

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКОГО ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА ГРАНИТОВ РАПАКИВИ (*Западное Прибайкалье*)

В.Б. Савельева, Е.П. Базарова

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Приморский комплекс в Западном Прибайкалье, сформировавшийся на постколлизивной стадии становления Сибирского кратона в раннем протерозое, включает граниты рапакиви, равномерно-зернистые биотитовые и лейкократовые граниты, аляскиты и представлен высококальциевой гранитоидной ассоциацией умеренной и несколько повышенной общей щелочности, с повышенными относительно кларковых содержаниями F, Ba, Pb, PЗЭ, Zr, Th, Zn. Комплекс представлен тремя массивами: Бугульдейско-Ангинским, Улан-Ханским и Трехголовым, в развитии которых выделяются две интрузивные фазы. Общей направленностью эволюции состава главной фазы являлся рост кремнекислотности при одновременном увеличении апгаитности, железистости и снижении отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$. Наиболее контрастны по составу и условиям кристаллизации Бугульдейско-Ангинский и Трехголовый массивы. Исходным для первого являлся относительно слабодифференцированный недосыщенный водой расплав, его кристаллизация происходила в умеренно глубинных условиях ($P_{\text{общ}} = 3\text{—}4$ кбар) и не сопровождалась существенным накоплением в лейкогранитах гранитофильных элементов (индекс концентрации гранитофильных элементов (ИНК) около 3), за исключением аляскитов, кристаллизация которых происходила в верхней части магматической камеры (ИНК = 5). Исходным для Трехголового массива служил лейкогранитный расплав, обогащенный Cs, Li, Rb, Sn, кристаллизация последнего протекала при пониженном $P_{\text{общ}}$ (около 2 кбар). Средние содержания Sn в лейкогранитах превышают кларковые для бедных кальцием гранитов в 4 раза, Th в 3.8, Rb в 2.7, Cs в 2.5, F в 2 раза (ИНК около 9). С гранитами заключительной фазы в Трехголовом массиве связаны проявления кварц-мусковитовых (\pm топаз, флюорит) грейзенов, содержащих касситерит, колумбит, ильменорутил, вольфрамит, бисмутинит и другие. В совокупности это позволяет рассматривать массив Трехголовый как перспективный в отношении оловянного оруденения.

Рапакиви, редкометалльные граниты, дифференциация, грейзены, олово, Восточная Сибирь.

THE EARLY PROTEROZOIC PRIMORSKII COMPLEX OF RAPAKIVI GRANITES (*western Cisbaikalia*): GEOCHEMISTRY, CRYSTALLIZATION CONDITIONS, AND ORE POTENTIAL

V.B. Savel'eva and E.P. Bazarova

The Primorskii complex in western Cisbaikalia, formed in the Early Proterozoic at the postcollisional stage of the Siberian craton evolution, comprises rapakivi granites, equigranular biotitic and leucocratic granites, and alaskites. It is a K-rich granitoid assemblage with medium and elevated alkalinity, whose F, Ba, Pb, REE, Zr, Th, and Zn contents exceed the clarkes. The complex consists of three plutons: Bugul'deika–Anga, Ulan-Khan, and Trekhgolovyi, which formed in two intrusive stages. The evolution of the major-stage composition was marked by an increase in silica content, with a simultaneous increase in apgaite and Fe contents and a decrease in $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$. The Bugul'deika–Anga and Trekhgolovyi plutons are the most contrasting in composition and crystallization conditions. The former originated from a weakly differentiated water-undersaturated melt, which crystallized at medium depths ($P_{\text{tot}} = 3\text{—}4$ kbar). The crystallization was not accompanied by considerable accumulation of granitophile elements (the concentration index (CI) of granitophile elements is ~ 3) in the leucogranites, except the alaskites, which crystallized in the upper part of the magma chamber (CI = 5). The Trekhgolovyi pluton originated from a leucogranitic melt enriched in Cs, Li, Rb, and Sn, which crystallized at a low P_{tot} (~ 2 kbar). The average contents of some elements in the leucogranites are higher than their clarkes in Ca-poor granites: by a factor of 4 for Sn, 3.8 for Th, 2.7 for Rb, 2.5 for Cs, and 2 for F (CI ~ 9). The final-stage granites in the Trekhgolovyi pluton are associated with quartz–muscovitic (\pm topaz, fluorite) greisens, which contain cassiterite, columbite, ilmenorutile, wolframite, bismuthinite, and other minerals. The data suggest that the Trekhgolovyi pluton has a Sn potential.

Rapakivi granites, rare-metal granites, differentiation, greisens, Sn, East Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Граниты рапакиви являются одними из наиболее ранних в истории Земли высококальциевыми кислыми породами, формирование которых происходило в субплатформенном режиме, благоприятном для глубокой дифференциации расплава [Таусон и др., 1982]. В целом в рапакиви-гранитных комплексах выявлены два направления дифференциации. Первое — образование на заключительной стадии двуслюдяных топазсодержащих гранитов или их субвулканических аналогов — онгонитов [Коваленко, Коваленко, 1976]. Примерами являются Выборгский батолит [Rämö, Naapala, 1993; Naapala, Lukkari, 2005], Салминский массив [Свириденко и др., 1984] в северо-западной части Восточно-Европейской платформы, дайки онгонитов Украинского щита [Шаталов, 1991], комплекс Агуа-Боа в провинции Питинга, Бразилия [Lenharo et al., 2002]. Второе направление — формирование на завершающей стадии агпаитовых натровых гранитов — проявлено в вулканическом комплексе Алданского щита [Недашковский, Ленников, 1991], комплексе Мадейра, Бразилия [Lenharo et al., 2002]. Именно с наиболее поздними дифференциатами в комплексах рапакиви связаны месторождения и рудопроявления Sn с сопутствующими W, Be, Zn, Cu, Pb, а также РЗЭ, Nb, Ta, Zr пегматитового, скарнового, грейзенового, кварцево-жильного и других типов [Великославинский и др., 1978; Naapala, 1995; Недашковский и др., 2000; Lenharo et al., 2002, 2003].

В Западном Прибайкалье граниты рапакиви известны в составе приморского комплекса, возрастные датировки последнего составляют 1.86—1.91 млн лет [Бибикова и др., 1981; Донская и др., 2003]. Развитие комплекса связано с аккреционно-коллизийными событиями, проявившимися на территории современной Восточной Сибири на рубеже около 1.9 млрд лет. В результате была сформирована единая структура Сибирского кратона [Розен, 2003]. Как показано Т.В. Донской с соавторами [2003, 2005], граниты рапакиви приморского комплекса являются постколлизийными, образовавшимися на стадии коллапса коллизийной системы, менее чем через 50 млн лет после завершения основных коллизийных событий. А.М. Лариным с соавторами [2003] граниты приморского комплекса включены в состав постколлизийного Южно-Сибирского магматического пояса и отнесены к рапакиви-гранит-шошонитовой ассоциации [Ларин, 2009].

В то же время, несмотря на имеющиеся в литературе сведения о металлогенической специализации гранитоидов и вулканитов Южно-Сибирского магматического пояса [Лобанов, 1970; Рябых, Рябых, 1974; Собаченко и др., 1974; Прохоров и др., 1982; Бухаров, 1987], целенаправленное изучение дифференциации в приморском комплексе гранитов рапакиви не проводилось. Представляется, что это важно не только для оценки потенциальной рудоносности гранитов этого комплекса, но и в целом для анализа перспектив рудоносности палеопротерозойских постколлизийных гранитоидов в краевой части Сибирского кратона.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СОСТАВ КОМПЛЕКСА

Гранитоиды приморского комплекса образуют выходы протяженностью свыше 200 км и шириной до 20 км вдоль западного берега оз. Байкал, где слагают Приморский хребет и часть Байкальского хребта (рис. 1). Они группируются в три массива: Бугульдейско-Ангинский, Улан-Ханский и Трехголовый. Самым крупным является Бугульдейско-Ангинский массив длиной 135 км. Именно в его составе впервые в Прибайкалье были выделены граниты рапакиви, в наименее измененном виде представленные в районе бух. Песчаная (см. рис. 1) [Ескин и др., 1971; Мануйлова, Срывцев, 1974].

На большей части территории гранитоиды имеют тектонические или интрузивные контакты с метаморфическими породами PR₁ (сарминская серия, иликтинская и анайская свиты); на юго-востоке они граничат с раннепалеозойскими метаморфическими образованиями, на северо-западе трансгрессивно перекрыты осадочными отложениями байкальской серии верхнего рифея. Все массивы приурочены к зоне Приморского разлома, отделяющего Сибирский кратон от складчатого обрамления.

В составе всех массивов выделяются два главных типа гранитоидов: крупноовоидные с маргинационной структурой (рапакиви) и относительно равномерно-зернистые, иногда порфириовидные (с идиоморфными вкрапленниками щелочного полевого шпата). Крупноовоидные гранитоиды в основном слагают краевые части массивов, а относительно равномерно-зернистые — центральные. В зоне Приморского разлома породы разгнеиваны.

В вопросе выделения интрузивных фаз в составе комплекса нет единого мнения. Однако достоверно установлено прорывание крупнозернистых гранитов мелкосреднезернистыми, слагающими массивы площадью до 9 км², относительно маломощные (до 300 м) тела вытянутой формы и жилы. Поэтому вслед за большинством геологов мы выделяем в составе комплекса две фазы. Породы первой или главной фазы (ГФ) представлены крупнозернистыми, в краевой части массивов среднезернистыми гранитоидами, крупноовоидными или равномерно-зернистыми, биотит-роговообманковыми, биотитовыми, лейкократовыми, вплоть до аляскитов. Ко второй или заключительной фазе (ЗФ) относятся мелкосреднезернистые граниты, гранит-порфиры и аплиты. Пегматиты для приморского комплекса не характерны.

Блоковое строение территории обусловило совмещение на современном уровне эрозионного среза гранитоидов, отвечающих разным фациям глубинности. К наиболее глубинным относится Улан-Ханс-

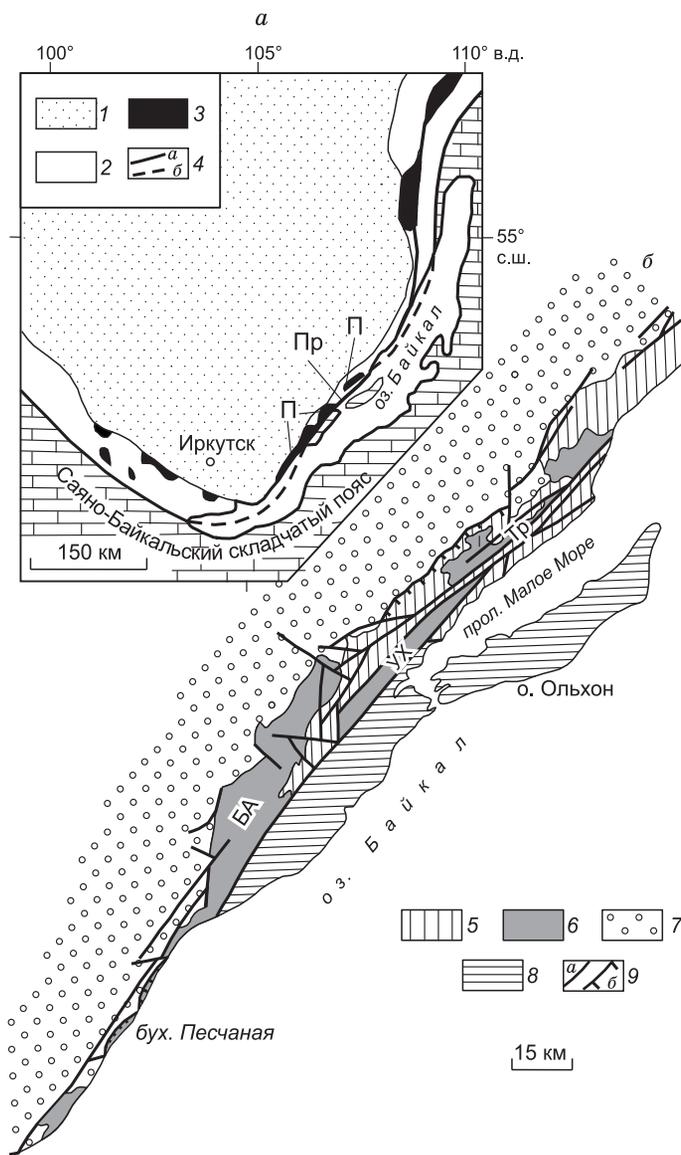
Рис. 1. Местоположение (а) и схема геологического строения района (б).

1—3 — Сибирская платформа: 1 — платформенный чехол, 2 — краевые выступы фундамента платформы (архей—протерозой), 3 — раннепротерозойские постколлизийные гранитоиды (П — приморский комплекс); 4 — зоны глубинных разломов: а — картируемые, б — скрытые (Пр — Приморский разлом); 5 — сарминская серия (PR₁); 6 — гранитоиды приморского комплекса (массивы: БА — Бугульдейско-Ангинский, УХ — Улан-Ханский, Тр — Трехголовый); 7 — байкальская серия (R₃); 8 — ольхонский метаморфический комплекс (PZ₁); 9 — главные разломы: а — субвертикальные, б — надвиги.

кий массив, залегающий среди пород амфиболитовой фации. На этом уровне становление интрузии сопровождалось порфиробластической микроклинизацией вмещающих гнейсов [Бухаров, 1987]. Менее глубинным является Трехголовый массив, прорывающий иликтинскую свиту, метаморфизованную в условиях зеленосланцевой фации. Для гранитов этого массива наряду с гипидиоморфно-зернистой и маргинационной структурами типична гранофировая структура. Интрузивные взаимоотношения гранитов с метапесчаниками, метаалевролитами, хлорит-мусковитовыми сланцами наблюдались в верховьях р. Правая Иликта в Байкальском хребте. В эндоконтактовой зоне массива зернистость гранитов уменьшается, они приобретают порфировидный облик. Термальное воздействие на вмещающие породы со стороны гранитов слабое, на контакте с гранитами образуются биотитовые роговики, проявлены турмалинизация и кварцевые жилы. Породы Бугульдейско-Ангинского массива в основном имеют черты глубинных, однако для слагающих верхнюю часть массива аляскитов характерны признаки гипабиссальности [Ферштатер, Бородина, 1975] — порфировидный облик, гранофировая структура.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализы пород выполнены в лабораториях Аналитического центра ИЗК СО РАН и Центра коллективного пользования Иркутского НИЦ СО РАН. Содержания петрогенных компонентов и F определялись химическим методом; редких элементов — методами фотометрии пламени (Li, Cs), спектральным (Be), рентгенофлуоресцентным (Rb, Sr, Ba, Sn, Pb, Zn, Nb, Zr, Y, Th, W) [Ревенко, 1994]. В выборочных пробах определены содержания РЗЭ; измерения выполнены на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се ICP-MS по методике [Panteeva et al., 2003]. Работа основана на данных авторских анализов 190 проб, также приведены анализы выборочных проб, среднее и стандартное отклонение по группам пород, а на диаграммах представлены результаты по всем пробам. Наибольшее число авторских анализов получено для Трехголового массива, данные по геохимии которого в литературе отсутствуют. Пробы гранитов из этого массива отбирались в верховьях рек Улан-Хан, Левая Сарма, Зундук, Средняя и Правая Иликта, а также на гольце Трехголовом. Улан-Ханский массив исследовался по долинам рек Курма, Улан-Хан, в междуречье Кучелги и Средней Анги. Опробование гранитов Бугульдейско-Ангинского массива проводилось по долине р. Бугульдейка, руч. Долон-Богот и в верховьях рек Таловка и Малая Анга. Авторами не изучалась юго-западная часть выходов комплекса, поэтому нами использованы шесть полных анализов гранитов рапакиви бухты Песчаная из работы [Донская и др., 2005] и три анализа гранитов Бугульдейско-Ангинского массива из статьи [Петрова и др., 1997].



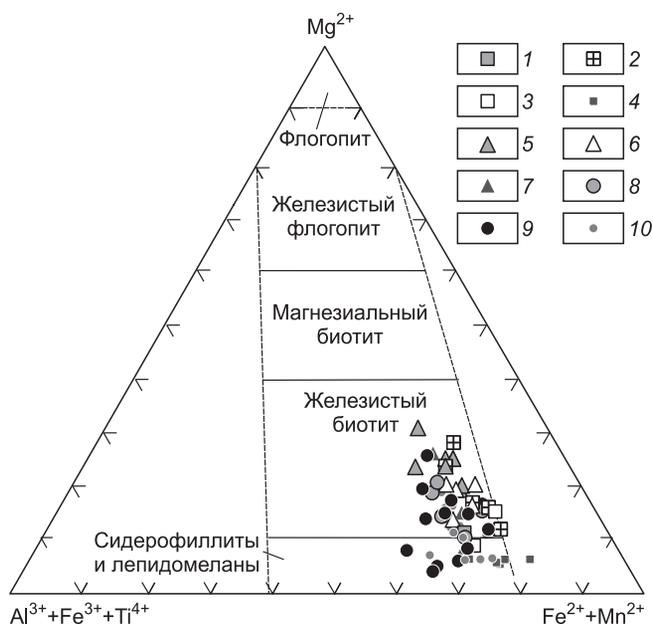


Рис. 2. Состав биотита из гранитоидов приморского комплекса.

