структурой исходных пород, но имеющих меньшую плотность.

Выветриванию подверглись граниты, плагиограниты и гранодиориты Ольховско-Чибикевского интрузивного комплекса (См-0). Главными минералами являются кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз и темноцветные: биотит, роговая обманка и, в меньшей степени, пироксен. Из примесей характерны магнетит, апатит, сфен.

В свежих разностях пород плагиоклаз альбитизирован и серицитизирован (иногда весьма значительно), изредка эпидотизирован. Калиевый полевой шпат замутнен, пироксен и роговая обманка в различной степени хлоритизированы. В районе среди интрузивных образований широко развиты зоны лиственитизации и беритизации. Среди неизмененных пород по керну скважин нередко наблюдаются участки повышенной трещиноватости, к которым обычно приурочена сульфидная (главным образом пиритовая) минерализация. В одной из скважин, пробуренных в гранодиоритах, на глубине свыше 50 м, среди совершенно неизмененных пород встречена зона выветрелых образований, все минеральные компоненты которых, за исключением кварца, превращены в каолинит.

В естественных обнажениях района часто можно наблюдать выходы дресвяников, мощность которых достигает 30 и более метров. В вертикальном разрезе этих дресвяников не обнаруживается изменения степени выветривания пород.

Начальные стадии выветривания пород вызывают почти полную хлоритизацию темноцветных минералов и замещение плагиоклазов гидрослюдасто-каолинитовым агрегатом. Биотит осветляется и незначительно замещается гидробиотитом. Калиевый полевой шпат интенсивно замутняется, испытывая начало каолинизации. В химическом составе пород происходят значительные изменения (табл.6). При этом бор выносится из зоны дезинтеграции плагиогранитов ($K=0,84$) и кварцевых диоритов ($K=0,68$), а в дресвяниках гранитов слегка накапливается ($K=1,06$). Аналогично ведет себя бериллий ($K=0,63, 0,75$ и $1,44$ соответственно).

Т а б л и ц а 6

Распределение главных породообразующих элементов, бора и бериллия
в коре выветривания пород Ольховско-Чибяжского интрузивного комплекса

n	d	pH	B	Be	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{B}{Be}$
Г р а н и т ы																	
3	2,65	7,2	12,0 0,032	0,7 0,0016	71,0 1882,0	14,3 379,0	4,09 108,0	2,83 75,0	0,95 25,0	0,63 17,0	0,11 2,9	0,23 6,1	2,6 69,0	3,83 96,0	2,33 62,0	5,0	20
З о н а д р е с в я н и к о в																	
8	2,25	6,9	15,0 0,034 1,06	1,0 0,0023 1,44	71,5 1609,0 0,85	15,6 351,0 0,93	3,55 80,0 0,74	1,28 29,0	2,13 48,0	0,60 14,0	0,11 2,5	0,27 6,0	1,45 33,0	2,91 65,0	2,11 47,0	4,6	14,8
П л а г и о г р а н и т ы																	
2	2,69	8,3	14,0 0,038	0,6 0,0016	67,5 1816,0	16,6 448,0	4,40 118,0	3,33 89,0	0,70 19,0	0,90 24,0	0,11 3,0	0,47 126,0	3,90 105,0	4,08 110,0	1,34 36,0	4,0	23,7
З о н а д р е с в я н и к о в																	
5	2,49	7,3	13,0 0,032 0,84	0,42 0,001 0,63	69,5 1730,0 0,95	15,5 387,0 0,86	4,12 103,0 0,87	2,41 60,0 0,67	1,45 36,0 1,89	0,85 21,0 0,88	0,10 2,4 0,86	0,47 12,0 0,95	3,4 85,0 0,81	3,64 91,0 0,83	1,57 39,0 1,08	4,5	32,0
К в а р ц е в ы е д и о р и т ы																	
3	2,85	8,1	22,0 0,063	0,27 0,0008	51,5 1468,0	20,2 576,0	9,97 284,0	6,30 180,0	2,98 85,0	4,03 114,0	0,20 5,7	0,93 26,0	10,1 287,0	2,46 70,0	0,49 14,0	2,5	78,7
З о н а д р е с в я н и к о в																	
5	2,15	6,8	20,0 0,043 0,68	0,3 0,0006 0,75	52,0 1118,0 0,76	19,4 417,0 0,72	9,96 214,0 0,75	4,41 95,0	5,07 109,0	3,49 75,0	0,22 4,7	0,75 16,0	7,0 150,0	2,10 45,0	0,61 13,0	2,7	71,7
З о н а к а о л и н и з и р о в а н н ы х п о р о д																	
4	1,97	6,7	16,0 0,032 0,51	0,36 0,0007 0,88	53,3 1050,0 0,72	17,4 343,0 0,60	10,0 197,0 0,69	3,32 65,0	6,32 124,0	3,67 72,0	0,20 3,9	0,78 15,0	6,27 123,0	1,90 37,0	0,53 10,4	3,0	45,7

Примечание. Первая строка - содержание элементов в вес.%, B и Be в г/т; вторая строка - содержание элементов в мг/см³; третья строка - коэффициент устойчивости.

Ряды подвижности элементов в зоне дезинтеграции пород Ольховско-Чибижского интрузивного комплекса выглядят следующим образом:

1. Крупнозернистые граниты:

вносятся $Ca > Na > Fe > K > Mg > Si > Mn > Al$
 0,48 0,68 0,74 0,76 0,82 0,85 0,86 0,93
 накапливаются $Be > B$ Для $Ti \ K=I$
 1,44 1,06

2. Плагииграниты:

вносятся $Be > Ca > Na > B > Mn, Al > Fe > Mg > Ti > Si$
 0,63 0,81 0,83 0,84 0,86 0,87 0,88 0,95 0,95
 накапливается K
 1,08

3. Кварцевые диориты:

вносятся $Ca > Ti > Na > Mg > B > Al > Be > Si > Mn > K$
 0,52 0,62 0,64 0,66 0,68 0,72 0,75 0,76 0,82 0,93
 накапливается Fe
 2,58

Породы более глубокой степени выветривания (каолинизированные дресвяники) встречены нами только на кварцевых диоритах. Здесь происходит полное замещение пироксена и роговой обманки хлоритом и монтмориллонитом, биотита — гидробиотитом, хлоритом и монтмориллонитом, плагноклаза и калиевого полевого шпата — каолинитом и гидрослюдай. Структура исходных пород полностью сохраняется и наблюдается интенсивное отбеливание выветрелых образований.

Из зоны каолинизированных пород коры выветривания кварцевых диоритов выносятся:

$Ca > B > Na > Ti > Al > Mg > Mn > Si > K > Be$
 0,43 0,51 0,58 0,58 0,60 0,63 0,68 0,72 0,74 0,88
 накапливается Fe
 2,37

В гранулометрических фракциях выветрелых пород бор и бериллий распределены равномерно и лишь во фракции <0,001 мм наблюдается резкое увеличение содержаний бора (до 40 г/т) в сравнении с более крупными классами (16–18 г/т). Главными фракциями-носителями основных количеств бора в выветрелых породах яв-

ляются средне- и мелкопесчаные составляющие (0,5–0,05 мм), в которых сосредоточено около половины всего количества бора и бериллия (47 и 58% соответственно). Процентное содержание бора и бериллия в породе за счет той или иной фракции, как и в корях выветривания других районов, в большей степени определяется количеством этой фракции, в меньшей степени – содержанием элемента (табл.7 и рис.7а).

Удельная поверхность обломков, слагающих гранулометрические классы, постепенно увеличивается к алеврито-глинистым составляющим, резко возрастая во фракциях 0,01–0,001 и <0,001 мм. График распределения бора напоминает кривую, характеризующую удельную поверхность частиц, а среднее содержание бериллия не коррелируется с удельной поверхностью (рис.7а).

В районе широко распространены глинистые образования прожилкового характера, приуроченные к дайкам и тектоническим трещинам и аналогичные гидротермально-экзогенным глинам района г.Уяра. В сравнении с породами, в которых они залегают, глины несколько обогащены бериллием и обеднены бором. Рентгеновским анализом в них устанавливается каолинит, монтмориллонит и гидрослюда. Грубые фракции глин чаще всего содержат корродированные зерна кварца.

Глины, образованные на контакте дайки аплитов с крупнозернистыми гранитами, содержат около 25% частиц размера <0,001 мм. Вся эта фракция на 100% представлена гидрослюдой диоктаэдрического типа без примесей каких-либо других минералов. Содержание бора в мономинеральной гидрослуде является самым низким из всех гранулометрических фракций глин гидротермально-экзогенного генезиса (табл.7), Бериллий в них также обнаружен в небольших количествах.

Распределение бора и бериллия в более грубых фракциях неравномерно и совершенно не увязывается с изменениями удельной поверхности частиц от одного класса к другому (рис.7б).

К о р а в ы в е т р и в а н и я о с н о в н ы х п о р о д изучена нами в карьере, расположенном в 1,5 км от южной окраины г.Ачинска, где вскрыты темно-серые плотные диабазовые порфириды. При микроскопических исследованиях они обнаруживают типичную диабазовую структуру основной массы. В порфировых вы-

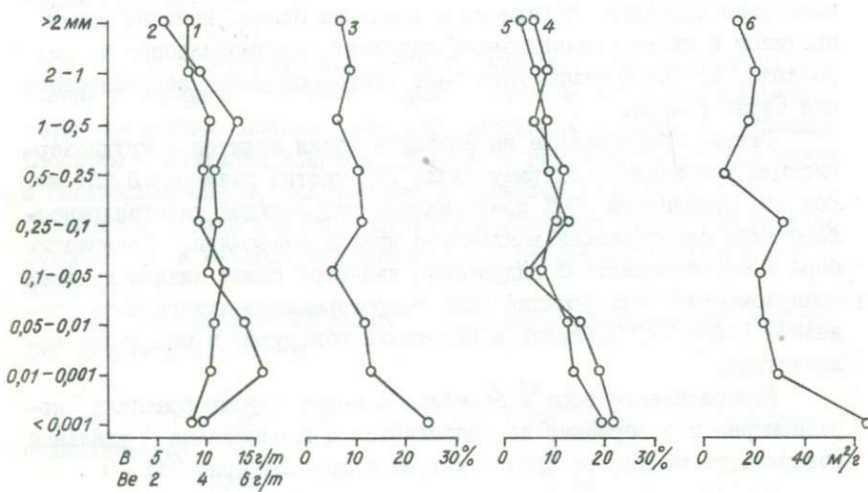
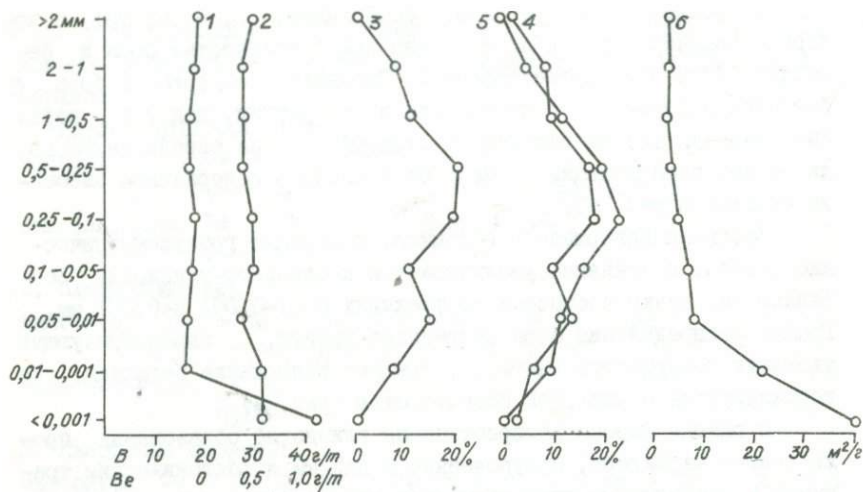


Рис.7. Распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях пород коры выветривания р-на г.Артемовска и пос. Чибижек
 1-содержание бора; 2-содержание бериллия; 3-количество фракции; 4-количество бора и 5-количество бериллия в породе за счет фракции; 6-удельная поверхность

Минеральный состав гранулометрических фракций выветрелых и гидротермально-экзогенных глинистых образований в коре выветривания пород Ольховско-Чибяжского интрузивного комплекса

Фракция	Количество фракции, %	Содержание в породе, г/т		Минеральный состав	Содержание во фракции, г/т		Количество в породе за счет фракции, %		Обнаружено относительно валового содержания, %		В/Ве
		В	Ве		В	Ве	В	Ве	В	Ве	
С т р у к т у р н ы й о л ь в и й г р а н о л и о р и т о в											
>2 мм	1,05	20,0	0,45	Шш+К(45), Би(45), РО(10), Кв(зн)	19,0	0,5	1,0	0,78	89,4	99,4	38,0
2-1	18,67			Шш+К(40), Би(50), РО+ГО(10), Кв(зн)	18,5	0,4	1,0	0,78			46,9
1-0,5	21,1			Шш+К(40), Би(50), РО+ГО(10)	17,0	0,4	10,33	11,29			43,6
0,5-0,25	21,47			Шш+К(50), Би(25), РО(25), Кв+Г(зн)М(зн)Г	17,0	0,4	17,94	17,93			43,6
0,25-0,1	20,47			Шш(15), Би(50), К(35), Кв+Г+РО(зн)М(зн)Г	17,0	0,4	16,93	24,38			37,7
0,1-0,05	11,69			Шш(10), Би(20), К+М(70), Кв+Г(зн)	17,0	0,4	10,23	12,75			30,0
0,05-0,01	15,59			М+К(75), Кв+Шш+Г(25), РО(зн)	16,5	0,4	13,25	12,75			30,0
0,01-0,001	8,28			К+Г+М(100), РО+Шш(зн)	16,5	0,4	6,83	1,95			27,7
<0,001	1,35			К+Г+М(100)	42,5	0,8	2,87	1,29			70,8
Г и л и н ы г и д р о т е р м а л ь н о - э к з о г е н н о г о п р о и с х о ж д е н и я, о б р . 137											
>2 мм	6,9	10,0	4,5	Шш+Г(60), Кв(40)	8,8	3,8	7,9	6,8	97,7	99,3	3,4
2-1	30,85			Шш+Г(85), Кв(15), Мн(2)	8,8	3,8	7,9	7,27			2,0
1-0,5	30,85			Шш+Г(85), Кв(15), Мн(2)	10,7	4,3	6,71	7,36			7,7
0,5-0,25	10,75			Шш+Г(85), Кв(10), Мн(5)	10,7	4,3	11,53	9,96			11,1
0,25-0,1	11,65			Г+Шш(90), Кв(5), Мн(5)	11,2	4,4	11,21	11,84			10,8
0,1-0,05	5,80			Г(90), Шш(5), Кв(1), Мн(4)	11,7	4,4	6,96	5,61			10,8
0,05-0,01	13,0			Г(95), Шш(5), Кв(1), Мн(1)	11,1	4,4	13,29	14,93			10,3
0,01-0,001	13,0			Г(99,5), Шш+Кв(сл)	10,7	4,4	13,93	18,48			10,7
<0,001	24,7			Г(100)	8,2	3,8	20,29	20,87			11,1
о б р . 144											
>2 мм	26,3	11,0	4,6	К(80), Г+М(20), Кв(зн)	13,1	5,0	31,27	28,5	99,09	101,3	2,6
2-1	29,35			К(80), Г+М(20), Кв(зн)	12,7	5,0	10,86	7,3			1,5
1-0,5	5,0			К(80), Г+М(20), Кв(зн)	10,6	5,0	4,86	6,0			1,9
0,5-0,25	6,45			К(85), Г+М(15), Кв+Мн(зн)	13,3	4,6	7,83	6,3			1,9
0,25-0,1	9,5			К(85), Г+М(15), Кв+Шш+Мн(зн)	10,9	4,6	9,48	11,59			1,9
0,1-0,05	7,6			К(85), Г+М(15), Шш(зн)	10,4	4,6	7,19	17,3			1,9
0,05-0,01	16,0			К(98), Г+М(10), Шш(2)	8,6	4,6	12,57	13,5			1,9
0,01-0,001	17,1			К+Г(80), Шш(20)	8,0	4,6	12,49	17,8			1,9
<0,001	2,7			К(90), Г+М(10)	11,1	4,4	2,7	1,9			1,3
о б р . 145											
>2 мм	26,4	11,0	2,0	Кв(50), Шш+Г+К(50)	9,4	1,7	22,45	22,5	100,45	94,5	5,5
2-1	12,1			Кв(50), Шш+Г+К(50)	9,9	1,3	10,89	7,85			6,6
1-0,5	9,9			Кв(40), Шш+Г+К(60)	10,0	1,8	9,05	8,9			5,5
0,5-0,25	10,3			Кв(30), Шш+Г+К(70)	9,9	1,8	9,27	10,8			4,7
0,25-0,1	10,0			К+Г+Шш(80), Кв(18), Р(зн)	11,0	1,8	10,0	9,0			6,1
0,1-0,05	4,8			К+Г+Шш(90), Кв(8), Р(зн)	13,1	1,8	5,76	6,0			2,8
0,05-0,01	7,5			К+Г+Шш(98), Кв+Р(2)	12,7	1,8	8,62	8,25			2,8
0,01-0,001	7,4			К+Г(98), Шш+Кв+Р(2)	14,8	1,6	9,99	9,6			7,7
<0,001	11,6			К+Г(95), Кв(5)	13,7	1,9	14,5	11,0			7,2

Примечание, Шш-полевой шпат; Би-биогит; Кв-кварц; РО-роговая обманка; Р-рудный; К-каолинит; Г-гидрослюда; ГО-гидроокислы Fe; Мн-гидроокислы марганца; зн-знаки; сл-следн. Цифры в скобках обозначают содержание минерала в %.

делениях основной плагиоклаз, пироксен и, в меньшей степени, биотит. Плагиоклаз чаще всего серицитизирован, пироксен хлоритизирован, биотит незначительно осветлен и хлоритизирован. Породы участками цеолитизированы и карбонатизированы. Среднее содержание бора в них составляет 14 г/т, бериллия - 0,54 г/т.

Выветрелые породы обнажаются в восточной стенке карьера в виде вертикальной зоны мощностью около 3 м. Происхождение ее скорее всего связано тектонической подготовкой пород, которая обусловила образование шаровых форм выветривания, возникающих при воздействии агентов выветривания "со всех сторон" [23]. Внешние зоны сферических образований обладают небольшой плотностью (2,2 г/см³), сложены монтмориллонит-хлорит-гетитовым материалом и содержат 20 г/т бора и 0,8 г/т бериллия. Внутренние участки полностью сохраняют структурные особенности диабазовых порфиритов и состоят из серпентина, хлорита и реликтовых минералов. Содержание бора - 24 г/т, бериллия - 0,6 г/т.

В породах начальных стадий выветривания (дезинтеграции) плагиоклаз замещается гидрослюдой и каолинитом, пироксен - монтмориллонитом и гетитом. По трещинам интенсивно развивается серпентин. Плотность пород уменьшается с 2,96 до 2,5 г/см³. Количество бора в них несколько увеличивается (K=1,32), а бериллия уменьшается (K=0,86). Поведение породообразующих элементов при выветривании диабазовых порфиритов в основном не противоречит закономерностям, установленным ранее [15]. В процессе начального выветривания выносятся: Mg > Ca > Si > Be > Mn > Al

0,49 0,57 0,85 0,86 0,97 0,98

накапливаются: K > Na, B > Ti Для Fe K=1.

3,5 1,32 1,25

Наиболее измененные породы представлены глинисто-охристыми рыхлыми образованиями, занимающими верхние части зоны и промежутки между сферическими остатками более свежих пород. Главными минералами их являются монтмориллонит, гидроокислы Fe и в меньшей степени Mn, а также каолинит. Из реликтовых минералов в небольших количествах присутствуют плагиоклаз и биотит. Плотность их 2 г/см³. Породы этой зоны теряют в сравнении с материнскими породами около 30% бора (K=0,71). Бериллий в них незначительно накапливается (K=1,13). В процессе интенсивного вы-

ветривания порфиритов выносятся:

Ca > Na > Mg > Mn > Al > B > Si > Fe > Ti
0,17 0,4 0,56 0,63 0,69 0,71 0,77 0,82 0,90

накапливаются: K > Be

2,75 1,13*

Взаимосвязи между содержанием бора и бериллия и распределением показателя pH в профиле выветривания диабазовых порфиритов не наблюдается (табл.8).

В различных карьерах, расположенных вокруг г.Ачинска, вскрываются переслаивающиеся песчано-глинистые отложения, материалом для которых служили коры выветривания [II,20].

В одном из карьеров, расположенных на восточной окраине г.Ачинска, вскрыты осадочные породы, в самом верху представленные средне- и мелкозернистыми песками с содержанием глинистого материала около 30%. Количество бора в этих породах составляет 18 г/т, бериллия - 0,5 г/т. Ниже залегает 10-15 - сантиметровый прослой серых каолиновых глин с небольшим (около 25%) содержанием песчаного материала и углистыми остатками. В них обнаружено 43 г/т бора и 2,4 г/т бериллия. Внизу эту зону сменяет временами выклинивающийся слой серых глин без видимых примесей песчаных или более грубых частиц. Концентрация бора в них достигает самого высокого значения (90 г/т), содержание бериллия составляет 1,3 г/т. Гораздо меньшими количествами бора и бериллия характеризуются нижележащие светлосерые высокопесчанистые глины (23 и 0,5 г/т соответственно). Таким образом, в данном разрезе устанавливается отчетливая связь содержания бора и бериллия с количеством глинистого материала в осадочных породах.

Обсуждение результатов

Все рассматриваемые в работе коры выветривания относятся к каолиновому типу и образованы главным образом на гранитах или близких к ним по составу интрузивных породах. Исключение составляет лишь профиль выветривания на диабазовых порфиритах р-на г. Ачинска.

Исходные породы не содержат собственных минералов бора и

Т а б л и ц а 8

Распределение главных породообразующих элементов, бора и бериллия
в коре выветривания диабазовых порфиритов р-на Ачинска

n	d	pH	B	Be	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂		B	
																Al ₂ O ₃	Be	Al ₂ O ₃	Be
И с х о д н ы е п о р о д ы																			
2	2,96	7,4	14,0	0,54	44,5	17,35	10,77	7,0	3,08	8,05	0,20	1,37	12,7	2,12	0,27	2,6	25,6		
			0,041	0,0016	1317,0	514,0	919,0	207,0	91,0	238,0	5,9	40,0	376,0	63,0	8,0				
З о н а д е з и н т е г р а ц и и																			
5	2,57	7,3	21,0	0,55	43,4	19,68	12,37	4,60	7,27	4,58	0,22	1,93	8,42	3,22	1,11	2,2	38,6		
			0,054	0,0014	1115,0	506,0	318,0	118,0	187,0	117,0	5,7	50,0	216,0	83,0	28,0				
			1,32	0,86	0,85	0,98	1,0	0,57	2,05	0,49	0,97	1,25	0,57	1,32	3,5				
З о н а г л и н и с т ы х п о р о д																			
3	2,08	6,9	14,0	0,86	48,66	17,03	12,56	0,10	12,45	3,15	0,18	1,72	3,10	1,21	1,08	2,8	16,1		
			0,029	0,0018	1012,0	354,0	261,0	2,1	259,0	65,0	3,7	36,0	64,0	25,0	22,0				
			0,71	1,13	0,77	0,69	0,82	0,01	2,85	0,56	0,63	0,90	0,17	0,40	2,75				

Примечание. Первая строка означает содержание элемента в вес.%; B и Be в г/т; вторая строка - абсолютные содержания на 1 см³ породы (мг/см³); третья строка - коэффициент концентрации (K) элемента относительно его содержания в исходной породе.

бериллия, поэтому речь идет только о рассеянном их нахождении в породообразующих минералах, главными из которых являются плагиоклазы, в которых чаще всего сосредоточено больше половины В и Ве пород [8,9] и др. . Из других минералов носителями бора и бериллия в этих породах являются роговые обманки, слюды, пироксены, эпидот. Так как подавляющая часть бора и бериллия в исходных породах исследованных профилей связана с полевыми шпатами, то для установления характера их поведения в процессе коррозирования основной интерес составляет изучение гипергенных преобразований полевых шпатов. Рентгеноструктурные исследования устанавливают, что псевдоморфные агрегаты, образованные по полевым шпатам, состоят в основном из каолинита, имеющего различную степень совершенства кристаллической структуры и содержащего те или иные количества примеси гидрослюд. В диабазовых порфиритах р-на г.Ачинска и диоритах Ольховско-Чибихевского интрузивного комплекса выветривание приводит к образованию по основным плагиоклазам и темнокветным минералам монтмориллонита с подчиненными содержаниями гидробиотита, гидромусковита, хлорита и гетита.

