

На правах рукописи

БАЗАРОВА Екатерина Петровна

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ
ГРАНИТОВ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2011

Работа выполнена в Институте земной коры СО РАН

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Савельева Валентина Борисовна

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Левицкий Валерий Иванович, Институт геохимии СО РАН

кандидат геолого-минералогических наук Донская Татьяна
Владимировна, Институт земной коры СО РАН

Ведущая организация: Иркутский государственный университет

Защита диссертации состоится: 11 ноября 2011 г. в 9.00 часов на
заседании Диссертационного совета Д 003.022.02 в Институте земной коры
СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, в конференц-
зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института земной
коры СО РАН

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю
совета к.г.-м.н. Юрию Витальевичу Меньшагину, men@crust.irk.ru

Автореферат разослан 22 сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Меньшагин Ю.В.

Введение

Актуальность исследования. Проблема связи рудообразования с гранитоидным магматизмом до настоящего времени остается одной из основных проблем магматической петрологии. При этом для оптимизации геолого-разведочных работ важное значение имеет оценка потенциальной рудоносности конкретных магматических комплексов.

Граниты рапакиви являются одними из наиболее ранних в истории Земли высококальциевых кислых пород, формирование которых происходило в субплатформенном режиме. Они известны практически на всех древних платформах, где слагают крупные батолиты в составе протяженных поясов кислого магматизма. Долгое время граниты рапакиви считались безрудными, однако в настоящее время установлена нередкая связь с поздними дифференциатами комплексов гранитов рапакиви оловянной и сопутствующей бериллиевой, циркониевой, тантал-ниобиевой, редкоземельной, урановой, висмутовой, полиметаллической минерализации.

В Западном Прибайкалье граниты рапакиви входят в состав раннепротерозойского приморского комплекса, относящегося к постколлизийному Южно-Сибирскому магматическому поясу на границе Сибирского кратона и складчатого обрамления.

Несмотря на то, что еще в шестидесятых годах XX века в гранитах приморского комплекса были выявлены проявления Sn, Nb, W, Bi и других редких металлов, проблеме металлогении комплекса до сих пор уделялось недостаточное внимание. Опубликованные геохимические данные получены преимущественно для гранитов юго-западной и центральной частей выходов комплекса и не дают полного представления о его составе; практически не изучен флюидный режим формирования гранитов; слабо изучены постмагматические процессы; не рассматривались особенности состава акцессорной минерализации, позволяющие уточнить металлогеническую специализацию гранитов. Все это в совокупности послужило основанием для постановки выполненных исследований.

Цель и задачи исследований. Целью выполненной работы являлась петролого-геохимическая характеристика приморского комплекса и, прежде всего, изучение проявления в нем дифференциации, поскольку, как известно из мировой практики, месторождения и рудопроявления Sn (с сопутствующими W, Be, Zn, Cu, Pb), РЗЭ, Nb, Ta, Zr в рапакивигранитных комплексах связаны именно с наиболее поздними дифференциатами. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Петро-геохимическая характеристика отдельных крупных массивов, слагаемых гранитами приморского комплекса.
2. Оценка условий кристаллизации, в первую очередь, флюидного режима кристаллизации гранитов.

3. Характеристика постмагматических процессов и связанной с ними акцессорной минерализации.

Защищаемые положения.

1. Образование главных разновидностей пород приморского комплекса связано с кристаллизационной дифференциацией исходных высококальциевых и высокожелезистых расплавов, общей направленностью которой являлось увеличение кремнекислотности гранитоидов при одновременных увеличениях апгаитности, железистости и отношения K_2O/Na_2O без существенного изменения общей щелочности. Обогащенность лейкогранитов массива Трехголового по сравнению с лейкогранитами других массивов Rb, обедненность Ba, Sr, Eu, резко пониженные отношения K/Rb, Ba/Rb, Sr/Rb, Eu/Eu* позволяют рассматривать их как продукты кристаллизации наиболее дифференцированного расплава.

2. Формирование гранитов приморского комплекса происходило при участии окисленной флюидной системы Н-типа (по терминологии Ф.А. Летникова). Особенности состава биотита позволяют отнести граниты к водному и хлорофильному флюидно-металлогеническим типам; лейкограниты Трехголового массива, по сравнению с лейкогранитами других массивов, кристаллизовались из расплава с повышенными концентрациями воды, фтора и бора.

3. Присутствие в Трехголовом массиве кварц-мусковит-топазовых грейзенов и фторфлогопита в составе альбитизированных гранитов второй фазы указывают на то, что постмагматические процессы в Трехголовом массиве протекали при участии флюидов, богатых фтором. Высокие концентрации в грейзенах Sn, Nb, Y, Th, U и РЗЭ и характерные для гранитов и грейзенов редкометалльные акцессорные минералы являются показателем металлогенической специализации приморского комплекса на перечисленные элементы.

Фактический материал и методы исследований.

В основу работы положены данные, полученные при проведении полевых работ в период 2007-2009 гг. Изучено около 180 шлифов, петрохимические выводы основываются на 202 полных силикатных анализах. Исследования включали в себя геохимическое опробование трех крупных массивов, составляющих указанный комплекс: Бугульдейско-Ангинского, Улан-Ханского и Трехголового.

Анализы пород выполнены в лабораториях Аналитического центра Института земной коры СО РАН и Центра коллективного пользования Иркутского НЦ СО РАН. Содержания петрогенных компонентов и F определялись химическим методом; редких элементов – методами фотометрии пламени (Li, Cs), спектральным (Ba, Be, Sn, Co, Ni, Sc, V), рентгенофлуоресцентным (Rb, Sr, Ba, Sn, Pb, Zn, Nb, Zr, Y, Th, Mo, W), методом ICP-MS (РЗЭ, Th, U, Nb, Ta, Zr, Hf, Cs, Sn) (аналитики Г.В. Бондарева, М.М. Самойленко, Н.Н. Ухова, В.В. Щербань, Л.В. Воротинова,

А.В. Наумова, Е.Г. Колтунова, Н.Ю. Царева, Е.В. Худоногова, С.В. Пантеева, С.И. Штельмах). Анализы минералов выполнены в Геологическом институте СО РАН на модернизированном микроанализаторе “МАР-3” и электронном сканирующем микроскопе “LEO-1430VP” с энергодисперсионным анализатором “INCAEnergy-300” (аналитики Н.С.Карманов и С.В.Канакин). U-Pb датирование циркона осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP-II в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (аналитик А.Н.Ларионов). Для датирования мусковита из грейзена применен ^{40}Ar - ^{39}Ar метод; изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре «5400» фирмы Микромасс (Англия) (анализ выполнен А.В.Травиным, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Изучение главных флюидных компонентов (H_2O , CO_2 , CO , H_2) в породах проводилось методом газовой хроматографии в Институте земной коры СО РАН (аналитик Л.В. Баранова) на лабораторном хроматографе ЛХМ-8МД; температура нагрева породы 850°C . Содержания F и Cl в слюдах определялись на модернизированном микроанализаторе “МАР-3” в Геологическом институте СО РАН. Нижний предел обнаружения для F $0,037\%$, для Cl – $0,025\%$.