1—4 — биотит из пород Бугульдейско-Ангинского массива: 1 — крупноовоидного гранита, 2 — равномерно-зернистых биотитовых и лейкократовых гранитов, 3 — аляскитов, 4 — гранитов ЗФ; 5—7 — из пород Улан-Ханского массива: 5 — крупноовоидных гранитов, 6 — равномерно-зернистых биотитовых и лейкократовых гранитов, 7 — гранитов ЗФ; 8—10 — из пород Трехголового массива: 8 — крупноовоидных гранитов, 9 — равномерно-зернистых биотитовых гранитов, 10 — гранитов ЗФ. Поля даны по [Коваль, 1998].

Анализы минералов выполнены в лаборатории физических методов анализа ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) на модернизированном микроанализаторе MAP-3 производства ОАО «Красногорский механический завод» и электронном сканирующем микроскопе LEO-1430VP (LEO Electron Microscopy Ltd.) с энергодисперсионным анализатором INCAEnergy-300 (Oxford Instruments Analytical Ltd.).

ПЕТРОГРАФИЯ

Петрографический состав приморского комплекса детально рассмотрен в работах [Мануйлова, Срывцев, 1974; Обухов, 1979; Брынцев и др., 1984]. Главными породообразующими минералами являются кварц и калиевый полевой шпат, обычно микропертитовый; последний в гранитах рапакиви образует овоиды величиной до 5 см. Порфиоровидные аляскиты Бугульдейско-Ангинского массива содержат фенокристаллы щелочного полевого шпата с $X_{Na} = 0.25—0.34$, в гранит-порфирах Трехголового массива вкрапленники представлены щелочным полевым шпатом и кварцем. Плаггиоклаз присутствует в резко подчиненном количестве и представлен несколькими генерациями. К ранней относятся зерна, имеющие состав от An_{31-35} до An_{24-27} ¹, обычно серицитизированные, а также реликты плаггиоклаза внутри овоидов калиевого полевого шпата. Вторая генерация представлена каймами андезина вокруг овоидов. К поздней генерации относится альбит, образующий прожилки в калиевом полевым шпате и интерстициальные зерна. Аляскиты, в отличие от лейкогранитов, содержат плаггиоклаз в виде единичных зерен.

Темноцветный минерал представлен железистым биотитом (табл. 1, рис. 2), редкие зерна роговой обманки отмечены только в крупноочковых гнейсогранитах Улан-Ханского массива. В аляскитах Бугульдейско-Ангинского массива вместо биотита обычен мусковит в сростании с магнетитом.

Постмагматические процессы в гранитах выражаются в микроклинизации, альбитизации, мусковитизации, грейзенизации, флюоритизации. Грейзенизация типична для Трехголового массива, где генетически связана с гранитами заключительной фазы. Грейзенизированные граниты слагают участ-

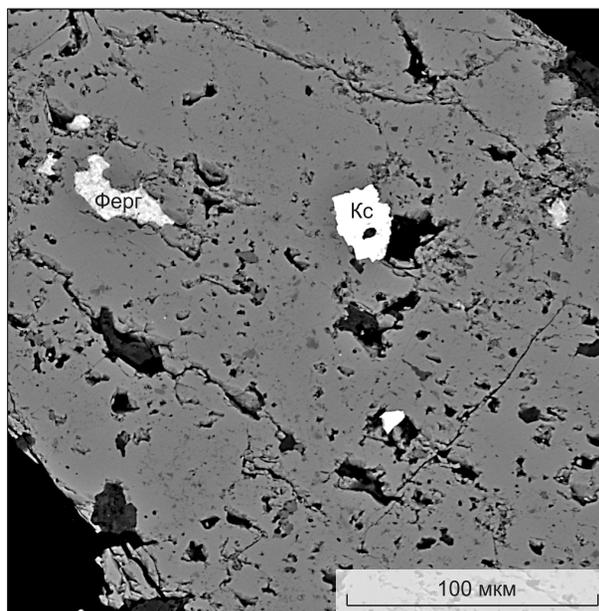


Рис. 3. Микровключения касситерита (Кс) и фергусонита (Ферг) в зерне ильменита из гранитов заключительной фазы массива Трехголового (фото в обратнорассеянных электронах).

¹ Здесь и далее Ab — альбит, An — анортит, Bt — биотит, Fl — флюорит, Mk — микроклин, Mu — мусковит, Ort — ортоклаз, Pl — плаггиоклаз, Qz — кварц, Trz — топаз.

Таблица 1. Представительные анализы биотита из гранитов приморского комплекса

Компонент	Бугульдейско-Англинский массив										Улан-Ханский массив										Трехголовый массив														
	Граниты ГФ			Граниты ЗФ			Граниты ГФ				Граниты ЗФ			Граниты ГФ			Граниты ЗФ			Граниты ГФ			Граниты ЗФ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂ , мас. %	33.70	33.57	33.94	34.24	33.32	33.76	34.72	36.37	34.39	34.34	34.15	35.57	34.25	35.35	34.55	35.02	34.28	33.70	33.57	33.94	34.24	33.32	33.76	34.72	36.37	34.39	34.34	34.15	35.57	34.25	35.35	34.55	35.02	34.28	
TiO ₂	1.54	1.56	3.11	2.51	1.70	2.63	2.07	2.47	2.19	2.50	2.36	1.82	2.72	1.76	1.48	1.04	2.37	1.54	1.56	3.11	2.51	1.70	2.63	2.07	2.47	2.19	2.50	2.36	1.82	2.72	1.76	1.48	1.04	2.37	
Al ₂ O ₃	17.05	15.61	14.66	13.91	14.34	14.50	15.46	14.37	14.72	14.78	15.59	15.19	14.13	15.60	17.25	17.09	15.54	17.05	15.61	14.66	13.91	14.34	14.50	15.46	14.37	14.72	14.78	15.59	15.19	14.13	15.60	17.25	17.09	15.54	
FeO _{общ}	30.77	32.04	30.08	31.44	34.65	32.36	26.93	24.62	28.92	30.32	31.52	25.84	30.80	29.42	31.71	31.11	28.25	30.77	32.04	30.08	31.44	34.65	32.36	26.93	24.62	28.92	30.32	31.52	25.84	30.80	29.42	31.71	31.11	28.25	
MnO	0.31	0.36	0.16	0.07	0.33	0.11	0.30	0.35	0.43	0.21	0.47	0.33	0.17	0.27	0.27	0.09	0.34	0.31	0.36	0.16	0.07	0.33	0.11	0.30	0.35	0.43	0.21	0.47	0.33	0.17	0.27	0.27	0.09	0.34	
MgO	2.54	2.72	4.00	3.52	1.35	2.88	6.06	7.24	4.87	3.70	1.78	6.25	3.65	3.30	1.01	0.89	4.85	2.54	2.72	4.00	3.52	1.35	2.88	6.06	7.24	4.87	3.70	1.78	6.25	3.65	3.30	1.01	0.89	4.85	
CaO	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.04	He обн.	0.04	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.04	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.04	He обн.									
Na ₂ O	»	»	»	»	»	»	He обн.	»	0.07	»	0.12	0.08	»	He обн.	»	»	0.11	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	He обн.
K ₂ O	9.60	9.38	9.69	9.71	9.51	9.52	9.52	9.95	9.68	9.70	9.38	9.83	9.89	9.72	9.68	9.26	9.54	9.60	9.38	9.69	9.71	9.51	9.52	9.52	9.95	9.68	9.70	9.38	9.83	9.89	9.72	9.68	9.26	9.42	9.54
BaO	0.10	0.28	0.26	He обн.	He обн.	He обн.	0.12	0.16	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.15	0.10	0.28	0.26	He обн.	He обн.	He обн.	0.12	0.16	He обн.	0.15								
Cl	0.12	0.29	≤0.04	0.09	0.22	0.10	0.12	0.05	0.06	0.17	0.16	0.10	0.12	0.23	0.11	0.33	0.05	0.12	0.29	≤0.04	0.09	0.22	0.10	0.12	0.05	0.06	0.17	0.16	0.10	0.12	0.23	0.11	0.33	0.20	0.05
F	≤0.25	≤0.25	0.30	0.65	≤0.25	0.46	0.51	0.96	0.78	0.40	≤0.25	1.17	0.99	0.47	0.85	1.97	1.12	≤0.25	≤0.25	0.30	0.65	≤0.25	0.46	0.51	0.96	0.78	0.40	≤0.25	1.17	0.99	0.47	0.85	1.97	0.52	1.12
-O=Cl ₂	0.03	0.07	—	0.02	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.02	0.07	0.01	0.03	0.07	—	0.02	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.02	0.07	0.05	0.01
-O=F ₂	—	—	0.12	0.27	—	0.20	0.21	0.41	0.33	0.17	—	0.49	0.42	0.20	0.36	0.83	0.47	—	—	0.12	0.27	—	0.20	0.21	0.41	0.33	0.17	—	0.49	0.42	0.20	0.36	0.83	0.22	0.47
Сумма	95.70	95.74	96.08	95.85	95.37	96.10	95.61	96.48	95.81	95.91	95.49	95.67	96.27	95.91	96.38	95.90	95.98	95.70	95.74	96.08	95.85	95.37	96.10	95.61	96.48	95.81	95.91	95.49	95.67	96.27	95.91	96.38	95.90	95.45	95.98
Si, ф. ед.	2.701	2.728	2.715	2.770	2.758	2.734	2.746	2.819	2.752	2.751	2.746	2.795	2.755	2.798	2.748	2.802	2.810	2.701	2.728	2.715	2.770	2.758	2.734	2.746	2.819	2.752	2.751	2.746	2.795	2.755	2.798	2.748	2.802	2.749	2.810
Ti	0.092	0.096	0.187	0.152	0.106	0.160	0.123	0.144	0.132	0.151	0.142	0.108	0.165	0.105	0.088	0.063	0.061	0.092	0.096	0.187	0.152	0.106	0.160	0.123	0.144	0.132	0.151	0.142	0.108	0.165	0.105	0.088	0.063	0.143	0.061
Al	0.610	1.494	1.382	1.326	1.399	1.384	1.441	1.313	1.388	1.395	1.477	1.406	1.339	1.455	1.616	1.611	1.450	0.610	1.494	1.382	1.326	1.399	1.384	1.441	1.313	1.388	1.395	1.477	1.406	1.339	1.455	1.616	1.611	1.461	1.450
Fe ³⁺	0.245	0.176	0.253	0.228	0.175	0.206	0.204	0.310	0.214	0.251	0.312	0.277	0.257	0.332	0.369	0.381	0.246	0.245	0.176	0.253	0.228	0.175	0.206	0.204	0.310	0.214	0.251	0.312	0.277	0.257	0.332	0.369	0.381	0.290	0.246
Fe ²⁺	1.814	1.998	1.756	1.895	2.220	1.981	1.574	1.283	1.718	1.777	1.804	1.418	1.812	1.612	1.736	1.697	1.622	1.814	1.998	1.756	1.895	2.220	1.981	1.574	1.283	1.718	1.777	1.804	1.418	1.812	1.612	1.736	1.697	1.727	1.622
Mn	0.021	0.025	0.011	0.005	0.023	0.007	0.020	0.023	0.029	0.014	0.032	0.022	0.011	0.018	0.000	0.006	0.023	0.021	0.025	0.011	0.005	0.023	0.007	0.020	0.023	0.029	0.014	0.032	0.022	0.011	0.018	0.000	0.020	0.023	0.023
Mg	0.303	0.330	0.477	0.424	0.166	0.347	0.714	0.836	0.580	0.442	0.214	0.732	0.437	0.389	0.120	0.106	0.572	0.303	0.330	0.477	0.424	0.166	0.347	0.714	0.836	0.580	0.442	0.214	0.732	0.437	0.389	0.120	0.106	0.358	0.572
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.04	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.04	0.000	0.000	0.05	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.018	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	0.018	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
K	0.981	0.972	0.989	1.001	1.004	0.983	0.960	0.983	0.988	0.991	0.962	0.985	1.014	0.981	0.981	0.945	0.964	0.981	0.972	0.989	1.001	1.004	0.983	0.960	0.983	0.988	0.991	0.962	0.985	1.014	0.981	0.981	0.945	0.963	0.964
Ba	0.003	0.009	0.008	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.005	0.003	0.009	0.008	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.005
Cl	0.016	0.040	0.000	0.012	0.031	0.014	0.017	0.007	0.008	0.023	0.022	0.013	0.017	0.031	0.015	0.045	0.006	0.016	0.040	0.000	0.012	0.031	0.014	0.017	0.007	0.008	0.023	0.022	0.013	0.017	0.031	0.015	0.045	0.027	0.006
F	0.000	0.000	0.075	0.167	0.000	0.119	0.127	0.236	0.198	0.102	0.000	0.292	0.251	0.117	0.214	0.497	0.280	0.000	0.000	0.075	0.167	0.000	0.119	0.127	0.236	0.198	0.102	0.000	0.292	0.251	0.117	0.214	0.497	0.133	0.280
f	0.87	0.87	0.81	0.83	0.94	0.86	0.71	0.66	0.77	0.82	0.91	0.70	0.80	0.83	0.95	0.95	0.77	0.87	0.87	0.81	0.83	0.94	0.86	0.71	0.66	0.77	0.82	0.91	0.70	0.80	0.83	0.95	0.95	0.85	0.77

Примечание. Расчет Fe³⁺ и Fe²⁺ выполнен по [Дутек, 1983]; f = (Fe²⁺ + Fe³⁺)/(Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mg). 1 — крупноволнистый гранит (р. Бугульдейка), 2 — крупнозернистый равнорнозернистый биотитовый гранит (верховья р. Тагловка), 3 — лейкокраповый биотитовый гранит (там же), 4 — аляскит (верховья р. Малая Анга), 5, 6 — мелкозернистые граниты (руч. Долон-Богот и верховья р. Малая Анга); 7, 8 — крупноволнистые граниты (р. Курма), 9, 10 — среднекрупнозернистые равнорнозернистые граниты (верховья р. Кучелга), 11, 12 — мелкозернистые граниты (там же); 13, 14 — крупноволнистые граниты (верховья р. Улан-Хан), 15, 16 — крупнозернистые лейкокраповые граниты (голец Трехголовый и верховья р. Провая Иликта), 17, 18 — мелкозернистые граниты (верховья рек Улан-Хан и Средняя Иликта). Проверка — нет данных. He обн. — содержание ниже пределов обнаружения.

ки площадью до 0.5 км² и зоны мощностью до 2 м. Проявлена следующая зональность: Qz + Mk + Pl + Bt → Qz + Ab + Mu (Mk) → Qz + Mu (Trpz, Fl) → Qz + Trpz (Mu, Fl). Альбитизация также свойственна преимущественно гранитам заключительной фазы.

Главным рудным минералом гранитов всех массивов является ильменит. Однако в аляскитах Бугульдейско-Ангинского массива и гранитах ЗФ обычен магнетит. Прочими распространенными акцессорными минералами являются алланит, апатит, циркон, рутил, титанит, эпидот, флюорит. Кроме того, в гранитах Улан-Ханского массива отмечается гранат, а для Трехголового характерен турмалин. На отдельных участках этого массива турмалин с кварцем образуют в гранитах шпидры до 12 см в длину и 8 см в поперечнике. В гранитах ЗФ Трехголового массива установлены молибденит, поликраз, иттрокразит, ксенотим, циртолит, торит, пирит, арсенопирит, в ильмените выявлены микровключения колумбита, пироклора, эвксенита, фергусонита, касситерита, бастнезита (рис. 3); в грейзенах присутствуют касситерит, колумбит, ильменорутит, вольфрамит, монацит, флюоцерит, редкоземельный торит, бисмутинит и некоторые другие редкометалльные минералы.