Как показали (n, α) - радиографические исследования выветрелых пород Салаира, Кокчетавской глыбы и Украинского щита [21], начальные стадии псевдоморфных превращений эндогенных минералов не приводят к интенсивному выносу из них бора. Аналогично ведет себя бериллий в процессах каолинизации пород [8].

Выветривание породообразующих минералов, по существующим представлениям, может происходить как переходом на короткое время в раствор всех ионов исходного минерала с последующим их осаждением и частичным выносом, так и перестройкой, в твердом состоянии части компонентов без перехода их в растворенную фазу [14]. Эти механизмы, являющиеся чрезвычайно важными для понимания геохимии редких элементов в процессе образования глинистых минералов, помогают объяснить отсутствие существенного выноса бора и бериллия из пород начальных стадий выветривания.

Опытами установлено, что растворы различного состава неодинаково воздействуют на изменение химического состава пород, подвергающихся гипергенным преобразованиям. Так, например, действие гумуса и уголекислоты на аллюмосиликаты вызывает предпоч-

тительный вынос кремнезема, а под влиянием серной и некоторых других кислот в раствор преимущественно переходит глинозем [II]. Следовательно, составы растворов, вызвавших выветривание, должны быть в какой-то степени отражены в значениях кремнево-глиноземного модуля ($K_1 = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$), впервые примененного Г. Гаррасовитцем [22] для характеристики степени измененности остаточных продуктов выветривания и являющегося прекрасным показателем разделения Al и Si в процессе корообразования.

На рис.8 приведено распределение бора, бериллия и значения K_1 в различных зонах кор выветривания Красноярского края. Графики содержаний бора и изменения величины $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ показывают обратную связь между этими двумя показателями, что легко объясняется выносом или накоплением алюминия, являющегося элементом - хозяином для бора. Процессы, вызывающие интенсивный вынос глинозема, фиксируются увеличением отношения $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ и уменьшением содержаний бора. Повышение содержаний бора отвечает более интенсивному выносу кремнезема в сравнении с глиноземом, а значит, и уменьшению величины K_1 . Для бериллия эта закономерность выражена гораздо слабее.

Исключение из установленного правила представляет поведение бора в коре выветривания гранитов р-на г.Уяра (рис.8). Как было отмечено выше, породы претерпели существенную гидротермальную подготовку, предшествующую выветриванию на данном участке, что, несомненно, могло отразиться на распределении породообразующих и редких элементов в выветрелых образованиях. Это находит свое отражение в рядах подвижности элементов, построенных для профилей выветривания и мелкозернистых биотит-роговообманковых, и крупнозернистых лейкократовых гранитов. Специфическое распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях глинистых образований гидротермально-экзогенного происхождения служит дополнительным свидетельством необычности процесса корообразования в р-не г.Уяра. Кроме того, пирролизит-псиломелановые агрегаты, отобранные из гидротермально-экзогенных глин этого района, практически не содержат бора, тогда как в марганцовистых стяжениях из коры выветривания р-на г.Ачинска (Мазульский карьер) его концентрация составляет 32 г/т. Бериллий в них не определялся.

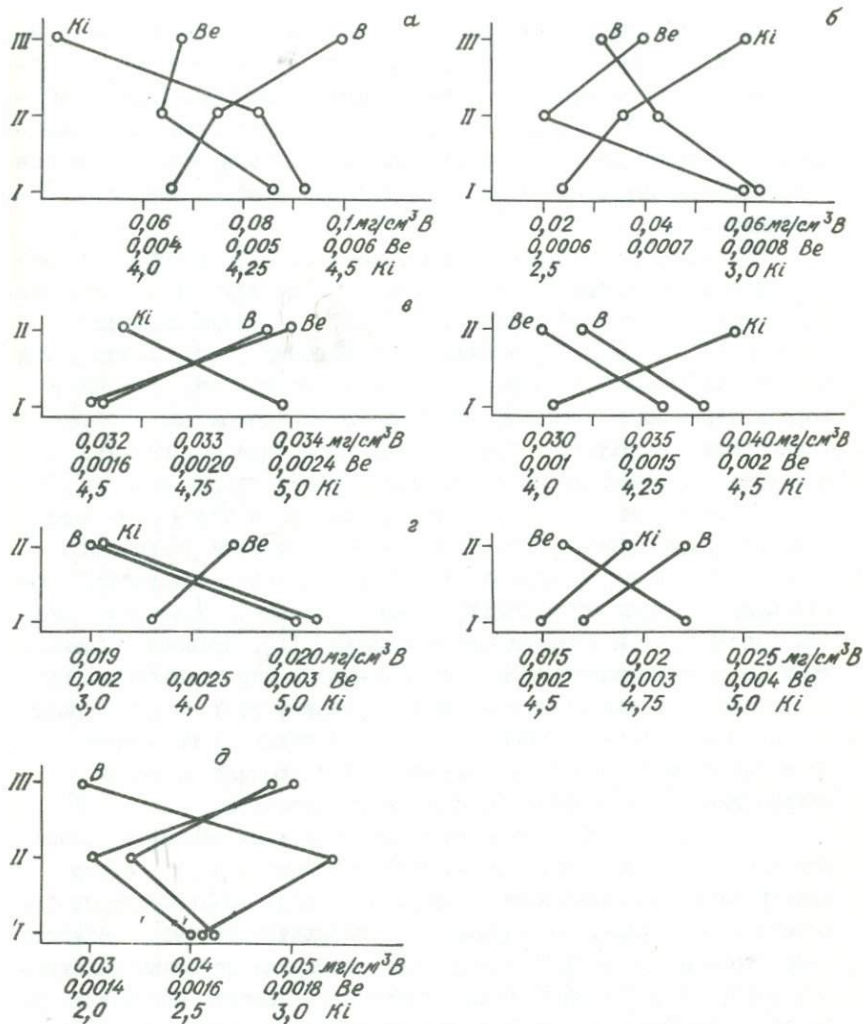


Рис.8. Распределение бора, бериллия и величины кремнево-глиноземного модуля в различных зонах кор выветривания Красноярского края

I-исходные породы; II-зона дезинтеграции; III-зона глин. а-гарацкие граниты; б-кварцевые диориты (В.Саян); в-граниты и плагиограниты (В.Саян); г-граниты р-на г.Уяра; д-диабазовые порфириты р-на г.Ачинска

Как видно из данных табл.9, гидротермально-экзогенные глины р-на г.Артемовска и г.Уяра, в отличие от элювиальных продуктов тех же кор выветривания, характеризуются понижением содержаний В и Ве с уменьшением размерности гранулометрических фракций, что, по-видимому, свидетельствует о выносе этих элементов в процессе превращения минералов исходных пород в глинистые новообразования.

Тонкие гранулометрические классы ($<0,001$ мм) пород несмещенной коры выветривания в среднем для всех изученных районов Красноярского края обнаруживают 1,5-2,5 - кратное увеличение содержаний В и Ве по сравнению с их валовыми количествами в тех же породах (табл.9). Очевидно, кроме эндокриптного рассеяния бора и бериллия в слоистых алюмосиликатах происходит сорбция их глинистыми минералами в процессе корообразования, как это отмечалось в литературе по корам выветривания других районов 3.

Процессы смыва, переноса и переотложения пород коры выветривания Красноярского края сопровождаются резким увеличением (\sim в 2,5 раза) содержаний бора в переотложенных продуктах, образование которых происходило преимущественно в условиях озерных бассейнов с непостоянными глубинами [II]. Сравнение данных табл. 9 по содержанию бора в несмещенных и переотложенных продуктах кор выветривания и в тонких фракциях этих пород свидетельствует в пользу сорбции бора. Дополнительное повышение содержаний бора в переотложенных продуктах происходит за счет увеличения в них количества глинистого материала.

Несмотря на одинаковую тенденцию к незначительному выносу или даже небольшому накоплению бора и бериллия в породах кор выветривания Красноярского края, однозначной связи между их повышением в профилях выветривания не наблюдается, что находит свое отражение в распределении В/Ве отношения по зонам выветрелых пород. В одних случаях наблюдается уменьшение его вверх по разрезу (диабазы р-на г.Ачинска, граниты и гранодиориты р-на г.Артемовска, мелкозернистые граниты р-на г.Уяра), в других случаях происходит повышение величины отношения к верхним горизонтам коры выветривания (таракские граниты, плагиограниты Ольховско-Чибихевского комплекса и крупнозернистые граниты р-на г.Уяра). Однако в подавляющем большинстве случаев бор-бериллие-

Т а б л и ц а 9

Среднее содержание бора и бериллия в породах кор выветривания, переотложенных продуктах и тонких гранулометрических фракциях этих пород

П о р о д ы	Количество анализов	С о д е р ж а н и е э л е м е н т о в , г/т					
		Валовое содержание		Фракция 0,01-0,001		Фракция < 0,001	
		B	Be	B	Be	B	Be
Несмещенная кора выветривания	II	13,5	1,48	18,8	3,6	26,7	3,8
Переотложенные продукты кор выветривания	II	33,4	1,43	31,2	2,0	39,0	3,0
Глины гидротермально-экзогенного происхождения	6	8,7	1,9	7,9	2,4	7,7	1,6

вое отношение определяется главным образом содержанием бора и в основном, его распределение в профиле выветривания контролирует уровень отношений В/Ве.

Данные по распределению бора и бериллия в корях выветривания всех изученных районов противоречат существующим представлениям о боре как активном мигранте [1,5,17 и др.] и в основном подтверждают закономерности, установленные для бериллия в экзогенных циклах миграции вещества [8]. Положение бора и бериллия в рядах подвижности, построенных для зон начального выщелачивания и каолинизированных пород, говорит об инертности обоих элементов в процессе образования кор выветривания Красноярского края. Лишь в процессе выветривания кварцевых диоритов Ольховско-Чибжекского интрузивного комплекса происходит интенсивный вынос бора ($K=0,51$), что по-видимому, является следствием специфических условий корообразования данного района. При начальных стадиях выветривания бор и бериллий, скорее всего, захватываются гидрослюдами, широко развитыми в породах. Поэтому коэффициенты их концентраций в этой зоне всегда близки или выше 1. К сожалению, мы не имеем возможности ответить на вопрос, является ли этот захват сорбцией элементов или здесь действует механизм эндокриптного вхождения их в кристаллическую структуру гидрослуд.

Выводы

Приведенные данные по распределению бора и бериллия в корях выветривания Красноярского края позволяют сделать следующие выводы:

1. Уровень содержания бора и бериллия в продуктах выветривания пород, не содержащих собственных минералов этих элементов, во многом определяется их содержанием в исходных образованиях. При этом наблюдается четкая обратная зависимость между содержанием бора и величиной кремнево-глиноземного модуля (SiO_2/Al_2O_3). Для бериллия такая взаимосвязь проявлена менее отчетливо.

2. Положение бора и бериллия в рядах подвижности элементов, построенных для различных зон кор выветривания, указывает на инертный характер их поведения в зоне гипергенеза.

3. Процессы гидротермального изменения, предшествующие корообразованию, существенно меняют поведение бора и бериллия в профилях выветривания в сторону их интенсивного перераспределения и выноса.

4. Процессы смыва, переноса и переотложения продуктов выветривания в изученных районах сопровождались накоплением бора в переотложенных образованиях как за счет сорбции его из вод бассейнов седиментации, так и за счет повышения роли глинистых минералов в осадках. Содержания бериллия при этом также возрастали, но в меньших масштабах.

5. Из всех гранулометрических классов пород кор выветривания наиболее высокими содержаниями бора и бериллия характеризуются самые тонкие составляющие.

ЛИТЕРАТУРА

1. БОЙКО Т.Ф. Редкие элементы в галогенных формациях. М., "Наука", 1973. 183 с.

2. БУЛЫННИКОВ А.Я. Краткий отчет о геологических работах в Ольховско-Чибижском золоторудном районе Минусинского уезда в 1924 г.— Изв. Сиб. отд-ния Геол. комитета, 1925, т.5, вып.1, 40 с.

3. БУРКОВ В.В., ПОДПОРИНА Е.К. Геохимия и месторождения малых и редких элементов в коре выветривания.— В кн.: Материалы семинара по геохимии гипергенеза и коры выветривания, Минск, 1969, с.47-51.

4. БУЯНОВА Н.Е., КАРНАУХОВ А.П. Определение удельной поверхности твердых тел хроматографическим методом тепловой десорбции аргона. Новосибирск, "Наука", 1965. 61 с.

5. ВАЛИЕВ Ю.Я. Геохимия бора в юрских отложениях Гиссарского хребта. М., "Наука", 1977. 152 с.

6. ВИКУЛОВА М.Ф. Методическое руководство по петрографо-минералогическому изучению глин. М., Госгеолтехиздат, 1957. 448 с.

7. ВИНОГРАДОВ А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.— Геохимия, 1962, № 4, с.3-9.

8. ГРИГОРЬЕВ Н.А. Бериллий в экзогенном цикле. М., Наука, 1978, 163 с.
9. ГОРБОВ А.Ф. Геохимия бора. Л., "Недра", 1976. 206 с.
10. ЗАВАРИЦКИЙ А.Н. Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1961. 479 с.
11. КАЗАРИНОВ В.П. Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири. М., Гостоптехиздат, 1958. 323 с.
12. КЕЛЛЕР У.Д. Основы химического выветривания.- В кн.: Геохимия литогенеза. М., "Изд-во иностр. лит-ры, 1963, с.85-196.
13. КУЗНЕЦОВ Ю.А. Петрология докембрия Южно-Енисейского кряжа. Томск, 1941. 240 с. (Материалы по геологии Западной Сибири, № 15 (57)).
14. КУКОВСКИЙ Е.Г. Превращения слоистых силикатов. Киев, Наукова думка, 1973. 103 с.
15. ЛИСИЦИНА Н.А. Вынос химических элементов при выветривании основных пород. М., "Наука", 1973. 225 с.
16. ПЕРЕЛЬМАН А.И., БАТУЛИН С.Г. Миграционные ряды элементов в коре выветривания.- В кн.: Кора выветривания. Вып.4, М., Изд-во АН СССР, 1962, с.219-260.
17. ПЕРЕЛЬМАН А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М., Недра, 1972. 288 с.
18. ПУСТОВАЛОВ Л.В., СОКОЛОВА Е.И. Методы определения pH и E в осадочных породах.- В кн.: Методы изучения осадочных пород. т.2, М., Гостеолтехиздат, 1957, с.116-127.
19. СИМОНОВА В.И. Количественный спектральный анализ определения бора в осадочных породах.- В кн.: Количественный анализ минералов и горных пород физическими методами. Новосибирск, "Наука", 1965, с.23-28. (Труды ИГиГ СО АН СССР, вып.32).
20. ЦЫКИН Р.А. Состав, строение и полезные ископаемые мезокайнозойских кор выветривания юга Средней Сибири.- Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд.геол.-мин. наук. Новосибирск, 1967. 20 с.
21. ЩЕРБОВ Б.Л., СУХОРОКОВ Ф.В. Поведение бора при минеральных преобразованиях в корях выветривания кислых пород (по данным n, α -радиографии).- В кн.: Теоретическая и генетическая минералогия. Новосибирск, "Наука", 1979 (в печати).
22. HARRASSOVITZ H. Laterit.- "Forsch. Geol. und Palaeontol", 1926. Bd.4, N.14.

Б.Л.Щербов, Ф.В.Сухоруков

ГЕОХИМИЯ БОРА И БЕРИЛЛИЯ В КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ
ЮГО-ЗАПАДНОГО САЛАИРА

В пределах юго-западного Салаира изучена кора выветривания, образованная на средних, основных и ультраосновных интрузивных породах, а также на амфиболитах и туфах основного состава.

Существование тропического и субтропического климата на юге Западной Сибири в период от триаса до палеогена включительно благоприятствовало корообразовательным процессам в этом регионе [8]. По морфологическим признакам и геологическим условиям кора выветривания подразделяется на площадные, линейные и линейно-площадные типы. Наибольшим развитием пользуются коры выветривания площадного и смешанного характера. В большинстве случаев коры перекрыты рыхлыми отложениями третичного и четвертичного времени мощностью от нескольких м до 70-120 м. Сохранность кор выветривания различная. Мощность элювиальных образований колеблется в широких пределах от первых метров до 100 и более м. В профилях линейного типа глубина проникновения выветривания достигает иногда 300 м [13].

Возраст коры выветривания Салаира является предметом долголетней дискуссии. В.Д.Фомичев и Л.Э.Алексеева [16] считают ее продуктом наложения верхнемезозойских - нижнекайнозойских процессов корообразования. По данным В.Н.Бесходарного и Н.С.Корженева [2] кора выветривания имеет третично-меловой возраст. А.М.Малолетко [12], специально изучавший эти вопросы, на основании широкого привлечения палеонтологических данных считает, что кора выветривания на Салаире формировалась трижды: в доюрское время (верхний триас ?), в верхнем мелу (за исключением

датского века) и в палеогене (эоцен-олигоцен?). Доюрская кора полностью уничтожена денудационными процессами юрского периода. В палеогене выветривание имело незначительные масштабы и не привело к формированию самостоятельных разрезов, а имело в большей степени характер наложения на верхнемеловую кору. Следовательно, коры выветривания, наблюдаемые в настоящее время в различных районах Салаира, образованы в верхнем мелу.

Макроскопическое изучение керна скважин показывает неравномерность выветривания в вертикальном разрезе. Чаще всего наблюдается неоднократная смена интенсивно выветрелых пород менее измененными, что, по нашему мнению, обусловлено тектоническими факторами.

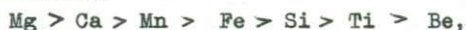
Для изучения динамики поведения бора и бериллия в корях выветривания Салаира мы стремились опробовать наиболее полные и хорошо сохранившиеся разрезы кор выветривания. Распределение микроэлементов рассмотрено на материале, отобранном из керна скважин и проанализированном количественными спектральными методами в лаборатории геохимии золота и редких элементов ИГиГ СО АН СССР. Все анализы выполнены Г.В.Еремеевой на приборах КСА-1 и ДФС-13. Рентгеноструктурные исследования глинистых минералов коры выветривания проведены Э.П.Солотчиной в лаборатории рентгеноструктурного анализа того же института. Общий химический состав пород определен М.И.Зеркаловой и Л.Д.Ивановой на приборе "Квантовак-1500В" в лаборатории спектрального анализа. Авторы пользуются случаем выразить всем перечисленным товарищам свою искреннюю признательность.

Для удобства сравнения профилей выветривания, образованных на различных исходных породах, все выветрелые образования разбиты нами на две зоны: зона каменного структурного элювия (дезинтеграции) и зона глинистого структурного элювия (зона глин). Кроме того нами опробованы породы переотложенных кор выветривания, в понимании И.И.Гинзбурга [4]. Кора выветривания диоритов изучена на Бехтемирском участке. Исходными породами служат мелкозернистые серые кварцевые диориты, не содержащие собственных минералов бора или бериллия. Минеральные составляющие диоритов имеют следующие количественные соотношения: кварц- 10-20%, роговая обманка 15-30%, плагиоклаз

– 25–30%, калиевый полевой шпат – 30–35%. В небольших количествах присутствуют сфен, апатит, биотит, магнетит. Основные породообразующие минералы распределены в породе крайне неравномерно. По своему химическому составу диориты стоят между бескварцевыми и кварцевыми диоритами, по А.Н.Заварицкому [7], несколько приближаясь к последним (табл. I). Содержания бора и бериллия в них близко к кларковому и составляет 2I и I,9 г/т соответственно.

В неизмененных породах плагиоклаз чаще всего серицитизирован, реже – пелитизирован в центральных частях зерен. Роговая обманка незначительно осветлена. Редкими зернами в плагиоклазе и на периферических частях кристаллов роговой обманки присутствует эпидот. Калиевый полевой шпат и биотит изменениями не затронуты.

Начальные стадии изменения диорита характеризуются значительным выносом магния, марганца, кальция (30–40%), интенсивным развитием гидрослюда и частичной каолинизацией пород. Плотность падает с 2,68 до 2,41 г/см³. Структурные особенности диоритов полностью сохраняются. В окраске появляются буроватые тона за счет пропитки гидроокислами железа. Содержание бора увеличивается более, чем в 2 раза (K = 2,23), бериллий остается примерно в тех же количествах (K = 0,96). Из зоны дезинтеграции кварцевых диоритов выносятся:



накапливаются: B > Na > K > Al.

Повышенные количества бора, по-видимому, следует объяснить широким развитием гидрослюдистого материала в породах зоны начального выветривания.

В верхней части разреза выветрелых пород увеличивается количество каолинита и монтмориллонита. Сохраняется гидрослюда. Если в нижних зонах профиля гранулометрические классы менее 0,05 мм составляли 20–30% (фракция < 0,001 мм не более I,5), то к верхним горизонтам вклад их возрастает до 50–60%, причем содержание фракции < 0,001 мм увеличивается в 3 раза (табл. 2). Плотность пород становится еще меньше (1,75 г/см³). В химическом составе пород происходит дальнейшее преобразование: выносятся: Mg > Ca > Na > Mn > Ti > Si > Fe > Al > B > Be, накапливается: K.

Т а б л и ц а I

Химический состав пород различных зон коры выветривания кварцевых диоритов

n	d	B	Be	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	ППП	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	B/Be	
И с х о д н ы е п о р о д ы																			
3	2,68	2I,0 0,056	I,9 0,005	58,3 1562,0	18,23 488,0	7,5 202,0	3,92 105,0	3,15 80,0	1,96 53,0	0,20 5,0	0,87 23,0	5,4 145,0	2,59 69,0	2,09 56,0	0,4I II,0	2,54 68,0	3,2	II,2	
З о н а д е з и н т е г р а ц и и																			
3	2,4I	52,0 0,125 2,23	2,0 0,0048 0,96	54,67 1317,0 0,84	20,7 499,0 1,02	6,9 166,0 0,82	1,53 37,0 0,35	5,24 126,0 1,57	1,36 33,0 0,62	0,15 3,6 0,72	0,87 2I,0 0,9I	4,27 103,0 0,7I	3,4I 82,0 1,19	2,52 6I,0 I,09	1,28 3I,0 2,82	6,2I I25,0 I,84	2,6	26,0	
З о н а г л и н																			
II	I,75	26,0 0,0455 0,8I	2,4 0,0042 0,84	55,2I 966,0 0,62	2I,3I 373,0 0,76	7,36 I29,0 0,64	0,2I 37,0 0,035	7,13 I25,0 I,56	0,63 II,0 0,2I	0,14 2,5 0,5	0,80 I4,0 0,6I	I,80 3I,5 0,22	I,05 I8,0 0,26	3,59 63,0 I,13	I,39 24,0 2,18	8,10 I42,0 2,09	2,6	10,8	
К о р а в ы в е т р и в а н и я в ц е л о м																			
I4	I,89	32,0 0,0605 I,08	2,2 0,0043 0,86	55,09 104I,0 0,66	2I,18 400,0 0,80	7,26 I37,0 0,68	0,49 9,3 0,09	6,72 I27,0 I,56	0,79 I4,9 0,28	0,142 2,6 0,52	0,82 I5,4 0,67	2,33 44,0 0,30	I,52 29,0 0,42	3,36 63,5 I,13	I,37 25,8 2,35	7,69 I3,8 2,03	2,6	I4,0	
П е р е о т л о ж е н н ы е п р о д у к т ы																			
4	I,6I	40,0 0,0064 I,05	I,8 0,0029 0,67	49,0 789,0 0,75	26,9 433,0 I,08	10,12 I63,0 I,19	0,05 0,8 0,86	10,06 I62,0 I,26	0,50 8,0 0,54	0,18 3,0 I,15	I,37 22,0 I,43	I,00 I6,1 0,37	0,08 I,3 0,04	0,60 9,7 0,15	II,20 I8,0 0,70	II,95 I92,0 I,39	0,55	22,2	

Примечание. В первой строке указано содержание породообразующих элементов в вес.%, редких элементов - в г/т. Во второй строке - содержание элементов в мг/см³. В третьей строке - коэффициенты концентрации элементов. Коэффициенты для перетолженных продуктов посчитаны относительно коры выветривания в целом. Ниже в подобных таблицах обозначения такие же.