Научная новизна работы.

1. Впервые с использованием современных методов анализа (рентгенофлуоресцентный, ICP-MS) получена геохимическая характеристика главных разновидностей пород, слагающих три крупных массива приморского комплекса и выполнено их геохимическое сопоставление, что позволило изучить дифференциацию в массивах гранитоидов и провести их геохимическую типизацию. 2. Впервые на микрозонде и электронном сканирующем микроскопе с энергодисперсионным анализатором изучен состав главных акцессорных минералов гранитов и грейзенов (касситерит, минералы Nb, Th, PЗЭ, Vi, Mo), что позволило уточнить металлогеническую специализацию комплекса. 3. Впервые охарактеризован флюидный режим формирования гранитов приморского комплекса на основе изучения распределения главных флюидных компонентов (H_2O , CO_2 , CO , H_2) в породах методом газовой хроматографии и распределения галогенов (F и Cl) в породообразующих слюдах. 4. Впервые установлено, что характерными продуктами постмагматического этапа в Трехголовом массиве являются кварц-топазовые (+мусковит) грейзены с содержанием F до 6 вес. %, что является показателем высокой концентрации HF в постмагматическом флюиде. 5. Впервые в альбитизированных гранитах Трехголового массива выявлен редкий минерал фторфлогопит, также указывающий на повышенную концентрацию HF во флюиде. 6. Получены изотопно-геохронологические данные, свидетельствующие о том, что в приморский комплекс объединяются разновозрастные граниты раннего протерозоя, сходные по своим геохимическим характеристикам.

Практическая значимость работы.

Результаты работы могут быть использованы как научными, так и производственными организациями, занимающимися проблемами оценки потенциальной рудоносности гранитоидов и осуществляющими поисковые работы на территории Западного Прибайкалья.

Апробация работы и основные публикации. По теме диссертации опубликованы 3 статьи и 9 тезисов докладов, 1 статья прошла рецензирование. Результаты работы докладывались на XI Всероссийском петрографическом совещании (Екатеринбург, 2010), Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2010), конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2009), XXIII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2009), XXIV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2011), научном совещании «Геодинамическая эволюция литосферы ЦАПП: от океана к континенту» (Иркутск, 2009).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 9 глав, введения, заключения и списка использованной литературы. Общий объем 247 страниц, включая 66 иллюстраций и 31 таблицу, в том числе 8 в приложении. Библиография включает 183 наименования.

Работа выполнена в Институте земной коры СО РАН (г. Иркутск) при финансовой поддержке грантов РФФИ 08-05-00182 и РФФИ 10-05-00289.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. В.Б. Савельевой, чьи консультации и советы оказали неоценимую помощь при подготовке работы. Автор благодарит академика РАН Ф.А. Летникова за неоднократные плодотворные обсуждения работы. Автор признателен также к.г.-м.н. Т.В. Донской за ценные замечания и пожелания.

Глава 1. ГРАНИТЫ РАПАКИВИ И ИХ МИРОВОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Существует несколько определений гранитов рапакиви, из числа которых мы придерживаемся определения (Naarala et al., 2005): граниты рапакиви – это граниты А-типа, характеризующиеся присутствием, по крайней мере в крупных батолитах, гранитных разновидностей со структурами рапакиви.

Граниты рапакиви известны практически на всех древних платформах, где слагают крупные, нередко многофазные батолиты в составе поясов кислого магматизма. По времени образования большинство интрузий относится к среднему протерозою (около 1,54 млрд. лет). Наибольшее число проявлений рапакивигранитного магматизма наблюдается на Восточно-Европейской платформе. Полный обзор проявлений рапакивигранитного магматизма в мире, взгляды на проблему овоидов, особенности химического состава гранитов, модели источников их расплава приведены в диссертации.

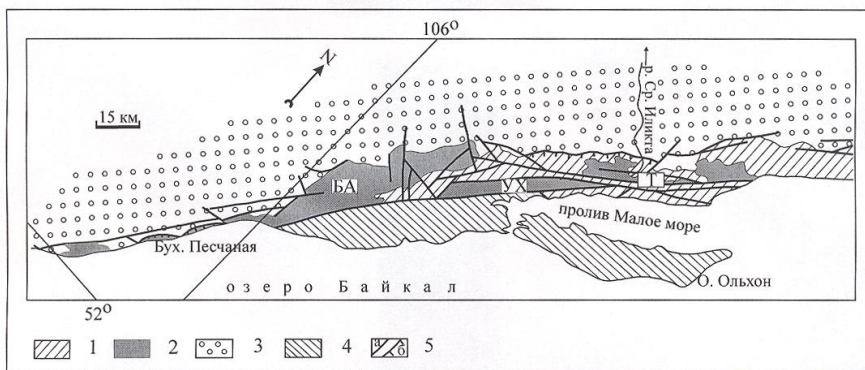
В рапакивигранитных комплексах преобладают собственно граниты; в составе ранних фаз могут присутствовать адамеллиты, монцодиориты и сиениты. Дифференциация осуществляется преимущественно по плюмазитовому тренду – с образованием на заключительной стадии топазовых гранитов с накоплением F, Li, Rb, Cs, Ga, Y, Sn, Nb, Ta, W, Th, U. В ряде комплексов поздняя фаза представлена альбитовыми гранитами, обогащенными F, Nb, Ta, Zr, Hf, U, Th, Sn, Rb и в меньшей мере Ga, Cs, W.

Характерными постамагматическими процессами в гранитах являются альбитизация и грейзенизация. В связи с рапакивигранитными комплексами выделяются три основных типа оруденения: Sn-полиметаллическое (W-Be-Zn-Cu-Pb), редкометалльно-редкоземельное и Fe-Cu (U-Au-Ag).

