

УДК 553.3/4.078:553.2:551.73

АНОРОГЕННЫЕ ГРАНИТОИДЫ ЮСТЫДСКОГО МАССИВА: ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ

¹Гусев А.И., ¹Гусев Н.И., ²Говердовский В.А.

¹Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукина, Бийск,
e-mail: anzerg@mail.ru;

²Всероссийский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург

Гранитоиды Юстыдского массива располагаются на юго-востоке Горного Алтая и имеют позднедевонский возраст. По своему составу и особенностям генерации они близки к древним гранитоидам «рапакиви», сформировавшимся во внутриплитной кратонной обстановке со зрелой земной корой. Приведена последовательность формирования гранитоидов: рапакивиподобные граниты 1 фазы, грубопорфировидные лейкограниты 2 фазы и мелкозернистые лейкограниты 3 фазы, различающиеся термодинамическими параметрами кристаллизации и флюидным режимом. Во всех фазах проявлено фракционирование редкоземельных элементов в виде тетрадного эффекта, имеющего аномальные значения для пород Горного Алтая.

Ключевые слова: анорогенные гранитоиды, петрология, геохимия, флюидный режим, рапакивиподобные граниты, тетрадный эффект фракционирования

Введение. Петротипический Юстыдский массив (20×13 км) является наиболее крупным среди аналогичных по составу на территории России. Он представлен двумя разобщенными выходами собственно Юстыдского массива (6×8 км) и расположенного южнее Богутинского массива (5×4 км). Оба интрузивных тела сливаются на территории Монголии в единый плутон. Севернее Юстыдского массива расположены Тургенигольский, Барбургазинский и Тоштуозекский массивы. Интрузивы конкордантны складчатой структуре вмещающих терригенных отложений и находятся в общем ореоле роговиков. Выходы массивов размещены в центральной и восточной частях Юстыдского прогиба, в поле развития барбургазинской и наиболее молодой богутинской свиты среднего-верхнего девона. Массивы сопровождают рои даек долеритов караюкского комплекса, имеющих близкий возраст формирования с гранитами Юстыдского массива ($375,1 \pm 5,4$ млн лет и $375,4 \pm 5,5$ млн лет, соответственно) по результатам датирования по цирконам U-Pb методом (SHRIMP II) [4].

Цель исследования – выявление петрологических, геохимических особенностей формирования гранитоидов массива и оценка параметров флюидного режима.

Последовательность формирования пород массивов у предшественников противоречива и неоднозначна в силу того, что гранитоиды имеют близкий состав и при внедрении последовательных фаз формировались термостатированные контакты, трудно диагностируемые в полевых условиях. По нашим данным в составе массива уверенно выделяются 3 фазы: рапакивиподобные граниты, грубопорфировидные лейкограниты и мелкозернистые лейкограниты. Петрографические особенности пород и составы минералов изучены довольно детально [2–4].

В табл. 1 приведены представительные анализы указанных фаз гранитоидов.

Нормализация некоторых РЗЭ проведена относительно концентраций в хондрите по [6].

По составу все фазовые разновидности пород относятся к умеренно-щелочным гранитам с преобладанием калия над натри-

ем. Принадлежит к высококалиевой серии, мета – пералюминиевым разновидностям, все породные типы относятся к высокожелезистым разновидностям при резком преобладании закисного железа над окисным [4]. Последнее указывает на восстановленный тип расплавов, из которых кристаллизовались породы. Это подтверждается также наличием в составе пород ферритных глобулей, и самородных элементов – меди, олова, свинца, цинка, а также графита [5]. Резкое преобладание ильменита в составе аксессуаров в породных типах также сви-

детельствует о восстановительной обстановке в расплавах. По этому показателю все гранитоиды Юстыдского массива следует относить к ильменитовой серии [9], которая формируется за счет дегидратационного плавления протолита в условиях существенного притока тепла и при низкой фугитивности кислорода. По соотношениям La/Yb_N все породные типы относятся к средне дифференцированному типу. Ранее нами по сумме признаков породы Юстыдского массива отнесены к анорогенному A_2 – типу [3, 4].