ГЕОХИМИЯ

В целом породы комплекса представлены гранитоидами нормальной и слабоповышенной щелочности, высококальциевыми, железистыми ($FeO_{общ}/(FeO_{общ} + MgO) > 0.8$) [Frost et al., 2001], варьирующими по составу от гранодиоритов до лейкогранитов и субщелочных гранитов и лейкогранитов (табл. 2, рис. 4, а, б). Наиболее разнообразен по составу Бугульдейско-Ангинский массив, тогда как Улан-Ханский сложен гранитами и лейкогранитами, а Трехголовый — лейкогранитами. В Бугульдейско-Ангинском массиве как крупноовоидные, так и равномерно-зернистые биотитовые граниты по соотношению SiO₂ и щелочей представлены полными рядами от гранодиоритов до лейкогранитов, тогда как в Улан-

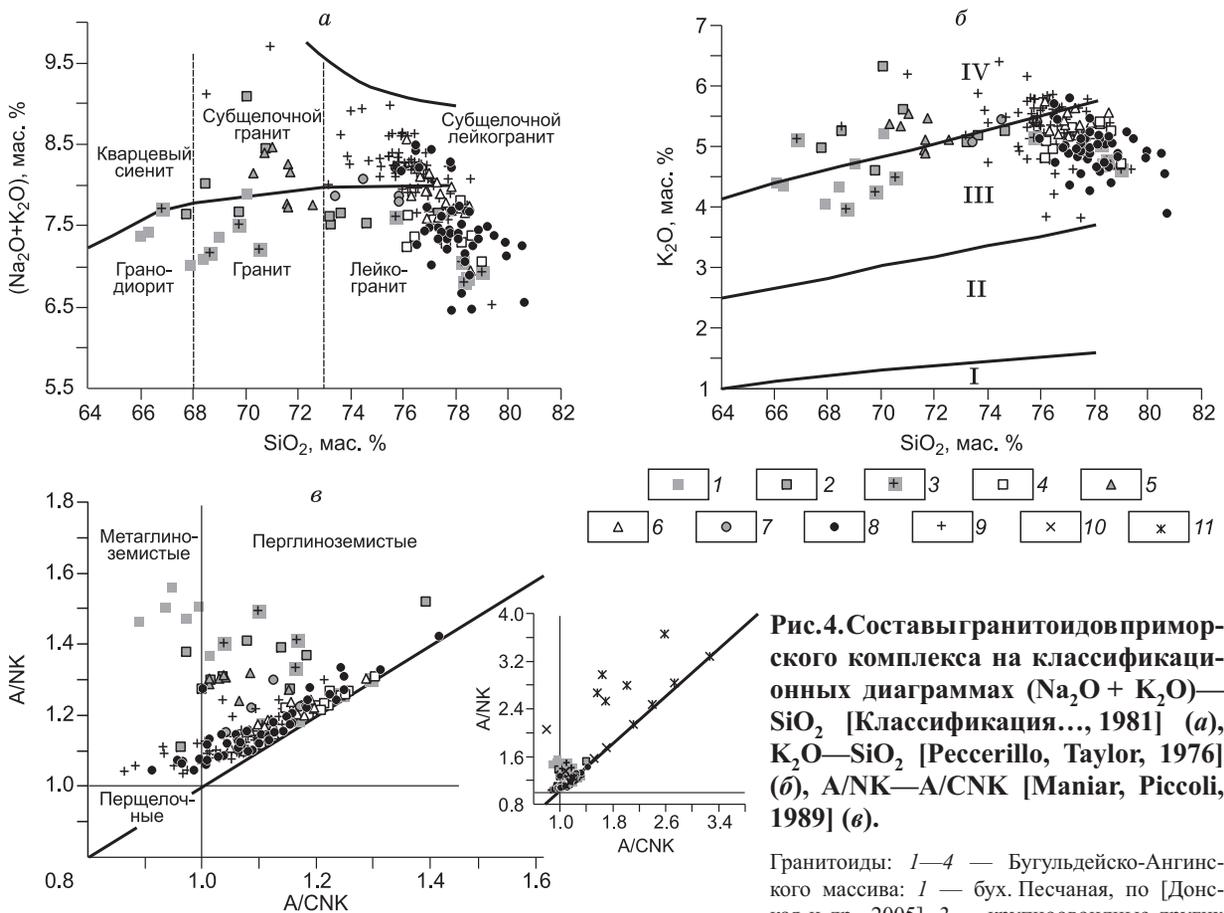


Рис.4. Составы гранитоидов приморского комплекса на классификационных диаграммах (Na₂O + K₂O)—SiO₂ [Классификация..., 1981] (а), K₂O—SiO₂ [Peccerillo, Taylor, 1976] (б), A/NK—A/CNK [Maniar, Piccoli, 1989] (в).

Гранитоиды: 1—4 — Бугульдейско-Ангинского массива: 1 — бух. Песчаная, по [Донская и др., 2005], 2 — крупноовоидные других

участков массива (включая анализы из работы [Петрова и др., 1997]), 3 — равномерно-зернистые биотитовые и лейкократовые, 4 — аляскиты; 5, 6 — Улан-Ханского массива: 5 — крупноовоидные, 6 — равномерно-зернистые биотитовые и лейкократовые; 7, 8 — Трехголового массива: 7 — крупноовоидные, 8 — равномерно-зернистые биотитовые; 9 — мелкосреднезернистые заключительной фазы всех массивов; на врезке: 10 — мусковитизированные и альбитизированные граниты, 11 — кварц-мусковитовые грейзены. б — поля серий: I — толеитовая, II — известково-щелочная, III — высококальциевая известково-щелочная, IV — шошонитовая; в — А — Al₂O₃, С — CaO, N — Na₂O, К — K₂O (мол. кол-ва).

Таблица 2.

Химический состав пород приморского комплекса

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив							
	Рапакиви бух. Песчаная [Донская и др., 2003]	Крупноовоидные граниты ГФ				Равномерно-зернистые граниты ГФ		
	Среднее (n = 6)	1/03	132/03	10/03	Среднее (n = 6)	18/03	19/03	26/03
SiO ₂ , мас. %	67.97 (1.4)	73.25	77.35	68.52	71.93 (3.4)	70.53	68.67	66.84
TiO ₂	0.63 (0.10)	0.37	0.15	0.62	0.37 (0.19)	0.62	0.64	0.78
Al ₂ O ₃	14.16(0.33)	13.19	10.75	14.45	13.25 (1.6)	13.12	14.32	13.85
Fe ₂ O ₃	1.86 (0.40)	0.33	0.47	1.59	1.02 (0.63)	1.43	2.00	2.88
FeO	2.96 (0.60)	2.91	0.71	3.02	2.31 (0.98)	3.26	3.02	3.19
MnO	0.07 (0.00)	0.02	0.02	0.07	0.04 (0.02)	0.08	0.07	0.11
MgO	0.48 (0.09)	0.22	0.12	0.51	0.35 (0.18)	0.42	0.51	0.55
CaO	2.88 (0.52)	1.15	0.83	1.73	1.25 (0.57)	1.81	1.91	1.14
Na ₂ O	2.85 (0.16)	2.40	2.42	2.76	2.55 (0.19)	2.72	3.20	2.58
K ₂ O	4.52 (0.36)	5.12	5.25	5.27	5.37 (0.44)	4.50	3.98	5.14
P ₂ O ₅	0.16 (0.02)	0.06	0.04	0.15	0.08 (0.06)	0.13	0.14	0.13
П.п.п.	1.38 (0.22)	0.67	0.69	0.99	0.91 (0.19)	0.87	1.08	2.34
F	—	0.36	0.25	0.26	0.27 (0.11)	0.17	0.10	0.07
Сумма	—	99.90	99.95	99.83	—	99.59	99.90	99.57
A/CNK	0.96(0.04)	1.14	0.96	1.08	1.08 (0.09)	1.04	1.10	1.17
K _{ар}	0.68(0.03)	0.72	0.90	0.71	0.76 (0.07)	0.71	0.67	0.71
Na ₂ O + K ₂ O	7.37 (0.29)	7.52	7.67	8.03	7.92 (0.55)	7.22	7.18	7.72
Na ₂ O/K ₂ O	0.64(0.08)	0.47	0.46	0.52	0.48 (0.04)	0.60	0.80	0.50
f	0.91(0.01)	0.94	0.90	0.90	0.90 (0.03)	0.92	0.90	0.91
K _{ок}	0.39(0.06)	0.10	0.40	0.34	0.30 (0.10)	0.30	0.40	0.47
	n = 6				n = 10			
Li, г/т	—	12	8	22	16 (7.6)	14	17	44
Rb	115 (22)	230	190	240	205 (26)	170	140	280
Cs	—	—	—	—	—	—	—	—
Sr	308 (47)	95	72	150	137 (61)	160	210	75
Ba	2900 (448)	1400	1400	3600	2079 (653)	890	1100	1400
Y	31 (4.3)	36	28	32	32 (6)	28	24	31
Zr	413 (32)	390	160	370	306 (101)	350	360	480
Nb	19 (1.8)	25	14	18	15 (4.8)	15	13	17
Th	10 (1.3)	38	40	7	26 (14)	43	24	36
Sn	—	3	3	3	3 (0.6)	8	4	7
Pb	—	53	17	44	36 (19)	47	30	45
Zn	—	54	27	84	57 (18)	57	93	110
Be	—	5	5.6	6	4.0 (1.4)	5	4	4
K/Rb	334 (41)	185	229	182	214 (26)	220	236	152
Ba/Rb	27 (8)	6.1	7.4	15.0	10 (2)	5.2	7.9	5.7
Sr/Rb	2.8 (0.8)	0.41	0.38	0.63	0.70 (0.4)	0.94	1.5	0.27

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив							
	Равномерно-зернистые граниты ГФ			Аляскиты ГФ				
	31/03	33/03	Среднее (n = 9)	37/03	40/03	56/03	58/03	Среднее (n = 10)
SiO ₂ , мас. %	75.70	78.97	73.94 (4.6)	77.14	76.15	78.97	77.62	77.50 (0.96)
TiO ₂	0.37	0.23	0.47 (0.20)	0.17	0.26	0.20	0.17	0.20 (0.05)
Al ₂ O ₃	12.12	10.35	12.17 (1.4)	11.70	12.05	11.25	11.70	11.64 (0.35)
Fe ₂ O ₃	0.25	0.29	1.33 (1.04)	0.49	1.14	0.84	0.72	0.98 (0.29)
FeO	2.78	1.77	2.51 (0.74)	1.61	1.99	0.78	1.22	1.17 (0.57)
MnO	0.02	0.04	0.05 (0.03)	Не обн.	Не обн.	0.01	0.02	0.02 (0.01)
MgO	0.38	0.20	0.37 (0.16)	0.24	0.19	0.08	0.08	0.14 (0.05)

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив							
	Равномерно-зернистые граниты ГФ			Аляскиты ГФ				
	31/03	33/03	Среднее ($n = 9$)	37/03	40/03	56/03	58/03	Среднее ($n = 10$)
CaO	0.06	0.30	0.69 (0.72)	0.09	Не обн.	0.05	0.19	0.09 (0.10)
Na ₂ O	2.47	2.32	2.53 (0.43)	2.26	2.43	2.34	2.36	2.33 (0.18)
K ₂ O	5.15	4.62	4.69 (0.38)	5.32	4.82	4.72	4.93	5.08 (0.24)
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.08 (0.05)	Не обн.	Не обн.	0.02	0.02	0.02 (0.01)
П.п.п.	0.62	0.55	0.92 (0.54)	0.64	0.44	0.55	0.61	0.52 (0.10)
F	0.19	0.05	0.11 (0.06)	0.07	0.07	0.09	0.07	0.09 (0.04)
Сумма	100.07	99.73	—	99.70	99.51	99.86	99.68	—
A/CNK	1.24	1.11	1.17 (0.08)	1.21	1.30	1.24	1.22	1.23 (0.04)
$K_{ар}$	0.80	0.85	0.77 (0.06)	0.81	0.76	0.80	0.79	0.80 (0.02)
Na ₂ O + K ₂ O	7.42	6.94	7.22 (0.32)	7.58	7.25	7.06	7.29	7.40 (0.21)
Na ₂ O/K ₂ O	0.48	0.50	0.55 (0.14)	0.42	0.50	0.50	0.48	0.46 (0.05)
f	0.89	0.91	0.91 (0.02)	0.90	0.94	0.95	0.96	0.93 (0.02)
$K_{ок}$	0.08	0.14	0.30 (0.20)	0.23	0.36	0.52	0.37	0.49 (0.19)
			$n = 12$					$n = 10$
Li, г/т	16	15	18 (10)	14	24	46	12	22 (12)
Rb	190	150	161 (42)	310	260	300	310	289 (18)
Cs	—	2.2	—	—	—	2.3	—	—
Sr	47	59	119 (65)	30	25	26	30	26 (9)
Ba	940	870	1452 (682)	230	780	250	170	346 (235)
Y	23	25	25 (4)	31	26	35	34	31 (3)
Zr	290	280	365 (76)	170	280	210	190	216 (46)
Nb	10	15	14 (3)	18	15	20	18	18 (1.5)
Th	51	19.8	50 (47)	72	45	28	10	41 (22)
Sn	3	3	3.4 (2.0)	6	15	7	15	11.5 (6.0)
Pb	21	13	26 (11)	16	27	25	30	30 (14)
Zn	40	36	63 (25)	17	38	55	66	51 (22)
Be	3	2	3.0 (1.1)	2	3	3	4	3.4 (0.7)
K/Rb	225	256	239 (42)	142	154	131	132	146 (9)
Ba/Rb	5.0	5.8	10 (6.1)	0.74	3.0	0.83	0.55	1.2 (0.9)
Sr/Rb	0.25	0.39	0.82 (0.54)	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09 (0.03)

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив		Улан-Ханский массив				
	Граниты ЗФ		Крупноовоидные граниты ГФ				
	1 ($n = 9$)	2 ($n = 7$)	74/06	80/06	4/07	8/07	Среднее ($n = 8$)
SiO ₂ , мас. %	73.42 (2.2)	76.28 (0.6)	72.56	70.74	71.74	70.34	71.41 (0.6)
TiO ₂	0.20 (0.07)	0.12 (0.05)	0.51	0.43	0.47	0.53	0.51 (0.04)
Al ₂ O ₃	12.77 (1.6)	12.46 (0.5)	12.75	14.10	13.65	13.60	13.41 (0.4)
Fe ₂ O ₃	1.31 (1.18)	0.94 (0.16)	0.98	1.03	1.36	1.36	1.02 (0.21)
FeO	1.49 (0.77)	1.01 (0.22)	2.80	2.50	2.27	2.93	2.95 (0.41)
MnO	0.02 (0.01)	0.01 (0.00)	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03 (0.01)
MgO	0.16 (0.08)	0.06 (0.03)	0.67	0.63	0.71	0.76	0.75 (0.07)
CaO	0.88 (0.33)	0.22 (0.13)	1.48	1.58	1.22	1.46	1.30 (0.32)
Na ₂ O	3.22 (0.49)	3.37 (0.38)	2.66	3.07	2.70	2.79	2.87 (0.16)
K ₂ O	5.29 (0.64)	4.89 (0.65)	5.11	5.33	5.47	5.37	5.22 (0.23)
P ₂ O ₅	0.03 (0.01)	0.02 (0.00)	0.11	0.10	0.11	0.11	0.12 (0.01)
П.п.п.	0.70 (0.27)	0.37 (0.11)	0.76	0.57	0.61	0.80	0.66 (0.13)
F	0.29 (0.11)	0.11 (0.05)	0.07	0.04	0.04	0.07	0.07 (0.03)
Сумма	—	—	100.49	100.12	100.36	100.13	—

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив		Улан-Ханский массив				
	Граниты ЗФ		Крупноовоидные граниты ГФ				
	1 (n = 9)	2 (n = 7)	74/06	80/06	4/07	8/07	Среднее (n = 8)
A/CNK	1.01 (0.12)	1.11 (0.02)	1.01	1.03	1.09	1.04	1.05 (0.04)
$K_{ар}$	0.87 (0.06)	0.87 (0.02)	0.78	0.77	0.76	0.76	0.77 (0.01)
Na ₂ O + K ₂ O	8.51 (0.54)	8.26 (0.43)	7.77	8.40	8.17	8.16	8.09 (0.28)
Na ₂ O/K ₂ O	0.55 (0.07)	0.71 (0.16)	0.52	0.58	0.49	0.52	0.55 (0.04)
f	0.94 (0.03)	0.97 (0.01)	0.85	0.84	0.83	0.85	0.84 (0.01)
$K_{ок}$	0.45 (0.22)	0.49 (0.10)	0.26	0.29	0.37	0.32	0.26 (0.06)
	n = 12	n = 12					n = 8
Li, г/т	10 (5)	10 (9)	40	22	25	45	33 (8)
Rb	216 (54)	309 (70)	220	160	220	230	209 (23)
Cs	—	—	—	4.6	—	9.0	—
Sr	72 (25)	22 (8)	92	120	84	79	100 (16)
Ba	643 (245)	98 (51)	1100	1400	1100	1200	1150 (112)
Y	34 (6.3)	37 (9)	46	31	36	35	39 (5.3)
Zr	274 (139)	207 (59)	290	240	240	290	285 (29)
Nb	25 (5)	27 (11)	16	13	14	15	15 (1.6)
Th	89 (37)	52 (29)	38	24	29	29	25 (11)
Sn	2.5 (0.8)	10 (5.4)	4.8	3	6.1	7.6	4.6 (1.5)
Pb	40 (20)	36 (16)	40	34	39	41	35 (11)
Zn	37 (17)	43 (17)	51	39	38	79	55 (15)
Be	5.8 (1.8)	4.9 (1.4)	4.2	5.6	3.6	6.4	4.3 (1.3)
K/Rb	216 (30)	142 (27)	193	276	206	194	210 (28)
Ba/Rb	3.2 (1.3)	0.35 (0.22)	5.0	8.8	5.0	5.2	5.6 (1.3)
Sr/Rb	0.38 (0.23)	0.08 (0.03)	0.42	0.75	0.38	0.34	0.49 (0.14)

Компонент	Улан-Ханский массив						
	Равномерно-зернистые граниты ГФ						Граниты ЗФ (n = 8)
	101/03	108/03	124/03	165/99	168/99	Среднее (n = 20)	
SiO ₂ , мас. %	77.59	76.85	76.16	77.29	77.83	77.41 (0.7)	75.49 (0.8)
TiO ₂	0.17	0.18	0.15	0.17	0.15	0.16 (0.02)	0.13 (0.03)
Al ₂ O ₃	11.73	11.84	12.70	11.61	11.49	11.65 (0.5)	12.62 (0.4)
Fe ₂ O ₃	0.31	0.16	0.21	0.48	0.52	0.49 (0.26)	0.50 (0.30)
FeO	1.45	1.64	1.22	1.34	1.04	1.29 (0.45)	1.25 (0.24)
MnO	Не обн.	0.02	Не обн.	0.03	0.03	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)
MgO	0.26	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19 (0.08)	0.14 (0.10)
CaO	0.09	0.31	0.31	0.36	0.34	0.23 (0.11)	0.39 (0.18)
Na ₂ O	2.60	2.50	2.84	2.41	2.41	2.54 (0.16)	3.23 (0.21)
K ₂ O	5.08	5.43	5.74	5.63	5.28	5.28 (0.23)	5.26 (0.33)
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03 (0.01)	0.02 (0.01)
П.п.п.	0.25	0.47	0.36	0.42	0.51	0.44 (0.12)	0.67 (0.35)
F	0.11	0.12	0.08	0.13	0.17	0.09 (0.06)	0.13 (0.04)
Сумма	99.62	99.68	99.93	100.03	99.91	—	—
A/CNK	1.18	1.12	1.11	1.08	1.12	1.13 (0.05)	1.08 (0.04)
$K_{ар}$	0.83	0.84	0.86	0.87	0.84	0.85 (0.03)	0.87 (0.03)
Na ₂ O + K ₂ O	7.68	7.93	8.58	8.04	7.69	7.82 (0.30)	8.49 (0.32)
Na ₂ O/K ₂ O	0.51	0.46	0.49	0.43	0.46	0.48 (0.03)	0.62 (0.07)
f	0.87	0.91	0.89	0.91	0.90	0.90 (0.04)	0.93 (0.05)
$K_{ок}$	0.18	0.09	0.15	0.26	0.33	0.29 (0.17)	0.28 (0.16)
						n = 20	n = 8

