

**Министерство образования и науки Монголии  
Ховдский государственный университет**

**Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет**

**ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ,  
ИСТОРИЯ И КУЛЬТУРА  
ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ  
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ**

**Материалы XII международной научной конференции  
г. Ховд, Монголия, 18–21 сентября 2015 г.**

**Том I  
Естественные науки**

**Ховд – Томск  
2015**

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ МАССИВА КЫЗЫЛ-ТАУ (ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ТИПОХИМИЗМА БИОТИТА

Большая часть редкометальных объектов Западной Монголии связана с кислым магматизмом: собственно с редкометальными гранитами либо с их продуцентами пневматолит-гидротермального оруденения. Рудоносность ограничивается типичными гранитофильными элементами (Sn-W-Mo и другими попутными компонентами), масштабы минерализации рудных объектов могут варьировать в широких пределах от месторождения до проявления. В пределах Западной Монголии, на территории Баян-Ульгейского аймака в 25 км к северо-востоку от города Ульгей, юго-западнее оз. Ачит-Нуур, находится гранитный массив Кызыл-Тау (Улаан-Уул). Этот массив стал известен благодаря открытому в пределах интрузии кварц-вольфрамитовому месторождению [1]. По масштабам оруденения объект относится к мелким, однако среднее содержание руды  $WO_3$  2-3 % сделало его экономически привлекательным [2]. Следует сказать, что с момента открытия месторождения (1975 г.) на массиве Кызыл-Тау работали различные коллективы геологов (Демин П.А., Иванова Г.Ф., Максимюк И.Е., Наумов В.Б., Коваль П.В., Якимов В.М., Бессоненко В.В., Боровиков А.А., Козлов В.Д., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А., Калмычкова Т.Н., Игнатов В.В., Альмухамедов Е.А., Семенцов Б.Г. и другие), благодаря которым в настоящее время имеем детальную информацию об этом объекте.

Геологические изыскания показали, что массив Кызыл-Тау, формируют две фазы внедрения, в каждой из которых выделяются по две структурно-вещественных разновидности (субфазы) [2, 3, 4]. Гранитоиды первой интрузивной фазы слагают около 75 % от площади массива. Южная треть массива представлена ранними сфен-биотитовыми адамеллитами повышенной щелочности. В центральной и северо-восточной части интрузива выходят биотитовые лейкократовые граниты второй субфазы первой фазы. Гранитоиды второй фазы внедрения представлены порфиroidными лейкогранитами с очень низким содержанием биотита и равномернозернистыми лейкогранитами с содержанием биотита до 5 %. Среди пород второй фазы наблюдают аплитовидные дайки ультракислого состава. Рудные зоны, представленные вольфрамитсодержащими грейзеново-жильными телами, образующими ряд рудных участков, выходят в северо-западном эндоконтакте массива. Становление рудоносных гранитоидов Кызыл-Тау связывают с пермь-триасовым магматизмом (табл. 1).

Таблица 1

Абсолютные датировки объекта Кызыл-Тау

Метод	Возраст (млн лет)	Аналитический материал	Литература
Pb-U	200	Циркон гранитов	5
Rb-Sr	189	Гранит	4
Rb-Sr	282	Гранит	6
Sm-Nd	303	Флюорит и вольфрамит из рудных жил	
<sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar	215	Гранит	7

Обрабатывая каменные материал, авторы данной работы, как и их предшественники, обратили внимание, что для гранитоидов Кызыл-Тау характерно значительное развитие метасоматических структур, связанных с альбитизацией полевых шпатов, появлением мирмекитов, вторичными изменениями полевых шпатов (развитием серицитизации плагиоклазов и пелитизации калиевых полевых шпатов), хлоритизацией биотита (табл. 2). Во всех магматических фациях наблюдаются постепенные переходы от порфиroidных к равномернозернистым разностям. Порфиroidные выделения II фазы гранитоидов представлены идиоморфными зернами плагиоклаза и округлыми выделениями кварца (похожего на «гороховидный»). Типичными аксессуарными минералами адамеллитов I фазы интрузива Кызыл-Тау являются сфен и магнетит, для последующих - ильменит. Во всех разностях гранитоидов присутствует флюорит, монацит, циркон, апатит.

При работе с аншлифами были обнаружены и диагностированы (метод спектрального микроанализа) рудные минералы: вольфрамит, марказит, борнит, халькопирит, халькозин, мелантерит ( $Fe[SO_4] \times 7H_2O$  и метацейнерит  $Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \times 8H_2O$ ).