Таблица 1

Содержания оксидов (масс. %), элементов (г/т) в гранитоидах Юстыдского массива

Оксиды, элементы и их отношения	Рапакивиподобные граниты 1 фазы	Грубопорфировидные лейкограниты 2 фазы	Мелкозернистые лейкограниты 3 фазы
1	2	3	4
SiO ₂	71,20	74,83	74,70
TiO ₂	0,44	0,28	0,29
Al ₂ O ₃	13,31	12,41	12,80
Fe ₂ O ₃	0,89	0,69	0,37
FeO	2,84	1,70	1,60
MnO	0,05	0,04	0,03
MgO	0,46	0,26	0,30
CaO	1,59	0,88	0,98
Na ₂ O	2,91	2,70	3,11
K ₂ O	5,25	5,24	5,11
P ₂ O ₅	0,10	0,06	0,04
Li	43,6	41,2	43,7
Be	5,3	7,2	8,1
Sc	10,4	8,3	7,4
V	15,7	11,4	11,1
Cr	11,2	9,3	8,3
Co	4,4	3,2	3,1
Ni	9,2	8,7	6,2
Cu	23,7	31,3	26,1
Zn	25,5	13,8	12,2
Ga	18,6	14,9	15,7
Rb	277	268	271
Sr	116	128	126
Y	110	134	137
Zr	172	205	203

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Nb	20,1	20,9	19,4
Cs	5,7	6,4	8,3
Ba	189	179	165
La	41,8	68,8	69,7
Ce	110,1	235,4	123,2
Pr	5,1	10,1	11,2
Nd	46,8	103,2	98,5
Sm	8,0	17,7	16,7
Eu	0,32	0,21	0,20
Gd	1,4	1,9	2,0
Tb	2,3	4,7	4,1
Dy	1,2	2,5	2,2
Ho	0,11	0,13	0,12
Er	0,31	0,34	0,32
Tm	0,13	0,21	0,15
Yb	6,9	12,4	11,3
Lu	0,8	1,5	1,2
Hf	10,0	12,2	12,3
Ta	2,4	3,3	3,2
Pb	27,5	18,3	16,5
Th	35	65	55
U	4,2	16,6	15,3
La/Yb _N	4,03	3,67	4,07
La/Sm _N	3,2	2,43	2,55
U/Th	0,12	0,26	0,28
Eu/Eu*	0,189	0,058	0,059

Пр и м е ч а н и е : силикатные анализы выполнены в лаборатории ИМГРЭ (г. Москва), а на химические элементы – методом ICP-ms в лаборатории ОИГиГ СО РАН (г. Новосибирск).

Особенности флюидного режима гранитоидов оценены на основе экспериментальных данных по составам биотитов, изложенных во многих работах [1, 7]. Составы биотитов Юстыдского массива и некоторые параметры структурной решётки слюды приведены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что биотиты породных типов отличаются высокой железистостью при доминирующей роли закисного железа. Обращают на себя вни-

мание высокие концентрации воды в составе биотитов, что указывает на высокое содержание водной фазы в магматогенных флюидах. В поздних фазах наблюдается появление бора, что, вероятно, обусловило интенсивную турмалинизацию пород как внутри массива, так и в его контактах. В целом биотит во всех случаях следует относить к гидроксил-биотиту по показателю OH_{Bt} . Высокое содержание воды во флюидах должно влиять на температуры кристаллизации

пород в сторону их снижения и определять особенности потенциальной рудоносности.

Оценка параметров флюидного режима пород приведена в табл. 3.

Таблица 2

Химический состав биотитов гранитоидов Юстыдского массива (масс. %)

Оксиды и структурные показатели биотитов	1	2	3
SiO ₂	34,94	34,73	35,45
TiO ₂	2,24	2,07	2,35
Al ₂ O ₃	13,6	18,65	15,03
Fe ₂ O ₃	4,5	4,65	4,35
FeO	24,02	24,10	23,10
MnO	0,21	0,14	0,12
MgO	4,92	1,51	4,12
CaO	0,3	0,10	0,11
Na ₂ O	0,2	0,12	0,12
K ₂ O	9,25	9,65	9,35
CO ₂	-	-	-
H ₂ O+	4,97	3,12	5,10
F	0,42	0,86	0,41
Cl	0,44	0,47	0,24
B ₂ O ₃	-	0,31	0,45
Σ	100,01	100,48	100,30
Al _{IV}	1,88	1,98	2,0
Al _{VI}	(-0,07)	0,58	0
F _{Bt}	0,017	0,057	0,017
Cl _{Bt}	0,01	0,015	0,005
OH _{Bt}	0,97	0,93	0,98