Компонент	Улан-Ханский массив						Граниты ЗФ (n = 8)
	Равномерно-зернистые граниты ГФ						
	101/03	108/03	124/03	165/99	168/99	Среднее (n = 20)	
Li, г/т	16	34	11	13	13	15 (8)	13 (7)
Rb	310	260	300	420	400	322 (94)	315 (60)
Cs	—	6.7	—	—	—	—	—
Sr	30	39	44	21	29	30 (11)	27 (9)
Ba	250	410	150	110	50	239 (126)	58 (26)
Y	31	29	35	31	51	32 (15)	40 (14)
Zr	210	170	140	170	170	180 (18)	180 (91)
Nb	14	19	21	26	30	23 (6)	25 (7)
Th	64	35	45	39	46	38 (13)	49 (28)
Sn	7	4	4	14	10	7.5 (3.2)	8 (3.6)
Pb	25	33	36	50	42	43 (13)	54 (17)
Zn	43	48	21	36	12	33 (14)	40 (15)
Be	5	8.5	9	7.5	6.1	5.9 (2.1)	7.7 (1.7)
K/Rb	136	173	159	111	110	148 (45)	143 (28)
Ba/Rb	1.5	2.7	1.3	0.26	0.13	0.9 (0.6)	0.20 (0.13)
Sr/Rb	0.10	0.15	0.15	0.05	0.07	0.11 (0.06)	0.09 (0.04)

Компонент	Трехголовый массив						
	Крупноовоидные граниты ГФ				Равномерно-зернистые граниты ГФ		
	14/07	15/07	17/07	Среднее (n = 5)	33/09	28/09	141/08
SiO ₂ , мас. %	75.85	73.42	75.72	75.07 (1.0)	77.45	77.46	75.94
TiO ₂	0.27	0.40	0.18	0.28 (0.07)	0.17	0.15	0.11
Al ₂ O ₃	12.30	13.10	12.06	12.40 (0.4)	11.80	11.62	11.80
Fe ₂ O ₃	0.68	1.12	0.56	0.86 (0.24)	0.42	0.11	0.17
FeO	2.33	2.26	1.95	2.24 (0.19)	1.50	1.90	1.72
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02 (0.00)	0.01	0.02	He обн.
MgO	0.29	0.50	0.13	0.26 (0.14)	0.04	0.07	0.10
CaO	0.24	0.85	0.61	0.53 (0.25)	0.17	0.23	0.62
Na ₂ O	2.69	2.79	2.79	2.66 (0.14)	2.87	2.57	3.04
K ₂ O	5.18	5.08	5.43	5.31 (0.15)	4.56	5.06	5.14
P ₂ O ₅	0.06	0.09	0.02	0.05 (0.03)	0.04	0.04	0.04
П.п.п.	0.46	0.78	0.44	0.59 (0.13)	0.84	0.78	0.75
F	0.06	0.06	0.29	0.14 (0.11)	0.16	0.16	0.40
Сумма	100.43	100.45	100.07	—	99.97	100.10	99.66
A/CNK	1.18	1.13	1.04	1.12 (0.05)	1.18	1.15	1.01
K _{ар}	0.82	0.77	0.87	0.82 (0.03)	0.82	0.83	0.90
Na ₂ O + K ₂ O	7.87	7.87	8.22	7.97 (0.16)	7.43	7.83	8.18
Na ₂ O/K ₂ O	0.52	0.55	0.51	0.50 (0.04)	0.63	0.51	0.59
f	0.91	0.87	0.95	0.92 (0.03)	0.98	0.97	0.95
K _{ок}	0.23	0.33	0.22	0.27 (0.06)	0.22	0.05	0.09
				n = 5			
Li, г/т	40	48	34	37 (11)	20	17	46
Rb	330	270	420	328 (53)	410	460	650
Cs	He обн.	10	8	6.6 (2.3)	6	7	10.3
Sr	42	65	20	43 (16)	12	15	10
Ba	460	980	160	450 (289)	100	95	22
Y	30	33	42	38 (7.5)	39	45	74
Zr	200	312	130	236 (72)	150	140	140
Nb	15	17	21	18 (2.5)	25	20	33

Компонент	Трехголовый массив						
	Крупноовоидные граниты ГФ				Равномерно-зернистые граниты ГФ		
	14/07	15/07	17/07	Среднее ($n = 5$)	33/09	28/09	141/08
Th	50	32	73	51 (16)	38	40	83
Sn	11	8.9	6	11 (3)	14	16	13
Pb	36	28	57	55 (21)	39	25	20
Zn	24	43	31	45 (18)	32	27	10
Be	2.3	6	5.9	4.5 (1.6)	3.1	2.5	2.2
K/Rb	130	156	107	137 (19)	92	91	66
Ba/Rb	1.4	3.6	0.38	1.5 (1.1)	0.24	0.21	0.03
Sr/Rb	0.13	0.24	0.05	0.14 (0.07)	0.03	0.03	0.02

Компонент	Трехголовый массив				
	Равномерно-зернистые граниты ГФ				Граниты ЗФ
	122/08	98/08	8/08	Среднее ($n = 45$)	1 ($n = 19$)
SiO ₂ , мас. %	78.85	76.47	78.21	78.04 (1.1)	76.73 (1.1)
TiO ₂	0.12	0.07	0.19	0.15 (0.05)	0.15 (0.04)
Al ₂ O ₃	10.53	11.54	11.15	10.95 (0.74)	11.51 (0.38)
Fe ₂ O ₃	0.11	0.30	0.20	0.23 (0.10)	0.24 (0.09)
FeO	1.83	1.56	2.40	1.95 (0.44)	1.87 (0.47)
MnO	Не обн.	0.01	0.03	0.02 (0.01)	0.03 (0.02)
MgO	0.17	0.11	0.27	0.15 (0.12)	0.12 (0.06)
CaO	0.27	0.64	0.05	0.30 (0.25)	0.29 (0.18)
Na ₂ O	2.52	2.94	2.09	2.49 (0.28)	2.75 (0.24)
K ₂ O	4.83	5.50	4.58	4.94 (0.35)	5.36 (0.37)
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.04	0.04 (0.01)	0.03 (0.01)
П.п.п.	0.47	0.35	0.57	0.69 (0.16)	0.73 (0.17)
F	0.12	0.40	0.03	0.17 (0.13)	0.13 (0.08)
Сумма	99.81	99.74	99.80	—	—
A/CNK	1.07	0.97	1.31	1.10 (0.10)	1.06 (0.06)
K_{ar}	0.89	0.93	0.75	0.86 (0.06)	0.90 (0.04)
Na ₂ O + K ₂ O	7.35	8.44	6.67	7.43 (0.56)	8.11 (0.37)
Na ₂ O/K ₂ O	0.52	0.53	0.46	0.50 (0.05)	0.52 (0.07)
f	0.92	0.94	0.90	0.94 (0.04)	0.94 (0.03)
$K_{ок}$	0.06	0.16	0.08	0.11 (0.05)	0.12 (0.05)
				$n = 45$	$n = 19$
Li, г/т	44	16	40	36 (25)	27 (19)
Rb	500	550	440	466 (82)	484 (80)
Cs	14.1	8.3	15.9	10.6 (5.1)	9.5 (4.0)
Sr	9.5	6.8	18	12 (5)	13 (6)
Ba	93	22	180	100 (65)	110 (97)
Y	31	28	21	40 (15)	36 (8)
Zr	150	130	160	158 (28)	164 (32)
Nb	21	26	23	23 (4)	23 (4)
Th	59	81	68	64 (18)	81 (24)
Sn	13	13	5	12 (4.2)	12 (6.5)
Pb	24	21	48	36 (19)	39 (21)
Zn	21	16	35	24 (8)	30 (34)
Be	1.4	2.5	3.8	2.7 (1.5)	3.2 (2.0)
K/Rb	80	83	86	91 (16)	95 (21)
Ba/Rb	0.19	0.04	0.41	0.24 (0.21)	0.24 (0.22)
Sr/Rb	0.02	0.01	0.04	0.03 (0.02)	0.03 (0.02)

Компонент	Трехголовый массив				
	Граниты ЗФ			Метасоматически измененные граниты	
	2 (<i>n</i> = 6)	3 (<i>n</i> = 16)	4 (<i>n</i> = 5)	1 (<i>n</i> = 8)	2 (<i>n</i> = 9)
SiO ₂ , мас. %	75.92 (0.21)	76.61 (0.9)	76.87 (0.2)	76.58 (4.9)	80.09 (3.3)
TiO ₂	0.29 (0.02)	0.22 (0.02)	0.09 (0.00)	0.12 (0.07)	0.18 (0.06)
Al ₂ O ₃	11.75 (0.23)	11.66 (0.5)	11.45 (0.1)	12.59 (3.2)	11.14 (1.7)
Fe ₂ O ₃	1.22 (0.24)	0.81 (0.29)	0.34 (0.12)	0.68 (1.22)	0.56 (0.43)
FeO	1.94 (0.35)	1.68 (0.32)	1.48 (0.09)	1.27 (0.27)	1.38 (0.32)
MnO	0.02 (0.01)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.02 (0.01)
MgO	0.13 (0.01)	0.09 (0.08)	0.12 (0.02)	0.11 (0.11)	0.13 (0.17)
CaO	0.24 (0.09)	0.17 (0.11)	0.45 (0.14)	0.70 (0.80)	0.70 (0.71)
Na ₂ O	2.76 (0.14)	2.42 (0.16)	2.94 (0.07)	3.37 (0.99)	0.25 (0.23)
K ₂ O	5.55 (0.12)	5.68 (0.30)	5.21 (0.11)	3.40 (1.39)	3.37 (0.77)
P ₂ O ₅	0.03 (0.00)	0.03 (0.01)	0.01 (0.00)	0.03 (0.02)	0.04 (0.01)
П.п.п.	0.34 (0.06)	0.58 (0.10)	0.53 (0.05)	0.82 (0.60)	1.96 (0.63)
F	0.03 (0.01)	0.03 (0.01)	0.37 (0.06)	0.67 (0.55)	0.52 (0.56)
Сумма	—	—	—	—	—
A/CNK	1.07 (0.02)	1.12 (0.04)	1.02 (0.02)	1.22 (0.26)	2.23 (0.54)
<i>K</i> _{ар}	0.90 (0.02)	0.87 (0.04)	0.91 (0.02)	0.72 (0.14)	0.36 (0.05)
Na ₂ O + K ₂ O	8.31(0.05)	8.09 (0.43)	8.15 (0.15)	6.77 (2.2)	3.62 (0.80)
Na ₂ O/K ₂ O	0.50 (0.04)	0.43 (0.02)	0.56 (0.01)	1.1 (0.4)	0.08 (0.08)
<i>f</i>	0.96 (0.00)	0.96 (0.03)	0.94 (0.01)	0.86 (0.03)	0.95 (0.06)
<i>K</i> _{ок}	0.39 (0.09)	0.33 (0.12)	0.19 (0.06)	0.23 (0.20)	0.27 (0.12)
	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 16	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 14	<i>n</i> = 16
Li, г/г	13 (10)	7.5 (3)	53 (16)	50 (63)	49 (43)
Rb	213 (25)	244 (20)	534 (27)	506 (328)	395 (149)
Cs	He обн.	He обн.	9.8 (2.4)	3.0 (2.2)	4.2 (2.6)
Sr	47 (3)	19 (4)	5.7 (1.2)	14 (10)	7.3 (4.8)
Ba	1183 (69)	544 (85)	14 (3)	462 (501)	137 (148)
Y	43 (10)	31 (7)	67 (7)	41 (22)	57 (49)
Zr	318 (12)	246 (27)	184 (5)	141 (82)	151 (67)
Nb	18 (2.4)	19 (1.5)	41 (3)	31 (13)	34 (41)
Th	30 (4)	30 (4)	71 (9)	43 (22)	52 (40)
Sn	11.5 (6)	15 (8)	12 (4.5)	35 (55)	54 (69)
Pb	33 (4.7)	28 (6.5)	42 (8)	28 (25)	24 (39)
Zn	33 (6.5)	42 (11)	25 (7)	26 (16)	27 (13)
Be	3.1 (1.2)	0.7 (0.3)	5.0 (0.7)	4.2 (3.8)	2.3 (1.4)
K/Rb	219 (22)	195 (20)	81 (3)	102 (49)	70 (13)
Ba/Rb	5.6 (0.7)	2.3 (0.5)	0.03 (0.01)	0.94 (1.2)	0.31 (0.18)
Sr/Rb	0.22 (0.04)	0.08 (0.01)	0.01 (0.00)	0.05 (0.04)	0.02 (0.01)

Примечание. Сумма оксидов дана с учетом O = F₂. Проверка — нет данных. Не обн. — содержание ниже пределов обнаружения. *n* — число проб, по которым рассчитано среднее арифметическое, в скобках у средних значений — стандартное отклонение. A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O), мол. кол-ва; *K*_{ар} = (Na₂O + K₂O)/Al₂O₃, мол. кол-ва; *f* = FeO_{общ}/(FeO_{общ} + MgO), *K*_{ок} = Fe₂O₃/(Fe₂O₃ + FeO). Породы заключительной фазы в Бугульдейско-Ангинском массиве: 1 — средний состав гранитов из жил среди крупноовоидных гранитов, 2 — средний состав гранитов из жил среди аляскитов; породы заключительной фазы в Трехголовом массиве: 1 — граниты из жил среди равномерно-зернистых гранитов, 2—4 — граниты, слагающие небольшие массивы на контакте гранитов главной фазы и иликтинской свиты; метасоматически измененные породы в Трехголовом массиве: 1 — альбитизированные, мусковитизированные, иногда флюоритизированные и турмалинизированные граниты, 2 — грейзенизированные граниты и кварц-мусковитовые грейзены.

Ханском и Трехголовом массивах равномерно-зернистые граниты по сравнению с крупноовоидными имеют повышенную кремнекислотность (см. табл. 2, рис. 4, а). По степени насыщенности глиноземом граниты варьируют от метаглиноземистых или слабопересыщенных ($ASI \leq 1.10$) до перглиноземистых, при этом глиноземистость резко возрастает в мусковитизированных породах (см. рис. 4, в).

С ростом содержания SiO_2 в породах главной интрузивной фазы Бугульдейско-Ангинского и Улан-Ханского массивов снижаются содержания TiO_2 , Al_2O_3 , $FeO_{общ}$, MgO , CaO , Na_2O и P_2O_5 (рис. 5) и одновременно возрастают железистость и апфитность гранитов; содержание K_2O возрастает от гранодиоритов к гранитам, а в лейкогранитах остается примерно на одном уровне или незначительно снижается (см. рис. 4). Это указывает на фракционирование из расплава Fe-Mg биотита, возможно, Ca-амфибола,

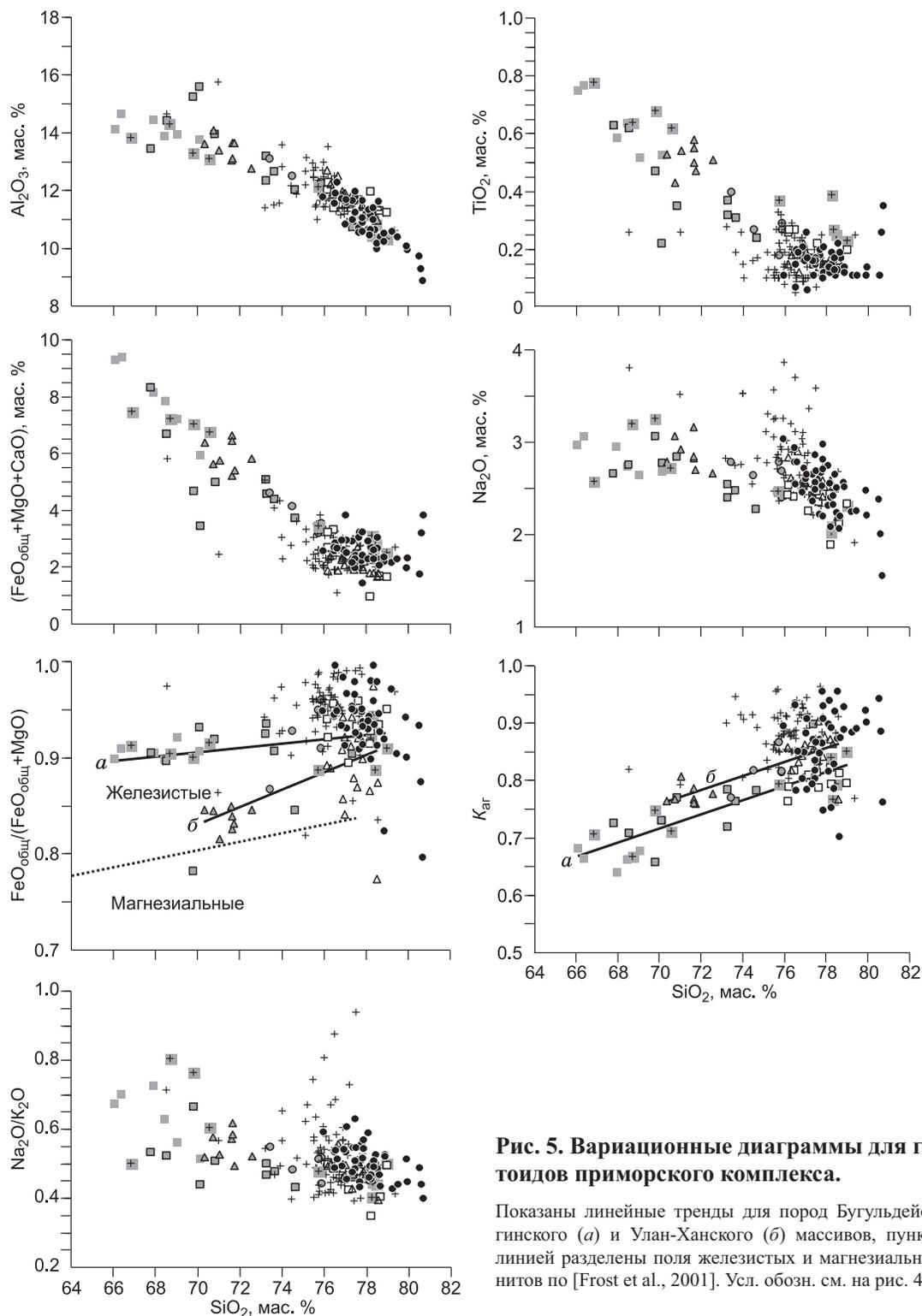


Рис. 5. Вариационные диаграммы для гранитоидов приморского комплекса.