## Петрографическая характеристика гранитоидов Кызыл-Тау

Характеристика	I фаза		II фаза	
	адамеллит	лейкогранит	лейкогранит порфи- ровидный	лейкогранит равномерно- зернистый
микроструктуры	Равномернозернистая Слабопорфировидная Гранофировая Пойкилитовая Обрастания Реакционные каемки Пертиты замещения Мирмекиты	Равномернозернистая Пертиты замещения «Шахматный» альбит	Порфировидная Пертиты замещения Мирмекиты	Равномернозернистая Пертиты замещения (сегре- гационные, обрастания)
метасоматоз	Серицитизация Альбитизация	Альбитизация	Серицитизация Альбитизация	Альбитизация
акцессорные минералы	Сфен Магнетит Флюорит Монацит Апатит Циркон	Ильменит Флюорит Монацит Апатит Циркон	Ильменит Флюорит Монацит Апатит Циркон	Ильменит Флюорит Монацит Апатит Циркон

Оценить параметры кристаллизации массива, выявить геохимические особенности расплава стало возможно, анализируя структурные, химические и другие особенности сквозных породообразующих минералов. Так, для выяснения физико-химических параметров гранитообразования ведущую роль отводят магнезиально-железистой слюде [8, 9, 10, 11 и др.]. Слюды в своей совершенной схеме изоморфизма, в которой участвуют как видообразующие ионы, так и редкие и рассеянные, фиксируют параметры минералообразования.

Биотит в изучаемых гранитах является единственным темноокрашенным породообразующим минералом. Его содержание в породах невелико (до 3-5 %). Довольно часто в зернах биотита можно наблюдать включения циркона, монацита, реже апатита, ильменита, магнетита и сфена, иногда включения сульфидов меди и касситерита. Заметное количество зерен биотита подвержено хлоритизации.

Химия биотита гранитоидов Кызыл-Тау определяется его переменным содержанием алюминиевого, железистого и магниевого минералов (табл. 3, 4). Факторный анализ (метод главных компонент) показал, что по видообразующим компонентам вся выборка разделяется на две группы (рис. 1). В первую группу вошли хлорсодержащие слюды сидерофиллит-аннитового ряда гранитоидов I фазы и частично порфировидных лейкогранитов II фазы. Вторая группа объединяет фторсодержащие слюды аннит-флогопитового ряда гранитоидов II фазы.

Физико-химические условия становления массива отражают расчетные параметры биотита - глиноземистости, железистости, титанистости и фтористости [8-15].

Глиноземистость и железистость биотита Кызыл-Тау уменьшается от ранних магматических фаций к поздним, при этом первый показатель меняется незначительно, второй - более динамично. Все это происходит на фоне увеличения в составе слюды фтора.

Таблица 3

## Содержание видообразующих элементов (вес.%) и микропримеси (ppm) в составе биотита гранитоидов Кызыл-Тау

Элементы	I фаза		II фаза	
	Адамеллит (5)	Лейкогранит (5)	Лейкогранит порфи- ровидный (5)	Лейкогранит равномерно- зернистый (5)
SiO <sub>2</sub>	35,02	36,26	36,81	38,38
TiO <sub>2</sub>	2,75	2,64	3,55	3,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,01	15,15	14,72	14,11
FeO	31,3	32,09	28,54	23,33
MnO	0,57	0,57	0,68	1,19
MgO	1,81	1,77	3,77	7,38
CaO	0,00	0,05	0,00	0,03
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,05
K <sub>2</sub> O	9,39	9,11	9,48	9,29
F	0,02	0,00	0,33	1,74
Cl	0,26	0,22	0,14	0,00