Глава 2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ИСТОРИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ ГРАНИТОИДОВ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Граниты приморского комплекса в Западном Прибайкалье входят в состав Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса, протягивающегося вдоль края Сибирского кратона. Время формирования пояса 1,88 – 1,84 млрд. лет (Ларин и др., 2002, 2003). Входящие в его состав интрузивные комплексы подробно рассмотрены в диссертации.

Приморский комплекс слагает хребет Приморский и южную часть Байкальского хребта. Выходы пород комплекса наблюдаются в виде цепочки массивов на протяжении свыше 200 км вдоль западного берега оз. Байкал (рис. 1) и в тектоническом отношении приурочены к зоне Приморского глубинного разлома. На большей части территории граниты комплекса имеют тектонические и интрузивные контакты с породами сарминской серии раннего протерозоя; на юго-востоке граничат с раннепалеозойским ольхонским метаморфическим комплексом, а на северо-западе перекрыты осадочными отложениями байкальской серии верхнего рифея.



1. Схема геологического строения западного берега оз. Байкал.

1, 2 – фундамент Сибирской платформы: 1 – сарминская серия протерозоя, 2 – граниты приморского комплекса (массивы: БА – Бугульдейско-Ангинский, УХ – Улан-Ханский, ГТ – гольца Трехголового (Трехголовый)); 3 – платформенный чехол; 4 – раннепалеозойская ольхонская коллизонная система; 5 – тектонические нарушения (а – разломы, б – надвиги).

Возраст комплекса в настоящее время принимается равным 1859 ± 16 млн. лет, что соответствует возрасту циркона из рапакиви юго-западных выходов комплекса (бухта Песчаная) (Донская и др., 2003). Однако по циркону из гранитов главной фазы Трехголового массива ранее U-Pb методом был получен возраст 1910 ± 30 млн. лет (Бибикова и др., 1981), т.е. проблема времени формирования комплекса остается окончательно не решенной.

По возрасту и геохимическим особенностям граниты приморского комплекса сходны с гранитами шумихинского комплекса Присаянского выступа фундамента Сибирской платформы, ирельского комплекса северо-западного Прибайкалья, кодарского комплекса Алданского щита.

Из приведенного в диссертации обзора по изученности приморского комплекса видно, что современные геохимические данные получены преимущественно для гранитов юго-западной и центральной частей выходов комплекса и не дают полного представления о его составе. Наиболее хорошо изученным является Бугульдейско-Ангинский массив. Слабо изучены особенности распределения редких элементов в гранитах разного петрографического состава, разных фаз, разных массивов, поведение редких элементов при постмагматических процессах. Многими исследователями отмечалась обогащенность пород приморского комплекса фтором и бором, тем не менее, флюидный режим формирования комплекса практически не изучен, хотя общеизвестна ведущая роль летучих компонентов в процессах экстракции, переноса и отложения рудных элементов.

Глава 3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВОВ ГРАНИТОВ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Породы всех массивов имеют практически одинаковый минералогический состав: главными породообразующими минералами являются кварц и калиевый полевой шпат, обычно микропертитовый, плагиоклаз присутствует в подчиненном количестве. Преобладают биотитовые граниты и значительно реже встречаются роговообманково-биотитовые граниты. Особенностью Трехголового массива является присутствие в гранитах кварц-турмалиновых шлиров.

В составе всех массивов выделяются крупноовоидные граниты (рапакиви) и относительно равномернoзернистые граниты. В вопросе выделения интрузивных фаз в составе комплекса нет единого мнения, но достоверно установлено прорывание крупнозернистых гранитов мелко-

среднезернистыми, слагающими небольшие массивы, тела вытянутой формы и жилы. Вслед за большинством геологов автор выделяет две фазы. Породы первой (главной) фазы представлены крупно- и среднезернистыми гранитами, крупноовоидными и равномернотернистыми, биотит-роговообманковыми, биотитовыми, лейкократовыми, до аляскитов. Ко второй (заключительной) фазе относятся мелко-среднезернистые граниты, гранит-порфиры и аплиты. Пегматиты для приморского комплекса не характерны.

Разнообразие текстур и структур указывает на различные условия кристаллизации расплавов. В породах главной фазы Трехголового массива и аляскитах Бугульдейско-Ангинского массива обычна гранофировая структура, присущая малоглубинным гранитам. Для пород Улан-Ханского массива характерны директивная текстура и метасоматическая структура, что указывает на его кристаллизацию в зоне повышенной проницаемости для глубинных флюидов при нестабильном тектоническом режиме.

Постмагматические изменения представлены альбитизацией, мусковитизацией, грейзенизацией, флюоритизацией. В грейзенизированных гранитах проявлена зональность: биотитовый гранит → альбитизированный и мусковитизированный гранит → кварц-мусковитовый грейзен → кварц-топазовый грейзен → кварцевая порода. Альбитизация характерна в основном для гранитов второй фазы. В Трехголовом массиве выявлены тела альбитовых метасоматитов мощностью до 1 м. Эти породы почти на 90% сложены альбитом и микроклином, прочие минералы представлены кварцем, бесцветной слюдой, кальцитом, магнетитом, гематитом.

Глава 4. МИНЕРАЛОГИЯ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Главными породообразующими минералами гранитов являются кварц и калиевый полевой шпат, обычно микропертитовый. В фенокристаллах щелочного полевого шпата из гранит-порфиров $X_{Na}=0.16-0.34$. Плаггиоклаз представлен несколькими генерациями; аляскиты содержат единичные зерна плаггиоклаза. Темноцветный минерал представлен биотитом, редкие зерна роговой обманки отмечены только в гнейсогранитах Улан-Ханского массива. По составу слюда близка к анниту. Для биотита характерны умеренные содержания TiO_2 (до 3,1%); биотиты из пород Трехголового массива отличаются повышенными железистостью $f=100*Fe/(Fe+Mg)$ (85%), содержанием $Al(VI)$ (0,47 на ф.е.) и низкими содержаниями TiO_2 (1,65%) (средние значения для биотитов из гранитов главной фазы).

Турмалин в гранитах Трехголового массива представлен шерлом с железистостью 74-100%. Из вторичных минералов наиболее распространен мусковит, для которого характерны высокие содержания FeO – до 10%; $X_{Na}=0,02-0,05$. Топаз в грейзенах представлен призматическими кристаллами или радиально-лучистыми и сферолитоподобными агрегатами.