Минеральный состав и распределение бора и бериллия в гранулометрических фракциях пород корн выветривания кварцевых диоритов (скв.321)

Размер фракции, мм	Минеральный состав	Содержание в породе		Количество во фракции, %	Содержание во фракции				Количество в породе				Обнар. во фракциях относит. общ. содеж.		В/Ве
		В, г/т	Ве, г/т		В, г/т	Ве, г/т	В, г/т	Ве, г/т	В, г/т	Ве, г/т	В, %	Ве, %			
Нижняя зона корн выветривания (7 проб)															
>2	Кв(10), Пш(70), К(20), Би(1), Го+Г(ан)	23,0	2,4	6,9	12,6	2,4	0,869	0,165	3,78	6,88	77,9	95,6	5,35		
2-1	Кв(8), Пш(50), К(40), Г(1), Го(1), Мн(сл), Би(ан)			11,3	14,7	2,7	1,661	0,305	7,22	12,71			5,4		
1-0,5	Пш(40), Кв(8), К(40), Г(10), Го+Би+Мн(2), Зп(ан)			7,4	16,8	2,4	1,243	0,177	5,40	7,38			7,0		
0,5-0,25	Пш(40), К(40), Кв(5), Г(10), Мн(1), Го(1), Зп+Би(ан)			12,0	18,0	2,7	2,160	0,324	9,39	13,50			6,7		
0,25-0,1	Кв(5), Пш(30), Би+Г+М(35), К(30), Го+Зп+Мн(ан)			22,4	17,7	2,0	3,965	0,448	17,24	18,67			8,85		
0,1-0,05	Пш+Кв(20), К(25), Г+Би+М(55), Зп+Го+Мн(ан)			9,9	14,6	1,5	1,445	0,148	6,28	6,17			9,7		
0,05-0,01	К(80%), М(15), Г(5), Кб+Го+Пш(сл)			17,0	18,0	1,7	3,060	0,289	13,30	12,04			10,6		
0,01-0,001	К(75), М(10), Г(15), Кб+Го+Пш(сл)			11,6	25,7	3,3	2,981	0,383	12,96	15,96			7,8		
<0,001	К(40), М(10), Г(50), Кб+Го+Пш(сл)			1,5	35,7	3,6	0,536	0,054	2,33	2,26			9,9		
Верхняя часть корн выветривания (6 проб)															
>2	Пш(50), Мн(50), К(ан)	24,0	2,5	1,56	5,5	2,0	0,086	0,031	0,36	1,24	71,1	98,5	2,8		
2-1	Пш+Кв(30), Мн(30), К+Г(40)			4,70	8,5	2,3	0,400	0,108	1,67	4,32			3,7		
1-0,5	Пш+Кв(40), Мн(20), К+Г(40)			4,64	11,0	2,3	0,510	0,107	2,13	4,28			4,8		
0,5-0,25	Пш+Кв(50), Мн(10), К+Г(40)			11,26	12,3	2,4	1,385	0,27	5,77	10,80			5,1		
0,25-0,1	Пш+Кв(50), Мн(5), К+Г+Го(45)			20,30	12,0	2,3	2,436	0,467	10,15	18,62			5,2		
0,1-0,05	Пш+Кв(40), Мн(2), К+Г+Го(58)			9,12	12,6	2,2	1,149	0,205	4,79	8,04			5,7		
0,05-0,01	К(80), Г(5), Кв+Пш+Го(15)			21,38	15,0	2,4	3,207	0,513	13,36	20,52			6,3		
0,01-0,001	К(70), Г(20), М+Пш+Го(10)			22,28	28,5	2,8	6,350	0,624	26,46	24,96			10,2		
<0,001	К(70), Г(25), М+Го(5)			4,76	35,5	3,0	1,690	0,143	7,04	5,72			11,8		
Перекристаллизованные породы (5 проб)															
>2	Кв+Пш(40), К+Го(60)	36,0	1,8	1,02	23,5	1,3	0,240	0,013	0,65	0,74	69,1	98,2	18,1		
2-1	Кв+Пш(60), К+Го(39), Мн(1)			2,60	16,6	1,4	0,432	0,036	1,17	2,00			11,9		
1,0-0,5	Кв+Пш(60)+К+Го(38), Мн+Би+Го(2)			3,20	18,2	1,4	0,582	0,045	1,58	2,50			13,0		
0,5-0,25	Кв+Пш(50), К+Го(45), Г+Би(5), Мн(ан)			9,20	18,5	1,4	1,702	0,129	4,63	7,17			13,2		
0,25-0,1	Кв+Пш(65), К+Г(35), Го+Би+Мн(ан)			13,25	18,5	1,5	2,451	0,199	6,66	11,06			12,3		
0,1-0,05	Кв+Пш(50), К+Г+Би(50), Го+Мн(1)			7,40	17,0	1,6	1,258	0,118	3,42	6,56			10,6		
0,05-0,01	К(80), Г(18) Кв+Го+Пш+Кб(2)			25,53	24,6	1,9	6,280	0,465	17,07	26,94			12,9		
0,01-0,001	К(70), Г(28), Кв+Го+Пш+Кб(2)			31,70	31,4	1,9	9,954	0,602	27,05	33,44			16,5		
<0,001	К(37), Г(60), Го(3), Кб+Пш(сл)			6,10	41,4	2,3	2,525	0,140	6,86	7,78			18,0		

Примечание. Кв - кварц; Пш - полевые шпаты; Би - биотит; К - каолинит; Г - гидрослюда; М - монтмориллонит; Го - гидрослюда железа; Мн - марганцевые образования; Зп - эпидот; Кб - карбонат, Сл - следы, ан - анки.

Как видно из данных табл. I, бор и бериллий даже в самых верхних частях разреза не испытывают существенного выноса и в рядах подвижности элементов занимают последние места наряду с Fe и Al.

Изучение гранулометрического состава пород коры выветривания кварцевых диоритов и продуктов ее перестроения показывает, что:

1. Мелкие фракции ($< 0,05$ мм) пород нижних горизонтов в сумме составляют не более 30%. Сложены они каолинитом низкой степени совершенства кристаллической структуры, натровым монтмориллонитом и диоктаэдрической гидрослюдой. В качестве следовых примесей присутствуют гетит, реликтовый полевой шпат, кальцит и доломит. Глинистая фракция ($< 0,001$ мм) представлена диоктаэдрической гидрослюдой (~ 50%), каолинитом (40%), монтмориллонитом (~ 10%) и характеризуется самыми высокими содержаниями бора и бериллия — 35,7 и 3,6 г/т соответственно (табл. 2). На долю мелких фракций в сумме приходится 28,6% всего бора и 30% бериллия породы. Крупные фракции обогащены реликтовыми минералами (кварцем, полевым шпатом и отчасти биотитом), а также содержат заметные количества каолинита. В небольших количествах присутствуют гидрослюда, гидроокислы железа и марганца, встречаются отдельные зерна эпидота. Содержание бора в крупных и средних классах невысокое и колеблется в небольших пределах (14–18 г/т). Подобным образом распределен и бериллий (1,5–2,7 г/т). Величина отношения B/Be в общем возрастает от крупных фракций к более тонким. В процессе отмучивания тонких частиц в водной среде породы теряют около 22% бора и приблизительно 4% бериллия.

2. В породах верхних горизонтов коры выветривания частицы менее 0,05 мм составляют 48,5%. Представлены они в основном каолинитом (70–80%) и диоктаэдрической гидрослюдой (5–25%) с примесью монтмориллонита, гетита и реликтовых кварца и полевого шпата. Содержание бора и бериллия такое же, как и в тонких фракциях пород нижних горизонтов, и возрастает от грубых к самым тонким гранулометрическим классам, достигая максимума в глинистой фракции (35,5 и 3 г/т соответственно). Доля бора в породе за счет мелких фракций возрастает до 47%, бериллия — до

51%. При разделении пород на гранулометрические фракции в водной среде из них выносятся около 28% бора и 1,5% бериллия. Величина бор-бериллиевое отношения монотонно увеличивается с 2,8 во фракции 2 мм до 11,8 в глинистой составляющей.

3. Продукты переотложения коры выветривания кварцевых диоритов в 1,5 раза богаче бором и несколько обеднены бериллием в сравнении с породами несмещенной коры (рис.1). Однако, содержания бора во фракциях находятся на том же уровне, что и в грану-

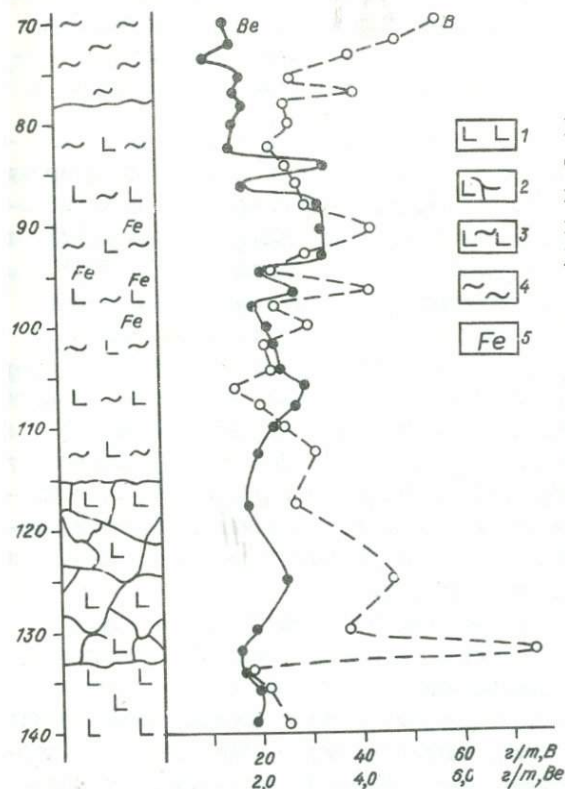


Рис.1. Распределение бора и бериллия в коре выветривания кварцевых диоритов Бехтемирского участка

1—кварцевые диориты; 2—зона дезинтеграции; 3—зона глинистых пород; 4—частично перемещенные породы коры выветривания; 5—участки интенсивного развития гидрокислов железа

лометрических классах элювиальных образований. Исключение составляют фракции 0,05–0,01, 0,01–0,001 и < 0,001, в сложении ко-

торых важную роль играет диоктаэдрическая гидрослюда (15–60%) и каолинит (37–80%), а также фракция > 2 мм, существенно обогащенная каолинитом и гидроокислами железа, являющимися прекрасной ловушкой для бора. Гранулометрические классы < 0,05 мм составляют около 63% перестроенных пород. На их долю приходится 51% В и 68% Ве. В процессе отмучивания мелких частиц породы теряют 31% бора и 1,8% бериллия. Поскольку крупные составляющие на 50–60% представлены кварцем и полевыми шпатами, то эти потери скорее всего следует отнести за счет более мелких классов, сложенных глинистыми минералами, сорбировавшими бор при перестроении пород и потерявшими его вследствие десорбции при отмучивании тонких фракций. Бериллий, по-видимому, сорбируется глинами менее интенсивно, и какая-то его часть во время перестроения пород теряется.

Кора выветривания на оливиновых габбро-норитах изучена по разрезу скважины, пробуренной на Бехтемирском участке. Основными породообразующими минералами исходных пород являются ромбический и моноклинный пироксен (40–45%), основной плагиоклаз (45–50%) и оливин (5–10%). По ромбическому пироксену существенно развит лучистый амфибол, по плагиоклазу – серицит и цоизит. Оливин почти полностью превращен в серпентин (хризотил), реже – в боулингит с обособленными скоплениями гематита. В качестве примеси присутствует магнетит. Породы имеют грубозернистое сложение и довольно высокую плотность – 3,04 г/см³. По своему химическому составу (табл.3) габбро-нориты ближе всего соответствуют оливиновому габбро [7]. Бериллий обнаружен в количестве 0,2 г/т, содержание бора выше кларкового для данного типа пород, по А.П.Виноградову [3], и составляет 16 г/т.

В зоне дезинтеграции и начального выщелачивания пород плотность падает до 2,7 г/см³. рН водной вытяжки* составляет 9,07 против 10,1 в неизмененных породах (рис.2).

В минеральном составе происходит существенная перестройка: плагиоклаз замещается гидрослюдой, нередко полностью, и в местах наибольшего скопления гидрослюд значительно каолинизируется; пироксен хлоритизирован и карбонатизирован; оливин полностью

* Изучено в соответствии с рекомендациями Л.В.Пустовалова и Е.И.Соколовой [15].

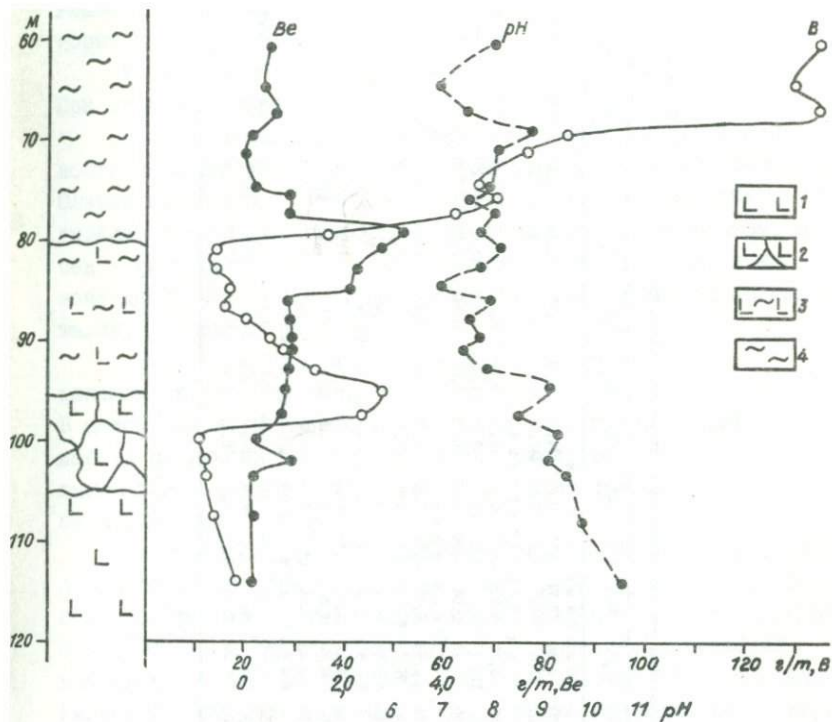


Рис.2 Распределение бора, бериллия и величины pH в коре выветривания оливинового габбро-норита

1 - габбро-норит; 2 - зона дезинтеграции; 3 - зона глин; 4 - перетолженные породы.

превращен в боулингитовый оранжево-коричневый агрегат с реликтами серпентина. Гидрослюды развиты повсеместно. С ними ассоциируют цоизит и каолинит. Рентгеноструктурным анализом в тонких фракциях пород нижних горизонтов коры выветривания установлены каолинит (90%) и монтмориллонит (10%).

Дезинтеграция и начальное выветривание пород вызывают значительный вынос Fe, Mg, K, Mn, в меньшей степени Ca, Al и Si (табл.3). Бор незначительно накапливается ($K=I,08$) совместно с

Таблица 3

Химический состав пород различных зон коры выветривания ольвинового габбро-норита

n	d	pH	B	Be	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{B}{Be}$		
2	3,04	10,1	16,0	0,2	45,0	13,88	9,33	6,30	Исходные породы										3,24	81,0
			0,0486	0,0006	1368,0	422,0	284,0	192,0	2,34	12,71	0,17	0,37	14,63	0,79	0,19	0,23	3,3			
4	2,7	9,07	19,5	0,52	47,88	14,8	8,65	3,96	Зона дезинтеграции										3,17	37,6
			0,0527	0,0014	1271,0	400,0	234,0	107,0	4,25	9,37	0,17	0,49	14,97	0,89	0,16	0,65	3,75			
			1,08	2,33	0,93	0,95	0,82	0,56	1,62	0,66	0,88	1,18	0,91	1,0	0,74	2,07	1,01			
9	1,54	7,76	27,0	1,37	44,7	31,8	5,65	1,74	Зона глин										0,71	17,6
			0,037	0,0021	688,0	490,0	87,0	27,0	70,0	42,0	8,8	4,0	47,0	6,0	2,6	2,04	13,02			
			0,76	3,5	0,50	1,16	0,31	0,14	0,99	0,11	0,54	0,36	0,1	0,25	0,45	3,69	2,00			
13	1,94	8,17	22,5	1,1	46,2	23,6	6,55	1,88	Кора выветривания в целом										1,96	20,8
			0,0437	0,0021	896,0	458,0	127,0	36,0	87,0	91,0	3,5	6,0	131,0	10,5	3,3	31,4	196,0			
			0,90	3,50	0,65	1,08	0,45	0,19	1,23	0,24	0,67	0,54	0,29	0,44	0,57	3,7	1,98			
3	1,92	7,99	83,0	2,7	63,25	17,24	6,0	0,14	Перестроженные продукты										0,27	30,6
			0,159	0,0052	1214,0	330,0	115,0	2,7	112	9,6	2,7	28,0	15,0	2,1	15,0	37,0	182,0			
			3,64	2,48	1,35	0,72	0,92	0,08	1,29	0,10	0,77	4,7	0,11	0,2	4,5	1,18	0,92			

Примечание см. табл. 1, с. 96.

Ti. Содержание бериллия возросло более, чем в 2 раза ($K=2,33$). Убывающий ряд подвижности элементов при выветривании габбро-норитов выглядит так:

$Mg > K > Fe > Mn > Ca > Si > Al > Na$.

При этом накапливаются: $Be > Ti > B$.

В образованиях верхних горизонтов коры выветривания плотность понижается в два раза в сравнении с исходными породами. Оливин полностью превращен в боулингит и монтмориллонит. Плагиоклаз замещается гидрослюдисто-каолинитовым агрегатом, пироксен — монтмориллонитом. pH суспензий становится еще ниже, чем в зоне дезинтеграции — 7,76. Происходит дальнейший вынос магния, калия, кальция и др.:

$Ca > Mg > Na > Fe > Ti > K > Si > Mn > B$,
накапливаются: $Be > Al$.

В целом для коры выветривания оливиновых габбро-норитов наблюдается следующий ряд подвижности элементов: выносятся: $Mg > Ca > Na > Fe > Ti > K > Si > Mn > B$,
накапливаются: $Be > Al$.

Анализ гранулометрического состава пород коры выветривания оливиновых габбро-норитов показывает равномерное распределение бора по фракциям и уменьшение содержаний бериллия от крупных к более мелким составляющим (табл.4). Повышение содержаний бора наблюдается лишь во фракциях I-0,5 и 0,5-0,25 мм, обогащенных гидроокислами железа и марганца, а также гидрослюдой. Крупные фракции сложены реликтовыми полевыми шпатами и пироксенами. Из вторичных минералов существенная роль принадлежит каолиниту, марганцевым соединениям и в меньшей степени гетиту, карбонату, лучистому амфиболу. По мере уменьшения размера фракций в них возрастает роль каолинита, имеющего очень низкую степень совершенства структуры.

Глинистые фракции ($<0,001$ мм) состоят на 99% из каолинита с примесью железистой гидрослюды (не более 1%) и следовых количеств полевых шпатов. Они характеризуются самыми низкими содержаниями бора (12 г/т) и бериллия (1,7 г/т). Фракции, мельче 0,05 мм, составляют почти 82% пород каолиновой зоны. В них сосредоточено 67% бора и 76% бериллия. Отношение B/Be от фракции к фракции колеблется незначительно и является максимальным для

Таблица 4

Минеральный состав и распределение В и Ве в гранулометрических фракциях
оливинового габбро-норита (скажина № 182)

Размер фракции, мм	Минеральный состав	Содержание в породе		Кол-во фракций, %	Содержание во фракции		Количество в породе за счет фракции			Обнаруж. во фракциях относит. общ. содерж.		В/Ве	
		В, г/т	Ве, г/т		В, г/т	Ве, г/т	В, г/т	Ве, г/т	В, %	Ве, %	В, %		Ве, %
Верхняя часть коры выветривания (4 пробы)													
>2	Шш+Пш(50), К(30), Мн(10), Г(5), Кб+Ам+ГО(5)	15,0	2,0	0,37	12,0	3,2	0,044	0,012	0,29	0,60	86,4	95,5	3,75
2-1	Шш+Пш(50), К(35), Мн(10), Г+Кб+Ам+ГО(5)			0,50	15,0	2,8	0,075	0,014	0,50	0,70			5,36
1-0,5	Шш+Пш(30), К+Г(60), Мн(10), ГО+Кб(зн)			0,67	27,0	2,5	0,161	0,017	1,21	0,85			10,8
0,5-0,25	Шш+Пш(15), К+Г(70), Мн(15), ГО(зн)			1,72	20,0	2,5	0,344	0,043	2,30	2,25			8,0
0,25-0,1	К+Г(70), Шш+Пш(20), Мн+ГО(10), М(зн)			8,37	15,3	2,0	1,281	0,167	8,54	8,35			7,65
0,1-0,05	К(80), Шш+Пш(10), Г(10), Мн+М+ГО(зн)			6,53	14,0	2,0	0,914	0,131	6,10	5,55			7,0
0,05-0,01	К(90), Г(10), Шш+Пш+М+М(сл)			22,54	13,3	1,9	2,998	0,428	20,00	21,40			7,0
0,01-0,001	К(90), Г(1), Шш(зн)			44,90	12,0	1,9	5,388	0,853	35,92	42,65			6,32
<0,001	К(99), Г(1), Шш(зн)			14,40	12,0	1,7	1,728	0,245	11,52	12,25			7,06
Продукты переотложения (8 проб)													
>2	Б(80), Мн(10), К(10)	94,0	2,86	4,96	74,7	3,9	3,70	0,19	3,9	6,64	80,1	100,3	19,2
2-1	Б(60), Мн(3), К(30), Г(7)			8,0	74,6	3,6	5,97	0,29	6,3	10,14			20,7
1-0,5	Б(40), Мн(3), К(50), Г(7)			7,06	78,1	3,2	5,51	0,22	5,9	7,69			24,4
0,5-0,25	Б(30), К(60), Г+М(10), Мн(зн)			14,3	78,5	2,8	11,22	0,40	11,9	13,99			28,0
0,25-0,1	Б(10), К(70), Г+М(20), Мн(зн)			15,46	78,0	2,9	12,06	0,45	12,8	15,73			27,0
0,1-0,05	Б(5), К(75), Г+М(20), Мн(зн)			4,5	74,5	3,0	3,35	0,13	3,5	4,55			24,8
0,05-0,01	К(70), Г(80), М(5), Кв(5)			29,12	78,6	2,6	22,89	0,76	24,3	26,57			30,2
0,01-0,001	К(70), Г(25), М(сл), Кв(5)			8,31	78,3	2,4	6,51	0,20	6,9	6,99			32,6
<0,001	К(30), Г+М(30), Кв(40)			8,29	52,3	2,8	4,34	0,23	4,6	8,04			18,7

Примечание. Кв - кварц; Шш - полевой шпат; Пш - пироксен; Ам - амфибол; Кб - карбонат; ГО - гидроксиды железа; Мн - марганцевые образования; К - калинит; Г - гидрослюда; М - монтмориллонит; Б - гетит-кварцевые обоживины; (сл) - следы; (зн) - знаки.

гранулометрического класса 2 мм. В результате отмучивания тонких фракций в воде породы теряют 13,6% бора и 4,5% бериллия.

Переотложенные породы коры выветривания данного участка обогащены кварц-гетитовыми бобовинами от 10 до 1 мм в диаметре, а также каолинитом низкой степени совершенства кристаллической структуры. Гидрослюда и монтмориллонит в переотложенных породах играют несущественную роль. Крупные фракции сложены преимущественно кварц-гетитовыми бобовинами и каолинитом. По мере уменьшения размерности фракций в них возрастает роль гидрослюда и монтмориллонита. В самой тонкой фракции увеличивается количество кварца (40%), монтмориллонита и гидрослюда (30%), уменьшается, в сравнении с более крупными составляющими, роль каолинита (30%). Содержание бора в переотложенных продуктах в среднем составляет 83 г/т, бериллия 2,7 г/т, что значительно превышает эти значения для пород несмещенной коры. Бор по всем гранулометрическим классам распределен равномерно (74–78 г/т), и лишь во фракции < 0,001 мм содержание его несколько падает (52,3 г/т). Для бериллия наблюдается отчетливая тенденция уменьшения содержания от крупных фракций к мелким, т.е. такая же, как в породах несмещенной коры выветривания.