Показаны линейные тренды для пород Бугульдейско-Ангинского (а) и Улан-Ханского (б) массивов, пунктирной линией разделены поля железистых и магнезиальных гранитов по [Frost et al., 2001]. Усл. обозн. см. на рис. 4.

Таблица 3. Содержания РЗЭ в породах приморского комплекса (по данным ICP-MS метода)

Компонент	Бугульдейско-Ангинский массив						Улан-Ханский массив				
	Граниты ГФ				Граниты ЗФ		Граниты ГФ			Граниты ЗФ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	10/03	8/03	33/03	56/03	11/03	60/03	80/06	75/06	108/03	115/03	
La, г/т	59.77	102.2	215.7	75.17	46.97	75.57	34.84	67.70	82.06	77.85	43.05
Ce	114.3	196.4	328.1	136.2	89.35	126.6	88.70	117.4	152.6	173.5	99.01
Pr	12.58	23.90	34.72	15.76	9.70	12.98	6.31	11.46	16.27	17.51	11.21
Nd	47.84	89.39	97.83	51.80	30.35	43.09	19.33	39.98	60.17	61.98	41.84
Sm	8.81	16.36	12.10	7.10	4.70	7.45	2.65	6.87	10.70	10.16	8.92
Eu	3.28	2.89	1.16	1.13	0.29	0.99	0.07	1.72	1.56	0.69	0.11
Gd	7.76	9.68	8.11	5.88	4.19	5.25	2.33	5.26	7.22	6.94	6.21
Tb	1.07	1.65	0.92	0.83	0.75	0.94	0.42	0.88	1.31	1.11	1.05
Dy	5.69	9.57	4.57	4.38	4.62	5.58	3.06	5.12	7.56	7.07	7.89
Ho	1.18	1.88	0.99	0.95	1.15	1.16	0.75	0.94	1.63	1.56	1.71
Er	3.32	5.31	3.05	2.93	3.58	3.72	2.37	2.71	3.97	4.97	5.01
Tm	0.69	0.74	0.46	0.43	0.54	0.59	0.40	0.39	0.58	0.79	0.76
Yb	3.22	4.21	2.65	2.48	3.20	3.76	2.55	2.41	3.70	4.10	4.21
Lu	0.42	0.66	0.50	0.39	0.57	0.66	0.47	0.41	0.66	0.55	0.77
Сумма РЗЭ	269.9	464.9	710.8	305.4	199.9	288.3	164.3	263.3	350.0	368.8	231.8
(La/Yb) _N	12.4	16.4	55.0	20.5	9.9	13.6	9.2	19.0	15.0	12.8	6.9
Eu/Eu*	1.24	0.70	0.36	0.53	0.20	0.48	0.09	0.88	0.54	0.25	0.04
(La/Sm) _N	4.3	3.9	11.2	6.7	6.3	6.4	8.3	6.2	4.8	4.8	3.1
(Gd/Yb) _N	1.9	1.9	2.5	1.9	1.1	1.1	0.74	1.8	1.6	1.4	1.2

Окончание табл. 3

Компонент	Трехголовый массив									
	Граниты ГФ				Граниты ЗФ			Измененные породы		
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	15/07	8/08	141/08	122/08	12/08	36/07	100/08	26/07	25/09	24/07
La, г/т	48.95	87.53	89.07	53.20	57.60	25.02	72.86	46.46	103.3	291.6
Ce	104.4	180.7	182.6	102.6	109.2	65.33	147.2	102.4	202.5	766.8
Pr	9.80	16.12	17.20	9.07	10.67	5.39	14.14	10.74	20.77	86.49
Nd	35.40	51.01	57.18	28.46	32.81	19.10	47.07	30.84	71.31	266.7
Sm	6.81	8.27	12.00	5.24	5.15	5.32	9.99	6.36	14.28	67.58
Eu	1.24	0.31	0.11	0.15	0.10	0.54	0.07	0.59	0.25	0.91
Gd	5.12	4.66	8.62	3.72	3.02	3.49	7.40	4.52	9.86	38.55
Tb	0.98	0.76	1.63	0.70	0.50	0.73	1.29	1.23	1.57	10.07
Dy	5.73	4.86	11.91	5.25	3.50	3.82	9.67	9.33	10.72	74.39
Ho	1.03	1.01	2.71	1.25	0.83	0.82	2.22	2.00	2.40	16.35
Er	3.36	3.03	8.83	4.39	2.70	3.05	7.66	7.64	7.21	62.32
Tm	0.45	0.47	1.39	0.69	0.46	0.50	1.16	1.40	1.09	11.47
Yb	2.76	3.06	9.04	4.55	3.13	3.59	7.55	12.70	6.24	96.91
Lu	0.47	0.49	1.49	0.76	0.56	0.58	1.24	2.12	0.97	18.39
Сумма РЗЭ	226.5	362.3	403.8	220.0	230.2	137.3	329.6	238.4	452.6	1809
(La/Yb) _N	12.0	19.3	6.7	7.9	12.4	4.7	6.5	2.5	11.2	2.0
Eu/Eu*	0.64	0.15	0.03	0.10	0.08	0.39	0.03	0.34	0.06	0.05
(La/Sm) _N	4.5	6.7	4.7	6.4	7.0	3.0	4.6	4.6	4.6	2.7
(Gd/Yb) _N	1.5	1.2	0.77	0.66	0.78	0.79	0.79	0.28	1.3	0.32

Примечание. $Eu/Eu^* = (Eu_{CN}) / (Sm_{CN}Gd_{CN})^{0.5}$, содержания элементов нормированы по [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. Бугульдейско-Ангинский массив: 1 — граниты рапакиви бух. Песчаная, среднее по 4 анализам из работы [Донская и др., 2005]; 2, 3 — крупноовоидные биотитовые граниты, верховья руч. Долон-Богот; 4 — крупнозернистый биотитовый

гранит, верховья р. Таловка; 5 — аляскит, верховья р. Малая Анга; 6, 7 — мелкосреднезернистые граниты: 6 — из жилы среди крупноовоидных гранитов, верховья р. Долон-Богот, 7 — из жилы среди аляскитов, верховья р. Малая Анга; Улан-Ханский массив: 8, 9 — крупноовоидные биотитовые граниты, р. Курма; 10 — крупнозернистый равномерно-зернистый биотитовый гранит, верховья р. Кучелга; 11 — мелкозернистый гранит из жилы среди крупнозернистых равномерно-зернистых гранитов, верховья р. Кучелга; Трехголовый массив: 12 — крупноовоидный биотитовый гранит, верховья р. Улан-Хан; 13—15 — крупнозернистые равномерно-зернистые биотитовые граниты: 13 — верховья р. Правая Иликта, 14 — голец Трехголовый, 15 — верховья р. Средняя Иликта; 16—18 — мелкосреднезернистые граниты: 16 — из жилы среди крупнозернистых равномерно-зернистых гранитов, верховья р. Правая Иликта, 17, 18 — из небольших массивов в верховьях рек Улан-Хан и Левая Сарма соответственно; 19 — альбитизированный и мусковитизированный мелкосреднезернистый гранит, верховья р. Улан-Хан; 20, 21 — апогранитные кварц-мусковитовые грейзены: 20 — верховья р. Левая Сарма, 21 — верховья р. Улан-Хан.

плагиоклаза, а также Fe-Ti оксидов и апатита. При этом породы Бугульдейско-Ангинского массива по сравнению с породами Улан-Ханского имеют повышенную железистость и пониженную апатитность, свидетельствующие о том, что исходными для этих массивов были расплавы, отличавшиеся по составу. В Трехголовом массиве рост содержания SiO₂ в породах от 73.4 до 80.6 мас. % сопровождается снижением содержаний Al₂O₃, Na₂O и K₂O, что отражает фракционирование щелочного полевого шпата, либо может указывать на проявленное на постмагматической стадии окварцевание. Лейкограниты Трехголового массива имеют очень высокую железистость (в основном ≥ 0.9) и отличаются от лейкогранитов других массивов высокой восстановленностью железа: коэффициент окисленности железа² в них в среднем 0.11 против 0.49 в аляскитах Бугульдейско-Ангинского и 0.29 в лейкогранитах Улан-Ханского массивов.

Мелкосреднезернистые граниты заключительной фазы представлены лейкогранитами, отличающимися от лейкогранитов главной интрузивной фазы пониженными содержаниями SiO₂, повышенными содержанием щелочей (преимущественно за счет Na), апатитностью и железистостью.

Для крупноовоидных гранитов Бугульдейско-Ангинского массива характерны превышающие кларковые для гранитов [Turekian, Wedepohl, 1961] содержания F, Ba, P3Э, Pb, Zr, Th, Zn, Sr и пониженные Li и Nb при околоскларковых Rb, Sn, Y, Be. Спектры P3Э в них наклонные вправо ((La/Yb)_N = 12.4—55), с резко проявленной дифференциацией среди легких ((La/Sm)_N = 3.9—11.2) и умеренной среди тяжелых ((Gd/Yb)_N = 1.9—2.5) лантаноидов, слабой положительной (в рапакиви бух. Песчаная) или отрицательной Eu-аномалией (Eu/Eu* = 0.36—1.24) (табл. 3, рис. 6). Равномерно-зернистые биотитовые граниты отличаются от крупноовоидных более низкими содержаниями Rb, Ba, Y и повышенным Th. В аляскитах по сравнению с крупноовоидными гранитами возрастают окисленность железа, в среднем примерно в 1.5 содержания Rb, более чем в 2 раза Th и в 3.5 раза Sn, в то же время более чем в 5 раз снижаются средние содержания Ba и Sr, в 1.5—2 раза Zr и P3Э при одновременном увеличении в составе последних доли тяжелых лантаноидов ((La/Yb)_N = 9.9, (Gd/Yb)_N = 1.1) и углубления Eu-аномалии (Eu/Eu* = 0.20) (см. табл. 2, 3), что отражает вероятное фракционирование биотита, плагиоклаза, циркона и алланита. Мелкозернистые граниты из жил среди крупноовоидных гранитов и аляскитов отличаются от вмещающих пород пониженными Li, Ba, Sr, Zn, Zr, P3Э, более резкой отрицательной Eu-аномалией и повышенными содержаниями Nb (в среднем в 1.5 раза) и Th (до 5 раз). В гранитах ЗФ окисленность железа выше ($K_{ок} = 0.45—0.49$), чем в крупноовоидных гранитах ($K_{ок}$ в среднем 0.30).

Крупноовоидные граниты Улан-Ханского массива имеют повышенные относительно кларковых содержания F, Ba, Zr, Pb, Th, Sn, Be, Zn и пониженные Nb, отличаясь от крупноовоидных гранитов Бугульдейско-Ангинского массива более высокими содержаниями Li, что связано с их повышенной магнетизальностью, Rb и более низкими F, Zr, Sr, Ba (рис. 7). Спектры P3Э сходны со спектрами в крупноовоидных гранитах Бугульдейско-Ангинского массива ((La/Yb)_N = 15—19, Eu/Eu* = 0.54—0.88) (см. рис. 6). В равномерно-зернистых лейкогранитах по сравнению с крупноовоидными гранитами примерно в 1.5 раза возрастают средние содержания Rb, Sn, Nb, Th, Be, более чем в 3 раза снижаются содержания Ba и Sr, в 1.5 раза Zr (см. табл. 2), углубляется Eu-аномалия (Eu/Eu* = 0.25). По геохимии эти граниты близки к аляскитам Бугульдейско-Ангинского массива, но в последних железо более окислено. Граниты ЗФ из жил среди равномерно-зернистых гранитов в целом близки к ним по редкоэлементному составу, но имеют более высокие средние содержания F, Be, более низкие Ba, P3Э и более глубокий Eu-минимум (Eu/Eu* = 0.04) (см. рис. 6).

Крупноовоидные граниты Трехголового массива обогащены относительно кларковых F, Rb, Cs, Be (в 1.5—2 раза), Sn (более чем в 3 раза), Th и Pb (в 3 раза) и обеднены Sr и Ba. По сравнению с аналогичными гранитами других массивов в них выше содержания Rb, Pb, Th, Cs и особенно Sn (в среднем 11 г/т), ниже Ba, Sr, Zr, Zn, значительно ниже отношения K/Rb, Ba/Rb, Sr/Rb (рис. 8). Содержание лантаноидов

² $K_{ок} = Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO)$.

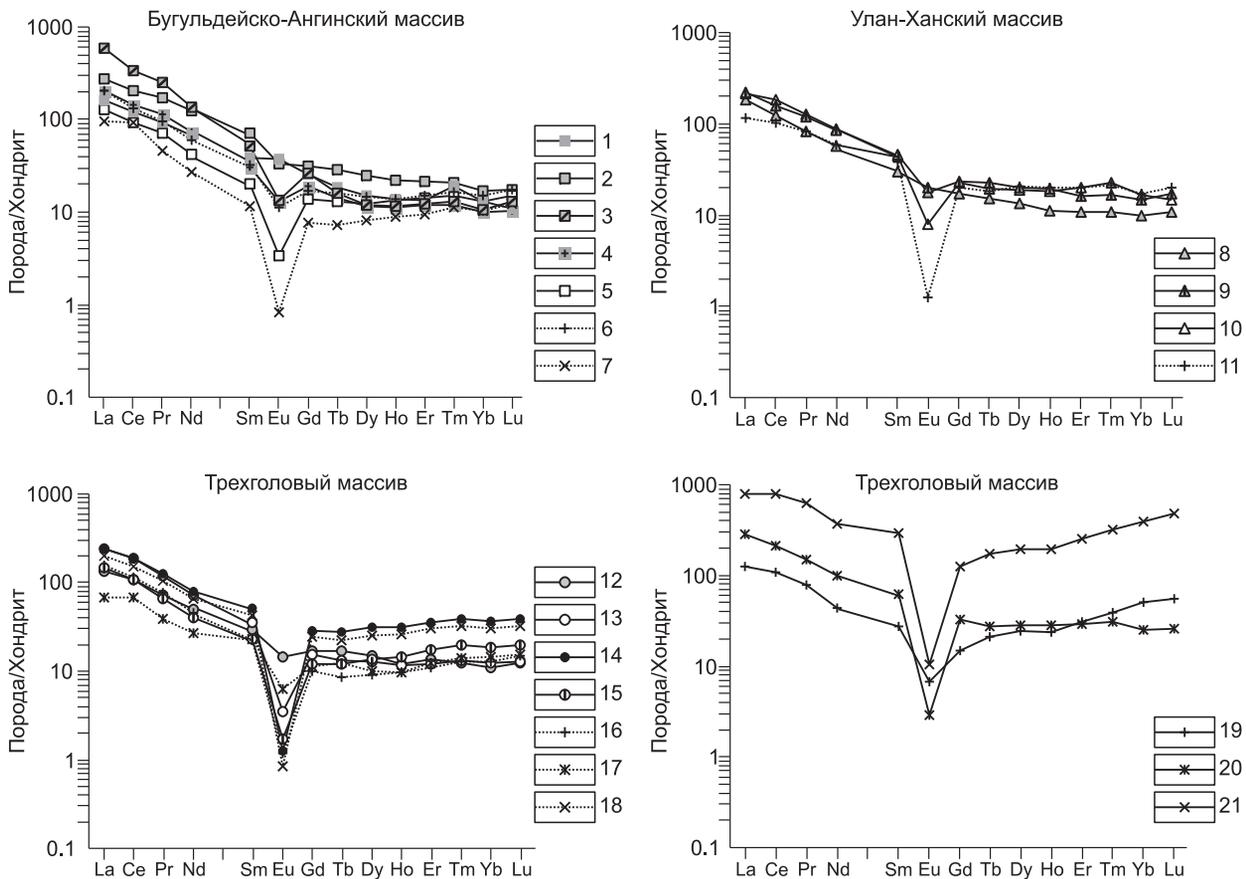


Рис. 6. Распределение РЗЭ в породах приморского комплекса.

Нормирование выполнено по [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. 1—21 соответствуют номерам в табл. 3.