Примечание: 1 – рапакивиподобные граниты 1 фазы; 2 – грубопорфировидные лейкограниты 2 фазы; 3 – мелкокристаллические лейкограниты 3 фазы; Al_{IV}, Al_{VI} – алюминий тетраэдрической и октаэдрической координаций в структуре биотита; F_{Bt}, Cl_{Bt}, OH_{Bt} – миналы фтор-биотита, хлор-биотита, гидроксил-биотита в структуре слюды.

Действительно, приведенные оценки температур кристаллизации биотитов не высоки и снижаются от гранитоидов 1 фазы (680 °C) к лейкогранитам заключительной фазы (660 °C). Низкие значения фугитивности кислорода и высокие – коэффициента восстановленности флюидов (0,58-0,65) свидетельствуют о редуцированной (восстановительной) среде кристаллизации пород. Высокие парциальные давления воды во флюидах указывают на

важную роль её в эволюции магматического очага. Резкое увеличение концентрации плавиковой кислоты во флюидах 2 фазы, по сравнению с 1 фазой, указывает на открытый характер глубинного очага в отношении флюидов, что могло быть связано с подтоком фтора в составе трансмагматических флюидов более глубинного мантийного источника. Подток бора в заключительных фазах становления магматитов Юстыдской системы отмечен нами

ранее. По потенциалу ионизации биотита выявляется повышение основности среды для второй фазы грубопорфировых лейкогранитов и повышение кислотности среды для заключительной фазы мелкозернистых

лейкогранитов, относительно рапакививоподобных гранитов ранней фазы. Это свидетельствует о неустойчивом режиме глубинного очага при генерации разнофазовых дериватов Юстыдского массива.

Таблица 3

Параметры флюидного режима гранитоидов Юстыдского массива

Фазы гранитоидов	T	fO ₂	fH ₂ O	pH ₂ O	pCO ₂	M _{HF}	K _{вос}	y
Овоидные рапакививоподобные граниты	680	-15,1	0,82	1,28	0,72	1,27	0,65	193,7
Грубопорфировидные лейкограниты	670	-16,2	0,85	1,65	0,75	1,60	0,58	191,4
Мелкозернистые лейкограниты	660	-16,0	0,90	1,3	0,80	1,28	0,61	194,5

Примечание: T° C – температура кристаллизации; lg fO₂ – логарифм фугитивности кислорода; fH₂O – фугитивность воды; pH₂O, pCO₂ – парциальное давление воды и углекислоты; K_{вос} – коэффициент восстановленности флюидов; M_{HF} – концентрации плавиковой кислоты во флюидах в моль/дм³ по [1]; y – потенциал ионизации биотита по В.А. Жарикову. Фугитивности и парциальные давления даны в килобарах.

Ранее нами установлено интенсивное фракционирование элементов в процессе эволюции магматического очага, сформировавшего Юстыдский и соседние массивы

[3]. Для фазовых породных типов оценены особенности фракционирования редкоземельных и других элементов, сведенных в табл. 4.

Таблица 4

Отношения химических элементов и значения тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ в породах Юстыдского массива

Отношения элементов и значения тетрадного эффекта	Рапакививоподобные граниты 1 фазы	Грубопорфировидные лейкограниты 2 фазы	Мелкозернистые лейкограниты 3 фазы	Хондрит
Y/No	1000,0	1030,76	1141,7	29,0
Eu/Eu*	0,189	0,058	0,059	0,32
La/Lu	52,25	45,86	58,08	0,975
Zr/Hf	17,2	16,8	16,5	36,0
Sr/Eu	362,5	609,5	630,0	100,5
TE _{1,3}	2,68	4,18	3,65	-

Примечание: TE_{1,3} – тетрадный эффект по В. Ирбер [8]. Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2. Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [6].