В альбитовых метасоматитах выявлена слюда, отвечающая по составу флогопиту. Анализ показал высокие содержания в ней (мас. %) MgO (до

21,7), SiO₂ (до 50,5) и F (5,5–8,9) при низких FeO (до 5,11) и Al₂O₃ (до 9,78). Содержание фтора соответствует заполнению позиций OH⁻ фтором от 65 до 100%, что позволяет рассматривать слюду как фторфлогопит.

Наиболее распространенными акцессорными минералами гранитов являются ильменит, рутил, титанит, эпидот, апатит, циркон и флюорит. В аляскитах Бугульдейско-Ангинского массива присутствует магнетит, в гранитах Улан-Ханского массива отмечается гранат. В гранитах второй фазы и грейзенах выявлены минералы Sn, Nb, W, TR, Zr, Th.

Главным минералом Sn является касситерит SnO₂. Среди минералов Nb и W установлены рутил, ильменорутил, ферроколумбит (Mn/(Mn+Fe)=0.11–0.40, Ta/(Ta+Nb)=0.02–0.06), ферберит, пироклор, минералы Y, Nb и Ti представлены самарскитом, фергусонитом, иттрокразитом. Среди минералов Y установлен ксенотим. Минералы легких РЗЭ представлены алланитом, монацитом, флюоцеритом, бастанезитом и минералами Th. Наряду с торитом выявлены минералы, в которых проявлено замещение Th либо Y и тяжелыми РЗЭ, либо легкими РЗЭ, с одновременным замещением Si фосфором (церфосфорхаттонит). В гранитах присутствуют также циркон, циртолит (до 4.4% Y₂O₃, до 6.1% ThO₂, до 5% UO₂), молибденит, вульфенит, повеллит, а в грейзенах встречаются бисмутинит, бисмутит, арсенопирит и пирит.

Глава 5. ПЕТРОХИМИЯ И ГЕОХИМИЯ ГРАНИТОВ

В целом породы комплекса представлены гранитоидами нормальной и несколько повышенной щелочности, высококалийевыми, железистыми ($FeO^{общ}/(FeO^{общ}+MgO) > 0.8$), образующими ряд от кварцевых сиенитов до ультракислых лейкогранитов (рис. 2).

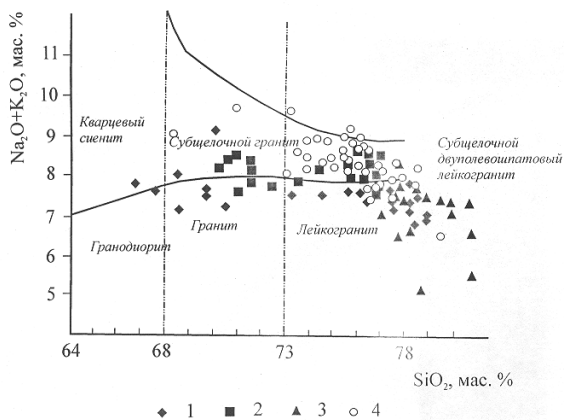


Рис. 2. Состав гранитоидов приморского комплекса на классификационной диаграмме (Na₂O+K₂O) – SiO₂, мас. %.

1 – 3 – граниты первой фазы Бугульдейско-Ангинского (1), Улан-Ханского (2) и Трехголового (3) массивов; 4 – граниты второй фазы всех массивов.

Наиболее разнообразен по составу Бугульдейско-Ангинский массив, Улан-Ханский массив сложен гранитами и лейкогранитами, а Трехголовый массив преимущественно лейкогранитами. Породы второй фазы всех трех массивов представлены высокожелезистыми и высококалийевыми

лейкогранитами преимущественно субщелочного состава. Граниты варьируют от метаглиноземистых или слабо пересыщенных глиноземом ($ASI \leq 1.10$) до перглиноземистых; при этом глиноземистость возрастает в мусковитизированных породах.

В целом с ростом содержания SiO_2 в породах первой интрузивной фазы снижаются содержания TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , Na_2O , CaO , MgO , P_2O_5 , а также Ba , Sr , Zr , Zn , Sc , V что характерно для продуктов фракционной кристаллизации, одновременно возрастают железистость, отношение K_2O/Na_2O , агпаитность и содержания Rb , Sn и Th . Наиболее основные крупноовоидные гранитоиды содержат повышенные, относительно кларков для бедных кальцием гранитов, концентрации F , Rb , Ba , Zr , Hf , Th , Sn , Pb , Zn , Co , Be .

Лейкограниты Трехугового массива отличаются от лейкогранитов других массивов повышенными агпаитностью, содержаниями (г/т) Rb (до 650), Sn (до 20), Li (до 80), Cs (до 27), F (до 6600), Th (до 110), U (до 20), Y (до 100), низкими Ba , Sr , Zr и пониженными K/Rb , Ba/Rb , Zr/Hf , Nb/Ta .

Мелко-среднезернистые граниты второй фазы представлены плюмазитовыми лейкогранитами, отличающимися от лейкогранитов главной фазы пониженными содержаниями SiO_2 , повышенной общей щелочностью (преимущественно за счет Na) и железистостью и в целом имеют более высокие, по сравнению с гранитами главной фазы, содержания Sn , Th , Nb . По редкоэлементному составу отдельные жилы и массивы различаются между собой: в Трехголовом массиве одни жилы и массивы гранитов второй фазы обогащены F (до 0,46%), редкими щелочами (Rb до 600 г/т, Li до 75 г/т), Sn (до 39 г/т), Th (до 140 г/т), Nb (до 53 г/т), Y (до 80 г/т), Mo (до 17 г/т) при низком Ba (12-80 г/т) и Zr (130-190 г/т), другие обеднены F , Rb , Li , но содержат больше Ba (до 1400 г/т) и Zr (до 340 г/т).

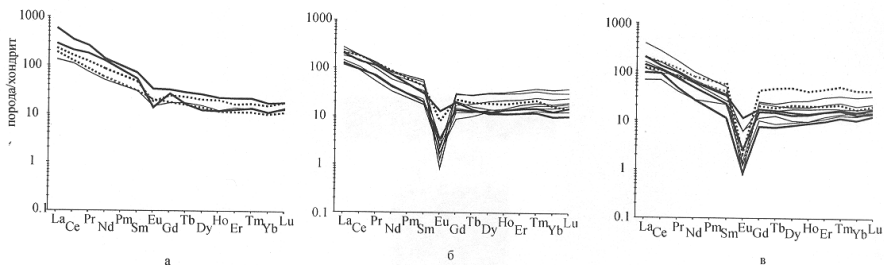


Рис. 3. Распределение РЗЭ в гранитах приморского комплекса. Нормирование выполнено по (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). а – крупноовоидные и порфириовидные биотитовые граниты; б – крупнозернистые равномернзернистые биотитовые и лейкократовые граниты; в – мелко-среднезернистые граниты заключительной фазы. Жирными линиями обозначены спектры для Бугульдейско-Ангинского, пунктирными – Улан-Ханского, тонкими – Трехголового массива.