и форма спектра РЗЭ в крупноовоидном граните Трехголового массива $((La/Yb)_N = 12, Eu/Eu^* = 0.64)$ близки к таковым в крупноовоидных гранитах других массивов. В равномерно-зернистых гранитах в среднем в 1.2—1.6 раза выше содержания F, Cs, Rb, Nb, Th, РЗЭ, в 3.5—4.5 раза ниже содержания Ba и Sr, в 6.5 раза Eu, в 1.5—2 раза Pb, Be, Zn, Zr, чем в крупноовоидных. По сравнению с лейкогранитами других массивов лейкограниты Трехголового массива обогащены F, Li, Rb, Cs и обеднены Sr, Ba, Zr (см. табл. 2, 3, рис. 7); в них проявлена тенденция к увеличению среди лантаноидов доли тяжелых РЗЭ (отношение $(La/Yb)_N$ снижается до 7—8) при одновременном усилении фракционирования среди тяжелых лантаноидов $((Gd/Yb)_N$ снижается до 0.66—0.77), резко понижено отношение Eu/Eu^* (0.03—0.15). Мелкозернистые граниты из жил среди равномерно-зернистых гранитов главной фазы (группа 1 гранитов ЗФ, см. табл. 2), как и в других массивах, имеют редкоэлементный состав, близкий к редкоэлементному составу гранитов главной фазы (повышено только содержание Th), однако мелкосреднезернистые граниты и гранит-порфиры, слагающие небольшие массивы по периферии массивов крупнозернистых гранитов, среди пород иликтинской свиты (верховья рек Улан-Хан, Средняя Иликта, Левая Сарма) отличаются по геохимии как между собой, так и от гранитов главной фазы. Граниты из массивов первого типа (группы 2 и 3 гранитов ЗФ, см. табл. 2) имеют низкие ($\leq 0.03\%$) содержания F, высокие содержания Ba, Zr, умеренно повышенные относительно кларковых содержания Rb, высокие отношения K/Rb и Ba/Rb . По содержаниям редких элементов и окисленности железа они близки к крупноовоидным гранитам Улан-Ханского массива, но содержат больше Sn (среднее по массивам 11—15 г/т). В гранитах из массивов второго типа (группа 4 гранитов ЗФ, см. табл. 2), напротив, выше кларковых содержания F (в среднем в 4.5 раза), Rb, Cs, Nb, Y, Pb (в 2—2.7 раза), Li; в то же время очень низкие содержания Ba (в среднем менее 15 г/т) и Sr (< 10 г/т) и, соответственно, отношения K/Rb и Ba/Rb . Среднее содержание Sn, однако, в гранитах из массивов первого и второго типа практически одинаковое, выше кларкового в 4—5 раз.

Постмагматические процессы альбитизации и мусковитизации гранитов с последующим образованием кварц-мусковитовых и кварц-топазовых грейзенов сопровождались накоплением в породах SiO_2

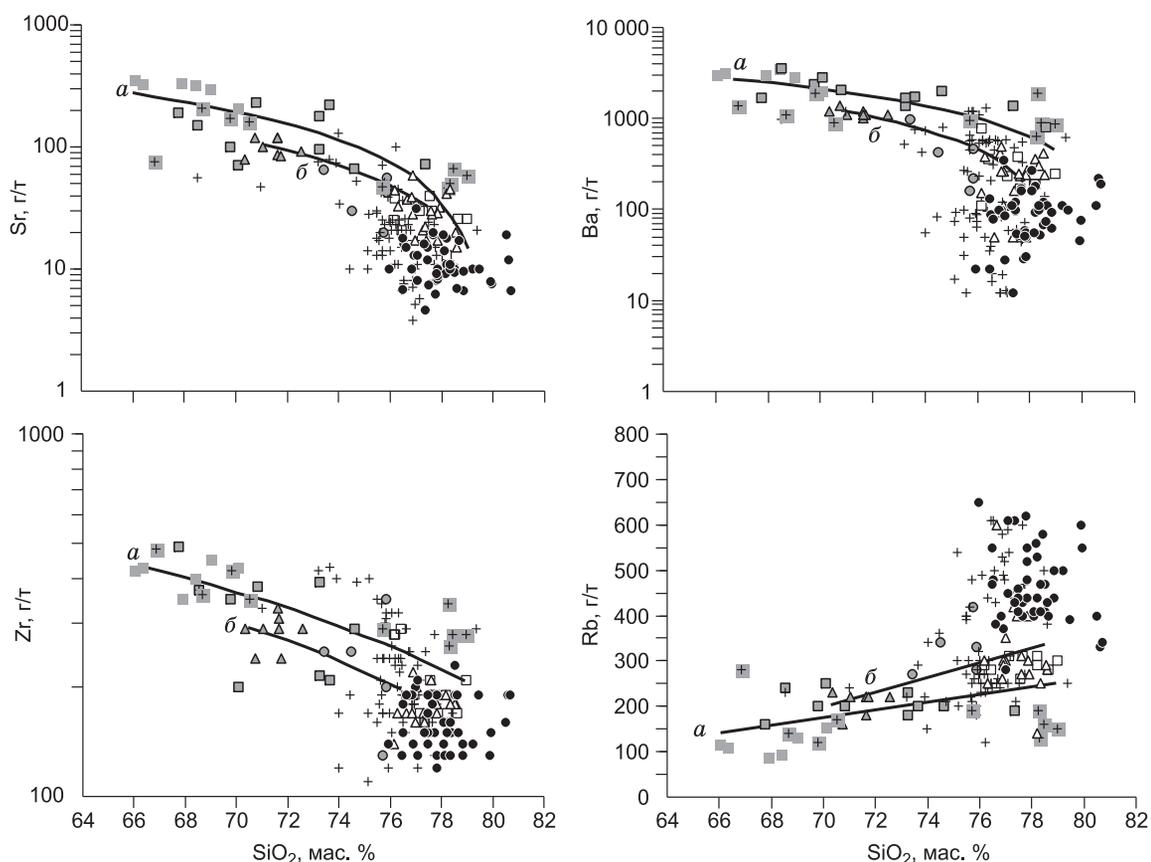


Рис. 7. Соотношение концентраций редких элементов и SiO_2 в породах приморского комплекса.

Усл. обозн. см. на рис. 4, 5.

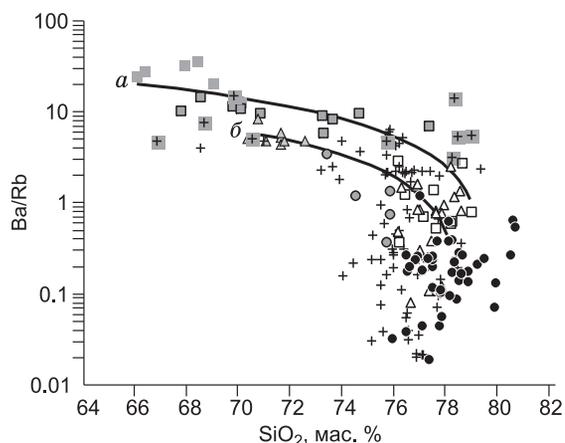
и выносом оснований при инертности алюминия, титана, а в кварц-мусковитовой зоне ограниченной подвижности калия (см. табл. 2). В гидротермально измененных породах возрастают средние содержания F, Sn, Li и увеличивается разброс (в г/т) содержаний F (700—60000), Li (11—205), Rb (96—1100), Sn (13—310), Ce (12—550), Y (7—210), Nb (24—190), W (от < 5 до 218). Проявлена также тенденция к увеличению относительной концентрации тяжелых лантаноидов, в результате чего форма спектра РЗЭ в грейзенах становится симметричной, сходной с таковой в Li-F гранитах [Коваль, 1998].

УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

К числу главных параметров, влияющих на рудоносность гранитных массивов, относятся глубинность их становления, кислотность—щелочность, поведение летучих компонентов при кристаллизации расплава [Руб, Коптев-Дворников, 1970; Таусон, 1977; Трошин, 1978; Козлов, 1985]. Как отмечалось выше, среди массивов гранитов приморского комплекса наименее глубинным является Трехголовый, глубина залегания кровли которого, по геологическим данным, составляла около 5 км [Бухаров, 1987]. Присутствие в верхней части Бугульдейско-Ангинского массива порфировидных аляскитов с гранофировой структурой основной массы также указывает на относительно мало-глубинные условия залегания кровли интрузии.

Рис. 8. Соотношение Ba/Rb — SiO_2 в гранитоидах приморского комплекса.

Усл. обозн. см. на рис. 4, 5.



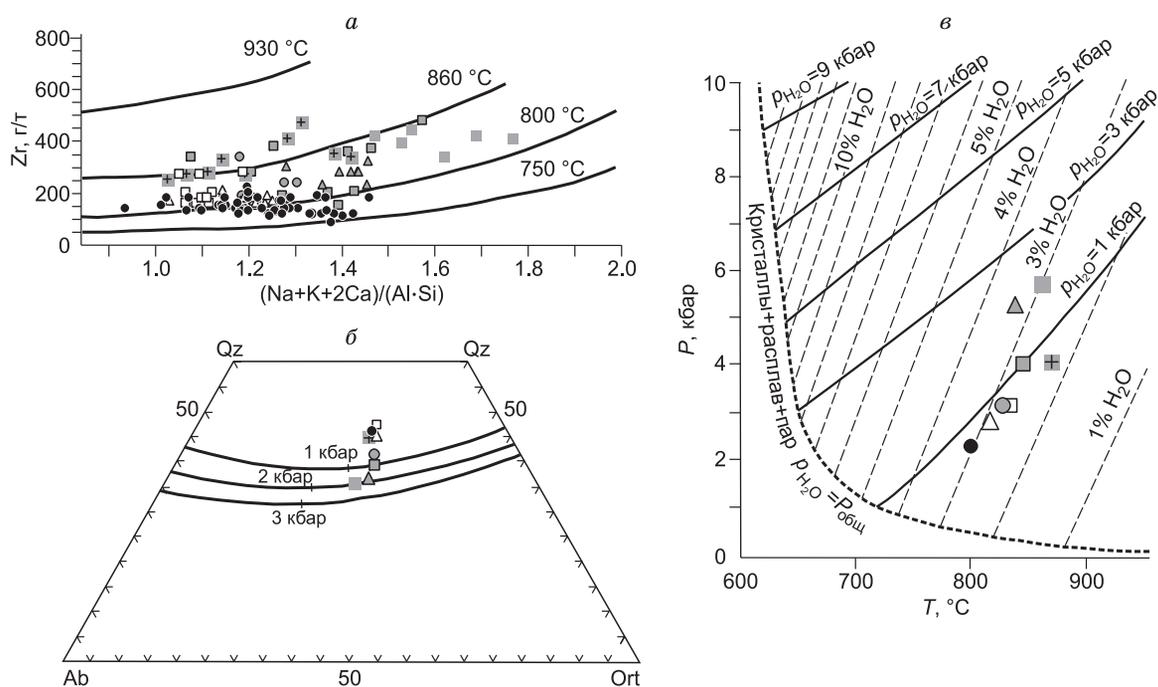


Рис. 9. Условия кристаллизации гранитных расплавов.

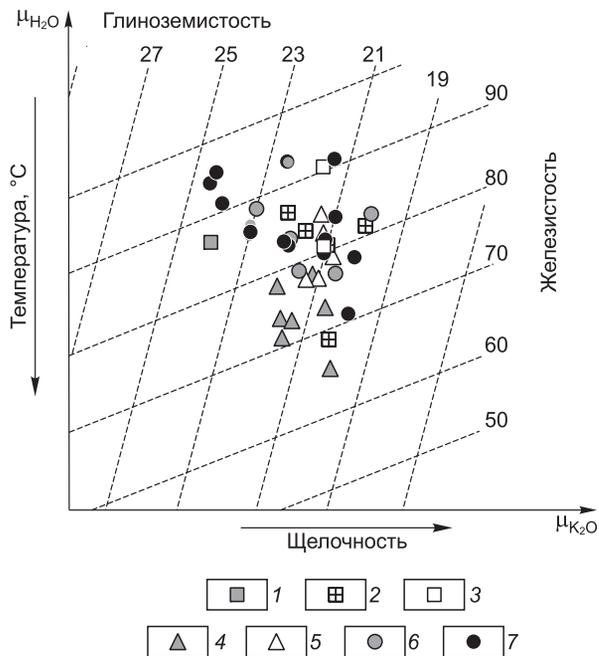
a — оценка температуры расплава на основе соотношения концентрации Zr и катионного отношения $(Na + K + 2Ca)/(Al \cdot Si)$ в гранитах [Watson, Harrison, 1983]; *б* — оценка p_{H_2O} на основе сопоставления среднего нормативного состава гранитов с кварц-полевошпатовыми котектиками при различных значениях давлений воды [Мигматиты, 1988]; *в* — оценка $P_{общ}$ и концентрации воды в расплаве на основе PT диаграммы системы гранит—вода при независимых вариациях $P_{общ}$ и p_{H_2O} [Рябчиков, 1975]. Усл. обозн. см. на рис. 4.

Для оценки температуры начальных стадий кристаллизации расплавов использовалось уравнение цирконового термометра, основанное на зависимости растворимости Zr в коровых расплавах от температуры и катионного отношения $(Na + K + 2Ca)/(Al \times Si)$ [Watson, Harrison, 1983]. Наиболее высокая температура расплава (850—860 °C) получена для крупноовоидных и равномерно-зернистых биотитовых гранитов Бугульдейско-Ангинского массива (рис. 9, *a*); для аляскитов она составляла в среднем 835 °C. В Улан-Ханском массиве образование крупноовоидных гранитов происходило из расплава с температурой не ниже (в среднем) 840 °C, а равномерно-зернистых — 815 °C. В Трехголовом массиве температура расплава, из которого кристаллизовались крупноовоидные граниты, составляла в среднем около 830 °C, а равномерно-зернистые — около 800 °C; для гранитов, слагающих голец Трехголовый, получены наиболее низкие температуры — 745—780 °C.

Оценка парциального давления воды при кристаллизации расплава выполнена на основе сопоставления средних нормативных составов гранитов с составом кварц-полевошпатовых котектик, полученных экспериментально для системы Кв—Орт—Аб—H₂O при p_{H_2O} 1, 2 и 3 кбар [Мигматиты, 1988]. Судя по диаграмме (см. рис. 9, *б*), кристаллизация крупноовоидных гранитов бухты Песчаная и Улан-Ханского массива происходила при p_{H_2O} около 2 кбар, крупноовоидных гранитов Бугульдейско-Ангинского и Трехголового массивов при p_{H_2O} около 1 кбар, а равномерно-зернистых гранитов всех массивов при p_{H_2O} менее 1 кбар. Полученные данные о температуре начальных стадий кристаллизации расплавов и p_{H_2O} позволяют с помощью PT диаграммы системы гранит—вода [Рябчиков, 1975] приблизительно оценить содержание воды в расплаве и общее давление при кристаллизации (см. рис. 9, *в*). Как следует из рис. 9, *в*, граниты Бугульдейско-Ангинского и Трехголового массивов кристаллизовались из расплава с содержанием воды около 2.5—3 %, а Улан-Ханского — около 3—3.5 %. $P_{общ}$ при кристаллизации крупноовоидных гранитов бух. Песчаная и Улан-Ханского массива составляло 5—6 кбар, что согласуется с оценками Т.В. Донской для гранитов рапакиви бух. Песчаная по амфиболовому геобарометру (4—7 кбар) [Донская и др., 2005]. Крупноовоидные и равномерно-зернистые биотитовые граниты Бугульдейско-Ангинского массива формировались при более низком $P_{общ}$ — около 4 кбар, а аляскиты и равномерно-зернистые граниты Улан-Ханского массива — при $P_{общ}$ около 3 кбар. Равномерно-зернистые граниты Трехголового массива кристаллизовались при наиболее низком $P_{общ}$ (около 2 кбар), что согласуется с геологическими данными. В целом полученные данные позволяют сделать вывод, что кристаллизация

Рис. 10. Соотношение активностей (μ) воды и калия в кристаллизующихся расплавах [Иванов, 1970].

1—3 — биотиты из пород Бугульдейско-Ангинского массива: 1 — крупноовоидного гранита, 2 — равномерно-зернистых биотитовых и лейкократовых гранитов, 3 — аляскитов; 4, 5 — из пород Улан-Ханского массива: 4 — крупноовоидных гранитов, 5 — равномерно-зернистых биотитовых и лейкократовых гранитов; 6, 7 — из пород Трехголового массива: 6 — крупноовоидных гранитов, 7 — равномерно-зернистых биотитовых гранитов. Железистость $f = 100\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$, глиноземистость $l = 100\text{Al}/(\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg})$.



гранитов происходила из недосыщенного водой расплава, что является общим признаком для гранитов рапакиви [Rämö, Naarala, 1993].

Отсутствие в гранитах главной фазы приморского комплекса магматического магнетита при устойчивости ильменита показывает, что расплав кристаллизовался в восстановительных условиях, при значениях p_{O_2} ниже буфера кварц-фаялит-магнетит, или близких к нему, что согласуется с высокой железистостью биотита в гранитах (см. табл. 1). При этом в породах ГФ Бугульдейско-Ангинского и Улан-Ханского массивов рост железистости биотита, отражающий снижение температуры кристаллизации, практически не сопровождается изменением глиноземистости слюды, что указывает на слабоменявшуюся щелочность расплава [Иванов, 1970] (рис. 10). В то же время в гранитах ГФ Трехголового массива одновременно возрастают железистость и глиноземистость биотита, что отражает рост кислотности расплава (обогащение летучими кислотными компонентами) при снижении температуры.