Как показывают компоненты табл. 4, все породные типы Юстыдского массива, в том числе, и рапакивиоподобные граниты первой фазы, являются сильно эволюционированными продуктами функционирования и эволюции глубинного очага. Об этом говорят высокие значения тетрадного эффекта М-типа фракционирования [10] редкоземельных элементов (пограничное значение для М-типа тетрадного эффекта составляет 1,1, в нашем случае $TE_{1,3}$ варьирует от 2,68 до 4,18). Относительно хондритовых значений в породах Юстыдского массива значительно увеличены отношения Y/No , La/Lu , Sr/Eu и снижены отношения Eu/Eu^* , Zr/Hf . Отношение La/Lu в породах Юстыдского массива намного выше чем в хондритах и указывает на значительное обогащение анализируемых пород лёгкими редкими землями. Высокая фракционированность породных типов в сумме с другими признаками указывает на возможность генерации вольфрам-молибденового и редкоземельного оруденения в тесной связи с выходами пород юстыдского комплекса. Металлогеническая специализация комплекса реализована в формировании комплексного Каракульского месторождения (Co-Ni-W-PЗЭ состава) и ряда проявлений олова, вольфрама и молибдена.

Интерпретация результатов

Полученные данные показали, что анорогенные гранитоиды Юстыдского массива формировались в сложных Р-Т параметрах, в условиях высокой доли водной составляющей в магматогенных флюидах, что приводило к заметному снижению температур кристаллизации пород. Близкая сопряжённость во времени и пространстве базитовых образований караюкского комплекса и гранитоидов юстыдского комплекса с рапакивиоподобными гранитами указывает на некоторое сходство в формировании гранитов рапакиви древних кратонов Балтийского,

Украинского, Канадского и других щитов, связанных тесно с базитами. Анорогенный характер гранитоидов, их тесная сопряжённость с базитовыми дайками и другие признаки позволяют предположить их генерацию с функционированием Сибирского суперплюма.

Высокая водная составляющая флюидов, обогащённость такими летучими компонентами, как фтор, бор, значительная фракционированная дифференцированность породных типов на обширный комплекс элементов способствовали формированию различных типов оруденения олова, вольфрама, молибдена, редких земель. На многих объектах наблюдается совмещение оруденения, связанного с базитовыми дайками и гранитоидами.

Список литературы

1. Аксюк А.М. // Петрология. – 2000. – Т. 10, №6. – С. 630-644.
2. Говердовский В.А. Магматические и рудные комплексы Юстыдского рудного узла (Юго-Восточный Алтай): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Новосибирск, 1991. – 18 с.
3. Гусев А.И., Гусев Н.И. // Природные ресурсы Горного Алтая. – Горно-Алтайск, 2006. – № 1. – С. 39-44.
4. Гусев Н.И., Шокальский С.П., Вовшин Ю.Е. и др. // Региональная геология и металлогения. – 2009. – № 40. – С. 54-69.
5. Полуэктова Т.И., Баженов А.И., Новоселов С.В. // Геология и геофизика, 1988. – №9. – С. 34-39.
6. Anders E., Greevesse N. // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – Vol. 53, № 2. – P. 197-214.
7. Jacobs D.C., Parry W.T. // Econ. Geology. – 1979. – Vol. 74, №4. – P. 860-887.
8. Irber W. // Geochim Cosmochim Acta. – 1999. – Vol. 63, №3/4. – P. 489-508.
9. Ishihara S. // Econom. Geology. – 1981. – 75 th Anniversary Volume. – P. 458-484.
10. Masuda A., Ikeuchi Y. // Geochim J. – 1979. – Vol. 13. – P. 19-22.

ANOROGENIC GRANITOIDS OF JUSTIDSKII MASSIF: PETROLOGY, GEOCHEMISTRY AND FLUID REGIME

¹Gusev A.I., ¹Gusev N.I., ²Gjverdovskii V.A.

¹*The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru;*

²*A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersberg*

Granitoids of Justidskii massif settle on the south-east Mountain Altay and it has late Devonian age. They are close on composition and peculiarities generation to old granitoids «rapakivi» that formed in interplate cratonic setting with mature Earth crust. Sequence of forming granitoids: rapakivi similar granite 1 phase, course porphyritic leucogranite 2 phase, fine-grained leucogranite 3 phase, distinguishing by thermodynamic parameters crystallization and fluid regime. Fractionation of rare earth elements display in all phases in sight tetrad effect, having anomalous meaning for rocks of Mountain Altay.

Keywords: anorogenic granites, petrology, geochemistry, fluid regime, rapakivi similar granites, tetrad effect fractionation