К о р а в ы в е т р и в а н и я а м ф и б о л и т о в изучена на двух участках – Пуртихинском и Бехтемирском. На Пуртихинском участке исходными породами служат мелкозернистые милонитизированные темносерые амфиболово-полевошпатовые метасоматические образования, незначительно карбонатизированные по трещинам и иногда обогащенные сфеном. Полевой шпат представлен кислым плагиоклазом, чаще всего с гидрослюдами, амфибол – эденитом, незначительно хлоритизированным. В сложении пород амфибол преобладает над плагиоклазом, кварц находится в резко подчиненном количестве (не более 3–5%). В прожилках вместе с кальцитом нередко наблюдается клиноцоизит.

Среднее содержание бора в амфиболитах составляет 20 г/т, бериллий при чувствительности анализа 1 г/т не обнаружен. Химический состав амфиболитов представлен в таблице 5.

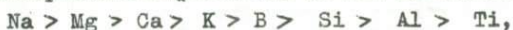
Начальные стадии выветривания амфиболитов характеризуются бурным образованием магниевого монтмориллонита по эдениту и гидрослюд совместно с кальцитом – по плагиоклазу. Плотность по-

род падает с 2,86 (исходные) до 2,30 г/см³. Породы теряют 25 % бора, из них интенсивно выносятся калий (90%) и натрий (60%). Убывающий ряд подвижности порообразующих элементов и бора для зоны дезинтеграции выглядит следующим образом:



При этом накапливается: $Mg > Fe, Ti$.

В результате дальнейшего выветривания породы почти полностью превращаются в каолинит-монтмориллонитовые глины с реликтовыми полевым шпатом и амфиболом, прослеживаемыми почти до самого верха профиля выветривания, но играющими резко подчиненную роль в сложении пород. Рентгеноструктурный анализ устанавливает довольно высокую степень порядочности кристаллической структуры монтмориллонита. В зоне глин иногда наблюдается доломитизация, ожелезнение и участками образование марганцевых соединений. Содержание бора в зоне глин уменьшается почти в три раза по сравнению с исходными породами. В результате полного выветривания амфиболитов из них выносятся:

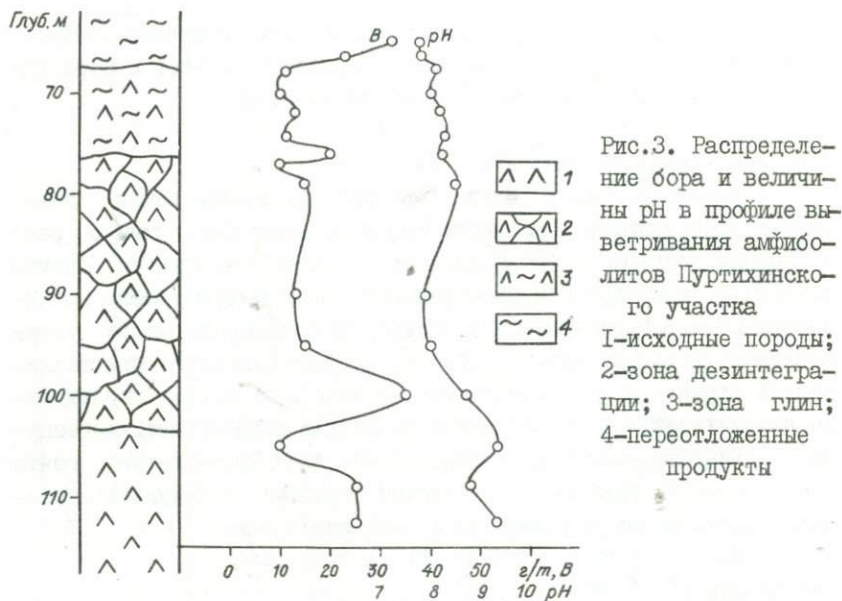


накапливается Fe .

Таким образом, бор в коре выветривания амфиболитов выносится по всему профилю, и чем выше степень измененности пород, тем больше вынос бора. Следует отметить, однако, что в нижней части зоны дезинтеграции содержание бора является самым высоким во всем разрезе (рис.3). В целом для коры выветривания бор в ряду подвижности элементов занимает промежуточное место между активно выносимыми и слабоподвижными.

В гранулометрических фракциях, с уменьшением их размерности, наблюдается постепенное понижение содержаний бора (табл.6). Это, по-видимому, связано с вымыванием его из тонких частиц в процессе отмучивания мелких фракций, когда породы потеряли 10% элемента. На долю крупных классов (более 0,5 мм) приходится половина всего бора породы, в тонких фракциях (менее 0,05 мм) обнаружено лишь около 9% валового бора.

В частично перемещенных продуктах коры выветривания амфиболитов Пуртихинского участка, имеющих близкий минеральный и гранулометрический состав к породам несмещенной коры, наблюдается повышение содержания бора. Бериллий в них не обнаружен.



В гранулометрических классах количество бора возрастает к тонким фракциям и достигает максимума в глинистых составляющих (0,01–0,001 и < 0,001). Это, по-видимому, свидетельствует о сорбции элемента в процессе переотложения глинистых пород коры выветривания на данном участке.

Исходными породами на Бехтемирском участке служат мелкозернистые кварц-полевошпатово-амфиболовые метасоматические образования. Главными породообразующими компонентами являются эденит (~60%), кварц (~25%) и кислый плагиоклаз (~15%). Иногда породы несут обильную гранатовую минерализацию. Эденит и гранат нередко хлоритизированы. Среднее содержание бора и бериллия в амфиболитах составляет 20 и 0,6 г/т (табл. 7).

Начальные стадии выветривания вызывают бурное образование гидрослюда и монтмориллонита по амфиболам и плагиоклазам. Каолинит играет резко подчиненную роль. Ряд подвижности породообразующих и малых элементов в зоне дезинтеграции амфиболитов

Т а б л и ц а 6

Минеральный состав и содержание бора в гранулометрических фракциях пород
коры выветривания амфиболитов Пуртихинского участка

Фракции, мм	Минеральный состав	Содержание бора в породе, г/т	Кол-во фракции, %	Содерж. бора во фракциях, г/т	Кол-во бора в породе за счет фр.		Обнаружено в породе относит. общего содерж., %
					г/т	%	
З о н а г л и н (4 пробы)							
>2	A+Пшл(60), K+M+Г(40), Д+ГО(зн)	17,3	16,03	14,0	2,24	12,9	89,9
2-1	A+Пшл(50), K+M+Г(50), Д+ГО+Mн(зн)		21,90	16,7	3,66	21,1	
1-0,5	A+Пшл(40), K+M+Г(55), Kв+ГО+Д+Mн(5)		17,93	16,7	2,99	17,3	
0,5-0,25	A+Пшл(30), K+M+Г(65), Kв+ГО+Д+Mн(5)		16,23	16,3	2,64	15,3	
0,25-0,1	A+Пшл(20), K+M(75), Kв+ГО+Д(5)Mн(зн)		11,77	15,0	1,77	10,2	
0,1-0,05	A+Пшл(20), M+K(75)Kв+ГО(5), Mн+Д(зн)		4,80	15,0	0,72	4,2	
0,05-0,01	A+Пшл(5)M+K(90)Kв+Г(5), Д(сл)		8,94	14,0	1,25	7,2	
0,01-0,001	M+K(95), A+Пшл+Kв+Г+ГО(5), Д(сл)		1,73	13,3	0,23	1,3	
<0,001	M(90), K(10), Д+A+Г(сл)		0,65	11,0	0,07	0,4	
П р о д у к т ы п е р е о т л о ж е н и я (2 пробы)							
>2	A(60), K+Г+M(40), Mн+ГО+Пшл(зн)	28,5	12,15	20,0	2,43	8,5	88,1
2-1	A(40), K+Г+M(60), Mн+ГО+Пшл(зн)		15,40	23,0	3,54	12,4	
1-0,5	A(35), M+K+Г(62), Mн+ГО+Пшл(зн)		11,95	25,5	3,05	10,7	
0,5-0,25	A(10), M+K+Г(85), M+ГО(5), Kв(зн)		14,20	26,5	3,76	13,2	
0,25-0,1	A(10), M+K+Г(85), M+ГО(5), Kв(зн)		15,05	26,0	3,91	13,7	
0,1-0,05	M+K+Г(90), A+Mн+ГО(10), Kв(зн)		9,20	27,0	2,48	8,7	
0,05-0,01	M+K+Г(95), A+Mн+ГО(5), Kв(зн)		14,0	25,5	3,57	12,5	
0,01-0,001	M(90), K+Г+A(10), Kв(сл)		7,15	28,5	2,04	7,2	
<0,001	M(95), K+Г+A+Kв(5)		0,9	38,5	0,35	1,2	

Примечание. А - амфибол, Пшл - полевой шпат, Kв - кварц, K - каолинит, M - монтмориллонит, Г - гидрослюда, ГО - гидроокислы железа, Mн - гидроокислы марганца, Д - доломит.
В скобках приведено примерное количество минерала в % (сл) - следы, (зн) - знаки.

Таблица 7

Химический состав пород коры выветривания амфиболитов Бехтемирского участка

n	d	pH	В	Ве	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	SiO ₂		
																	Al ₂ O ₃	Ве	
3	2,96	9,13	20,0	0,6	50,83	16,05	11,85	Исходные породы									3,2	32,8	
			0,059	0,0018	1504,0	475,0	350,0	284,0	35,0	167,0	4,7	52,7	254,0	71,0	10,6	5,6			73,0
4	2,4	7,9	26,0	3,4	45,87	21,06	7,84	Зона дезинтеграции									2,2	7,6	
			0,0624	0,0062	1101,0	505,0	188,0	27,0	158,0	65,0	2,6	17,3	219,0	57,6	7,9	37,0			159,0
9	1,68	7,35	26,0	1,9	46,33	23,55	9,12	Зона глин									2,0	13,7	
			0,0437	0,0032	778,0	396,0	153,0	1,0	152,0	29,7	3,0	14,9	86,5	13,8	4,4	37,6			200,0
13	1,9	7,5	26,0	2,36	46,19	22,78	8,73	Кора выветривания в целом									2,0	11,0	
			0,0494	0,0045	878,0	433,0	166,0	7,4	157,0	39,0	3,0	16,0	121	25	5,3	38,6			196,0
6	1,57	6,54	25,0	3,1	40,88	27,97	12,89	Переотложенные породы									1,5	8,0	
			0,039	0,0049	642,0	439,0	202,0	1,7	200,0	12,0	2,4	20,4	13,3	0,9	2,2	31,0			230,0
			0,80	1,09	0,73	1,0	1,22	0,23	1,27	0,31	0,8	1,28	0,11	0,04	0,42	0,8	1,2		

Примечание см. табл. I, с. 96.

данного участка резко отличается от схемы их поведения в коре выветривания аналогичных пород Пуртихинской площади.

Вносятся: $Ti > Mg > Fe > Mn > Si > K > Na > Ca$,
накапливаются: $Be > B > Al$.

По мере дальнейшего выветривания в породах начинают доминировать монтмориллонит и каолинит, имеющие низкую степень совершенства структуры. Рентгеноструктурные исследования устанавливают два вида монтмориллонита – натровый и магниевый-кальциевый. Реликтовые амфибол, плагиоклаз и кварц имеют резко подчиненное значение. Уменьшается роль гидрослюда. Плотность пород падает с 2,96 (исходные) и 2,4 (зона дезинтеграции) до 1,68 г/см³.

Из зоны глин выносятся:

$Mg > Na > Ti > Ca > K > Fe > Si > Mn > B > Al$,
накапливается Be .

Анализ данных табл.7 и рядов подвижности элементов показывает, что ни бор, ни бериллий не испытывают активного выноса из коры выветривания амфиболитов. Оба элемента распределены в профиле неравномерно и максимальных содержаний достигают в зоне дезинтеграции (рис.4). Увеличение содержания бора в этой зоне обусловлено, скорее всего, привнесением его из вышележащих горизонтов коры выветривания и накоплением в новообразованных глинистых минералах, среди которых существенную роль играет гидрослюда, занимающая среди сорбентов бора первое место [II]. В целом из коры выветривания амфиболитов Бехтемирского участка выносятся 16% бора (на Пуртихинском участке – 44%).

Очень высокие коэффициенты концентрации бериллия в зоне дезинтеграции ($K=5,67$) и в зоне глин ($K=1,78$) не могут быть удовлетворительно объяснены одним лишь перераспределением его в коре выветривания. По-видимому, существовал какой-то внешний источник обогащения бериллием пород профиля выветривания (например, проникающие сверху растворы с повышенным содержанием бериллия). Вполне возможно, что причиной увеличения общего его содержания в выветрелых продуктах является неравномерное распределение в вертикальном разрезе исходных амфиболитов.

В гранулометрических фракциях нижних горизонтов коры выветривания амфиболитов наблюдается увеличение содержаний бериллия и уменьшение содержаний бора в сторону мелких фракций.

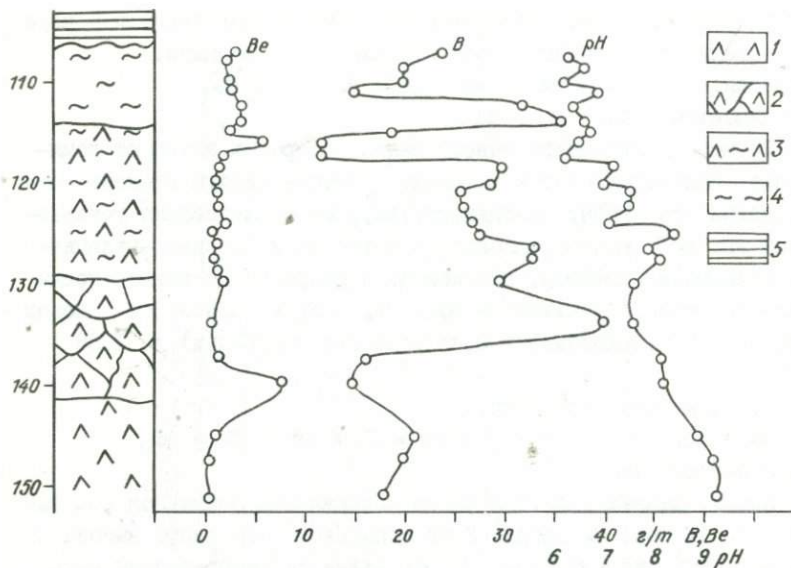


Рис.4. Распределение бора и бериллия в коре выветривания амфиболитов Бехтемирского участка.

1 - амфиболиты; 2 - зона дезинтеграции; 3 - зона глин; 4 - перепреотложенные продукты; 5 - рыхлые отложения.

В этом же направлении происходит увеличение количества глинистых минералов во фракциях (табл.8).

В гранулометрических классах пород верхней зоны бор и бериллий распределены более равномерно. При отмучивании тонких частиц выветрелые образования теряют 20% (в зоне дезинтеграции), 36% (в нижней части каолиновой зоны) и 48% (в верхней части профиля) бора. Эти потери, скорее всего, происходят за счет вымывания бора преимущественно из тонких фракций.

В перепреотложенных продуктах коры выветривания амфиболитов бор распределен по гранулометрическим составляющим подобным же образом. При выделении тонких частиц в водной среде перепреотложен-

Таблица 8

Минеральный состав и содержание бора и бериллия в granulометрических фракциях пород коры выветривания амфиболитов Бехтемперского участка

Фракция	Минеральный состав	Содержание в породе		Кол-во фракций, %	Содерж. во фракции		Кол-во в породе за счет фракций		Обнаружено во фракциях относительно общего содержания		В/Ве
		В, г/т	Ве, г/т		В, г/т	Ве, г/т	В, %	Ве, %	В, %	Ве, %	
Зона дезинтеграции (2 пробы)											
>2 мм	A(60), Кв+III(39), К+М+Г+Хл(I), Р+(зн)	26,0	2,4	16,05	27,5	2,1	4,41	0,34	17,0	14,2	12,9
2-1	A(60), Кв+III(38), К+М+Г+Хл(2), Р(зн)			28,45	23,0	2,2	6,54	0,53	25,2	26,3	10,5
1-0,5	A(60), Кв+III(35), К+М+Г+Хл(5), Р(зн)			14,4	20,0	2,4	2,88	0,35	11,1	14,6	8,4
0,5-0,25	A(60), Кв+III(35), К+М+Г+Хл(5), Р+(зн)			7,15	20,0	2,4	3,43	0,36	13,2	15,6	9,7
0,25-0,1	A(40), Кв+III(20), К+М+Г+Хл(40), Р+(зн)			10,0	18,0	2,7	1,50	0,27	6,9	11,3	6,2
0,1-0,05	A(30), Кв+III(20), К+М+Г(50), Р+(зн)			4,15	18,0	2,6	0,65	0,11	2,5	4,2	4,6
0,05-0,01	К+М+Г(90), А, Кв+III(10)			7,05	12,0	2,6	0,85	0,18	3,4	7,5	4,6
0,01-0,001	К+М+Г(99), А(с), Кв+III(с)			2,45	12,0	2,6	0,29	0,06	1,1	2,5	4,6
<0,001	K(65), M(35), Г(с)			0,3	13,0	2,4	0,04	0,01	0,2	0,4	5,4
Нижняя зона коры выветривания (7 проб)											
>2 мм	A+III(50), К+М(50), Кв(зн)	26,0	1,96	1,25	24,5	1,76	0,31	0,02	1,02	1,02	13,9
2-1	A+III(20), К+М(30), Кв(10), Mn(40)			2,90	22,2	1,83	0,65	0,05	2,55	2,6	12,1
1-0,5	A+III(10), К+М(50), Кв(10), Mn(30)			3,61	20,7	1,90	0,75	0,07	3,57	3,5	10,9
0,5-0,25	A(10), К+М(70), Кв+Mn+Г(20)			12,64	20,5	1,70	2,60	0,21	10,71	10,7	12,1
0,25-0,1	К+М(90), Кв+А+Mn+Г(10)			17,50	19,5	1,75	3,42	0,30	15,3	15,3	11,1
0,1-0,05	К+М(95), Кв+А+Mn+Г(5)			8,50	17,00	1,80	1,45	0,15	7,85	7,7	9,4
0,05-0,01	K(50), M(50), Кв(с)			19,80	15,00	1,95	3,00	0,38	19,39	19,4	9,7
0,01-0,001	K(50), M(50), Кв(с)			31,80	13,00	2,30	4,14	0,73	37,24	37,2	5,7
<0,001	K(50), M(50), Кв(с)			2,00	13,00	2,45	0,30	0,04	2,04	2,00	5,3
Верхняя зона коры выветривания (5 проб)											
>2 мм	Mn(99), K(I), Кв(зн)	19,0	1,3	1,12	8,28	1,48	0,093	0,017	70,5	1,3	51,9
2-1	Mn(50), K+Г(50), Кв(зн)			1,3	10,80	1,43	0,140	0,019	90,7	1,15	12,9
1-0,5	Mn(40), K+Г(60), Кв+Г(зн)			0,76	14,00	1,56	0,106	0,012	0,6	0,8	8,9
0,5-0,25	Mn(9), K+Г(90), Кв+Г(1)			1,80	14,20	1,32	0,256	0,024	1,4	1,9	10,8
0,25-0,1	Mn(3), K+Г(95), Кв+Г(2)			4,60	13,2	1,36	0,607	0,063	3,2	4,9	9,7
0,1-0,05	Mn(1), K+Г(97), Кв+Г(2)			3,66	11,06	1,00	0,406	0,037	2,1	2,9	11,3
0,05-0,01	K(60), Г(40), Кв(5)			18,25	9,12	1,10	5,655	0,201	2,8	13,9	10,3
0,01-0,001	K(90), Г(10), Кв(с)			5,97	9,8	1,20	5,617	0,688	29,6	53,1	8,2
<0,001	K(90), Г(10), Кв(с)			11,00	8,64	1,30	0,950	0,143	5,0	11,0	6,5
Переотложенные продукты (4 пробы)											
>2 мм	К+М+Г(60), Г(20), Mn+Кв(40)	24,0	-	3,57	15,0	-	0,54	-	-	-	41,4
2-1	К+М+Г(90), Г(10), Mn+Кв(10)			1,52	19,3	-	0,30	-	-	-	-
1-0,5	К+М+Г(70), Г(30), Mn+Кв(30)			2,20	17,3	-	0,20	-	-	-	-
0,5-0,25	К+М+Г(80), Г(20), Mn+Кв(зн)			2,20	17,3	-	0,39	-	-	-	-
0,25-0,1	К+М+Г(90), Г(10), Mn+Кв(зн)			5,15	15,0	-	0,77	-	-	-	-
0,1-0,05	К+М+Г(95), Г(5), Mn+Кв(зн)			3,10	12,0	-	0,37	-	-	-	-
0,05-0,01	К+М+Г(95), Г(1), Кв(4), III(с)			19,15	9,0	-	1,72	-	-	-	-
0,01-0,001	K(85), M+Г+Г(15), III(с)			5,86	12,0	-	4,05	-	-	-	-
<0,001	K(80), M+Г(20), Кв(с)			13,02	12,0	-	1,56	-	-	-	-

Примечание. Кв - кварц, III - полевой шпат, А - амфибол, Р - рудный, К - каолинит, Г - гидроксид, М - монтмориллонит, Г(О) - гидроксиды железа, Mn - марганцевые соединения, Зп - эпидот, Хл - хлорит.

ные породы потеряли около 50% бора (бериллий в их не определялся).

Таким образом, поведение бора и бериллия в корях выветривания амфиболитов Пуртихинского и Бехтемирского участков существенно отличаются. Ясно выраженное отличие этих двух профилей проявляется и в поведении порообразующих компонентов. Ряд подвижности элементов Пуртихинского разреза в целом для коры выветривания выглядит следующим образом:

Вносятся: $K > Na > Ca > B > Mg > Si > Al$;

накапливается: Fe. Для Ti $K=I$

Несколько иной порядок выноса элементов в коре выветривания Бехтемирского участка:

вносятся: $Mg > Ti > Na > Fe > Ca > K > Si > Mn > B > Al$.

Рентгеноструктурными исследованиями (аналитик Э.П.Солотчина) пород начальных стадий выветривания амфиболитов Бехтемирской площади установлен слоистый силикат с $d_{001}=13,3\text{Å}$ (рис.5, I-a).

При обработке образца этиленгликолем на рентгенограмме регистрируются два рефлекса с $d=17,3\text{Å}$ и $14,3\text{Å}$ (рис.5, I-б). После отжига образца в течение 1 часа при 500°C оба рефлекса сдвигаются до $9,6\text{Å}$ (рис.5, I-в). Полученные результаты указывают на то, что доминирующая фаза с $d_{001}=14,3\text{Å}$ принадлежит минералу вермикулитового типа, вторая ($d_{001}=17,3\text{Å}$) – монтмориллониту.

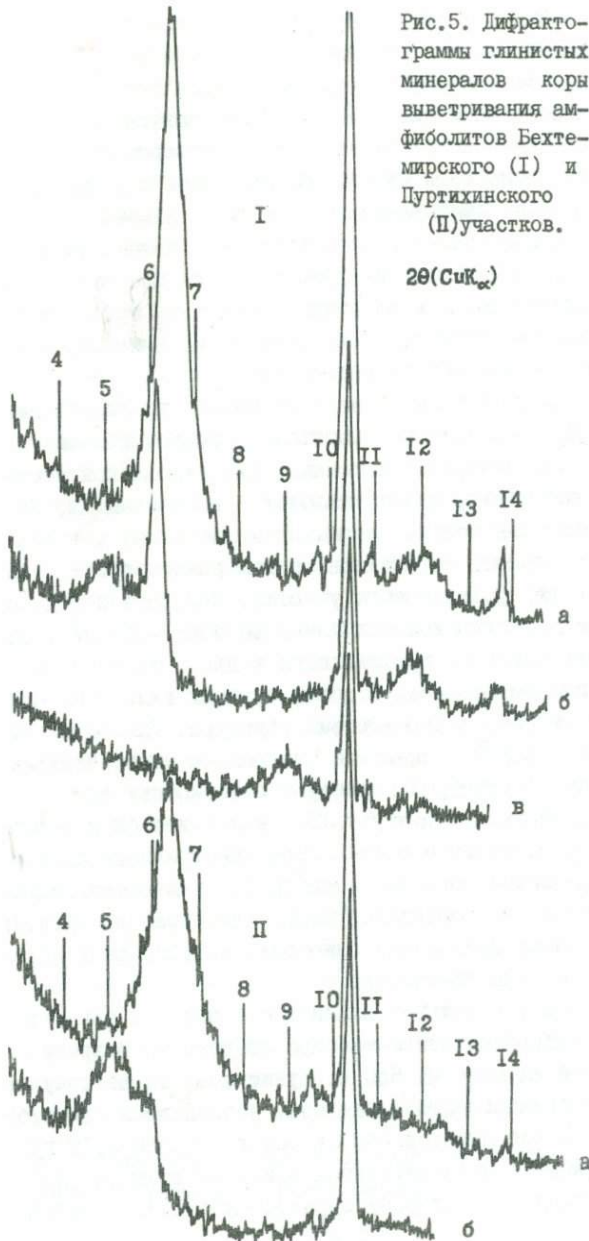
В образцах из зоны дезинтеграции коры выветривания Пуртихинского участка на дифрактограмме появляется рефлекс, соответствующий глинистому минералу с $d_{001}=13,8\text{Å}$ (рис.5, II-a). Напитка образца этиленгликолем вызывает появление двух фаз: с $d=16,8\text{Å}$ и $d=14,3\text{Å}$ (рис.5, II-б). Первая, резко доминирующая, соответствует монтмориллониту, вторая – минералу вермикулитового типа.