Как отмечалось, для гранитов приморского комплекса в целом характерны высокие содержания F (см. табл. 2). При этом в Трехголовом массиве проявлена тенденция к росту содержания F в породах при снижении отношения Ba/Rb, указывающая на накопление F в остаточном расплаве (рис. 11, а), тогда как в Бугульдейско-Ангинском массиве, напротив, одновременно с уменьшением отношения Ba/Rb снижается содержание F, что, вероятно, обусловлено обогащенностью исходного расплава кальцием и связыванием F во флюорите на ранних стадиях кристаллизации.

Распределение галогенов в биотите дает дополнительную информацию о содержании и поведении летучих компонентов в магмах. Биотиты из пород приморского комплекса содержат умеренные количества F и повышенные относительно типично коровых гранитов (0.1 мас. %, по [Бушляков, Холоднов,

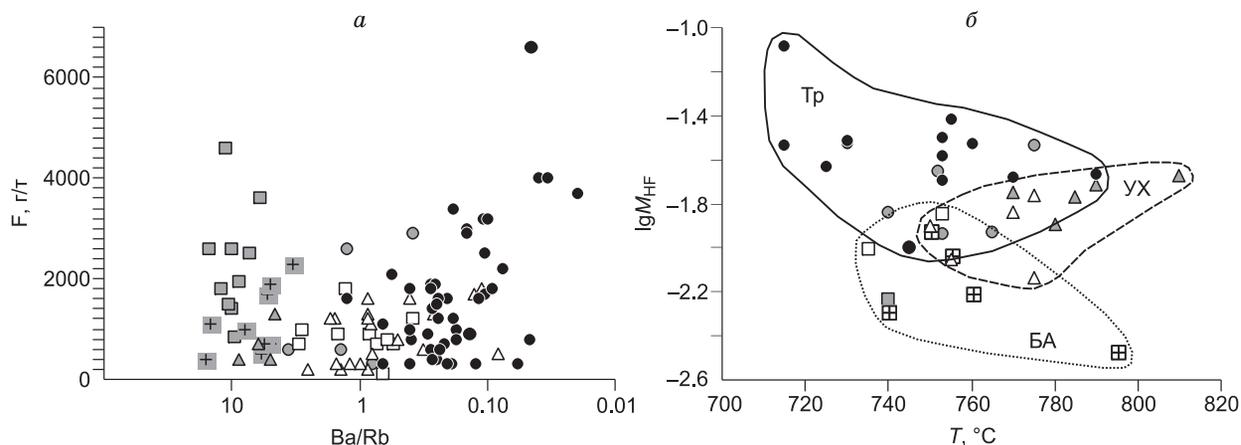


Рис. 11. Соотношение Ba/Rb—F в гранитоидах приморского комплекса (а) и концентрация HF (M , моль/дм³) во флюидах гранитоидов главной фазы, по данным биотитового геофториметра [Аксюк, 2002].

а — усл. обозн. см. на рис. 4; б — усл. обозн. см. на рис. 10. Показаны поля гранитов главной фазы Бугульдейско-Ангинского (БА), Улан-Ханского (УХ) и Трехголового (Тр) массивов.

Таблица 4. Средние содержания F и Cl в биотите из гранитов приморского комплекса и параметры флюида, равновесного с биотитом

Порода	f_{Bt}	F, мас. %	Cl, мас. %	$T, ^\circ\text{C}$	$M_{\text{HF}}, \text{моль/дм}^3$	$\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{H}_2\text{O}})$	$\lg(f_{\text{HCl}}/f_{\text{H}_2\text{O}})$	$\lg(f_{\text{HCl}}/f_{\text{HF}})$
Бугульдейско-Ангинский массив								
1 (4)	82	0.27	0.12	756	0.007	-4.00	-1.98	2.08
2 (4)	84	0.45	0.07	750	0.010	-3.76	-2.14	1.67
3 (7)	92	≤ 0.25—0.46	0.16	727	0.006	-3.99	-2.07	1.98
Улан-Ханский массив								
1 (7)	73	0.75	0.15	784	0.016	-3.57	-1.50	2.14
2 (5)	80	0.54	0.12	765	0.012	-3.69	-1.77	1.98
3 (3)	81	0.52	0.17	758	0.012	-3.84	-1.63	2.27
Трехголовый массив								
1 (5)	82	0.75	0.23	757	0.018	-3.54	-1.53	2.09
2 (5)	79	1.03	0.36	765	0.024	-3.38	-1.31	2.15
3 (8)	89	1.07	0.19	734	0.034	-3.32	-1.98	1.46
4 (8)	88	0.80	0.14	741	0.023	-3.44	-2.01	1.53
5 (5)	85	0.56	0.15	746	0.015	-3.65	-1.84	1.88

Примечание. В скобках — число проб, по которым рассчитано среднее арифметическое. $f_{\text{Bt}} = 100\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$; T — температура устойчивости биотита данного состава при окислительных условиях, отвечающих буферу QFM [Wones, Eugster, 1965]. M_{HF} — концентрация нейтральной частицы HF^0 во флюиде, равновесном со слюдой [Аксюк, 2002]. Расчеты параметров флюида выполнены по уравнениям из работ: M_{HF} — по [Аксюк, 2002], $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{H}_2\text{O}})$, $\lg(f_{\text{HCl}}/f_{\text{H}_2\text{O}})$, $\lg(f_{\text{HCl}}/f_{\text{HF}})$ — по [Munoz, Swenson, 1981; Munoz, 1984]. Бугульдейско-Ангинский массив: 1 — крупноовоидные и равномерно-зернистые биотитовые граниты, 2 — лейкократовые граниты и аляскиты, 3 — мелкосреднезернистые граниты ЗФ; Улан-Ханский массив: 1 — крупноовоидные биотитовые граниты, 2 — равномерно-зернистые биотитовые и лейкократовые граниты, 3 — мелкосреднезернистые граниты ЗФ; Трехголовый массив: 1 — крупноовоидные биотитовые граниты, 2 — лейкократовые граниты верховьев р. Правая Иликта, 3 — лейкократовые граниты гольца Трехголового, 4 — мелкозернистые граниты из жил среди гранитов главной фазы, 5 — мелкосреднезернистые граниты, слагающие самостоятельные массивы.

1986]) количества Cl (табл. 4). Наиболее высокие содержания галогенов типичны для слюды из Трехголового массива. Для оценки режима F и Cl во флюиде, равновесном с биотитом, использовались уравнения из работ [Munoz, Swenson, 1981; Munoz, 1984; Аксюк, 2002]. Температура кристаллизации биотита оценивалась по экспериментальной кривой зависимости железистости слюды от температуры при окислительных условиях, отвечающих буферу QFM, и представляет собой минимальную температуру устойчивости биотита данного состава в отсутствие магнетита [Wones, Eugster, 1965]. Как следует из табл. 4 и рис. 11, б, при наиболее высоких концентрациях HF во флюиде кристаллизовался биотит в Трехголовом массиве, при наиболее низких в Бугульдейско-Ангинском и промежуточных в Улан-Ханском. Образование гранитов ЗФ во всех массивах происходило при пониженной концентрации HF во флюиде, равновесном с биотитом, по сравнению с гранитами ГФ (см. табл. 4). Поздние дифференциаты ГФ во всех массивах кристаллизовались при пониженной летучести HCl во флюиде по сравнению с водой и HF (см. табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно [Таусон, 1977], наиболее общими критериями, определяющими потенциальную рудоносность гранитоидов, являются их геохимический тип и геологическая обстановка становления, от которых зависят состав и содержание летучих компонентов в магмах и режим процессов эманационной дифференциации. К благоприятным признакам при оценке рудоносности интрузий относятся повышенные содержания литофильных редких элементов, высокая флюидонасыщенность гранитов, высокие дисперсии концентраций рудообразующих, редких литофильных и летучих элементов в породах, проявления метасоматитов и др. [Коваль, 1998].

Приморский комплекс представлен полной и завершенной гранитоидной ассоциацией высокой железистости, умеренной общей щелочности и повышенной калиевости [Изох, 1978], сформировавшейся на постколлизивной стадии в краевой части Сибирского кратона [Донская и др., 2005]. Исходными для гранитов являлись известково-щелочные магмы с низкими содержанием воды (2.5—3.5 мас. %) и

фугитивностью кислорода (ниже буфера QFM), образовавшиеся, вероятно, при частичном плавлении глубокометаморфизованных пород кислого состава [Frost, Frost, 2011]. При этом пониженная железистость крупноовоидных гранитов Улан-Ханского массива наряду с повышенной магнезиальностью биотита в нем указывают на вероятные различия по фугитивности кислорода источников расплавов [Agnol, de Oliveira, 2007]. Однако эволюция состава расплавов в Бугульдейско-Ангинском и Улан-Ханском массивах однотипна и выражается в росте кремнекислотности гранитоидов при одновременном увеличении железистости, калиевости и агапайности.

В целом полученные данные по геохимии и условиям кристаллизации гранитов показывают, что наиболее контрастными являются Бугульдейско-Ангинский и Трехголовый массивы, сопоставление которых дает важную информацию по проблеме потенциальной рудоносности комплекса. Для оценки потенциальной рудоносности гранитов мы использовали предложенный В.Д. Козловым [1985, 2000а] метод расчета элементных формул и индексов концентрации (ИНК) гранитофильных элементов. Элементная формула [Козлов, 2000а] представляет собой результат нормирования содержаний элементов в данной разновидности гранита по их кларковым концентрациям в гранитах. Элементы, концентрирующиеся в вышекларковых количествах, записываются в числителе формулы, а присутствующие в нижекларковых количествах — в знаменателе. Числовые значения при каждом элементе в формуле означают количество гранитных кларков данного элемента. К гранитофильным элементам В.Д. Козловым

Таблица 5. Сравнительная геохимическая характеристика гранитов приморского комплекса в элементных формулах и индексах концентрации

Граниты	Элементная формула	ИНК
Бугульдейско-Ангинский массив		
Крупноовоидные ГФ	$\frac{F_{3,4}-Ba_{2,6}-Pb_{1,8}-Zr_{1,8}-Th_{1,5}-Be_{1,3}-Rb_{1,2}-Zn_{1,1}-Sn_{1,0}}{Li_{0,4}-Sr_{0,5}-Nb_{0,7}-Y_{0,8}}$	3.9
Равномерно-зернистые биотитовые ГФ	$\frac{Th_{2,9}-Zr_{2,1}-Ba_{1,8}-F_{1,4}-Pb_{1,3}-Zn_{1,3}-Sn_{1,1}-Be_{1,0}-Rb_{1,0}}{Sr_{0,4}-Li_{0,5}-Y_{0,6}-Nb_{0,7}}$	2.6
Аляскиты ГФ	$\frac{Sn_{3,8}-Th_{2,4}-Rb_{1,7}-Pb_{1,5}-Zr_{1,2}-F_{1,1}-Be_{1,1}-Zn_{1,0}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,4}-Li_{0,6}-Y_{0,8}-Nb_{0,9}}$	5.1
Мелкосреднезернистые ЗФ 1	$\frac{Th_{5,2}-F_{3,6}-Pb_{2,0}-Be_{1,9}-Zr_{1,6}-Rb_{1,3}-Nb_{1,2}}{Sr_{0,2}-Li_{0,3}-Zn_{0,7}-Ba_{0,8}-Sn_{0,8}-Y_{0,9}}$	9.5
Мелкосреднезернистые ЗФ 2	$\frac{Sn_{3,3}-Th_{3,1}-Rb_{1,8}-Pb_{1,8}-Be_{1,6}-F_{1,4}-Nb_{1,3}-Zr_{1,2}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,1}-Li_{0,3}-Zn_{0,9}-Y_{0,9}}$	6.7
Улан-Ханский массив		
Крупноовоидные ГФ	$\frac{Pb_{1,8}-Zr_{1,6}-Th_{1,5}-Sn_{1,5}-Be_{1,4}-Ba_{1,4}-Rb_{1,2}-Nb_{1,1}-Zn_{1,1}}{Sr_{0,3}-Nb_{0,7}-Li_{0,8}-Y_{0,9}-F_{0,9}}$	3.4
Равномерно-зернистые ГФ	$\frac{Sn_{2,5}-Th_{2,2}-Pb_{2,2}-Be_{2,0}-Rb_{1,9}-Nb_{1,1}-F_{1,1}-Zr_{1,0}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,3}-Li_{0,4}-Zn_{0,7}-Y_{0,8}}$	5.2
Мелкосреднезернистые ЗФ	$\frac{Th_{2,9}-Sn_{2,7}-Pb_{2,7}-Be_{2,6}-Rb_{1,9}-F_{1,6}-Nb_{1,2}-Zr_{1,0}-Y_{1,0}}{Ba_{0,1}-Sr_{0,1}-Li_{0,3}-Zn_{0,8}}$	7.9
Трехголовый массив		
Крупноовоидные ГФ	$\frac{Sn_{3,7}-Th_{3,0}-Pb_{2,8}-Rb_{1,9}-F_{1,8}-Be_{1,5}-Zr_{1,4}-Y_{1,0}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,6}-Zn_{0,9}-Li_{0,9}-Nb_{0,9}}$	8.9
Равномерно-зернистые ГФ	$\frac{Sn_{4,0}-Th_{3,8}-Rb_{2,7}-F_{2,1}-Pb_{1,8}-Nb_{1,1}-Y_{1,0}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,1}-Zn_{0,5}-Li_{0,9}-Be_{0,9}-Zr_{0,9}}$	9.2
Мелкосреднезернистые ЗФ 1	$\frac{Th_{4,8}-Sn_{4,0}-Rb_{2,8}-Pb_{2,0}-F_{1,6}-Be_{1,1}-Nb_{1,1}}{Sr_{0,1}-Ba_{0,1}-Zn_{0,6}-Li_{0,7}-Y_{0,9}-Zr_{0,9}}$	9.9
Мелкосреднезернистые ЗФ 2	$\frac{Sn_{3,8}-Th_{1,8}-Zr_{1,8}-Pb_{1,7}-Ba_{1,5}-Rb_{1,3}-Y_{1,1}-Be_{1,0}}{Sr_{0,2}-Li_{0,3}-F_{0,4}-Zn_{0,7}-Nb_{0,9}}$	4.1
Мелкосреднезернистые ЗФ 3	$\frac{Sn_{5,0}-Th_{1,8}-Rb_{1,4}-Pb_{1,4}-Zr_{1,4}}{Sr_{0,1}-Be_{0,2}-Li_{0,2}-F_{0,4}-Ba_{0,7}-Zn_{0,8}-Y_{0,8}-Nb_{0,9}}$	3.5
Мелкосреднезернистые ЗФ 4	$\frac{F_{4,6}-Th_{4,2}-Sn_{4,0}-Rb_{3,1}-Pb_{2,1}-Nb_{2,0}-Y_{1,7}-Be_{1,7}-Li_{1,3}-Zr_{1,1}}{Sr_{0,02}-Ba_{0,02}-Zn_{0,5}}$	15.8

Примечание. Формулы и ИНК рассчитаны по средним составам пород из табл. 2. Принятые кларковые концентрации для гранитов при нормировании (г/т) [Козлов, 1985]: F — 800, Li — 40, Rb — 170, Be — 3, Sr — 300, Ba — 800, Sn — 3, Th — 17, Pb — 20, Zn — 50, Y — 40, Zr — 175, Nb — 21. Cs при расчетах не учитывался.

[1985] отнесены элементы, кларковые концентрации которых в лейкогранитах выше, чем концентрации в гранодиоритах. Индекс концентрации показывает степень суммарной геохимической аномальности данной разновидности по сравнению с кларковым гранитом и рассчитывается по формуле: $ИНК = КК_1 + КК_2 + \dots + КК_n - n$, где $КК$ — кларки концентрации гранитофильных элементов, n — число элементов, участвующих в расчете ИНК. Sr, Ba и Zn при расчете ИНК не учитываются.

Как следует из приведенных выше данных, исходным для Бугульдейско-Ангинского массива был относительно слабодифференцированный расплав. В процессе внутрикамерной дифференциации, протекавшей при умеренном $P_{общ}$ (от 4 до 3 кбар), был сформирован ряд пород от гранодиоритов до лейкогранитов. В нем значительное (в 6—7 раз) снижение содержаний Sr сопровождалось гораздо более слабым ростом содержаний Rb — в среднем от 115 г/т в гранитах рапакиви до 150—190 г/т в наиболее кремнекислых равномерно-зернистых гранитах (см. табл. 2, рис. 7). ИНК для главных разновидностей пород, слагающих Бугульдейско-Ангинский массив, низкий — 2.5—4 кларка (табл. 5). Исключение составляют аляскиты, отличающиеся от близких по кремнекислотности лейкогранитов повышенными концентрациями Rb, достигающими 310 г/т, и пониженными Ba, снижающимися в отдельных пробах до 170 г/т. Высокая степень окисленности железа в аляскитах наряду с характерным для них парагенезисом мусковита и магнетита вместо биотита и особенностями структуры позволяет предполагать, что их кристаллизация происходила в верхней части магматической камеры из относительно обогащенного водой расплава при повышенной активности кислорода. В аляскитах ИНК возрастает до 5, в первую очередь, за счет Sn (в среднем 3.8 кларка). Кроме того, повышенной редкометаллностью (6.5—9.5 кларка) характеризуются граниты заключительной фазы, слагающие относительно маломощные жилы, однако объем их по сравнению с объемом гранитов главной фазы несуществен. Сходная картина наблюдается в Улан-Ханском массиве, крупноовоидные граниты в котором имеют значение ИНК = 3.4, для равномерно-зернистых гранитов ИНК около 5, а для мелкозернистых гранитов ЗФ ИНК возрастает до 8. Уровень в 2—3 кларка типичен для Sn, Th, Pb, Be и Rb (см. табл. 5).