Элементы	I фаза		II фаза	
	Адамеллит (5)	Лейкогранит (5)	Лейкогранит порфировидный (5)	Лейкогранит равномернoзернистый (5)
сумма	96,12	97,85	98,01	98,54
Li	430	430	610	1580
B	16	33	160	62
Zr	280	218	280	470
Nb	500	600	500	270
Sn	720	620	480	260
V	24	33	15	105
Ge	4,5	4,1	3,7	3,0
Ga	150	110	73	38
Y	48	50	60	44
Cu	>1000	1000	300	300
Pb	62	190	70	45
Формульные коэффициенты				
K	0,98 - 1,03	0,91 - 0,96	0,95 - 1,01	0,88 - 1,01
Na	0,00	0,00 - 0,01	0,00	0,00 - 0,03
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00 - 0,01
Fe	2,12 - 2,30	2,12 - 2,23	1,67 - 2,07	1,40 - 1,69
Mg	0,21 - 0,23	0,20 - 0,23	0,34 - 0,75	0,73 - 0,99
Ti	0,16 - 0,19	0,15 - 0,17	0,20 - 0,23	0,17 - 1,19
Mn	0,04	0,04	0,03 - 0,08	0,07 - 0,09
Al <sub>VI</sub>	0,24 - 0,46	0,35 - 0,47	0,28 - 0,41	0,29 - 0,37
Al <sub>IV</sub>	1,04 - 1,16	1,02 - 1,07	1,02 - 1,06	0,94 - 1,03
Si	2,84 - 2,96	2,93 - 2,98	2,94 - 2,98	2,97 - 3,06
F	0,00 - 0,02	0,00	0,00 - 0,33	0,26 - 0,55
Cl	0,03 - 0,04	0,02 - 0,04	0,02 - 0,04	0,00
OH	1,24 - 1,48	1,29 - 1,39	0,94 - 1,31	0,74 - 1,19
O	0,47 - 0,72	0,57 - 0,69	0,65 - 0,81	0,55 - 0,71

Таблица 4

### Минеральный состав и типоморфные соотношения биотита гранитоидов Кызыл-Тау

Характеристика	I фаза		II фаза	
	Адамеллит (5)	Лейкогранит (5)	Лейкогранит порфировидный (5)	Лейкогранит равномернoзернистый (5)
Fe minal	75 - 82	74 - 79	60 - 74	49 - 60
Al minal	1 - 1,5	1 - 1	1 - 3	2,5 - 3
Mg minal	7 - 8	7 - 8	12 - 27	26 - 35
(K+Na)/Al	0,59 - 0,68	0,56 - 0,63	0,61 - 0,71	0,62 - 0,73
Si/Al	1,93 - 2,03	2,00 - 2,09	2,07 - 2,24	2,23 - 2,34
(Mg+Fe)/Al	1,53 - 1,80	1,58 - 1,72	1,63 - 1,83	1,80 - 1,88
L <sub>Bi</sub>	20,83 - 22,50	20,77 - 21,91	19,70 - 21,22	19,16 - 19,79
F <sub>Bi</sub>	90,21 - 91,27	90,17 - 91,39	69,01 - 85,89	58,57 - 69,83
T <sub>Bi</sub>	6,32 - 6,91	5,92 - 6,41	7,58 - 8,49	6,46 - 6,99

Примечание. L<sub>Bi</sub> - глиноземистость магнезиально-железистых слюд (Al/(Al+Mg+Fe+Si)); F<sub>Bi</sub> - железистость магнезиально-железистых слюд (Fe/(Fe+Mg)); T<sub>Bi</sub> - титанистость магнезиально-железистых слюд (Ti/(Fe+Mg+Mn)).

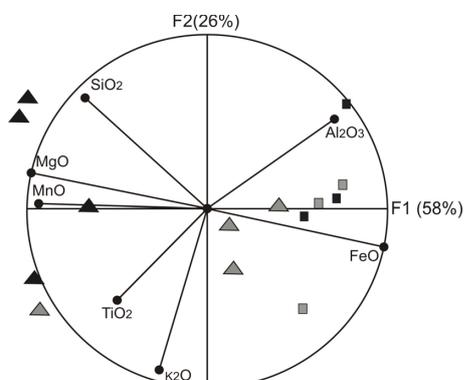


Рис. 1. Совмещенная проекция переменных (оксидов) и наблюдений на плоскость 1 и 2 компонент

Примечание. 1 - биотит адамеллитов I фазы; 2 - из лейкогранитов I фазы; 3 - из порфировидных лейкогранитов II фазы; 4 - из равномернoзернистых гранитов II фазы.