По-видимому, различие поведения бора в разрезах двух описанных участков следует объяснить образованием различных глинистых минералов в корях выветривания, где исходными породами являются близкие по составу амфиболиты. Накопление бора в зоне дезинтеграции Бехтемирского профиля обязано предпочтительному развитию глинистых минералов гидрослюдистого типа, сорбирующих бор охотнее, чем монтмориллонит, каолинит и другие слоистые новообразования кор выветривания.

По существующим представлениям [6,9], для образования минералов группы монтмориллонита требуется сохранение Ca, Mg и Fe^{2+}

Рис.5. Дифрактограммы глинистых минералов корн выветривания амфиболитов Бехтемирского (I) и Цуртихинского (II) участков.

$2\theta(\text{CuK}\alpha)$



в системе. Именно это условие выполняется для зоны дезинтеграции профиля выветривания пуртихинских амфиболитов, где $K_{Mg} = 1,12$, $K_{Ca} = 0,85$, $K_{Fe} = 2+1,03$. Образованию минералов группы иллита способствует сохранение ионов К и Са. Этим условиям больше соответствует обстановка зоны дезинтеграции Бехтемирского профиля.

В породах зоны глин Пуртихинского разреза доминирующее положение среди новообразованных минералов занимают монтмориллонит низкой степени совершенства структуры и каолинит, также несовершенный. Подчиненная роль принадлежит гидрослюде, гетиту и марганцевым соединениям, в небольших количествах присутствует доломит. Существенное значение имеют реликтовые минералы — амфибол, полевой шпат и в меньшей степени кварц.

На Бехтемирской площади верхние зоны коры выветривания сложены в основном каолинитом, пропитанным гидроокислами железа, а также агрегатами минералов марганца. Гидрослюда присутствует в небольших количествах, монтмориллонит — в исчезающих. Из реликтовых остается один только кварц. Иными словами, степень, выветрелости пород верхних горизонтов Бехтемирского профиля гораздо выше, чем в коре Пуртихинского участка. Исходные породы обоих разрезов содержат одинаковые количества бора — 20 г/т. Однако, в зоне глин Бехтемирского профиля бора в два с лишним раза больше, чем в Пуртихинском разрезе. В обоих случаях глинистые минералы имеют низкую степень совершенства структуры. Как показано Д.Г.Порренгой [21,22], глинистые минералы с неупорядоченной кристаллической структурой сорбируют бор охотнее чем минералы, имеющие упорядоченную структуру. Это как будто бы находится в противоречии с поведением бора в коре выветривания амфиболитов описываемых разрезов. Однако, повышенные количества гидроокислов железа, являющихся хорошими ловушками для бора, в бехтемирском разрезе могут объяснить увеличение содержания бора в породах коры выветривания данного участка.

К о р а в ы в е т р и в а н и я н а д у н и т а х Белининского гипербазитового массива изучена по разрезу скважины, пробуренной на глубину 650 м. Дуниты, слабо затронутые серпентинизацией прожилкового характера, наблюдаются до глубины 350 м. Удельный вес дунитов составляет в среднем $3,12 \text{ г/см}^3$. Сложены они оливином с незначительной примесью хромшпинели и ромбического пироксена, по которому образуется бастит. Содержание бо-

ра в них составляет 14 г/т. Бериллий не обнаружен.

С глубины 500 м дуниты интенсивно серпентинизированы, трещиноваты. Оливин сохраняется лишь отдельными дробленными зернами. Основным минералом является лизардит, реже - хризотил. Присутствуют тальк, магнезит, следы пирроаурита. Вверх по разрезу количество пирроаурита в общем возрастает, хотя встречаются участки, где он не обнаруживается. Разделение данного профиля на зоны значительно затруднено из-за неравномерного распределения новообразованных минералов в вертикальном разрезе. Так, слабо измененный дунит с незначительно серпентинизированным оливином встречается на глубине 44 м, хотя ниже этого уровня отмечаются участки полной серпентинизации, не содержащие никаких признаков оливина, но существенно минерализованные монтмориллонитом, магнезитом и пирроауритом^ж. В образцах, отобранных на глубинах 340 и 65 м пирроаурит является основным породообразующим минералом. В качестве второстепенных присутствуют магнезит, тальк, цеолиты, и в более высоких горизонтах - монтмориллонит, образование которого впервые отмечается на глубине 65 м. Верхние горизонты разреза (начиная с глубины около 35 м) сложены кварцем, халцедоном, монтмориллонитом и гетитом с примесью реликтовых оливина, серпентина и хромшпинели. В зоне трещиноватых серпентинитов, которые нами условно в данном разрезе отнесены к зоне дезинтеграции, плотность пород падает до 2,53 г/см³, рН водной вытяжки составляет 9,15 против 10,3 в исходных дунитах. Содержание бора незначительно понижается (13 г/т) и коэффициент его концентрации составляет 0,75. В зоне выщелоченных серпентинитов, претерпевших значительную монтмориллонитизацию, рН суспензий становится еще ниже - 8,3, плотность - 2,33 г/см³. Содержание бора возрастает до 25 г/т (K=1,32).

Породы, содержащие повышенные количества пирроаурита, несколько обеднены бором - 8 г/т (6 анализов).

На этом же участке в соседних скважинах вскрыты небольшой мощности нонтрониты и охры, в составе которых существенная роль принадлежит гематиту, магнетиту и маггемиту, являющемуся продуктом окисления магнетита в поверхностных условиях [18]. С глу-

^ж Пирроаурит определен Т.А. Корневой методом термического анализа на дериватографе венгерской фирмы MOM.

бины 40 м в соседней скважине отобраны структурные сыпучие нонтронитовые глины, содержание бора в которых составляет 130 г/т. Две пробы структурных охр из другой скважины, отобранные на глубине около 100 м, содержат 75 и 175 г/т бора.

Увеличение содержаний бора в верхних частях коры выветривания данного района, по-видимому, следует отнести за счет просачивавшихся сверху растворов, содержавших бор, который мог быть сорбирован новообразованными глинистыми минералами, в основном нонтронитом, обладающим высокой сорбционной емкостью.

В целом в описываемом разрезе $K_B = 0,84$ (без учета зоны охр и нонтронитов, где его содержание увеличивается на порядок). В геохимическом ряду подвижности элементов он занимает положение среди наименее подвижных:

$Mg > Ca > Si > Ni > Zn > Fe > Cr > B > Al > Mn > Co > Ti.$ ^{*}

В коре выветривания литокристаллокластических туфов основного состава, изученных на Бехтемирском участке по разрезу скважины, поведение бора характеризуется резким выносом по всему профилю. Туфы, по-видимому, претерпели гидротермальную подготовку: обломки основного плагиоклаза и пироксена интенсивно хлоритизированы. Хлоритизации подверглась также основная масса породы. Кроме того, породы карбонатизированы (кальцит, доломит), а также существенно обогащены гидрослюдами.

Чрезвычайно неравномерное выветривание, обусловленное, по-видимому, не только гидротермальной и тектонической подготовкой, но и сменой литологического состава пород в вертикальном разрезе, не позволяет достаточно корректно выделить зоны коры выветривания. Поэтому зональность данного профиля определена нами с некоторой долей условности.

В общих чертах, выветривание туфовой толщи приводит к интенсивному образованию гидрослуд в нижней части разреза. Каолинит и монтмориллонит при этом играют резко подчиненную роль. Реликтовые минералы туфов сохраняются и принимают достаточно широкое участие в сложении пород. К верхам разреза увеличивается роль каолинита низкой степени совершенства кристаллической структуры и гетита, количество монтмориллонита уменьшается, и в самых верхних горизонтах он совсем исчезает. Гидрослюдам сохра-

ж Все данные, за исключением В, заимствованы у А.В.Манаевой [13].

няются по всему разрезу, но кверху количество их уменьшается.

Содержание бора колеблется в широких пределах (от 18 до 220 г/т). Исходные породы в среднем содержат 94,0 г/т бора и 0,7 г/т Be. В зоне дезинтеграции содержание бора снижается до 60 г/т ($K=0,5$). Бериллий в весовых количествах остается на том же уровне, что и в исходном субстрате, однако пересчет изообъемным методом показывает некоторый его вынос из зоны начального выветривания ($K=0,79$). Зона глин резко обедняется бором — 35,0 г/т ($K=0,2$), но самые верхние ее части в среднем содержат около 135 г/т бора. Увеличивается и количество бериллия (рис.6). По-видимому, просачивавшиеся сверху, из перекрывающей 60-метровой толщи рыхлых отложений воды, приносили с собой бор и бериллий в верхние горизонты коры выветривания, где они могли быть сорбированы гидрослюдами, гидроокислами железа и каолинитом. pH суспензий в профиле колеблется от 9,3 в низах разреза до 6,1 в верхних горизонтах. Связи содержаний B с величиной pH не отмечается. В верхах разреза заметна прямая зависимость содержаний Be от значения pH (рис.6).

В гранулометрических фракциях пород из различных горизонтов коры выветривания туфов отмечается увеличение содержаний бора с уменьшением размера частиц. На этом фоне, однако, наблюдаются отклонения в ту, или иную сторону, что обусловлено вариациями минерального состава фракций. Увеличение количеств гидрослюда, каолинита, монтмориллонита и гидроокислов железа вызывает повышение содержаний бора (табл.9).

Обсуждение результатов и заключение

Изучение кор выветривания Юго-Западного Салаира показывает, что бор в большинстве случаев накапливается в зоне начального изменения пород (дезинтеграции) и выносится из верхних (глинистых) горизонтов. Наряду с этим, существуют разрезы, где наблюдается резкое обогащение бором самых верхних горизонтов; это, по-видимому, объясняется приносом его в составе фильтрующихся растворов из перекрывающих рыхлых отложений в подстилающие горизонты, где он сорбируется или входит в структуру гли-

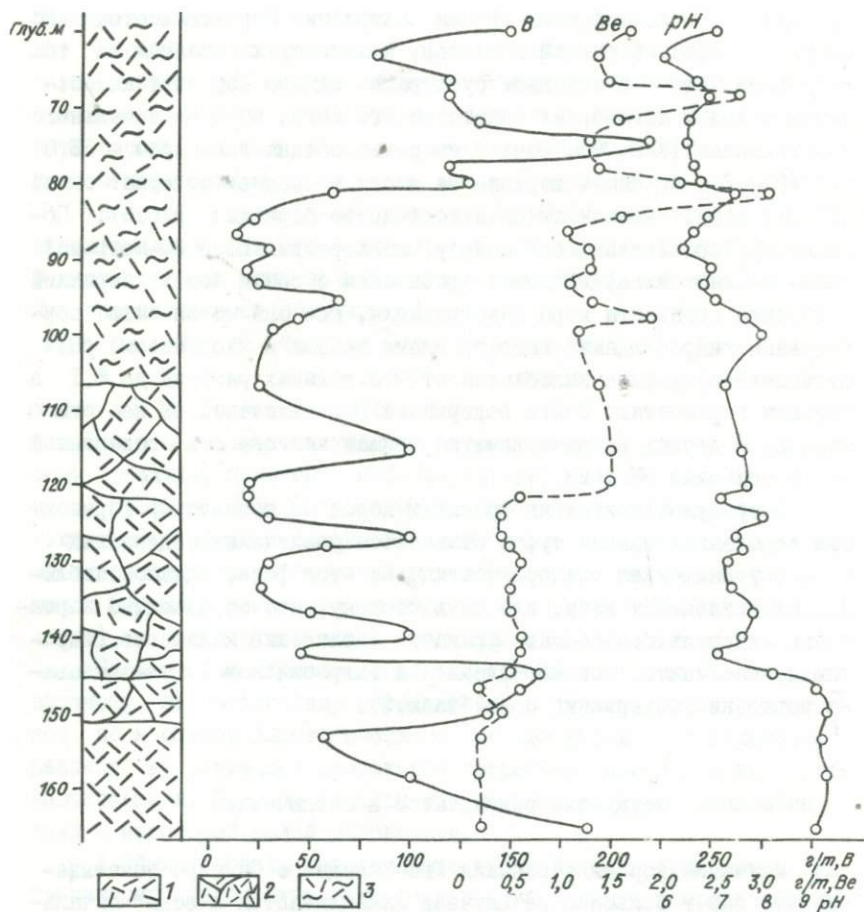


Рис.6. Распределение бора, бериллия в коре выветривания туфов основного состава

1-туфы; 2-зона дезинтеграции; 3-зона глин

Таблица 9

Распределение бора в гранулометрических фракциях пород коры выветривания туфов основного состава

Фракция, мм	Минеральный состав	Кол-во фракции, %	Содержание В в породе, г/т	Содержание В во фракции, г/т	Количество в породе за счет фракции		Обнаружено во фракц. отн. общ. содерж., %
					г/т	%	
Зона дезинтеграции (I проба)							
>2	Хл(50), Г(10), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(40)	15,0	140	44,0	6,6	4,71	85,2
2-1	Хл(50), Г(15), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(35)	5,6		60,0	3,4	2,43	
1-0,5	Хл(50), Г(20), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(30)	4,1		76,0	3,1	2,21	
0,5-0,25	Хл(50), Г(20), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(30)	6,3		76,0	4,8	3,43	
0,25-0,1	Хл(60), Г(20), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(20)	9,6		70,0	6,7	4,79	
0,1-0,05	Хл(70), Г(15), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(15)	5,9		140,0	8,3	5,93	
0,05-0,01	Хл(60), Г(20), Д+Кц+Шш+Пи+Кв(20)	25,6		180,0	46,1	33,14	
0,01-0,001	Хл(80), Г(5), Д+Кц+Г(15)	15,7		120,0	18,8	13,43	
<0,001	Хл(60), Г(40), Д+Кц+Г(сл)	12,2		180,0	22,0	15,71	
Нижняя часть каолиновой зоны (I проба)							
>2	Хл(50), М+Г(45), К+Д+Кц+Шш+Кв(5)	30,7	64	56,0	17,2	26,88	90,6
2-1	Хл(50), М+Г(45), К+Д+Кц+Шш+Кв(5)	5,5		58,0	3,2	5,0	
1-0,5	Хл(50), М+Г(45), К+Д+Кц+Шш+Кв(5)	3,1		50,0	1,6	2,50	
0,5-0,25	Хл(35), М+Г+К(60), Д+Кц+Шш+Кв(5)	5,4		72,0	3,9	6,09	
0,25-0,1	Хл(20), М+Г+К(75), Д+Кц+Шш+Кв(5)	15,3		60,0	9,2	14,38	
0,1-0,05	Хл(15), М+Г+К(80), Д+Кц+Шш+Кв(5)	11,4		62,0	7,1	11,09	
0,05-0,01	Хл(5), М+Г+К(90), Д+Кц+Шш+Кв(5)	25,0		52,0	13,0	20,31	
0,01-0,001	М(55), Г(40), К+Шш+Кв(5)	1,5		50,0	0,8	1,25	
<0,001	Г(80), К(10), М(10)	2,1		90,0	2,0	3,13	
Верхняя часть каолиновой зоны (I проба)							
>2	К(40), Г(20), Г(35), Кв(5)	1,0	170	110,0	1,1	0,65	58,1
2-1	К(50), Г(15), Г(25), Кв+Кб(5)	2,5		86,0	2,2	1,30	
1-0,5	К(50), Г(15), Г(30), Кв+Кб(5)	3,0		93,0	2,8	1,65	
0,5-0,25	К(50), Г(15), Г(20), Кв+Кб(5)	6,2		89,0	5,5	3,24	
0,25-0,1	К(55), Г(20), Г(20), Кв+Кб(5)	11,5		100,0	11,5	6,77	
0,1-0,05	К(55), Г(15), Г(25), Кв+Кб(5)	6,0		100,0	6,0	3,53	
0,05-0,01	К(65), Г(15), Г(15), Кв+Кб(5)	35,0		95,0	33,0	19,59	
0,01-0,001	К(55), Г(20), Г(20), Кв+Кб(5)	25,7		93,0	23,9	14,10	
<0,001	К(35), Г(35), Г(30)	9,5		130,0	12,4	7,30	

Примечание. Шш - полевые шпаты; Пи - пироксен; Кв - кварц; Хл - хлорит; Д - доломит; Кц - кальцит; Кб - карбонаты вообще;
Г - гидрослюда; К - каолинит; М - монтмориллонит; Г(О) - гидроксиды железа и марганца.

нистых минералов (главным образом каолинита и монтмориллонита) и гидроокислов железа.

Существование повышенных количеств бора в растворах подтверждено исследованиями [10,17]. К сожалению, оценить долю бора, приносимого растворами, или оставшегося от разложения исходных минералов и сорбированного глинистыми минералами, не представляется возможным.

В целом для корь выветривания региона наблюдается вынос бора ($K_B=0,73$) и накопление бериллия $K_{Be}=2,0$). Зона дезинтеграции в подавляющем большинстве случаев обогащена этими элементами ($K_B=1,2$, $K_{Be}=2,17$) относительно верхних горизонтов выветрелых образований. По нашему мнению, это происходит за счет приноса бора и бериллия растворами из верхних частей разрезов.

Анализ распределения бора и бериллия по гранулометрическим классам в целом показывает, что оба элемента стремятся сосредоточиться в более мелких фракциях, представленных главным образом каолинитом, монтмориллонитом, гидрослюдой и гидроокислами железа. Это находится в согласии с единодушным мнением о благоприятных сорбционных свойствах перечисленных минералов, первое место среди которых прочно занимает гидрослюда и гидроокислы железа. Существуют данные о том, что бор, сорбированный глинистыми минералами, удерживается настолько прочно, что содержание его не меняется даже при воздействии сильными десорбентами II, или при геологических процессах, влияющих на породы после их формирования [20]. Однако, при отмучивании тонких гранулометрических фракций в водной среде породы теряют нередко до 40% бора и более.

В связи с наблюдающимися высокими потерями бора в процессе отмучивания тонких фракций в водной среде (время отмучивания составляет 1,5–2 месяца) нами проделана серия опытов для более подробного рассмотрения этого вопроса. С этой целью ряд образцов из зоны глин корь выветривания оливинового габбро–норита и перестроженных продуктов этого же разреза был подвергнут промывке бидистиллятом.

Глинистые породы (вес проб 100–150 г) дробились, и после многократного квартования из них отбирались навески в 10 г, которые помещались в фарфоровые выпарительные чашки и заливались бидистиллированной водой комнатной температуры. После полного

оседания частиц пробы промывались повторно для удаления влаги, оставшейся от первой промывки. Затем вода сливалась, пробы высушивались при комнатных условиях и подвергались количественному спектральному анализу. Параллельно анализировались исходные пробы. Время опытов составляло 10–20 часов и зависело только от скорости оседания глинистых частиц.

Данные опыта показывают (табл. 10), что самое большое количество бора (28%) вынесено из перестроенных пород, где его валовое содержание составляет 130–135 г/т. Самыми низкими величинами вынесенного бора характеризуются породы верхних горизонтов зоны глин (1%), содержащих около 15 г/т бора. Породы нижней части этой же зоны в процессе промывки потеряли 17,4% элемента.

Таким образом, и в породах несмещенной коры и в перестроенных продуктах наблюдается прямая зависимость между валовым содержанием бора и его вынесенным количеством. Аналогичные результаты получены нами для кор выветривания Северного Казахстана, Украины и других районов. Для бериллия такая закономерность не прослеживается.

Содержание воднорастворимого бора в породах
коры выветривания оливинового габбро-норита

Т а б л и ц а 10

Зоны коры выветривания	Кол-во проб	Содержание В в породах (x), г/т	Вынесено бора би-стиллятом (\bar{x}_B)		x/ \bar{x}_B
			г/т	вес. %	
Нижние горизонты зоны глин	3	33,0	5,7	17,4	5,8
Верхние горизонты зоны глин	3	15,7	0,16	1,0	98,1
Нижняя часть перестроенных пород	5	74,3	11,1	14,9	6,7
Верхняя часть перестроенных пород	2	132,5	37,1	28,0	3,6

Что же собой представляет воднорастворимый ("подвижный") бор? Одним из его источников могут служить циркулирующие в корках выветривания растворы, концентрация бора в которых иногда

достигает существенных величин [1]. Высыхая, растворы оставляют бор в породе и при обычных геохимических анализах он участвует в валовом показателе. При промывке пород водой этот бор должен вновь перейти в раствор, если не полностью, то в основном своем количестве. С другой стороны, глинистые минералы с низкой степенью упорядоченности структуры более предпочтительны для замещений $\text{BO}_3\text{OH} - \text{SiO}_4$ и $\text{BO}_4 - \text{AlO}_4$, чем минералы с высокоупорядоченными структурами [19]. Неизвестно, однако, как прочно связан бор в неупорядоченных структурах. Тем не менее, существование ослабленных связей в неупорядоченных структурах дает основание полагать, что бор закреплен в них непрочно. По-видимому, какая-то часть его может быть вовлечена в раствор и вынесена из образцов при промывке их водой. Исследования А.Д.Народецкой с группой соавторов [14] показывают, что дополнительным источником подвижного бора являются рассеянные в породах микрокристаллы воднорастворимых боратов, а прочно фиксированный бор связан главным образом с глинистыми минералами.

На распределение бора в профилях выветривания решительное влияние оказывает состав минеральных новообразований. Примером могут служить коры выветривания амфиболитов Пуртихинского и Бехтемирского участков. В одном случае образование гидрослюд в нижних частях разреза способствует накоплению бора, а возникновение глинистых минералов с несовершенной кристаллической структурой при отсутствии гидрослуды в другом случае обуславливает вынос бора. Поэтому, с нашей точки зрения, было бы неправильным считать, что степень или характер изменения исходных пород не оказывают влияния на содержание бора в глинистых элювиальных образованиях кор выветривания [5].

Продукты ближнего сноса и частичного перемещения пород кор выветривания в большинстве случаев обогащены бором и бериллием. При этом не наблюдается существенной сортировки материала и обогащения пород глинистыми минералами. Следовательно, увеличение содержания микроэлементов в переотложенных продуктах должно быть связано их сорбции из вод бассейнов, в которых происходило перемещение пород кор выветривания.

Сравнение распределения бора и показателя $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (К1) в различных зонах изученных профилей выветривания показывает,

что обратная связь этих двух величин прослеживается лишь до зоны дезинтеграции. Выше она сменяется прямой зависимостью (рис.7). Это отличает коры выветривания данного региона от молодых кор открытого типа Красноярского края (см. статью в настоящем сборнике), где обратная взаимосвязь между содержаниями В и величиной К отмечалась по всему разрезу. Как было отмечено выше, кора выветривания Салаира прошла сложное формирование с наложением более поздних этапов. Это, несомненно, могло привести ко вторичному перераспределению бора и бериллия в профилях, образованию свободного глинозема и вторичных минералов кремния, что должно было бы повлечь за собой усложнение процессов разделения Al и Si, следовательно, исказить первоначальное взаимоотношение В и Ве с распределением кремнево-глиноземного модуля в корях выветривания.