В отличие от Бугульдейско-Ангинского и Улан-Ханского массивов, петро- и геохимические особенности Трехголового массива — обогащенность Rb, обедненность Ba, Sr, Eu, резко пониженные отношения K/Rb , Ba/Rb , Sr/Rb , Eu/Eu^* (см. табл. 2, 3, рис. 7, 8) указывают на то, что исходным для этого массива являлся лейкогранитный расплав, образовавшийся, возможно, в процессе дифференциации известково-щелочной магмы в глубинной магматической камере и затем отделившийся от нее и перемещенный в верхние горизонты коры. Кристаллизационная дифференциация в глубинной магматической камере сопровождалась снижением парциального давления кислорода, который связывался в темноцветных минералах. Перемещенный в верхние горизонты земной коры этот расплав уже изначально содержал в повышенных количествах гранитофильные элементы (ИНК в гранитах в среднем около 9), а в ходе его последующей кристаллизации возникали небольшие объемы остаточных расплавов. Из последних кристаллизовались субщелочные граниты, аномально (по сравнению с другими породами приморского комплекса) обедненные Sr (< 10 г/т) и Ba (< 15 г/т) и обогащенные F, Li, Sn, Th, а также Y и Nb (группа 4 гранитов ЗФ), ИНК которых достигает уже 16 кларков (см. табл. 2, 5). Другая часть гранитов и гранит-порфиров из автономных массивов ЗФ имеет низкий ИНК и повышенные содержания Ba (до 1.5 кларков), что указывает на более низкую степень дифференциации исходной магмы, а низкие содержания F позволяют предполагать быструю дегазацию расплава в малоглубинных условиях. Однако именно с этими массивами известны проявления кварц-топаз-мусковитовых грейзенов с повышенными концентрациями Sn, Nb, Y, Th, PЗЭ.

Состав и условия формирования приморского комплекса подтверждают его принадлежность к группе оловоносных гранитоидных формаций, подобно другим комплексам гранитов рапакиви [Изох, 1978; Козлов, 1985; Наарала, 1995]. При этом в Бугульдейско-Ангинском и Улан-Ханском массивах к субредкометалльным ограниченно-рудноносным с ИНК = 4—6 кларков, по [Козлов, 2000а], относятся только аляскиты и равномерно-зернистые лейкограниты, а также граниты ЗФ, тогда как большая часть слагающих эти массивы гранитов по значению ИНК являются безрудными. Трехголовый массив существенно отличается от Бугульдейско-Ангинского и Улан-Ханского. Лейкогранитный состав интрузии, ее значительный объем (протяженность массива около 55 км при ширине 1—9 км), обогащенность F, восстановительные условия являлись благоприятными факторами для накопления летучих компонентов и Sn в остаточных расплавах, от которых могли отделяться рудоносные растворы [Козлов, 1985; Бескин и др., 1996]. По значениям ИНК граниты Трехголового массива являются потенциально рудоносными. Но в целом полученные данные показывают, что даже при значительных объемах известково-щелочной магмы и глубоко продвинутой ее дифференциации могут возникнуть только ограниченно-рудноносные интрузии, тогда как возникновение промышленных концентраций редких элементов в гранитах связывается в настоящее время многими исследователями с поступлением в коровые кислые расплавы вещества из глубинного источника [Трошин, 1986; Руб, Руб, 1994; Козлов, 2000б; Летников, 2003; Поцелуев и др., 2008].

ВЫВОДЫ

1. Формирование гранитов приморского комплекса связано с внедрением в породы раннего протезоя недосыщенных водой расплавов, отделившихся от эволюционирующих глубинных очагов высококалиевой и высокожелезистой известково-щелочной магмы, и их дальнейшей внутрикамерной дифференциацией при низком p_{O_2} , что обусловило устойчивость ильменита в качестве главного рудного минерала гранитоидов. Общая направленность изменения состава главной интрузивной фазы комплекса выражается в росте кремнекислотности пород при одновременном увеличении алкаитности, железистости и снижении отношения Na_2O/K_2O . Наряду с этим для гранитов ЗФ проявлена тенденция к возрастанию общей щелочности остаточных расплавов.

2. Наиболее контрастны по составу и условиям кристаллизации Бугульдейско-Ангинский и Трехголовый массивы. Исходным для Бугульдейско-Ангинского массива служил относительно слабодифференцированный расплав, кристаллизация которого происходила в условиях умеренных глубин ($P_{общ} = 3—4$ кбар) и не сопровождалась накоплением фтора в наиболее кислых поздних дифференциатах, чем, по-видимому, обусловлено умеренное (до 2 раз) обогащение Rb лейкогранитов по сравнению с гранодиоритами при одновременном снижении содержаний Sr в 6—7 раз. Только в верхней части интрузии из относительно обогащенного водой расплава, при повышенной активности кислорода, кристаллизовались плюмазитовые ($ASI_{сред} = 1.23$) аляскиты, в которых содержание Rb достигало 1.8 кларка, а Sn — 5 кларков.

3. Исходным для Трехголового массива служил лейкогранитный расплав, обогащенный Cs, Li, Rb, Sn, Th, возникший, вероятно, в процессе дифференциации известково-щелочной магмы в глубинной магматической камере и перемещенный затем в верхние горизонты земной коры. Кристаллизация этого расплава происходила при пониженном $P_{общ}$ (около 2 кбар) и повышенной по сравнению с другими массивами летучести HF. Наиболее поздними дифференциатами лейкогранитного расплава являлись резко обедненные Sr (< 10 г/т) и Ba (< 15 г/т) субщелочные умеренно глиноземистые ($ASI_{сред} = 1.02$) лейкограниты с повышенными относительно кларковых содержаниями Sn, Th (в среднем в 4 раза), а также Nb и Y (в 1.7—2 раза).

4. Полученные данные показывают, что в процессе дифференциации высококалиевой известково-щелочной магмы возможно образование значительных объемов лейкогранитов с ИНК на уровне 8—10 кларков, а предельные кислые дифференциаты имеют ИНК около 16, что характерно для потенциально рудоносных интрузий [Козлов, 2000a]. Геохимические особенности гранитов ГФ массива Трехголового, присутствие акцессорных редкометаллических минералов в гранитах ЗФ, проявление грейзенизации позволяют рассматривать его как перспективный в отношении обнаружения оловянного оруденения грейзенового типа.

Авторы выражают признательность рецензентам О.М. Туркиной, В.Д. Козлову, а также Т.В. Донской за высказанные ими замечания, послужившие улучшению качества статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-05-00289-а).

ЛИТЕРАТУРА

- Аксюк А.М.** Экспериментально обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология, 2002, т. 10, № 6, с. 630—644.
- Бескин С.М., Жабин А.Г., Кудрявцев Ю.К., Филатов Е.И.** Использование петрохимических и геохимических особенностей гранитоидных формаций при прогнозе редкометаллического оруденения // Отечественная геология, 1996, № 7, с. 39—48.
- Бибикова Е.В., Кориковский С.П., Сезько А.И., Федоровский В.С.** Возраст гранитов приморского комплекса (Западное Прибайкалье) по данным U-Pb метода // Докл. АН СССР, 1981, т. 257, № 2, с. 462—466.
- Брынцев В.В., Петрова З.И., Левицкий В.И.** Рапакивиоподобные граниты южного обрамления Сибирской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984, № 1, с. 11—22.
- Бухаров А.А.** Протоактивизированные зоны древних платформ. Новосибирск, Наука, 1987, 200 с.
- Бушляков И.Н., Холоднов В.В.** Галогены в петрогенезисе и рудоносности гранитоидов. М., Наука, 1986, 192 с.
- Великославинский Д.А., Биркис А.П., Богатиков О.А., Бухарев В.П., Великославинский С.Д., Гордиенко Л.И., Зинченко О.В., Кивисилла Я.Я., Кирс Ю.Э., Кононов Ю.В., Левицкий Ю.Ф., Нийн М.И., Пуура В.А., Хворов М.И., Шустова Л.Е.** Анортозит-рапакивигранитная формация Восточно-Европейской платформы. Л., Наука, 1978, 296 с.
- Донская Т.В., Бибикова Е.В., Мазукабзов А.М., Козаков И.К., Гладкочуб Д.П., Кирнозова Т.И., Плоткина Ю.В., Резницкий Л.З.** Приморский комплекс гранитоидов Западного Прибайкалья: геохронология, геодинамическая типизация // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (10), с. 1006—1016.

- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Ковач В.П., Мазукабзов А.М.** Петрогенезис раннепротерозойских постколлизионных гранитоидов юга Сибирского кратона // *Петрология*, 2005, т. 13, № 3, с. 253—279.
- Ескин А.С., Обухов С.П., Хренов П.М.** Граниты рапакиви из Западного Прибайкалья // *Докл. АН СССР*, 1971, т. 200, № 4, с. 921—924.
- Иванов В.С.** О влиянии температуры и химической активности калия на состав биотита в гранитоидах (на примере Западно- и Восточно-Иульгинского интрузивов Центральной Чукотки) // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1970, № 7, с. 20—30.
- Изох Э.П.** Оценка рудоносности гранитоидных формаций в целях прогнозирования. М., Недра, 1978, 137 с.
- Классификация** и номенклатура магматических горных пород / Под ред. О.А. Богатикова, Н.П. Михайлова, В.И. Гоньшакова. М., Недра, 1981, 160 с.
- Коваленко В.И., Коваленко Н.И.** Онгониты — субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. М., Наука, 1976, 128 с.
- Коваль П.В.** Региональный геохимический анализ гранитоидов. Новосибирск, НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1998, 494 с.
- Козлов В.Д.** Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометалльных провинций. М., Наука, 1985, 304 с.
- Козлов В.Д.** Сравнительная геолого-геохимическая оценка потенциальной рудоносности гранитоидов и продуктивность Sn-W оруденения (Центральная Европа, Забайкалье, Чукотка) // *Геология и геофизика*, 2000а, т. 41 (6), с. 857—868.
- Козлов В.Д.** Отражение особенностей геохимической эволюции варисского гранитоидного магматизма в металлогении Богемского массива // *Геология рудных месторождений*, 2000б, т. 42, № 5, с. 459—475.
- Ларин А.М.** Граниты рапакиви в геологической истории Земли. Статья 1. Рапакивигранитсодержащие магматические ассоциации: возраст, геохимия, тектоническое положение // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 2009, т. 17, № 3, с. 3—28.
- Ларин А.М., Сальникова Е.Б., Котов А.Б.** Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс: возраст, длительность формирования и тектоническое положение // *Докл. РАН*, 2003, т. 392, № 4, с. 506—511.
- Летников Ф.А.** Магмообразующие флюидные системы континентальной литосферы // *Геология и геофизика*, 2003, т. 44 (12), с. 1262—1269.
- Лобанов М.П.** О генезисе редкометалльных метасоматитов Прибайкалья // *Геология рудных месторождений*, 1970, № 3, с. 23—32.
- Мануйлова М.М., Срывцев Н.А.** Приморский комплекс гранитов рапакиви (Западное Прибайкалье) // *Проблемы докембрийского магматизма*. Л., Наука, 1974, с. 174—180.
- Мигматиты** / Ред. Дж.Р. Эшуорт. М., Мир, 1988, 344 с.
- Недашковский П.Г., Ленников А.М.** Петрология и геохимия алданских рапакиви. М., Наука, 1991, 134 с.
- Недашковский П.Г., Кириллов В.Е., Гурьянов В.А., Пахомова В.А.** Геологическое строение и металлогения Улканского вулканогенного прогиба (юго-восток Алданского щита). Владивосток, Дальнаука, 2000, 70 с.
- Обухов С.П.** Граниты рапакиви Прибайкалья: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Иркутск, ИЗК СО АН СССР, 1979, 190 с.
- Петрова З.И., Макрыгина В.А., Антипин В.С.** Петролого-геохимическая корреляция гранитов рапакиви и кислых вулканитов в южном обрамлении Сибирской платформы // *Петрология*, 1997, т. 5, № 3, с. 291—311.
- Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Владимиров А.Г., Анникова И.Ю., Бабкин Д.И., Никифоров А.Ю., Котегов В.И.** Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез. Томск, STT, 2008, 226 с.
- Прохоров К.В., Собаченко В.Н., Татаринов А.В.** Даванская зона смятия и ее рудоносность // *Разломы и эндогенное оруденение Байкало-Амурского региона*. М., Наука, 1982, с. 102—117.
- Ревенко А.Г.** Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск, Наука, 1994, 264 с.
- Розен О.М.** Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // *Геотектоника*, 2003, № 3, с. 3—21.
- Руб М.Г., Коптев-Дворников В.С.** Геохимические критерии потенциально рудоносных гранитоидов // *Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов*. Иркутск, ИГХ СО АН СССР, 1970, с. 3—46.

- Руб М.Г., Руб А.К.** Петрология редкометалльных гранитов Вознесенского рудного узла, Приморье // Петрология, 1994, т. 2, № 1, с. 43—67.
- Рябых А.М., Рябых Э.М.** О редкометалльной минерализации в гранитах приморского комплекса (Западное Прибайкалье) // Эндогенные полезные ископаемые Саяно-Байкальской горной области. Иркутск, Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1974, с. 86—89.
- Рябчиков И.Д.** Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М., Наука, 1975, 232 с.
- Свириденко Л.П., Светов А.П., Голубев А.И., Павлов Г.М.** Топазсодержащие туффзиты южной окраины Балтийского щита // Докл. АН СССР, 1984, т. 276, № 6, с. 1245—1249.
- Собаченко В.Н., Костюкова Е.С., Кузнецова А.И., Легейдо В.А., Новиков В.М., Петров Л.Л., Смирнова Е.В., Цыханский В.Д.** Геолого-геохимическая характеристика гранитоидов Даванской и Приморской зон глубинных разломов Прибайкалья // Геохимия, 1974, № 2, с. 233—242.
- Таусон Л.В.** Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977, 279 с.
- Таусон Л.В., Петрова З.И., Собаченко В.И., Левицкий В.И., Левковский Р.З., Дагелайская И.Н., Рехвиашвили О.И.** Геохимический тип гранитов рапакиви // Докл. АН СССР, 1982, т. 265, № 3, с. 721—726.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 1988, 384 с.
- Трошин Ю.П.** Геохимия летучих компонентов в магматических породах, ореолах и рудах Восточного Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1978, 174 с.
- Трошин Ю.П.** Ассоциация редкометалльных плюмазитовых гранитов с высококальциевыми известково-щелочными вулканоплутоническими сериями пород // Геохимия вулканитов различных геодинамических обстановок. Новосибирск, Наука, 1986, с. 93—111.
- Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С.** Петрология магматических гранитоидов (на примере Урала). М., Наука, 1975, 288 с.
- Шаталов Н.Н.** Дайки докембрийских редкометалльных онгонитов Украинского щита // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991, № 4, с. 36—52.
- Agnol R.D., de Oliveira D.C.** Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Garajas, Brazil: implications for classification and petrogenesis of *A*-type granites // *Lithos*, 2007, v. 93, p. 215—233.
- Dymek R.F.** Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses, West Greenland // *Amer. Miner.*, 1983, v. 68, № 9—10, p. 880—899.
- Frost C.D., Frost B.R.** On ferroan (*A*-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin // *J. Petrol.*, 2011, v. 52, № 1, p. 39—53.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D.** A Geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.*, 2001, v. 42, № 11, p. 2033—2048.
- Haapala I.** Metallogeny of the rapakivi granites // *Miner. Petrol.*, 1995, v. 54, p. 149—160.
- Haapala I., Lukkari S.** Petrological and geochemical evolution of the Kumi stock, a topaz granite cupola within the Wiborg rapakivi batholith, Finland // *Lithos*, 2005, v. 80, p. 347—362.
- Lenharo S.L.R., Moura M.A., Botelho N.F.** Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil // *Precam. Res.*, 2002, v. 119, p. 277—299.
- Lenharo S.L.R., Pollard P.J., Born H.** Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga Mine, Amazonas, Brazil // *Lithos*, 2003, v. 66, p. 37—61.
- Maniar P.D., Piccoli P.M.** Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1989, v. 101, p. 635—643.
- Munoz J.L.** F—OH and Cl—OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits // *Miner. Soc. Amer. Rev. Miner.*, 1984, v. 13, p. 469—493.
- Munoz J.L., Swenson A.** Chloride—hydroxyl exchange in biotite and estimation of relative HCl/HF activities in hydrothermal fluids // *Econ. Geol.*, 1981, v. 76, № 8, p. 2212—2221.
- Panteeva S.V., Gladkochoub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P.** Determination of 24 trace elements in felsic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry after lithium metaborate fusion // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, v. 58, № 2, p. 341—350.
- Peccerillo A., Taylor S.R.** Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey // *Contr. Miner. Petrol.*, 1976, v. 58, p. 63—81.
- Rämö O.T., Haapala I.** One hundred years of rapakivi granite // *Miner. Petrol.*, 1993, v. 52, p. 129—185.

Turekian K., Wedepohl K. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust // Geol. Soc. Amer. Bull., 1961, v. 72, № 2, p. 175—191.

Watson E.B., Harrison T.M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth Planet. Sci. Lett., 1983, v. 64, p. 295—304.

Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory, and application // Amer. Miner., 1965, v. 50, p. 1228—1272.

Рекомендована к печати 5 апреля 2011 г.

Г.В. Поляковым

Поступила в редакцию 23 июня 2010 г.,

после доработки — 4 февраля 2011 г.