Для пород комплекса характерны высокие содержания РЗЭ при значительном преобладании легких лантаноидов над тяжелыми (La_N/Yb_N 16–55); для спектров РЗЭ характерно сильное фракционирование легких (La_N/Sm_N 4–11) и слабое или умеренное фракционирование тяжелых (Gd_N/Yb_N 1,1–2,5) лантаноидов. Для крупноовоидных гранитов характерны спектры РЗЭ со слабо или умеренно выраженными отрицательными Eu-аномалиями ($Eu/Eu^*=0,36–0,88$). В равномернозернистых гранитах возрастает «глубина» Eu-минимума, отражающая усиление фракционирования плагиоклаза, и происходит выволаживание спектров в области тяжелых РЗЭ ($Eu/Eu^*=0,03–0,53$; $Gd_N/Yb_N=0,66–1,9$). Максимальное обеднение Eu характерно для лейкогранитов Трехголового массива: $Eu/Eu^*=0,03–0,14$ (рис. 3). Спектры РЗЭ в гранитах второй фазы близки к таковым в равномернозернистых гранитах первой фазы.

Глава 6. ГЕОХИМИЯ ПОСТМАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Изучение геохимии постмагматических процессов выполнено путем сопоставления составов метасоматически измененных гранитов с вмещающими неизмененными породами. На ранней стадии грейзенизации (замещение биотита мусковитом, плагиоклаза серицитом, калиевого полевого шпата альбитом) отмечается небольшой рост содержания Na и снижение K. Содержания SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MnO, CaO, P_2O_5 меняются слабо, проявлен вынос FeO и менее Fe_2O_3 . Содержание F меняется незакономерно. Проявлены тенденции к росту содержаний Li, Rb, Ba при выносе Zn и Be.

При образовании собственно кварц-мусковитовых грейзенов выносятся Na_2O , в некоторых случаях Fe_2O_3 , FeO, Al_2O_3 и K_2O ; возрастают содержания потерь при прокаливании, CaO и CO_2 . В кварц-мусковитовых грейзенах проявлено обогащение относительно гранитов Li, Sn, Y, Nb, Th, U.

Для кварц-мусковит-топазовых грейзенов характерны повышенные, относительно гранитов, содержания F и Al_2O_3 . Наряду с выносом Na_2O усиливается вынос K_2O . Кроме того, выносятся MgO, MnO, менее FeO и Fe_2O_3 , тогда как содержание CaO в одних случаях в грейзенах понижено относительно гранитов, в других повышено. Происходит вынос Rb, Sr, Ba, Pb, Zn, Be, в меньшей мере Y, Th, Li. При окварцевании выносятся практически все петрогенные компоненты, включая Al.

В целом в грейзенизированных 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). Кварц-мусковитовые грейзены по сравнению с кварц-мусковит-топазовыми содержат больше Li, Rb, Sn, Nb, Y, Th, U, однако в последних установлены наиболее высокие содержания W (до 218 г/т).

Альбитизация сопровождалась привносом в породы Na, Al, Fe, Mg, CO_2 и F. В альбитовых метасоматитах, по сравнению с гранитами, повышены

содержания Li, Be, Sc, V, Ga, Sr, в меньшей мере Y, Nb, Th, Zr, Hf и понижены Ni, Cu, Pb, Sn, U.

Глава 7. УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТОВ И ФОРМИРОВАНИЯ АПОГРАНИТНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ

VII.1. Условия кристаллизации гранитов

К числу главных параметров, влияющих на рудоносность гранитных массивов, относятся глубинность их становления, температура расплава, из которого кристаллизовались граниты, кислотность–щелочность и поведение летучих компонентов при кристаллизации расплава.

Для рапакиви юго-западных выходов комплекса Т.В.Донской и др. (2005) на основе амфиболового геобарометра получены значения давления при кристаллизации 4-7 кбар. В изученных автором породах амфибола нет, поэтому при оценке глубинности можно опираться только на геологические данные. Граниты Трехголового массива прорывают породы иликтинской свиты, метаморфизованные примерно при 2.2 кбар и 340 °С (Савельева, Зырянов, 2001), что позволяет считать глубину становления верхней кромки массива не более 6-7 км. Присутствие в Бугульдейско-Ангинском массиве порфиридных аляскитов с гранофировой структурой также указывает на относительно малоглубинные условия кристаллизации.

Для оценки температуры начальных стадий кристаллизации расплавов использовано уравнение цирконового термометра (Watson, Harrison, 1983). Для порфиридных и равномернозернистых биотитовых гранитов Бугульдейско-Ангинского массива получено среднее значение 860°С, для крупноовоидных гранитов Улан-Ханского массива 840°С, а для крупноовоидных гранитов Трехголового массива 830°С.

Для оценки кислотности-щелочности расплавов использовались диаграммы А.А.Маракушева и И.А.Тарарина (1965) и В.С.Иванова (1970). На первой точки составов слюд ложатся в основном в поле нормальной щелочности, за исключением биотитов Трехголового массива, которые попадают также в поле пониженной щелочности. В Улан-Ханском массиве рост железистости биотита практически не сопровождается изменением его глиноземистости, что свидетельствует о не меняющейся щелочности. В Трехголовом массиве рост железистости сопровождается ростом глиноземистости биотита, что указывает на снижение щелочности расплава. В Бугульдейско-Ангинском массиве отчетливой зависимости не наблюдается.

Общее представление о флюидном режиме кристаллизации расплавов дает диаграмма Q-Ab-Ort, где точки средних составов крупноовоидных гранитов – производных слабо дифференцированных расплавов располагаются вблизи расплава-минимум при $P_{H_2O}=1$ кбар с некоторым смещением к вершине ортоклаза. Кристаллизация лейкократовых гранитов всех массивов протекала при $P_{H_2O}<1$ кбар. С учетом данных по глубинности

это указывает на обедненность расплавов водой, что связано, вероятно, с высокой степенью метаморфизма пород, подвергавшихся плавлению.