Все сказанное выше позволяет сделать следующие выводы:

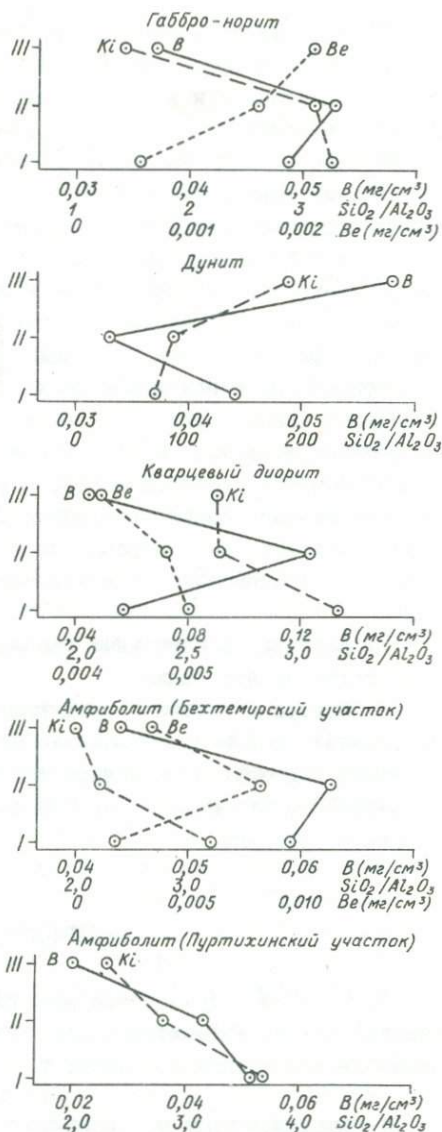


Рис.7. Распределение В, Ве и K_1 в различных зонах кор выветривания Юго-Зап.Салаира. I-исходные породы; II-зона дезинтеграция; III-зона глин

1. В профилях выветривания габбро-норитов, кварцевых диоритов и амфиболитов Бехтемирского участка бор накапливается в зоне дезинтеграции и выносится из зоны глин, а бериллий накапливается в обеих зонах. Во всех этих профилях в зоне начальных стадий выветривания наблюдается широкое образование гидрослюд, а в верхних горизонтах в основном каолинита и монтмориллонита с низкой степенью совершенства кристаллической структуры.

2. В коре выветривания дунитов, амфиболитов Пуртихинского участка и туфов основного состава уже на начальных стадиях гипергенного преобразования выносится 20-25% бора. В коре выветривания амфиболитов эта тенденция прослеживается до самых верхних горизонтов, тогда как в двух остальных профилях в верхних горизонтах наблюдается накопление бора, что объясняется скорее всего унаследованным неравномерным распределением бора в вертикальном разрезе исходных пород, а также возможным привнесом его просачивающимися сверху растворами. Такое распределение бора в профиле выветривания встречается редко, тем не менее возникновение ложных аномалий его в верхних зонах кор выветривания возможно.

3. Бериллий в изученных разрезах кор обычно накапливается в продуктах выветривания.

4. Содержания бора в продуктах переотложения показывают, что ближний снос и переотложение их происходило, по-видимому, в небольших водоемах с различным содержанием бора (различной соленостью), что может быть использовано при палеогеографических реконструкциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. БАРНС И. Образование кремнисто-карбонатных пород (лиственитов) из серпентинитов в Калифорнии, США.— В кн.: I Международный геохимический конгресс, т.П. М., "Наука", 1973, с.404-412.

2. БЕСХОДАРНОВ В.Н., КОЖНЕВ Н.С. Новые данные о коре выветривания на ультраосновных породах Алтайского края.— В кн.: Кора выветривания. Вып.5, М., Изд-во АН СССР, 1963, с.309-314.

3. ВИНОГРАДОВ А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.- "Геохимия", 1962, № 4, с.3-9.

4. ГИНЗБУРГ И.И., КАЦ А.А., КОРИН И.З., ПОПКОВ В.Ф., САВЕЛЬЕВ И.И., ТРУБИНА К.Н. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала, ч.1. Типы и морфология древней коры выветривания. Л., Изд-во АН СССР, 1946, 147 с. (Тр. Ин-та геологич. наук АН СССР).

5. ГОРБОВ А.Ф. Геохимия бора. М., Недра, 1976. 207 с.

6. ДИР У.А., ХАУИ Р.А., ЗУСМАН Дж. Породообразующие минералы. Т.3, М., Мир, 1966. 316 с.

7. ЗАВАРИЦКИЙ А.Н. Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1961. 479 с.

8. ИВАНИЯ Л.А., СУХАРИНА А.Н. Мезозойско-кайнозойские коры выветривания юго-востока Западной Сибири и их перспективы на бокситы.- В кн.: Коры выветривания и бокситы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1967, с.92-99.

9. КЕЛЛЕР У.Д. Основы химического выветривания.- В кн.: Геохимия литогенеза. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1963, с.85-196.

10. КРАЙНОВ С.Р. Геохимия редких элементов в подземных водах. М. Недра, 1973. 295с.

11. ЛУКАШЕВ К.И., КУЗНЕЦОВ В.А., ЛУКАШЕВ В.К. Геохимическое изучение земной коры. Минск, Наука и техника, 1977. 176с.

12. МАЛОЛЕТКО А.М. О возрасте коры выветривания Салаирского кряжа.- В кн.: Кора выветривания. Вып.5, М., Изд-во АН СССР, 1963, с.326-332.

13. МАНАЕВА А.В. Результаты определения степени подвижности элементов в коре выветривания серпентинитов Белининского массива.- В кн.: Вопросы географии Кузбасса и Горного Алтая. Вып.4, (т.2), Новосибирск, 1971, с.139-144.

14. НАРОДЕЦКАЯ А.Д., ДРОЗДОВИЧ Н.И., ПЕКУРОВСКАЯ С.Ф. Комплексный метод определения форм нахождения бора в горных породах. - В кн.: Методы анализа вещественного состава горных пород и вод при геохимических исследованиях. Минск, 1978, с.59-74.

15. ПУСТОВАЛОВ Л.В., СОКОЛОВА Е.И. Методы определения рН и в осадочных породах.- В кн.: Методы изучения осадочных пород, т.2, М., Госгеолтехиздат, 1957, с.116-127.

16. ФОМИЧЕВ В.Д., АЛЕКСЕЕВА Л.Э. Геологический очерк Са-
лаира. М., Госгеолтехиздат, 1961, 218 с.

17. ЧЕРНЯЕВ А.М., ЧЕРНЯЕВА Л.Е., БАБЧЕНКО В.Н. Гидрохимия
малых, редких и рассеянных элементов. Л., Гидрометиздат, 1970,
163 с.

18. Adetoye F. Maghemite in the Sydney duricrust.- "Amer.
Miner.", 1970, v 55, N 5-6, p.925-933.

19. Christ C.L. Substitution of Boron in Silicate Crystals.
- Geochemistry of Boron, by C.T.Walker, Benchmark Papers in
Geology, v.23, Stroudsburg, Pennsylvania, 1975, 244-249.

20. Frederikson A.F., and Reynolds R.C. How Measuring Pa-
leosalinity Aids Exploration.- "Oil Gas J.", 1960, v.58, p.154-
158.

21. Porrenga D.H. Clay Mineralogy and Geochemistry of Re-
cent Marine Sediments in Tropical Areas.- Geochemistry of Boron,
by C.T.Walker. Benchmark Papers in Geology, v.23, Stroudsburg,
Pennsilvania, 1975, p.283-306.

22. Porrenga D.H. Influence of grinding and heating of
layer silicates on boron sorption.- "Geochem. Cosmochem. Acta",
1967, v.31(3), p.309-312.

В.М.Гавшин, В.А.Бобров, Р.Г.Демина,
Л.М.Дорогиницкая

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА, ТОРИЯ И КАЛИЯ В МОРСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МЕЗОЗОЯ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

Мезозойские отложения Западно-Сибирской плиты - одного из
крупнейших осадочных бассейнов планеты - хорошо изучены в связи
с проблемами нефтегазоносности. Достаточно надежно аргументиро-
вано их стратиграфическое расчленение, доказано формирование
осадков преимущественно в условиях морского бассейна, исследо-
вана трансформация глинистых минералов по мере погружения оса-

дочных толщ, выведены оценки для содержаний основных порообразующих компонентов, органического углерода и некоторых микроэлементов в главнейших гранулометрических разностях осадочных пород [10, 11]. На этом фоне кажется особенно привлекательным рассмотреть распределение радиоактивных элементов, чтобы получить надежный материал для последующих глобальных сопоставлений.

Как показывает практика современной геохимии, оценка содержаний химических элементов в геологических телах в значительной мере зависит от качества аналитических данных и от способов их статистической обработки. До настоящего времени исследование распределения радиоактивных элементов в отложениях Западно-Сибирской плиты нашли отражение лишь в двух публикациях: в статье Л.П.Зуева, В.С.Кудрявцева [14] и в статье И.И.Плумана [23]. Обе эти работы основаны, главным образом, на результатах гамма-спектрометрического анализа, но не содержат характеристики качества аналитических данных. В 1976-77 гг. в лаборатории ядерно-геохимических методов анализа ИГиГ СО АН СССР, в сотрудничестве с лабораторией физических свойств СНИИГТимС, были выполнены новые гамма-спектрометрические определения радиоактивных элементов в пробах керна из скважин, пробуренных на месторождениях нефти и газа. Полученные результаты позволяют существенно уточнить и дополнить опубликованную ранее радиогеохимическую характеристику мезозойских отложений Западно-Сибирской плиты. Для того, чтобы аргументировать возможность сопоставления осадочных толщ, исследованных в разное время и разными способами, мы прежде всего рассмотрим основные принципы оценки качества анализов и обработки аналитических данных средствами математической статистики.

1. Стандартные образцы горных пород как основа для оценки качества анализов

Еще 20-25 лет тому назад геологи, как правило, "принимали на веру" аналитические данные, априори полагая, что результаты анализа характеризуют истинное содержание химического элемента в горной породе. Перелом в сознании геологов наметился после

выхода в свет в 1951 г. работы Ферберна и др., в которой опубликованы материалы, оказавшиеся, по мнению Д.М.Шоу [30] "самыми важными для геохимии и петрологии за последние сто лет". На примере классического силикатного анализа Ферберн и др. убедились в том, что определения химического состава одной и той же пробы, выполненные в разных лабораториях, не вполне согласуются между собой. Этот вывод был получен после того, как пробы гранита G-I и диабазы W-I были многократно проанализированы в авторитетных химических лабораториях разных стран. Поскольку о химическом составе этих проб было накоплено больше информации, чем о какой-либо другой горной породе, к ним стали относиться как к своего рода стандартам, пользуясь которыми можно сравнивать аналитические данные разных лабораторий.

Как только была осознана необходимость стандартизации геохимических исследований, стали появляться новые "стандартные образцы" в США и Канаде, ЮАР и Японии, в Скандинавии, Франции и ГДР; они быстро распространились по лабораториям всех стран и, хотя первые в мире геохимические стандарты в настоящее время уже израсходованы, дело стандартизации за 26 лет продвинулось настолько, что в 1977 г. вышел в свет первый номер специального журнала "Geostandards Newsletter". В одной из проблемных статей этого номера S. Abbeу [32] ставит под сомнение само понятие "стандартный образец", предупреждая от неправомерной аналогии с понятиями "стандартный метр" или "стандартный килограмм". Поскольку истинное содержание компонента в пробе (например, количество атомов в единице объема или массы) определить невозможно, "рекомендуемые" значения выводятся как среднее из данных, полученных разными способами в различных лабораториях. При этом французские исследователи, вычисляя среднее из всей совокупности чисел, отбрасывают затем все значения, отличающиеся от среднего более, чем на величину стандартного отклонения; рекомендуемые значения выводятся из оставшегося ряда чисел. В аналогичной процедуре японские исследователи пользуются удвоенным стандартным отклонением, а южноафриканские - утроенным. Скандинавские и канадские исследователи применяют своего рода "метод экспертных оценок", не исключая субъективного фактора в процессе выбора приемлемых данных. Нет единообразия и в терминологии: помимо "рекомендуемых" значений, можно встретить "гарантирован-

ные", "принятые", "предлагаемые" и т.д. [32]. Всего сказанного достаточно, чтобы оценить необходимую меру осторожности при употреблении "стандартных образцов", которые, однако, являются в настоящее время единственной опорой при сопоставлении анализов, выполненных в разных лабораториях.

Насколько затрудняются глобальные обобщения, если геохимические публикации не содержат результатов анализа стандартных образцов, можно показать на примере аттестации французских стандартов. В базальте ВВ лаборатория чехословацкой "Геоиндустрии" рентгенофлуоресцентным методом обнаруживает 1 г/т урана, а лаборатория Льежского университета нейтронно-активационным анализом - 3,15 г/т; в граните GN рентгенофлуоресцентный анализ Канадского центра исследования минералов дает 10 г/т урана, тогда как тем же методом в англо-американской исследовательской лаборатории ЮАР найдено 22 г/т. В том же граните "ядерными методами" в лаборатории университета Претории определяется 54,1 г/т тория, а рентгено-флуоресцентным методом в Бристольском университете - 155 г/т [35]. Во всех трех примерах выбраны крайние значения из ряда определений, но, по-видимому, в каждой из названных лабораторий анализируются не только стандартные образцы. Следовательно, и сейчас, через 27 лет после работы Ферберна и др., в публикациях могут оказаться результаты анализов, совершенно непригодные для каких-либо геохимических обобщений. Тем более трудно оценить качество аналитических данных, опубликованных до введения в практику стандартных образцов.

В 70-х годах появились стандартные образцы Института геохимии СО АН СССР и Сибирского филиала ВНИИФТРИ; они пока не все аттестованы на радиоактивные элементы, но обладают для нас тем существенным преимуществом перед международными стандартами, что их можно получить в количестве, достаточном для гамма-спектрометрического анализа.

2. Достоинства и недостатки наиболее распространенных способов определения радиоактивных элементов в горных породах

Имеющиеся в настоящее время сведения о распределении радиоактивных элементов в осадочных и магматических формациях Западной и Средней Сибири основаны, главным образом, на люминесцентном определении урана [17], колориметрическом — тория [13], рентгеноспектральном флуоресцентном — урана и тория [16], гамма-спектрометрическом — урана, тория и калия [5].

Люминесцентный метод определения урана привлекает исследователей высокой чувствительностью и удовлетворительной воспроизводимостью. Однако, в обычной процедуре люминесцентного анализа не предусматривается контроль за полнотой извлечения урана из раствора; возможно, в связи с этим обнаруживается тенденция к занижению концентраций урана при анализе стандартных образцов [9]; по-видимому, по этой же причине в статье И.И.Плумана [23] оценки содержания урана в отложениях Западно-Сибирской плиты, основанные на люминесцентном анализе, существенно ниже по сравнению с данными гамма-спектрометрии.

Колориметрический метод определения тория с арсеназо-III хорошо зарекомендовал себя в практике радиогеохимических исследований, но он слишком трудоемок, в связи с чем далеко не во всех пробах, проанализированных люминесцентным способом на уран, оказывается определенным и торий [29]; кроме того, колориметрический анализ уступает другим методам определения тория по чувствительности.

Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ, не имеющий себе равных по экспрессности, обладает недостаточной для радиогеохимических исследований чувствительностью. Так, в практике геологической экспедиции Мингео СССР не удалось опустить порог чувствительности ниже 2,5 г/т. Помимо того, метод, по-видимому, испытывает трудно учитываемое влияние химического состава матрицы, что приводит к неожиданным результатам, например, к резкому систематическому завышению содержания урана в стандартном образце габро эссекитового [9].

Гамма-спектрометрический анализ привлекает внимание, преж-

де всего, возможностью определения всех трех радиоактивных элементов, что особенно важно при оценке вклада радиоактивного излучения горных пород в тепловой поток земной коры. Очень ценной для практики оказалась возможность гамма-спектрометрического анализа керна в лабораторных и полевых условиях [4]. Слабым местом метода является оценка содержания урана по радию, на основе предположения о равновесии урана с продуктами распада. В связи с этим, наиболее подходящим объектом для гамма-спектрометрического анализа оказывается именно керновый материал, извлеченный со значительной глубины, из зоны застойных вод, где маловероятны процессы разделения урана и тория. Строгие требования к равновесию в рядах радиоактивного распада предъявляются и к эталонам, в качестве которых поэтому не могут служить химически чистые соли урана и тория. Поскольку эталоны для гамма-спектрометрического анализа готовятся на основе равновесных руд, содержания урана и тория в них получены путем анализа другими методами. Следовательно, гамма-спектрометрический анализ не является "первичным", что ограничивает возможность его применения для аттестации стандартных образцов ("вторичные" методы анализа, сколь бы точны они ни были, для аттестации не рекомендуются) [34].

В последние годы вводится в практику определение урана методом запаздывающих нейтронов [7]. Этот способ анализа успешно конкурирует со всеми остальными по чувствительности, воспроизводимости и экспрессности, его применение ограничивается лишь необходимостью постоянного контакта исследователя с атомным реактором. В процедуре метода запаздывающих нейтронов в качестве эталона используется чистая соль азотнокислого уранила, он практически не испытывает влияния химического состава матрицы. Как прямой "первичный" метод определения урана, он оказывается незаменимым при аттестации стандартных образцов и в процедуре внешнего контроля анализов, выполненных в других лабораториях. На основе сопоставления большого количества анализов, полученных гамма-спектрометрическим методом и методом запаздывающих нейтронов, удалось установить удовлетворительное соответствие данных, подтверждающее отсутствие значительных отклонений от равновесия между ураном и радием в пробах керна и в стандартных образцах горных пород.

Успешно апробировано на стандартных образцах нейтронно-активационное определение тория, характеризующееся высокой чувствительностью и хорошей воспроизводимостью [19]. Это — слишком трудоемкий способ анализа для массовых определений, но, как и метод запаздывающих нейтронов, он, несомненно, окажется полезным для аттестации стандартных образцов и внешнего контроля [9].

3. Метрологическая характеристика гамма-спектрометрического анализа

Гамма-спектрометрическое определение урана (по радию), тория и калия в Институте геологии и геофизики СО АН СССР начато в 1966 г. С тех пор на основе совершенствования гамма-спектрометрического анализа, выполнен целый ряд исследований по геохимии радиоактивных элементов в геологической истории земной коры [15, 18, 24]. Оценка качества анализов первоначально основывалась на исследовании стандартных образцов ВСЕГЕИ, затем удалось воспользоваться стандартами ЦГИ ГДР и французского Центра петрографических и геохимических исследований [8]. С введением в практику стандартных образцов Института геохимии СО АН СССР и Сибирского филиала ВНИИФТРИ оказалось возможным существенно дополнить метрологическую характеристику анализа [9].

Показателем воспроизводимости гамма-спектрометрического анализа является среднеквадратичная погрешность. Как следует из табл. I, относительная среднеквадратичная погрешность единичного определения всех трех радиоактивных элементов возрастает с уменьшением концентрации. Но эта обычная тенденция осложняется в связи со спецификой процедуры гамма-спектрометрического анализа, в которой определение каждого элемента ведется на фоне гамма-излучения двух остальных. Поэтому при анализе аляскитового гранита, для которого характерно высокое торий-урановое отношение, относительная среднеквадратичная погрешность определения урана возрастает до 40%. В доломитизированном известняке, где, при невысоком уровне концентраций, уран преобладает над торием, ошибка определения тория достигает 56%. По всем остальным стандартам погрешность анализа укладывается

Т а б л и ц а I

Радиоактивные элементы в стандартных образцах горных пород

	Наши данные				Атте-МЗН стат	Соборнов, 1977 [27]	НАА
	\bar{X}	$\pm \Delta X, P=95\%$					
Гранит GM (26 определений)							
Уран, г/т	8,6	$\pm 0,3$	0,8	9,3%	6,8		
Торий, г/т	29,0	$\pm 0,7$	1,9	6,2%	35,4		38,9
Калий, %	3,96	$\pm 0,10$	0,24	6%	3,93		
Th/U ср.	3,4	$\pm 0,12$	0,3	21%			
Th ср./U ср.	3,4				5,2		
Сланец ТВ (21 определение)							
Уран, г/т	3,1	$\pm 0,2$	0,4	16%	3,4		
Торий, г/т	15,1	$\pm 0,6$	1,2	7,9%	17,0		18,3
Калий, %	3,23	$\pm 0,06$	0,13	4%	3,21		
Th/U ср.	5,0	$\pm 0,5$	1,0	20%			
Th ср./U ср.	4,9				5,0		
Гранит альбитизированный СТ-1А (27 определений)							
Уран, г/т	77,3	$\pm 1,3$	3,3	4,3%	63,0	67,8	
Торий, г/т	134,6	$\pm 1,7$	4,0	3,0%	120,0		138,0
Калий, %	3,26	$\pm 0,14$	0,33	10,3%	3,44		
Th/U ср.	1,7	$\pm 0,04$	0,09	5%			
Th ср./U ср.	1,7				1,9		
Габбро эссекитовое СТД-1А (20 определений)							
Уран, г/т	2,5	$\pm 0,1$	0,3	11,2%		2,4	
Торий, г/т	7,4	$\pm 0,2$	0,4	5,4%			8,9
Калий, %	2,68	$\pm 0,05$	0,10	5%	2,46		
Th/U ср.	3,0	$\pm 0,2$	0,4	11%			
Th ср./U ср.	3,1						
Траш СТ-1А (24 определения)							
Уран, г/т	0,6	$\pm 0,05$	0,11	18,3%		0,8	
Торий, г/т	1,5	$\pm 0,08$	0,19	12,7%			1,64
Калий, %	0,60	$\pm 0,01$	0,03	3,7%	0,58		
Th/U ср.	2,4	$\pm 0,25$	0,6	24%			
Th ср./U ср.	2,5						
Гранит аляскитовый СТ-2 (26 определений)							
Уран, г/т	0,6	$\pm 0,11$	0,24	40%		0,72	

Т а б л и ц а I (продолжение)

	Наши данные		s	s/x	Аттестат	МЗН Соборов, 1977 [27]	НАА
	\bar{X}	$\pm \Delta \bar{X}, P=95\%$					
Торий, г/т	11,8	$\pm 0,2$	0,4	3,3%			13,4
Калий, %	6,69	$\pm 0,04$	0,11	1,6%	5,98		
$T_{1/2}$ ср.	24,9			84%			
$T_{1/2}$ ср. / $T_{1/2}$ ср.	19,7						
<u>Алевролит СА-I (25 определений)</u>							
Уран, г/т	3,6	$\pm 0,1$	0,3	8,3%		2,8	
Торий, г/т	10,2	$\pm 0,2$	0,4	3,9%			12,5
Калий, %	3,01	$\pm 0,04$	0,10	3,3%	2,87		
$T_{1/2}$ ср.	2,9	$\pm 0,1$	0,2	8%			
$T_{1/2}$ ср. / $T_{1/2}$ ср.	2,8						
<u>Известняк доломитизированный СИ-I (36 определений)</u>							
Уран, г/т	1,7	$\pm 0,06$	0,2	11,2%		1,7	
Торий, г/т	0,5	$\pm 0,1$	0,3	56%			0,56
Калий, %	0,26	$\pm 0,01$	0,03	11,5%	0,30		
$T_{1/2}$ ср.	0,3	$\pm 0,07$	0,21	70%			
$T_{1/2}$ ср. / $T_{1/2}$ ср.	0,3						

Примечание. МЗН - метод запаздывающих нейтронов [7]. НАА - нейтронно-активационный анализ [19].

В этой и в следующей таблицах: $\bar{X} \pm \Delta \bar{X}, P=95\%$ - средние и доверительные интервалы с вероятностью 95%, s - стандартное отклонение, s/x - относительная среднеквадратичная погрешность.

Т а б л и ц а 2
Статистические параметры гамма-спектрометрического анализа
"внутрилабораторных стандартов"

	Статистические параметры		
	\bar{X}	s	s/x
<u>"Стандартный" керн № 683 (алевропелит)</u>			
Уран (по радио), г/т	1,3	0,16	12,3%
Торий, г/т	4,7	0,27	5,7%
Калий, %	1,35	0,07	4,8%
<u>"Стандартный" керн № 694 (алевропелит)</u>			
Уран (по радио), г/т	1,6	0,24	15%
Торий, г/т	3,6	0,36	10%
Калий, %	0,74	0,04	5,4%

Примечание. Оба образца керна проанализированы по 24 раза.

ются в границы 1,6–12,7 % для тория и калия; 4,3–18% для урана (по радию). Стандартные образцы исследовались на лабораторных гамма-спектрометрических установках, собранных в ИГиГ СО АН СССР на основе разработок В.А.Боброва и А.М.Гофмана [5], в том же режиме, что и рядовые пробы; поэтому приведенные статистические характеристики служат показателями воспроизводимости анализа при массовых определениях радиоактивных элементов в лабораторных условиях в пробах горных пород весом около 300 г.