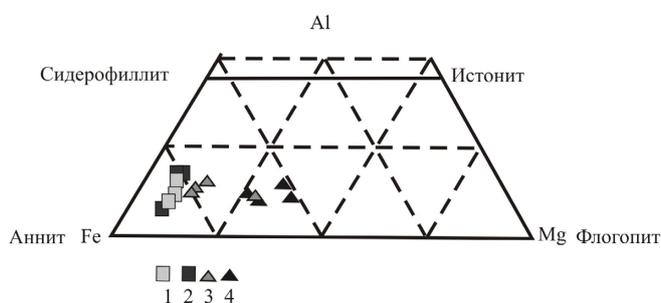


Рис. 2. Минеральный состав биотита гранитоидов массива Кызыл-Тау

Содержание фтора в биотите зависит от активности воды и кислорода в расплаве. Безфтористые и низкофтористые биотиты Кызылтауского массива кристаллизовались из расплава с высокой фугитивностью кислорода и воды. Это способствует образованию биотита с высоким содержанием аннитовой молекулы, которому несвойственно концентрировать фтор. Наличие сфен-магнетитовой ассоциации в гранитоидах I фазы подтверждает флюидный режим расплава. Особенностью фторсодержащих биотитов гранитоидов Кызыл-Тау является наличие широко проявленного изоморфизма:  $Mg^{2+} - (2Li^+) \leftrightarrow Fe^{2+}$ , что является следствием геохимической близости лития и магния. Для F-содержащих биотитов концентрации лития и магния увеличиваются в 3,5 раза относительно Cl-содержащих (табл. 1). Следует отметить, что наиболее близкой к действительной величине концентраций HF во флюиде можно получить исходя из состава слюды [16]. Поскольку для темных слюд Кызыл-Тау обнаруживаем корреляцию количества фтора и отношений главных катионов, участвующих в изоморфизме, возможно применение уравнения биотитового геофториметра. Для гранитоидов поздней фазы массива Кызыл-Тау десятичный логарифм концентрации HF составляет порядка минус 1,5, что соответствует значениями биотита Акчатауского гранитоидного комплекса, месторождения Акчатау.

Наряду с глиноземистостью, железистостью, фтористостью важнейшим параметром состава биотита является титанистость. Вхождение титана в кристаллическую решетку триоктаэдрических слюд определяется двумя параметрами системы: температурой и фугитивностью кислорода. Чем выше температуры кристаллизации, тем вероятнее появление титана в слюде. Повышение активности кислорода в расплаве сдвигает равновесие между катионными и анионными комплексами титана в область устойчивости последних, тем самым препятствуя вхождению Ti в октаэдрические позиции биотита [14]. В биотите гранитоидов I фазы Кызыл-Тау содержание  $TiO_2$  и FeO имеют положительную значимую связь, свидетельствующую о относительно высоком потенциале кислорода, характерном для сфен-магнетитовых серий. Для биотита II фазы - корреляция отрицательная. По содержанию  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  в биотите предложили оценивать фации глубинности пород [12]. На основании имеющихся аналитических данных (табл. 1), гранитоиды I фазы кристаллизовались в абиссальных условиях, II – мезо-гипабиссальных.

Состав биотита, содержание в нем редких и рудных элементов определяется геохимией элементов, а так же зависит от их концентрации в расплаве. Однако следует помнить, что присутствие других изоморфноемких минералов в породе, например, мусковита, роговой обманки, приводят к снижению содержания рудных и редких в биотите. Содержание многих редких элементов в биотите Кызыл-Тау значительно превышают средние значения, определенные В.В. Ляховичем для биотитов из биотитовых гранитов СССР [17]. Для многих из них, главной формой вхождения в биотит является не структурная, а минеральная, т.е. в виде самостоятельных включений (Zr, Y, Cu, Sn, Bi). Концентрации некоторых элементов (в частности Li) благодаря их фторофильности увеличиваются в биотите поздней фазе. Концентрации Sn, Bi, Ga, Ge, Cu уменьшаются по направлению к поздней фазе, но все равно остаются довольно высокими. Для Sn и Bi главным фактором, благоприятствующим их вхождению в структуру биотита являются повышенная его железистость. Концентрация Ga в биотите зависит от наличия Al в шестерной координации (изоморфизм Al-Si-Ga). Количество Ge в биотите зависит от активности флюида, который способствует его геохимической специфике (или он аналог Si, или проявляет халькофильные свойства).

Анализ данных химического состава биотита и вольфрамит парагенетических ассоциаций, выявил прямую положительную корреляционную зависимость содержания гюбнеритового компонента в вольфрамите и флогопитового минала в слюде.