Состав главных летучих компонентов изучен методом газовой хроматографии. Для гранитов характерно резкое преобладание во флюиде водорода над углеродом и высокая окисленность флюида: средние отношения H/C ($H/C=2(H_2O+H_2)/(CO_2+CO)$) в гранитах разных типов первой фазы 18–54, в гранитах второй фазы 16–27; коэффициент восстановленности флюида ($K_B=(CO+H_2)/(CO_2+H_2O)$) в гранитах первой фазы 0,04–0,16, в гранитах второй фазы 0,02–0,06. Отношение H_2/H_2O для большинства проб $<0,1$. Полученные данные показывают, что образование расплавов происходило под воздействием на исходную матрицу окисленной флюидной системы H -типа (Летников и др., 1981).

Основные тенденции в поведении флюидных компонентов отражены на графиках зависимости их содержаний от отношения Ba/Rb в гранитах. С уменьшением Ba/Rb отношения содержания флюидных компонентов снижаются. Граниты Трехголового массива имеют повышенную флюидонасыщенность по сравнению с гранитами других массивов, а наиболее высокие содержания воды и водорода характерны для кварц-турмалиновых шлиров в этом массиве (рис. 4). Поведение CO_2 и CO менее закономерно.

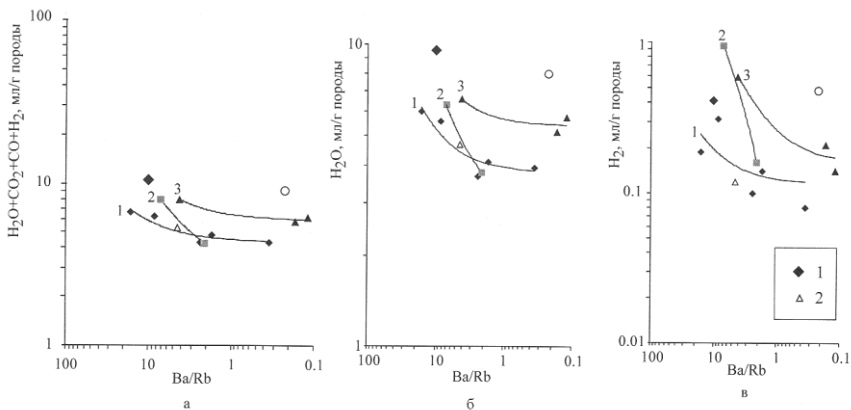


Рис. 4. Корреляция содержаний флюидных компонентов в гранитах с отношением Ba/Rb . 1 – 3 – линейные тренды для Бугульдейско-Ангинского (1), Улан-Ханского (2) и Трехголового (3) массивов. Тренд 1: биотитовые равномернозернистые граниты – лейкократовые граниты – аляскиты – мелкозернистые граниты и гранит-порфиры; тренд 2: крупноовоидные граниты – равномернозернистые лейкократовые граниты; тренд 3: крупноовоидные граниты – равномернозернистые средне- и крупнозернистые граниты – жильные мелко- и среднезернистые граниты. 1 и 2 – точки составов крупноовоидных гранитов Бугульдейско-Ангинского (1) и мелко- и

среднезернистых гранитов второй фазы Трехголового (2) массивов, не учитывающиеся при построении трендов. Кружками обозначены точки средних содержаний флюидных компонентов в кварц-турмалиновых шлирах.

Наиболее важную роль в магматических и постмагматических процессах играют F и Cl. Распределение галогенов в биотите дает информацию о поведении этих компонентов в магмах. Биотиты приморского комплекса содержат умеренные количества F (в среднем по разным группам пород от 0,27 до 1,07%) и Cl (0,07-0,36%). Наиболее высокие содержания галогенов характерны для биотитов из Трехголового массива. По соотношению F и Cl в биотитах граниты относятся к водному и хлорофильному типам по классификации (Бушляков, Холоднов, 1986).

Для оценки режима F и Cl во флюиде, равновесном с биотитом, использовались уравнения из работ (Munoz, 1984; Munoz, Swenson, 1981; Аксюк, 2002). Температура кристаллизации биотита оценивалась по экспериментальной кривой зависимости железистости слюды от температуры при окислительных условиях, отвечающих буферу Ni-NiO (Wones, Eugster, 1965). При наиболее высоких концентрациях HF во флюиде кристаллизовался биотит в Трехголовом массиве, при наиболее низких в Бугульдейско-Ангинском массиве и при промежуточных в Улан-Ханском массиве (рис. 5). Поздние дифференциаты главной фазы во всех массивах кристаллизовались при пониженной летучести HCl по сравнению с HF: $\lg(f_{HCl}/f_{HF})$ снижается от 1,88–1,96 в крупноовоидных биотитовых гранитах до 1,25–1,46 в лейкократовых гранитах.

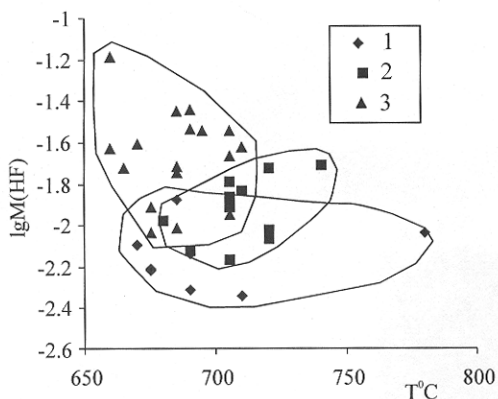


Рис. 5. Концентрации HF во флюиде гранитов, определенные с помощью биотитового геофториметра (Аксюк, 2002). 1–3 - биотиты из гранитов Бугульдейско-Ангинского (1), Улан-Ханского (2) и Трехголового (3) массивов. M_{HF} – концентрация нейтральной частицы HF⁰ во флюиде, равновесном со слюдой, моль/дм³ (Аксюк, 2002).

Присутствие турмалина в породах Трехголового массива и особенно кварц-

турмалиновых шлиров в гранитах отличает этот массив от других массивов и свидетельствует об обогащенности расплава бором (содержания В₂О₃ в кварц-турмалиновых шлирах достигает 3%).