Кроме общепринятых стандартных образцов, в практике гамма-спектрометрического анализа ежедневно измерялись два 9-сантиметровых образца ядра – "внутрилабораторные стандарты", представленные наиболее распространенными литологическими разностями осадочных терригенных пород. Как показано в таблице 2, воспроизводимость анализа по ядру скважин не хуже, чем при исследовании измельченных проб, упакованных в полиэтиленовые флаконы. Установлено, что уменьшение длины ядерного образца вдвое приводит к завышению аналитических данных на 20–25%. Поэтому для анализа ядра из скважин, пробуренных на территории Западно-Сибирской плиты, отбирались образцы, приближающиеся по длине к эталонам.

Для большинства видов анализа в интервале концентраций не более 1–1,5 порядков обнаруживается линейная зависимость между концентрацией элемента (С) и абсолютной среднеквадратичной погрешностью единичного определения (σ)

$$\sigma = \sigma_0 + \delta_0 C,$$

где δ_0 – "воспроизводимость аналитического метода" [31].

Соответствующие статистические параметры гамма-спектрометрического анализа также обнаруживают тенденцию к линейной зависимости, хотя и не очень четкую. Из уравнений, полученных методом наименьших квадратов, по данным табл. I, находим значение порога чувствительности по формуле:

$$L = k\sigma_0, \text{ где } k = 3,5 [31].$$

"Правильность" или "истинность" гамма-спектрометрического анализа оценивается по результатам многократных определений радиоактивных элементов в восьми стандартных образцах (табл. I). Результаты гамма-спектрометрического определения урана (по радию) сопоставляются с паспортными дан-

Пороги чувствительности гамма-спектрометрического определения урана (по радию), тория и калия

Уран (по радию)	0,4 г/т
Торий	0,3 г/т
Калий	0,16 %

ными для стандартов ГДР, с анализами методом запаздывающих нейтронов трех иркутских стандартов и с данными О.П.Соборнова [27] по остальным трем иркутским стандартным образцам. Способ анализа О.П.Соборнова основан на калибровке гамма-спектрометра по серии отечественных и международных стандартов и, следовательно, является "вторичным"; он не должен быть положен в основу аттестации новых стандартов, но для целей межлабораторных сопоставлений, несомненно, дает весьма надежную опору. Как показывает график (рис.1), в общем, гамма-спектрометрический анализ ИГиГ СО АН СССР обнаруживает некоторую тенденцию к завышению содержаний урана, однако не столь четкую, чтобы можно было говорить о наличии систематической погрешности и, тем более, о ее величине.

Правильность определения тория оценивается по сопоставлению с данными нейтронно-активационного анализа [19,9]. На графике отчетливо видно систематическое занижение тория в процедуре гамма-спектрометрического анализа (рис.1). Если результаты гамма-спектрометрического определения умножить на I, I_3 , они вплотную приблизятся к значениям, полученным нейтронно-активационным анализом, методом О.П.Соборнова и колориметрическим анализом (данные аттестации иркутских стандартов пока нельзя считать достаточно надежными). До тех пор, пока не выяснены причины занижения тория, по-видимому, не следует вносить изменения в процедуру анализа, однако имеет смысл введение 13-процентной поправки в конечные результаты статистической обработки аналитических данных.

При гамма-спектрометрическом определении калия в качестве эталона применяется красная кровяная соль. Следовательно, в

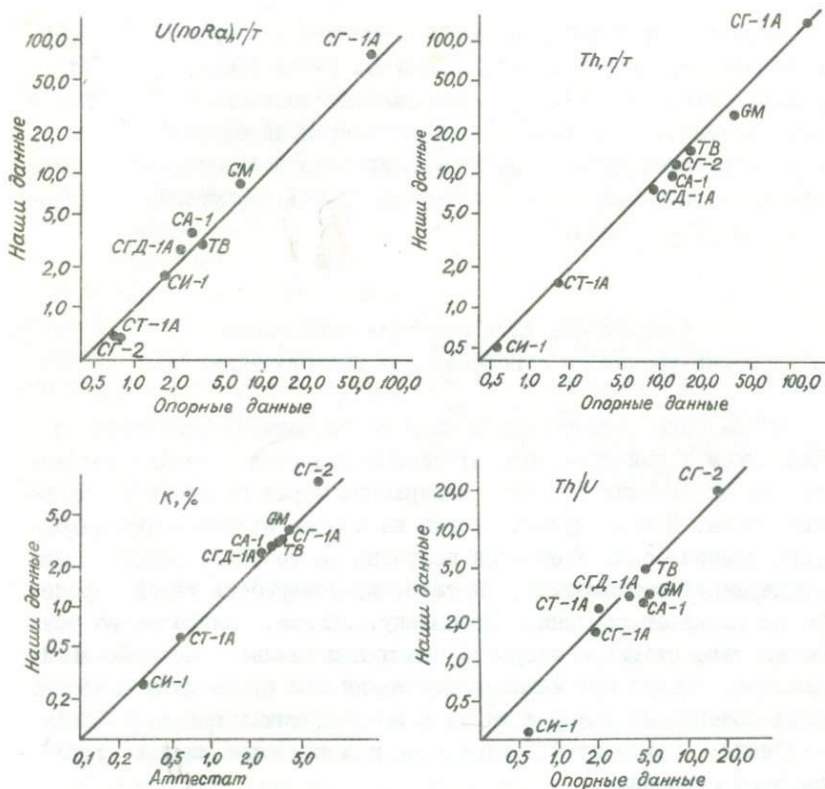


Рис. I. Сопоставление результатов гамма-спектрометрического анализа с опорными данными (пояснения в тексте)

этом случае гамма-спектрометрический метод является "первичным". Некоторые отклонения результатов анализа от линейных соотношений с данными аттестата, наблюдающиеся для отдельных иркутских стандартов, скорее всего, следует отнести на счет погрешности аттестации (рис. I).

Поскольку торий-урановому отношению в геохимических исследованиях придается важная самостоятельная роль [33], попытаемся оценить также воспроизводимость и "правильность" определения и

этого параметра (рис.1). Естественно, частное от деления двух величин варьирует в более широких пределах, чем делимое и делитель. Относительное среднее квадратичное отклонение для единичного определения торий-уранового отношения в стандартных образцах изменяется, в основном, в пределах 5-24% (табл.1). В тех образцах, где, вследствие неблагоприятных соотношений радиоактивных элементов, возрастает аналитическая дисперсия урана и тория, соответственно и среднее квадратичное отклонение торий-уранового отношения увеличивается до 70-84% (иркутские стандарты СИ-1 и СТ-2 - табл.1).

4. Сравнение двух способов определения торий-уранового отношения для геологических тел

В практике радиогеохимии чаще всего можно встретиться с вычислением торий-уранового отношения для геологических тел как частного от деления среднего содержания тория на среднее содержание урана. В тех случаях, когда на основе исследования закона распределения обоих элементов получены несмещенные оценки для их содержаний в геологическом теле, правомерность такой процедуры не вызывает сомнения. Поскольку, однако, далеко не во всех работах даже ставится вопрос о выяснении закона распределения элементов, обычно нет никаких оснований для суждения о качестве оценки содержаний урана и тория в геологических телах. Тогда, естественно, приходится сомневаться и в качестве оценки торий-уранового отношения.

Другой способ определения торий-уранового отношения для геологических тел - вычисление среднего из значений, полученных для индивидуальных проб; этот способ, без объяснения причин, предпочитают, например, Р.Б.Баратов и В.В.Могаровский [3]. Специально предпринятое вычисление торий-уранового отношения одновременно по двум способам позволяет сопоставить между собой полученные оценки (рис.2). При этом обнаруживаются следующие закономерности:

1. Среднее отношение всегда выше, чем отношение средних. По-видимому, это связано с некоторой, обычно положительной, асимметрией плотности распределения торий-уранового отношения.

2. При умеренных значениях коэффициента вариации ($K < 50\%$) два способа оценки торий-уранового отношения дают близкие результаты. Заметим, что в этих случаях чаще всего распределение всех трех случайных величин не противоречит нормальному или логнормальному законам и, следовательно, оказывается возможным получить несмещенные оценки для содержаний урана, тория и их отношения. Чем более проявляется положительная асимметрия распределения, тем больше оснований предпочитать отношение средних.

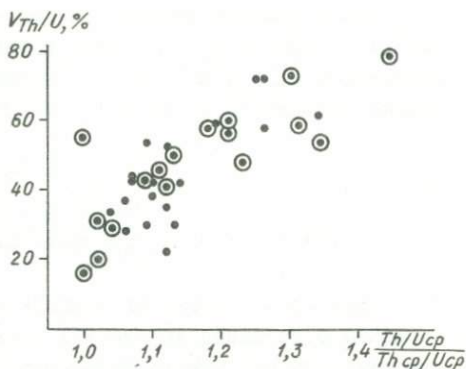


Рис.2. Превышение среднего торий-уранового отношения над отношением средних в зависимости от коэффициента вариации V . Кружками показаны выборки из песчаников, точками — из алевропелитов.

3. С дальнейшим возрастанием коэффициента вариации среднее отношение все более значительно превышает отношение средних. Если коэффициент вариации выше 50%, то, опять-таки оказывая предпочтение отношению средних, следует каждый раз рассматривать закон распределения тория и урана, чтобы убедиться в надежности оценки их отношения.

В качестве примера завышенной оценки торий-уранового отношения, можно привести значение, данное в "Справочнике физических констант горных пород" для "серых и зеленых сланцев" — 4,9 [28]. В первоисточнике находим: отношение средних — 4,1; медиана — 4,4; среднее отношение — 4,9; модальное значение по гистограмме — менее четырех; положительная асимметрия распределения совершенно очевидна. Хотя в этом случае распределения урана и тория тоже оставляют желать лучшего, тем не менее, в свете проведенного нами сравнения двух способов вычисления торий-уранового отношения, данная в справочнике оценка должна рассматриваться как завышенная по меньшей мере на 20%.

Для отложений Западно-Сибирской плиты, как показано в табл. 4, коэффициенты вариации торий-урановых отношений не превышают 33% и, соответственно, среднее отношение весьма незначительно, обычно всего на 3-4% выше, чем отношение средних.

5. Задачи и принципы статистической обработки аналитических данных

Одна из основных задач статистического анализа в геохимии — оценка содержаний химических элементов в геологических телах. Очевидно, прежде чем воспользоваться статистикой, необходимо четко определить контуры геологических тел, в пределах которых химический состав горных пород не испытывает существенных изменений. Специфика осадочных толщ заключается в послойной гранулометрической и, соответственно, химической неоднородности; выделяя в разрезе, например, песчаники, алевропелиты, аргиллиты, мы можем рассматривать свиту или осадочную формацию как совокупность переплетающихся трех однородных геологических тел. Первое испытание на однородность осуществляется визуально, при отборе образцов; впоследствии внешне однородные геологические тела могут расчленяться на основе петрографических исследований или результатов анализа.

В процессе опробования геологических тел, имея в виду последующую статистическую обработку аналитических данных, следует соблюдать принцип случайности выбора пробы. Это требование, в первом приближении, реализуется при равномерном отборе проб из разреза, пересеченного скважинами.

Когда определены контуры геологических тел и из каждого тела случайным образом отобраны, а затем проанализированы пробы, возникает вопрос, каким образом по данным анализов можно составить заключение о содержании того или иного элемента в конкретном геологическом теле. Поскольку речь идет, прежде всего, о гамма-спектрометрическом анализе, представим себе каждое геологическое тело расчлененным по всей массе на 300-граммовые ячейки, которые и будем рассматривать как генеральную совокупность. Какое-то количество ячеек отбирается в процессе опробо-

Т а б л и ц а 4

Сравнение двух способов вычисления торий-уранового отношения для отложений Западно-Сибирской плиты

Породы; Месторождения	Кол-во проб	$\frac{Th}{U}$ ср.	V, %	$\frac{Th}{U}$ ср. U ср.
<u>Юрские отложения</u>				
<u>Алевропелиты</u>				
-Останинское	74	2,7	18	2,6
-Мирное	29	3,4	33	3,1
-Лутинецкое	18	3,0	25	2,9
-Ю. Русское, Вангапурское и др.	17	3,1	27	3,0
-алевропелиты в целом	138	2,9	27	2,8
<u>Алевролиты</u>				
-Останинское	23	2,5	28	2,4
-Мирное	10	2,9	15	2,8
-алевролиты в целом	33	2,6	24	2,5
<u>Песчаники</u>				
-Останинское	49	2,9	28	2,8
-Мирное	25	2,8	22	2,7
-песчаники в целом	74	2,9	27	2,8
<u>Меловые отложения</u>				
<u>Алевропелиты</u>				
-Мамонтовское	28	3,1	21	3,0
-Усть-Балыкское	46	3,5	22	3,4
-Советское, Федоровское	19	3,3	12	3,3
-алевропелиты в целом	93	3,3	21	3,2
<u>Песчаники</u>				
-Мамонтовское	77	3,2	31	3,1
-Усть-Балыкское	25	2,9	25	2,8
-Советское, Федоровское	25	3,4	23	3,3
-песчаники в целом	127	3,2	29	3,0

Примечание. V - коэффициент вариации

вания для анализа и составляет выборку. Так мы подходим к элементарной задаче математической статистики: оценке параметров генеральной совокупности по результатам выборочного опробования [25].

Улучшая чувствительность, воспроизводимость и "правильность" анализа, соблюдая правила опробования и корректно применяя аппарат математической статистики, мы можем сколь угодно приблизиться в своих оценках к истинному содержанию (то-есть количеству атомов на единицу объема или массы) химического элемента в геологическом теле. Такие оценки прочно войдут в научный аппарат геохимии как фактический материал; они в дальнейшем не должны измениться до тех пор, пока не возникнут задачи, для решения которых потребуется сузить доверительные интервалы или расчленив выделенные ныне геологические тела на более мелкие объемы.

Располагая числовым материалом, мы прежде всего приступаем к проверке основной гипотезы — соответствия эмпирического распределения нормальному закону. Если основная гипотеза принимается, то, во-первых, возникает возможность оценки содержания элемента в геологическом теле через среднее арифметическое и, во-вторых, оказываются применимыми очень простые способы вычисления доверительных интервалов для полученных оценок, например: $\bar{x} \pm \frac{t(P, f) s}{\sqrt{n}} = \bar{x} \pm \bar{x} [12]$; кроме того, открываются

возможности для исследования корреляционных связей и дисперсионного анализа. Проверка эмпирически найденных распределений радиоактивных элементов на нормальность по отношениям оценок асимметрии и эксцесса к их дисперсиям [26], как мы увидим в дальнейшем, для выборок из отложений Западно-Сибирской плиты приводит к принятию основной гипотезы практически во всех случаях; более жесткие критерии Большева и Смирнова [6] несколько ограничивают круг выборок, отвечающих нормальному распределению.

В аддитивном выражении общей дисперсии:

$$\sigma^2 = \sigma_{\Pi}^2 + \sigma_p^2 + \sigma^2 [1]$$

слагаемое σ_p^2 — дисперсия пробоотбора, в случае гамма-спектрометрического анализа керна, мало отличается от нуля, поскольку

здесь исключены операции дробления и гомогенизации материала; $\sigma_{\text{п}}^2$ — природная дисперсия также должна быть меньше, чем для большинства других способов анализа, так как определение радиоактивных элементов ведется в большой массе породы — около 300г. Понижение общей дисперсии радиоактивных элементов — одно из преимуществ, которые обнаруживает гамма-спектрометрический анализ керна в сравнении с другими аналитическими методами.

6. Статистические оценки распределения радиоактивных элементов в отложениях Западно-Сибирской плиты

Пробы керна для гамма-спектрометрического анализа отбирались, в основном, из скважин, пробуренных на Останинском, Мирном, Лугинецком, Мамонтовском, Усть-Балыкском, Федоровском и Советском месторождениях, чаще всего по разрезу через 2-7 м, иногда — с перерывами в несколько десятков метров.

Вся совокупность гранулометрических разностей терригенных осадочных пород подразделялась на классы. Песчаники и алевролиты разделялись по общепринятой границе — 0,1 мм. Обычно в алевролитах уже заметна примесь пелитового материала; с дальнейшим уменьшением медианного размера зерен количество пелитового вещества постепенно возрастает и, таким образом, между алевролитами и аргиллитами трудно провести резкую границу. Поэтому те породы, в которых затруднительно оценить соотношение между пелитовым и алевролитовым материалом, мы называем алевропелитами. Таким образом, для статистической обработки выделились три следующих класса: 1 — песчаники, 2 — алевролиты и 3 — алевропелиты, аргиллиты. Для того, чтобы не сгладились различия между выделенными классами, неоднородные образцы керна, состоящие из двух или трех гранулометрических разностей, не включались в выборки, сформированные для статистической обработки аналитических данных.

Содержания урана, тория и калия в юрских отложениях оценивались по восьми выборкам. Песчаники, алевролиты, алевропелиты (аргиллиты) из скважин, пробуренных на Останинском и Мирном месторождениях, составили 6 выборок, в седьмую вошли алевро-

ропелиты Лутинецкого месторождения и в восьмую — алевропелиты, отобранные А.С.Фомичевым на различных площадях, в том числе расположенных в северной части Западно-Сибирской плиты. Распределение радиоактивных элементов в специфических отложениях баженовской свиты достаточно подробно охарактеризовано в работах И.И.Плумана [21,22], и в этой статье нами не рассматривается. Совокупности результатов гамма-спектрометрического анализа в каждой из выборок ни в одном случае не противоречат гипотезе о нормальном распределении. Сравнение дисперсий и средних по критериям Фишера и Стьюдента не позволяет считать, что все выборки идентичны; тем не менее, объединение проб из каждой гранулометрической разности в одну выборку опять-таки приводит к распределению, приближающемуся к нормальному, что позволяет вычислить доверительные интервалы для статистических оценок, полученных как по отдельным выборкам, так и для каждого гранулометрического класса в целом (табл.5,6,7,8).

Меловые отложения охарактеризованы по шести выборкам; среди них редко встречаются алевролиты, поэтому статистические оценки удалось получить лишь для песчаников и алевропелитов (аргиллитов) из скважин, пробуренных на Мамонтовском, Усть-Балыкском, Советском и Федоровском месторождениях. Проверка выборочных параметров на соответствие гипотезе о нормальном распределении почти во всех случаях дает положительные результаты. В обобщенных выборках для каждой гранулометрической разности эмпирические распределения всех трех радиоактивных элементов тоже приближаются к гауссову; следовательно, и в этих случаях мы имеем основание для вычисления доверительных интервалов (табл.5,6,7,8).

Рассматривая полученные статистические параметры, нетрудно убедиться, что оценить содержания урана и тория в юрских или меловых алевропелитах, а также в песчаниках мела, можно было бы без большого риска по любой из выборок: пределы вариации выборочных оценок лишь незначительно превышают доверительные интервалы, выведенные для каждого среднего значения. Отсюда можно заключить, что в процессе осадконакопления достигалась достаточно высокая степень гомогенизации терригенного материала и, следовательно, по крайней мере для центральных час-

Т а б л и ц а 5

Статистические параметры распределения урана
в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты

Породы; Месторождения	Кол-во проб	Статистические параметры					
		$\bar{X} \pm \bar{X}, P-95\%$	S^2	σ	v	A	E
<u>Юрские отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Останинское	74	3,2±0,2	0,71	0,84	26	0,81	1,23
-Мирное	29	2,5±0,3	0,65	0,81	32	0,64	1,21
-Лугинское	18	3,1±0,3	0,30	0,55	18	-0,01	0,61
-Ю. Русское, Вянгаурское и др.	17	2,8±0,3	0,47	0,68	24	1,03	0,19
-алевропелиты в целом	138	3,0±0,1	0,65	0,81	28	0,64	1,21
<u>Алевропелиты</u>							
-Останинское	23	2,4±0,3	0,52	0,72	30	0,27	-0,73
-Мирное	10	2,1	0,32	0,57	27		
алевропелиты в целом	33	2,3±0,2	0,46	0,68	30	0,50	-0,48
<u>Песчаники</u>							
-Останинское	49	1,4±0,1	0,27	0,52	38	0,79	0,75
-Мирное	25	1,9±0,2	0,35	0,59	31	0,73	-0,61
-песчаники в целом	74	1,6±0,1	0,37	0,61	39	0,73	0,26
<u>Меловые отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Мамонтовское	28	2,6±0,2	0,37	0,61	23	-0,11	-0,84
-Усть-Балыкское	46	2,5	0,27	0,52	21	1,23	2,45
-Советское, Федоровское	19	2,3±0,2	0,15	0,39	17	0,48	-0,56
-алевропелиты в целом	93	2,5±0,1	0,29	0,54	22	0,72	0,70
<u>Песчаники</u>							
-Мамонтовское	77	1,2±0,1	0,17	0,41	34	0,83	0,73
-Усть-Балыкское	25	1,2±0,2	0,14	0,38	31	1,13	0,81
-Советское, Федоровское	25	1,2±0,1	0,10	0,32	26	-0,85	0,29
-песчаники в целом	127	1,2±0,1	0,15	0,39	25	0,69	0,78
Всего 465 определений							

Примечание. В этой и следующих таблицах $\bar{X} \pm \bar{X}, P-95\%$ - среднее и доверительные интервалы при уровне значимости 95%; S^2 - дисперсия; σ - среднее квадратичное отклонение; v - коэффициент вариации; A - коэффициент асимметрии; E - коэффициент эксцесса.