Таким образом, изменения состава биотита Кызыл-Тау в полной мере отражают развитие магматической системы. Расплав, формирующий породы I фазы, был более вязким, кристаллизовался в абиссальных условиях. Летучие компоненты, играющие ведущую роль в составе флюида, являлись кислород, хлор, вода и их активность определила минеральный набор второстепенных и рудных минералов. Вторая порция расплава кристаллизовалась в условиях низкого парциального давления кислорода, была маловодной, фтористой. Это пересыщенный глиноземом известково-щелочных расплавов нормальной щелочности, однако, относительно первой фазы, он отличался увеличением химического потенциала калия. Кристаллизация этого расплава проходила в мезо-гипабиссальных условиях. По железистости-глиноземистости биотита кызылтауский комплекс имеет черты гранитоидов I-типа ильменитовой специализацией, с которой связывают олово-вольфрамовое оруденение Типоморфизм биотита указывает на общие геохимические особенности и физико-химические тенден-

ции развития минералообразующей системы, характерные для рудоносных гранитоидов данного металлогенического профиля.

### Литература

1. Семенцов Б.Г. Крупнейшие месторождения Горного и Монгольского Алтая (геологическое строение и история познания). - Горно-Алтайск: Горно-Алт. тип., 2011. - 695 с.
2. Fluid regime and ore formation in the tungsten (–yttrium) deposits of Kyzyltau Mongolian Altai: evidence for fluid variability in tungsten–tin ore systems / Graupner T., Kempe U., Dombon E., Patzold O., Leeder O., Spooner E.T.C. // *Chemical geology*. – 1999. - V. 154. - P. 21-58.
3. Иванова Г.Ф., Максимюк И.Е., Наумов В.Б. Геохимические особенности гранитоидов и вольфрамитового оруденения месторождения Кызыл-Тау (Западная Монголия) // *Геохимия*. – 1985. - № 6. - С. 858-869.
4. О мезозойском возрасте рудоносных гранитов массива Кызыл-Тау (Монгольский Алтай) / Козлов В.Д., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А., Калмычкова Т.Н., Игнатов В.В., Альмухамедов Е.А. // *Геология и геофизика*. – 1995. – Т. 36. - № 3. - С. 73-77.
5. Демин П.А. Условия образования и зональность вольфрамовых месторождений Монгольского Алтая / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. - Иркутск: Институт Земной коры СО РАН, 1993. - 17 с.
6. Kempe U., Belyatskiy B.V. Direct isotope dating of W(-Y) mineralization at Kyzyltau (Mongolian Altai): preliminary results // *International geology review*. – 2000. – V. 42. - P. 470-480.
7. Пермотриасовый магматизм и Ag-Sb оруденение в Юго-Восточного Алтая и Северо-Западной Монголии / Павлова Г.Г., Борисенко А.С., Говердовский В.А., Травин А.В., Жукова И.А., Третьякова И.Г. // *Геология и геофизика*. – 2008. - Т. 49. - № 7. - С. 720-733.
8. Маракушев А.А., Тарарин И.А. О минералогических критериях щелочности гранитоидов // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. – 1965. - № 3. - С. 20-37.
9. Путинцев А.В., Григорьев С.И. Состав биотитов из гранитов и петрогенетическая типизация орогенных гранитоидных серий // *ЗВМО*. – 1993. - Ч. 122. - № 4. - С. 18-34.
10. Бухарова О.В., Коноваленко С.И., Баева А.А. Минералого-геохимические особенности пегматитовых гранитоидов гранит-лейкогранитовой формации с граносиенитами // *Вестник Томского государственного университета*. – 2010. - № 338. - С. 217-222.
11. Валуй Г.А., Авченко О.В., Кирюхина Н.И. Генезис магнезиальных биотитов в малоглубинных гранитоидах // *Доклады АН СССР*. – 1991. - Т. 319. - № 2. - С. 461-465.
12. Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С. Петрология магматических гранитоидов (на примере Урала). - М.: Наука, 1975. – 286 с.
13. Бороданов В.М. Особенности состава биотита гранитоидов, сопровождаемых вольфрамовым оруденением // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. – 1983. - № 7. - С. 76-81.
14. Хитрунов А.Т. О титанистости биотитов гранитоидов // *Доклады АН СССР*. – 1974. - Т. 215. - № 5. - С. 1214-1216.
15. Григорьев С.И. Типизация, петрогенезис и геодинамика известково-щелочных и субщелочных гранитоидных комплексов / С.И. Григорьев. – С-Пб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 108 с.
16. Аксюк А.М. Режим фтора в глубинных гидротермальных флюидах и поверхностных водах (экспериментальные исследования) / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. - М.: Институт экспериментальной минералогии, 2009. - 59 с.
17. Ляхович В.В., Ляхович Т.Т. Геохимические особенности биотита // *Геохимия*. – 1987. - № 3. - С. 339-349.