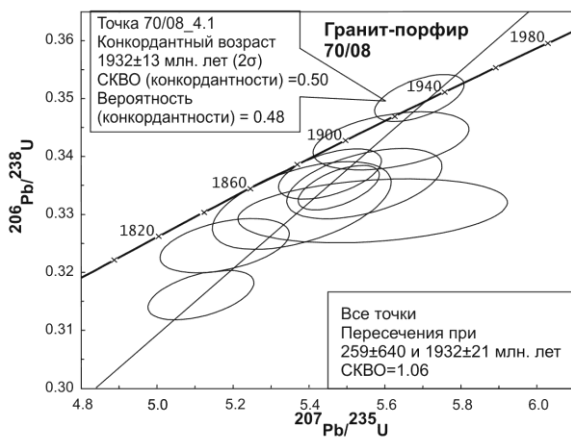
VII.2. Условия протекания постмагматических процессов

Образование грейзенов, содержащих флюорит и топаз, свидетельствует о том, что процесс протекал под воздействием на породы кислых растворов, богатых HF. В соответствии с экспериментами (Зарайский, 1999), температура образования грейзенов составляла от 400 до 600°C и происходила под воздействием растворов, насыщенных глиноземом и бедных калием. Присутствие кальцита в грейзенах показывает, что наряду с фтором постамагматический флюид содержал в значительном количестве углекислоту.

Образование фторфлогопита связано с процессом альбитизации, проявившемся в апикальной части гипабиссального массива субщелочных гранитов. Аномально низкая глиноземистость флогопита и его парагенезис с гематитом и кальцитом показывают, что образование микроклин-альбитовых метасоматитов происходило в условиях повышенной щелочности, высокого окислительного потенциала, при участии флюида, богатого углекислотой и при повышенных концентрациях HF во флюиде, однако недостаточных для образования флюорита.

Глава 8. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предшествующих работах определение возраста приморского комплекса U-Pb методом проводилось по цирконам из гранитов главной фазы (см. Главу 2). Нами была поставлена задача датирования гранитов второй фазы Трехголового массива, с которыми связаны проявления редкометалльной минерализации грейзенового типа. Датирование циркона выполнено локальным U-Pb методом (SHRIMP-II). Всего было выполнено 10 анализов в 9 кристаллах циркона, из которых один анализ дал конкордантный возраст 1932 ± 13 млн. лет, а результаты, полученные по остальным цирконам,



группируются вблизи верхнего пересечения дискордии с конкордией, отвечающего возрасту 1932 ± 21 млн. лет (рис. 6). Значение, получаемое по нижнему пересечению, не имеет геологического смысла.

Рис. 6. Диаграмма с конкордией для цирконов: дискордия: $T_1 = 1932 \pm 21$ млн. лет, $T_2 = 259 \pm 640$ млн. лет, СКВО=1,06 (через все точки). Размеры эллипсов соответствуют $\pm 2\sigma$

погрешностям по обеим осям координат.

Полученный возраст гранитов второй фазы Трехголового массива в пределах ошибки измерения близок к возрасту, установленному ранее по циркону из гранитов главной фазы этого же массива. Это, вслед за (Бибикова и др., 1987), позволяет предполагать, что в состав приморского комплекса объединяются разновозрастные граниты со сходными минералогическими и геохимическими характеристиками. Датирование мусковита из кварц-мусковитовых грейзенов Трехголового массива Ar–Ar-методом дало возраст промежуточного плато в спектре 792 ± 7 млн. лет и интегральный возраст 868 ± 8 млн. лет. По-видимому, эти значения отражают не время образования грейзенов, а термальное событие, имевшее место в Западном и Северном Прибайкалье в интервале 700-800 млн. лет (Гладкочуб и др., 2007).

Глава 9. ФЛЮИДНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ГРАНИТОВ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Приморский комплекс в соответствии с (Изох, 1978) представлен полной и завершенной гранитоидной ассоциацией умеренной общей щелочности и повышенной калиевости. Исходными для комплекса являлись известково-щелочные магмы, образовавшиеся при плавлении глубокометаморфизованных верхнеархейских пород кислого состава (Донская и др., 2005) и изначально обогащенные F, Ba, Zr, Rb, Pb, Th, Sn, что следует из геохимии наиболее основных разностей гранитов. Эволюция состава пород главной интрузивной фазы выражается в увеличении кремнекислотности при одновременном снижении основности, росте железистости, отношения K_2O/Na_2O и агапитности. Дифференциация расплава отвечала Ba-Rb тренду. Для гранитов второй фазы проявлена тенденция к возрастанию общей щелочности в основном за счет Na.

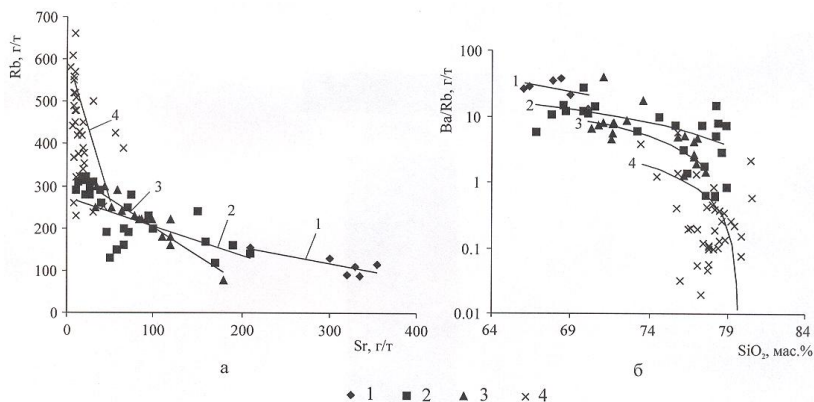


Рис. 7. Соотношения Rb–Sr (а) и Ba/Rb–SiO₂ (б) в гранитах. Точки составов и линейные тренды эволюции: 1 – гранитов бухты Песчаной по (Донская и др., 2005), 2

– Бугульдейско-Ангинского массива, 3 – Улан-Ханского массива, 4 – Трехголового массива.