Т а б л и ц а 6

Статистические параметры распределения тория
в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты

Породы; Месторождения	Кол-во проб	Статистические параметры					
		$\bar{x} \pm$	$\bar{x}, P-95\%$	s^2	s	v	A
<u>Ерские отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Останинское	74	8,4 \pm 0,4	3,27	1,81	21	0,16	0,48
-Мирное	29	8,0 \pm 0,6	2,25	1,50	19	-0,22	-0,63
-Лугинецкое	18	9,2 \pm 0,8	2,47	1,57	17	-0,25	0,05
-Ю. Русское, Вэнгапурское и др.	17	8,5 \pm 0,9	3,05	1,75	21	0,50	-0,99
- алевропелиты в целом	138	8,4 \pm 0,3	2,98	1,73	20	0,12	0,19
<u>Алевролиты</u>							
-Останинское	23	5,7 \pm 0,5	1,47	1,21	21	0,23	-1,03
-Мирное	10	5,9	0,78	0,88	15		
алевролиты в целом	33	5,8 \pm 0,4	1,23	1,11	19	0,29	-0,88
<u>Песчаники</u>							
-Останинское	49	3,8 \pm 0,4	1,81	1,34	35	0,58	0,76
-Мирное	25	5,3 \pm 0,5	1,60	1,26	24	0,15	-1,35
-песчаники в целом	74	4,3 \pm 0,3	2,22	1,49	34	0,31	-0,31
<u>Меловые отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Мамонтовское	28	7,8 \pm 0,6	2,40	1,55	20	0,80	0,57
-Усть-Балыкское	46	8,5 \pm 0,4	2,12	1,46	17	0,46	0,60
-Советское, Федоровское	19	7,4 \pm 0,4	0,87	0,93	12	0,27	-0,87
-алевропелиты в целом	93	8,1 \pm 0,3	2,09	1,44	18	0,66	0,68
<u>Песчаники</u>							
-Мамонтовское	77	3,7 \pm 0,2	1,02	1,01	27	0,66	0,15
-Усть-Балыкское	25	3,4 \pm 0,4	0,80	0,89	26	0,56	-0,58
-Советское, Федоровское	25	4,1 \pm 0,5	1,25	1,12	27	-0,03	-0,73
-песчаники в целом	127	3,7 \pm 0,2	1,05	1,03	28	0,53	-0,21
Всего 465 определений							

Статистические параметры распределения калия
в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты

Породы; Месторождения	Кол-во проб	Статистические параметры					
		$\bar{x} \pm \bar{x}, P=95\%$	s^2	s	v	A	E
<u>Юрские отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Останинское	74	2,37	0,20	0,45	19	-1,13	2,81
-Мирное	29	2,37	0,18	0,42	18	1,37	2,31
-Лугинецкое	18	2,38 \pm 0,22	0,20	0,45	19	-0,27	-0,97
-Ю. Русское, Вентануровское и др.	17	2,95 \pm 0,14	0,08	0,28	9	0,06	-1,05
алевропелиты в целом	138	2,44 \pm 0,08	0,22	0,47	19	-0,43	1,57
<u>Алевролиты</u>							
-Останинское	23	1,72 \pm 0,18	0,18	0,42	24	-0,17	-0,48
-Мирное	10	1,65	0,10	0,32	19		
-алевролиты в целом	33	1,70 \pm 0,14	0,15	0,39	23	-0,17	-0,32
<u>Песчаники</u>							
-Останинское	49	1,75 \pm 0,10	0,12	0,35	20	-0,28	0,07
-Мирное	25	1,66 \pm 0,13	0,11	0,33	20	0,65	-0,01
-песчаники в целом	74	1,72 \pm 0,08	0,12	0,35	20	0,01	-0,09
<u>Меловые отложения</u>							
<u>Алевропелиты</u>							
-Мамонтовское	28	2,03 \pm 0,14	0,13	0,36	18	0,57	-0,18
-Усть-Балыкское	46	2,32 \pm 0,10	0,09	0,30	13	-0,09	0,30
-Советское, Федоровское	19	2,03	0,07	0,26	13	1,75	4,00
-алевропелиты в целом	93	2,18 \pm 0,07	0,12	0,35	16	0,25	-0,29
<u>Песчаники</u>							
-Мамонтовское	77	1,92 \pm 0,09	0,15	0,39	20	-0,39	-0,62
-Усть-Балыкское	25	1,97 \pm 0,10	0,06	0,25	13	-0,17	-1,05
-Советское, Федоровское	25	2,32 \pm 0,14	0,12	0,34	15	-0,08	-0,26
-песчаники в целом	127	2,00 \pm 0,07	0,15	0,39	19	-0,25	-0,11
Всего 465 определений							

Обобщенные статистические оценки распределения
радиоактивных элементов в мезозойских терригенных отложениях
Западно-Сибирской плиты

Породы	Кол-во проб	Уран (по радио), г/т	Торий, г/т	Калий, %	
<u>Юрские отложения</u>					
алевропелиты, аргиллиты	138	3,0 \pm 0,1	9,5 \pm 0,3 ^{ж)}	2,44 \pm 0,08	3,2
алевролиты	33	2,3 \pm 0,2	6,5 \pm 0,4 ^{ж)}	1,70 \pm 0,14	2,8
песчаники	74	1,6 \pm 0,1	4,9 \pm 0,3 ^{ж)}	1,72 \pm 0,08	3,1
<u>Меловые отложения</u>					
алевропелиты, аргиллиты	93	2,5 \pm 0,1	9,1 \pm 0,3 ^{ж)}	2,18 \pm 0,07	3,6
песчаники	127	1,2 \pm 0,1	4,2 \pm 0,2 ^{ж)}	2,00 \pm 0,07	3,5
Оценки И.И.Плумана для мезозойских отложений в целом:					
аргиллиты	47	2,6	7,3	2,2	2,8
алевролиты	25	2,1	7,1	2,2	3,4
песчаники	58	1,8	5,8	2,2	3,2

Примечания. 1. Доверительные интервалы даны с 95-процентной вероятностью. 2. ж) - содержания тория и соответствующие торий-урановые отношения даны с 13-процентной надбавкой (см. в тексте).

тей Западно-Сибирской плиты, специфика какого-либо локального источника сноса не отражалась сколько-нибудь существенно на распределении радиоактивных элементов в осадочных толщах.

Оценки распределения урана и тория, полученные для юрских алевропелитов Пудинского мегавала, практически не отличаются от средних значений сводной выборки, составленной, в основном, из алевропелитов северной части Западно-Сибирской плиты. Распространяя на этом основании полученные данные на весь мезозойский разрез, мы, тем не менее, оставляем возможность

для дальнейшего уточнения в будущем обобщенных статистических оценок по мере вовлечения в исследование kernового материала из различных участков обширного региона. Сочетание завершенности исследований по отдельным структурам с гибкостью обобщенной оценки позволит с течением времени с максимальной степенью надежности определить содержания урана и тория в осадочном чехле Западно-Сибирской плиты.

Определения содержаний калия удовлетворительно согласуются с ранее выведенными оценками [II] только для песчаников юрского возраста. В алевропелитах намечается возрастание концентрации калия по мере погружения осадочных толщ: 2,18% в меловых отложениях, 2,44% - в юрских, залегающих не глубже 2700 м и 2,95% - в юрских алевропелитах, вскрытых в северной части Западно-Сибирской плиты на глубинах 2600-4200 м (таблица 7). Тенденция станет еще более очевидной, если принять во внимание, что 25 проб из глинистых пород апта дают среднее содержание калия всего 1,31%. По-видимому, закономерное возрастание концентрации калия по мере увеличения глубины залегания глинистых пород объясняется вертикальной зональностью распределения слоистых алюмосиликатов - преобразованием монтмориллонита и смешанно-слоистых минералов в ассоциацию хлорита и гидрослюда [20,10].

7. Закономерности распределения радиоактивных элементов в процессе гранулометрической дифференциации терригенного материала

В сравнении выборочных статистических оценок отчетливо выступает возрастание содержаний урана, тория и, в меньшей степени - калия от песчаников к алевролитам и далее к алевропелитам, то-есть проявляется упорядоченный тип распределения радиоактивных элементов в гранулометрическом спектре осадочных толщ.

Причины упорядоченного распределения в какой-то мере прослеживаются при исследовании корреляционных связей между содержаниями радиоактивных элементов и количеством тех или иных ком-

понентов осадочных пород. Так, в несомоновых песчаниках обнаруживается положительная корреляция урана, тория и, в меньшей степени, калия с количеством наиболее тонких фракций терригенного материала, с содержанием обломков интенсивно измененных полевых шпатов и слюд, а также с количеством глинистого цемента и с долей в его составе хлорита или гидрослюд (табл.9). Следовательно, даже при невысоком уровне содержаний урана и тория, характерном для песчаников, уже сказывается вклад глинистых минералов в общее количество радиоактивных элементов в породе.

В алевропелитах неосома, содержащих примерно в два раза больше урана и тория, чем песчаники, устанавливаются корреляционные связи между каждым из трех радиоактивных элементов и количеством фракции $< 0,01$ мм, в составе которой преобладает глинистое вещество (табл.10). Таким образом, концентрации урана и тория возрастают по мере увеличения количества пелитового вещества по всему гранулометрическому спектру осадочной толщи, от песчаников до аргиллитов. Для калия эта тенденция проявляется значительно менее четко, поскольку падение содержания калиевых полевых шпатов с уменьшением медианного размера зерен компенсируется возрастанием количества калийсодержащих глинистых минералов — гидрослюд.

С другой стороны, невысокое содержание урана и тория в песчаниках по сравнению с алевропелитами в какой-то мере связано с "разбавляющей" ролью кварца. Это обстоятельство не оказывается существенным внутри класса песчаников, однако оно не может не проявиться при сопоставлении псаммитов с алевропелитами.

Поскольку и уран, и торий следуют за пелитовым веществом, естественно ожидать появления корреляционных связей и между этими двумя элементами. И действительно, почти во всех выборках, как в песчаниках, так и в алевропелитах, с высокой степенью надежности устанавливается корреляция между ураном и торием (табл.11).

Линейные соотношения между ураном и торием особенно отчетливо проявляются на графике, где нанесены средние содержания радиоактивных элементов во всех гранулометрических разностях (рис.3). Соответственно, коэффициенты корреляции между

Т а б л и ц а 9

Корреляция между радиоактивными элементами
и отдельными компонентами неокомовых песчаников

Ярус Свита Пласт	Валанжин мегионская BC ₁₀			Готерив-баррем вартовская BB ₈				BC ₁₋₅	
	U	Th	K	U	Th	K	U	Th	K
Ф-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ф-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ф-3	0,81	0,91	0,40	0,52	0,46	0,36	0,68	0,66	-
Ф-4	0,68	0,63	0,44	0,58	0,68	0,37	0,68	0,68	-
М	-0,51	-0,83	-0,48	-0,70	-0,84	-0,40	-	-0,49	-
Кв	-	-	-	-	-	-0,39	-	-	-
П	0,48	-	-	-	-	0,33	-	-	-
П _{изм}	0,51	0,35	-	0,36	0,36	0,54	0,42	0,57	0,60
Сл	0,50	0,40	0,40	0,50	0,48	0,49	0,74	0,86	0,92
Х	-	-	-	0,48	0,37	0,38	-	-	-
Г	0,35	0,40	0,60	-	-	-	0,40	0,45	0,49
К	-	-	-	-	-	-	-	-	-
С _{гл}	-	-	-	0,53	0,62	-	0,62	0,65	-

Примечание. Символами обозначены: Ф-1, Ф-2, Ф-3, Ф-4 - фракции >25, 0,25-0,1; 0,1-0,05; 0,05-0,01 мм соответственно; М - медианный размер зерен; Кв - кварц; П - общее количество полевых шпатов; П_{изм} - сильноизмененные полевые шпаты; Сл - слюды; Х - хлорит; Г - гидрослюда; К - каолинит; С_{гл} - содержание глинистого цемента. Коэффициенты корреляции значимы с доверительной вероятностью 0,95; там, где это требование не выполняется - прочерк.

Т а б л и ц а 10

Корреляция между радиоактивными элементами
и количеством фракции <0,01 мм (С_{гл})

	Уран	Торий	Калий	С _{гл}
Уран	I	0,35	0,17	0,76
Торий		I	0,54	0,74
Калий			I	0,70

Примечание. Коэффициенты корреляции значимы с доверительной вероятностью 0,95.

Т а б л и ц а II

Коэффициенты корреляции между радиоактивными элементами
в отложениях Западно-Сибирской плиты

Породы; Месторождения	Кол-во проб	Коэффициенты корреляции		
		Уран Торий	Уран Калий	Торий Калий
<u>Курские отложения</u>				
<u>Алевропелиты</u>				
-Останинское	74	0,72	0,59	0,72
-Мирное	29	0,56	-	-
-Лугинское	18	-	-	-
-Ю. Русское, Вангапурское и др.	17			
-алевропелиты в целом	138	0,57	0,33	0,49
<u>Алевролиты</u>				
-Останинское	23	0,62	0,66	0,82
-Мирное	10	0,76	-	-
-алевролиты в целом	33	0,62	0,50	0,73
<u>Песчаники</u>				
-Останинское	49	0,71	-	0,41
-Мирное	25	0,59	0,40	-
-песчаники в целом	74	0,74	-	0,24
<u>Меловые отложения</u>				
<u>Алевропелиты</u>				
-Мамонтовское	28	0,53	-	0,81
-Усть-Балыкское	46	0,36	-	0,74
-Советское, Федоровское	19	0,74	0,59	-
-алевропелиты в целом	93	0,45	-	0,74
<u>Песчаники</u>				
-Мамонтовское	77	0,72	0,24	0,51
-Усть-Балыкское	25	0,65	-	-
-Советское, Федоровское	25	0,63	-	-
-песчаники в целом	127	0,68	0,21	0,42

Примечание. Коэффициенты корреляции значимы с доверительной вероятностью 0,95.

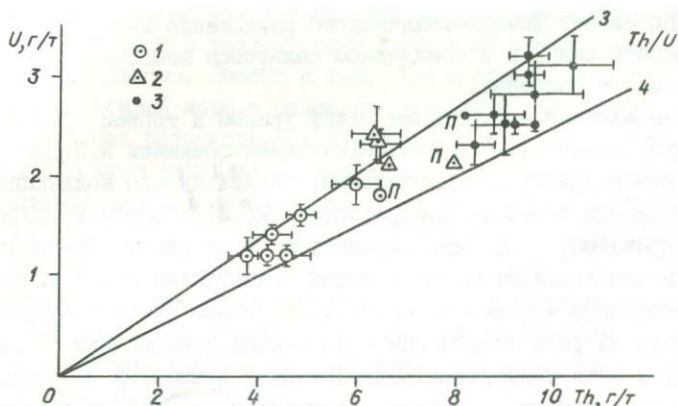


Рис.3. Соотношения урана и тория по выборкам из разреза мезозойских отложений Западно-Сибирской плиты (табл. 5,6).

1 - песчаники; 2 - алевролиты; 3 - алевропелиты, аргиллиты. Все содержания тория даны с 13-процентной поправкой (пояснение в тексте). Доверительные интервалы соответствуют вероятности 95%. Индексом "п" обозначены выборки И.И.Плужина [23].

ураном и торием во всем гранулометрическом спектре юрских и меловых отложений (0,80 и 0,86) оказываются еще более высокими, чем установленные по отдельности для песчаников и алевропелитов; они могут служить, таким образом, критерием для констатации упорядоченного типа распределения радиоактивных элементов в разрезе мезозойских отложений.

На рис.3 наглядно обнаруживается еще одна закономерность: торий-урановое отношение, полученное по разным выборкам, варьирует в исключительно узких пределах: его значения редко опускаются ниже трех и нигде не достигают четырех. Как известно, пути

урана и тория в морском осадочном процессе неодинаковы: если торий поступает в осадок, в основном, со взвесью, то значительная доля урана осаждается из раствора. Следовательно, строго выдержанное постоянство торий-уранового отношения, возможно, отражает достижение физико-химического равновесия между содержаниями урана в водах и в осадочном пелитовом веществе мезозойского морского бассейна.

Установленные соотношения между ураном и торием удовлетворительно согласуются со статистическими оценками И.И.Плумана [23], и это не кажется удивительным, поскольку его коллекция анализировалась в той же лаборатории (рис.3). Оценки Л.П.Зуева и В.С.Кудрявцева, напротив, отличаются от наших: торий-урановое отношение для аргиллитов оказывается значительно более низким, а для песчаников — более высоким [14]. Данные Зуева и Кудрявцева основаны на регистрации гамма-излучения в несколько других условиях; и хотя содержания радиоактивных элементов оценивались в сравнении с нашими эталонами, результаты анализа оказались существенно иными. На этом примере можно еще раз убедиться в том, насколько важно сопровождать аналитические данные результатами анализа стандартных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистические оценки распределения радиоактивных элементов в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты довольно близки к значениям, опубликованным для осадочных пород в сводках и справочниках. Однако, хрестоматийные справочные данные выведены, в основном, по результатам анализов, выполненных еще в 1956–58 гг. Так, в "Справочнике физических констант горных пород" [28] и в известной статье Турекиана и Ведеполя [36], оценки содержаний радиоактивных элементов в осадочных породах опираются на анализы, опубликованные в 1956 г. Барановым, Роновым и Кунашовой [2] и в 1958 г. Адамсом и Вивером [33]. Между тем, в те годы количество проанализированных пород было еще невелико, а современные принципы статистической обработки аналитических данных тогда еще не вошли в практику. Так, из выборки

Адамса и Вивера, представляющей "серые и зеленые сланцы" не была исключена проба с 12 г/т урана и 47 г/т тория, явно выпадающая из генеральной совокупности.

Очевидно, наступает время пересмотра выведенных ранее средних значений с учетом новых данных по крупнейшим осадочным бассейнам планеты. Вместе с тем, обобщенные оценки для осадочных пород земной коры, в целом не позволяют проследить эволюцию распределения радиоактивных элементов в ходе геологической истории. По мере накопления фосфоритов, отложений, обогащенных органическим веществом, карбонатных пород и стратиформных урановых руд, неизбежно должно было бы возрастать торий-урановое отношение в комплементарных терригенных толщах. Несмотря на очевидную реальность этой тенденции, она до сих пор не продемонстрирована в количественном выражении; на материалах по Русской платформе даже, напротив, намечается понижение торий-уранового отношения снизу вверх по разрезу [2].

Можно надеяться, что накопление достаточно надежных данных по содержаниям радиоактивных элементов в геологических формациях разного возраста позволит прийти к более полному представлению об эволюции торий-уранового отношения с течением геологического времени. Оценки содержаний урана и тория в морских терригенных отложениях Западно-Сибирской плиты мы рассматриваем как один из этапов на пути решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. АНОШИН Г.Н. Золото в магматических горных породах. Новосибирск, Наука, 1977. 206 с.

2. БАРАНОВ В.И., РОНОВ А.Б., КУНАШОВА К.Г. К геохимии рассеянного тория и урана в глинах и карбонатных породах Русской платформы. — "Геохимия", 1956, № 3, с.3-8.

3. БАРАТОВ Р.Б., МОГАРОВСКИЙ В.В. Средние содержания урана и тория в магматических формациях Тянь-Гяня и Памира (Таджикистан). — "Геохимия", 1978, № 8, с.1255-1258.

4. БОБРОВ В.А., ГАВШИН В.М., КОЛБАСИН А.В., РАЗИЛОВ В.И. Латеральные неоднородности распределения урана в красноцветной

толще по данным полевого радиогеохимического картирования.— В кн.: Радиоактивные элементы в геологических процессах. Тезисы докладов. Душанбе, 1975, с.85—87.

5. БОБРОВ В.А., ГОФМАН А.М. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов. Методические разработки. Новосибирск, 1971. 67 с.

6. БОЛЬШЕВ Л.Н., СМИРНОВ Н.В. Таблицы математической статистики. М., Наука, 1965. 464 с.

7. ВЕРИМАН Е.Г., МЕЩЕРЯКОВ Р.П., СТОЛБОВ Ю.М. Экспрессный неразрушающий метод определения кларковых содержаний урана и тория в геологических объектах по запаздывающим нейтронам.— В кн.: Ядерно-физические методы в геологии. Новосибирск, 1975, с.54—63.

8. ГАВШИН В.М., БОБРОВ В.А., МАЛЫСОВА З.В. Определение радиоактивных элементов в стандартных образцах горных пород.— В кн.: Ядерно-геохимические методы. Новосибирск, 1976, с.69—75.

9. ГАВШИН В.М., БОБРОВ В.А., ВЕРИМАН Е.Г. и др. Определение радиоактивных элементов в стандартных образцах СТ-1А, СТ-1А, СТД-1А.— В кн.: Физические методы анализа в геохимии. Новосибирск, 1978, с.38—45.

10. ГЕОЛОГИЯ нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 1975. 679 с.

11. ГЕОХИМИЯ юрских и нижнемеловых отложений Западно-Сибирской низменности. М., Недра, 1971. 251 с.

12. ДОЕРФЕЛЬ К. Статистика в аналитической химии. М., Мир, 1969, 222 с.

13. ЖУРАВЛЕВ Р.С., ОСИПОВ Д.К., ГЛАДКИХ Э.В. Распределение урана и тория в нефелиновых породах горы Горячей и вопросы их генезиса.— "Геохимия", 1965, № 6, с.762—766.

14. ЗУЕВ Л.П., КУДРЯВЦЕВ В.С. Распределение радиоактивных элементов в породах нижнемеловых продуктивных отложений широтного Приобья.— В кн.: Методика разведки и промыслово-геофизических исследований газонефтяных месторождений Тюменской области. Тюмень, 1975, с.102—106. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып.106).

15. КРЕНДЕЛЕВ Ф.П. Кларки радиоактивных элементов в породах докембрия Енисейского края. М., Наука, 1971. 376 с.

16. ЛЕНИН С.С., СЕРИКОВ И.В., ТОПОРСКИЙ В.Н. Рентгено-

спектральный флуоресцентный анализ радиоактивных элементов.— В кн.: Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск, Наука, 1975, с.250—252.

17. МАЛЯСОВА З.В. Определение микроколичеств урана в породах и минералах.— В кн.: Радиоактивные элементы в горных породах. Ч.П, Новосибирск, 1972, с.111.

18. МИРОНОВ А.Г., НОЖКИН А.Д. Золото и радиоактивные элементы в рифейских вулканогенных породах и продуктах их метаморфизма (Енисейский кряж). Новосибирск, Наука, 1978. 252 с.

19. ПАРХОМЕНКО В.С., ПОГРЕБНЯК В.Ф. Первичная обработка гамма-спектров с помощью ЭВМ.— В кн.: Ядерно-геохимические методы. Новосибирск, 1976, с.76—85.

20. ПЕРОЗИО Г.Н. Эпигенетическая зональность в терригенных породах мезозоя центральной части Западно-Сибирской низменности.— "Докл. АН СССР", 1960, т.135, № 5, с.1203—1206.

21. ПЛУМАН И.И. Ураноносность черных аргиллитов волжского яруса Западно-Сибирской плиты как критерий геохимических условий осадконакопления.— "Геохимия", 1971, № 9, с.1138—1143.

22. ПЛУМАН И.И. Ураноносность черных битуминозных аргиллитов верхней юры Западно-Сибирской плиты.— "Геохимия", 1971, № 11, с.1362—1368.

23. ПЛУМАН И.И. Распределение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты.— "Геохимия", 1975, № 5, с.756—767.

24. ПУЗАНКОВ Ю.М., БОБРОВ В.А., ДУЧКОВ А.Д. Радиоактивные элементы и тепловой поток земной коры полуострова Камчатка. Новосибирск, Наука, 1977. 126 с.

25. ПУСТЫЛЬНИК Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., Наука, 1968. 288 с.

26. РОДИОНОВ Д.А. Функции распределения содержаний элементов и минералов в изверженных породах. М., Наука, 1964. 102 с.

27. СОБОРНОВ О.П. Радиоэлементы в стандартных образцах горных пород.— "Геохимия", 1977, № 11, с.1700—1710.

28. СПРАВОЧНИК физических констант горных пород. М., Мир, 1969. 542 с.

29. УРАН И ТОРИЙ в магматических и метаморфических поро-

дах центральной части Алтае-Саянской складчатой области. М., Наука, 1972. 223 с.

30. ШОУ Д.М. Геохимия микроэлементов кристаллических пород. Л., Недра, 1969. 207 с.

31. ЮФА Б.Я., ГОЛУБЕВ Н.В., КУЗНЕЦОВ А.Г., ГУБАНОВА Г.Ф. Требования геохимии к метрологическим параметрам аналитических методов и возможности этих методов для геохимических исследований радиоактивных элементов.- В кн.: Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск, Наука, 1975, с.237-243.

32. ABBEY S. "Standard samples": how "standard" are they? - "Geostandards newsletter", 1977, v.1, N 1, p.39-45.

33. ADAMS J.A.S., WEAVER Ch.E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies.- "Bull.Amer.Assoc.Petrol.Geol.", 1958, v.42, N2, p.387-430.

34. ENGELS J.C., INGAMELLS C.O. Geostandards - a new approach to their production and use.- "Geostandards newsletter, 1977, v.1, N2 1, p.51-60.

35. GOVINDARAJU K., de la ROCHE H. Rapport (1966-1976) sur les éléments en traces dans les trois roches standards géochimiques du CRPG: Basalte BR et Granites, GA et GH.- "Geostandards newsletter", 1977, v.1, N2 1, p.67-98.

36. TUREKIAN K.K., WEDEPOHL K.H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust.- "Geol.Soc. Amer.Bull.", 1961, v.72, N2 2, p.175-191.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Предисловие.	3
В.М.ГАВШИН, Б.Л.ЩЕРБОВ, Ф.В.СУХОРУКОВ, Э.В.МАЛЯСОВА, Л.Н.СМЕРТИНА. Закономерности распределения микроэлементов в профиле выветривания Барлакского гранитного массива . . .	5
В.М.ЦИБУЛЬЧИК, В.А.ПОНОМАРЧУК, В.А.ТРУНОВА. Ниобий, тантал, цирконий, гафний в корях выветривания Кокчетавско- го поднятия (Северный Казахстан).	19
Ф.В.СУХОРУКОВ, Б.Л.ЩЕРБОВ. Бор и бериллий в корях выветривания Красноярского края	57
Б.Л.ЩЕРБОВ, Ф.В.СУХОРУКОВ. Геохимия бора и бериллия в корях выветривания юго-западного Салаира.	93
В.М.ГАВШИН, В.А.БОБРОВ, Р.Г.ДЕМИНА, Л.М.ДОРОГИНИЦКАЯ. Распределение урана, тория и калия в морских терригенных отложениях мезозоя Западно-Сибирской плиты.	128

ГЕОХИМИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОЦЕССАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ, ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И КАТАГЕНЕЗА
Сборник научных трудов

Технический редактор *Л.А. Жукова*

Подписано к печати 5.IX.1979 г. МН 06209.
Бумага 60x84/16. Печ. л. 10,25. Уч.-изд. л. 9,5.
Тираж 500. Заказ 280. Цена 1 руб. 40 коп.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.

Цена 1 руб. 40 коп.

3055