Массивы разделяются на два типа по соотношению Rb и Sr (рис. 7 а). Первый тип представлен Бугульдейско-Ангинским массивом. Значительный диапазон содержаний Sr в породах этого массива указывает на проявление внутрикамерной дифференциации, которая не сопровождалась существенным накоплением Rb и снижением отношения Ba/Rb (рис. 7 б). Исключение составляют аляскиты, которые отличаются от лейкогранитов повышенными содержаниями Rb и пониженными - Ba. Относительно наиболее основных гранитов массива аляскиты обогащены Sn в 3 раза, Th в 2 раза и Rb в 1.4 раз. Вторую группу образуют граниты Улан-Ханского и Трехголового массивов, которые имеют пониженные концентрации Sr и повышенные Rb, причем концентрация Rb резко возрастает при относительно небольшом снижении Sr, что особенно выражено в Трехголовом массиве. Обогащенность лейкогранитов Трехголового массива Rb, обедненность Ba, Sr, Eu, резко пониженные отношения K/Rb, Ba/Rb, Sr/Rb, Eu/Eu*, Zr/Hf, Nb/Ta по сравнению с лейкогранитами других массивов (рис. 7) позволяют предполагать, что исходным для этого массива являлся лейкогранитный расплав, образовавшийся в процессе дифференциации известково-щелочной магмы в глубинной магматической камере и затем отделившийся от нее и перемещенный в верхние горизонты коры. Этот расплав уже изначально содержал в повышенных количествах литофильные элементы: лейкограниты Трехголового массива по сравнению с лейкогранитами других массивов содержат в среднем примерно в 2 раза больше F, в 1.6–2.2 раза больше Li, Cs, Ta, до 1.5 раз больше Sn, в 3 р. больше U. Повышенные содержания F и Cl в биотите, пониженные температуры кристаллизации, кварц-турмалиновые шпиры и проявления грейзенизации указывают на обогащенность расплава флюидными компонентами.

Граниты Трехголового массива по ряду геохимических особенностей близки к типу плюмазитовых редкометалльных гранитов, по Л.В.Таусону. Лейкогранитный состав интрузии и ее значительный объем являлись благоприятными факторами для накопления летучих компонентов и Sn в остаточных расплавах, от которых могли отделяться рудоносные растворы. Присутствие в гранитах второй фазы акцессорных редкометалльных минералов, связь с гранитами грейзенов, также содержащих минералы Sn, W, Nb, Y, TR, Th, повышенные концентрации Sn в гранитах и гидротермально измененных породах позволяют рассматривать массив Трехголовый как перспективный в отношении оловянного оруденения грейзенового типа. Неблагоприятным фактором для его обнаружения является значительный эрозионный срез. Повышенное содержание Cl в биотитах является показателем специализации комплекса на Au, Cu, Pb, Zn и Mo.

Заключение

Полученный материал по геохимии, минералогии и условиям кристаллизации гранитоидов приморского комплекса, а также новые изотопно-геохронологические данные позволяют сделать следующие выводы.

Формирование комплекса связано с внедрением в породы раннего протерозоя порций расплава, отделявшихся от эволюционирующего глубинного очага высококальциевой и высокожелезистой известково-щелочной магмы, и их дальнейшей внутрикамерной дифференциации.

Наиболее контрастными по составу и условиям кристаллизации являются Бугульдейско-Ангинский и Трехголовый массивы. Исходным для первого являлся относительно слабо дифференцированный расплав, кристаллизация которого не сопровождалась накоплением фтора и существенным обогащением лейкогранитов гранитофильными элементами. Исходным для Трехголового массива служил лейкогранитный расплав, обогащенный Cs, Li, Rb, Sn, Th, водой, фтором и бором.

Повышенная флюидонасыщенность гранитов Трехголового массива, присутствие аксессуарных минералов Sn, Mo, Nb, Y, проявление грейзенизации, повышенные концентрации Sn, Rb, Li, F в гранитах и гидротермально измененных породах позволяют рассматривать этот массив как перспективный в отношении обнаружения оловянного оруденения грейзенового типа, а повышенное содержание Cl в слюдах является показателем специализации комплекса на Au, Cu, Pb, Zn, Mo. Тем не менее, дифференциация расплава не привела к формированию редкометалльных гранитов, а выразилась лишь в повышении в 2-4 раза содержания гранитофильных элементов. Причиной этого могут быть преимущественно глубинные условия кристаллизации и недосыщенность расплавов водой.

Полученный возраст кристаллизации гранитов второй фазы Трехголового массива, в пределах ошибки измерения близкий к возрасту гранитов главной фазы этого же массива (1,91 млрд. лет) и сильно отличающийся от значения, полученного по циркону из гранитов крайней юго-западной части массива (1,86 млрд. лет), позволяет считать, что в состав приморского комплекса объединяются разновозрастные граниты, сходные по петрографическому составу и геохимии.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах

1. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.** Геохимическая типизация гранитов приморского комплекса Западного Прибайкалья // Доклады РАН, 2010. Т. 435, №2. С. 244-248.

2. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.**, Карманов Н.С. Аксессуарные минералы приморского комплекса гранитов рапакиви (Западное Прибайкалья) // Записки Российского минералогического общества, 2011. №2. С. 38 – 58.

3. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.** Фторфлогопит из альбитизированных гранитов приморского комплекса (Западное Прибайкалье) // Записки Российского минералогического общества, 2011. №4. С. 119 – 128.

Тезисы докладов на российских и международных конференциях

4. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.** Редкометаллическая минерализация в раннепротерозойских постколлизийных гранитах Приморского комплекса (Западное Прибайкалье) // Граниты и эволюция Земли: геодинамическая позиция, петрогенезис и рудоносность ранитоидных батолитов: Материалы I международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. С. 339 – 342.

5. **Базарова Е.П.** Особенности состава слюд в гранитах приморского комплекса // Строение литосферы и геодинамика. Материалы XXIII Всероссийской молодежной конференции 21 – 26 апреля 2009 г., Иркутск. – Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2009. С. 129 – 130.

6. **Базарова Е.П.** Геохимия гранитов приморского комплекса (граниты массива г. Трехголовый) // Современные проблемы геохимии. Материалы конференции молодых ученых 5 – 10 октября 2009 г., Иркутск. Иркутск: Изд-во УРАН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2009. С. 13 – 15.

7. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.**, Ларионов А.Н. Новые данные о возрасте гранитов приморского комплекса в Западном Прибайкалье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН 11 – 14 октября 2009 г., Иркутск. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. – В 2-х томах. – Т. 2. С. 64 – 66.

8. **Базарова Е.П.** Геохимическая характеристика гранитов приморского комплекса // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIV международного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. Т. 1. ТПУ. – Томск, издательство ТПУ, 2010. С. 71 – 81.

9. **Базарова Е.П.**, Савельева В.Б. Процессы грейзенизации в приморском комплексе гранитов рапакиви // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 70 – 71.

10. Савельева В.Б., **Базарова Е.П.** Флюидно-геохимическая характеристика приморского комплекса гранитов рапакиви (Западное Прибайкалье) // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010. Т. 2. С. 199 – 200.

11. **Базарова Е.П.** Турмалинизация в гранитах Трехголового массива приморского комплекса (Западное Прибайкалье) // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIV Всероссийской молодежной конференции

(Иркутск, 19 – 24 апреля 2011 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. С. 62 – 63.

