

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.4

№ госрегистрации 01201351651

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

чл.-корр. РАН

_____ В.С.Шацкий

« ____ » _____ 2014 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Процессы мантийно-корового взаимодействия и источники вещества при
формировании кислых магматических и метаморфических комплексов
складчатого обрамления и выступов фундамента Сибирского кратона

№ 0350-2014-0006

(промежуточный)

Научный руководитель темы

_____ д.г.-м.н. В.С. Антипин
подпись, дата

Иркутск 2014

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д-р
геолого-минералогических наук

В.С. Антипин

подпись, дата

Ответственные исполнители темы:

д-р геолого-минералогических наук

В.А. Макрыгина (раздел 1)

подпись, дата

д-р геолого-минералогических наук

В.И. Левицкий (раздел 1)

подпись, дата

д-р геолого-минералогических наук

В.С. Антипин (раздел 2)

подпись, дата

д-р геолого-минералогических наук

А.Б. Перепелов (раздел 3)

подпись, дата

д-р геолого-минералогических наук

В.Е. Загорский (раздел 4)

подпись, дата

УДК 550.4

Реферат

Отчет включает 24 стр., 6 илл., 16 ист.

Ключевые слова: геохимия, мантия, земная кора, магматизм, геодинамические обстановки, гранитоиды.

Цели исследования: изотопно-геохимическое изучение проявлений кислого магматизма в разных структурных этажах земной коры: от глубинных синколлизийных, тесно связанных с метаморфизмом, до внутриплитных и островодужных вулканических; выявление соотношения мантийного и корового вещества в разных геодинамических обстановках формирования гранитоидных и кислых субвулканических и эффузивных пород и связь с ними оруденения; разработка и совершенствование петрогенетических моделей формирования гранитно-пегматитовых систем с месторождениями Li, Cs, Be, Ta, Nb, Sn, РЗЭ, Nb, Ta, Zr, слюды и самоцветов.

Содержание

Введение	5
Раздел 1 Петролого-геохимическое и изотопно-геохронологическое изучение процессов метаморфизма и метасоматоза и их роли в формировании гранитоидов в раннем докембрии и фанерозое на юге Сибирской платформы и в ее складчатом обрамлении	6
Раздел 2 Петрологические и изотопно-геохимические индикаторы процессов мантийно-корового взаимодействия при формировании коллизионных и внутриплитных гранитоидов	9
Раздел 3 Источники вещества, процессы формирования и эволюции кислых магм в различных геодинамических обстановках (на основе минералогических, термобарогеохимических и изотопно-геохимических данных)	12
Раздел 4 Геохимические и петрогенетические модели различно специализированных гранитно-пегматитовых систем с участием коровых и мантийных источников	17
Основные результаты проведенного исследования	20
Список публикаций по теме	21
Список использованных источников	23

Введение

Проведены изотопно-геохимическое и петрологическое исследования метаморфических и магматических комплексов в древних блоках фундамента земной коры Сибирской платформы и складчатого обрамления с целью геохимического обоснования их связи со сменой геодинамических обстановок. Сюда входят коллизионный этап развития – аккреция складчатых блоков к кратону (синметаморфический) и этап более позднего рифтогенеза и внутриплитного магматизма. В основе работы лежит комплексное и детальное исследование вещества и особенно редкоэлементного и изотопного состава пород. В дальнейшем предполагается переход от детального изучения отдельных модельных магматических и метаморфических объектов к возрастным срезам геологического развития крупных блоков земной коры, а также петрологических и геодинамических причин проявления в них мощных импульсов метаморфизма и магматизма в связи с процессами мантийно-корового взаимодействия. Полноценная и высококачественная база данных, накопленных за последние годы, позволяет выявлять геохимические закономерности эволюции кислого магматизма и дает возможность строить более обоснованные модели развития эндогенных процессов в земной коре и мантии, что является спецификой многолетних исследований участников исследования.

Раздел 1 Петролого-геохимическое и изотопно-геохронологическое изучение процессов метаморфизма и метасоматоза и их роли в формировании гранитоидов в раннем докембрии и фанерозе на юге Сибирской платформы и в ее складчатом обрамлении

1.1 Установление состава и возраста гранитоидов китойского ультраметаморфического комплекса из гранулитовых и зеленокаменных поясов Присаянского выступа Сибирского кратона и возраста фундамента Тувино-Монгольского микроконтинента

В 2014 году продолжено петролого-геохимическое и изотопно-геохронологическое (Rb/Sr, Sm/Nd и U/Th/Pb) исследование гранитоидов китойского ультраметаморфического комплекса в главных структурах Присаянского выступа юго-запада Сибирского кратона: в гранулитовых шарыжалгайском и китойском комплексах, в тоналит-трондьемитовых гранито-гнейсах фундамента зеленокаменных поясов Онотском (ОЗП), Таргазойском (ТЗП) и в Гарганской глыбе.

Ранее было установлено [Сальникова и др., 2007], что метаморфизм и гранитизация в условиях гранулитовой и амфиболитовой фации происходили по крайней мере дважды – в неогархее (2.48-2.53-2.56 млрд лет в шарыжалгайском и китойском комплексах) и палеопротерозое (1.87-1.85 млрд лет). Нами в шарыжалгайской серии обнаружены еще более древние гранит-мигматиты с возрастом 2.78 млрд лет, а их протолитами могли быть гиперстен-биотитовые плагиогнейсы – 3.2-3.4 млрд лет [Poller et al., 2005]. Полихронную природу протолитов и гранитоидов китойского комплекса подтверждают модельные возрасты [$T_{Nd}(DM)$], полученные ранее и в 2014 г. для шарыжалгайской и китойской серий, варьирующие от 2.4 до 3.85 млрд лет. В комплексах гранито-гнейсов Онотского и Таргазойского зеленокаменных поясов и в Гарганской глыбе нами впервые установлено широкое развитие гранитоидов с возрастом 2.6-2.65 млрд лет, равных по возрасту китойским гранитоидам. Возраст их субстрата (ТТА) составляет в ОЗП и ТЗП 3.287-3.386 млрд лет.

Состав гранитоидов (плагиоклазовые и калишпатовые мигматиты, эндербиты, чарнокиты, автохтонные и аллохтонные граниты, пегматиты) зависит от субстрата и степени его преобразований и варьирует от низкощелочных до щелочных гранитоидов, обогащенных Ti, Al, K, Ba, LREE, Zr, Cr, Ni. Гранитоиды относятся к ультраметаморфическому, реже S, I и A-типам. При формировании гранитоидов по разному субстрату фиксируется привнос Si, щелочей, Rb, Ba, Sr, Mo, Pb (кроме Na, Sr в

тоналиты), вынос Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Cr, V, Ni, Co. По тектоническому положению гранитоиды относятся к позднеорогенным, посткинematическим.

Судя по рисунку 1, линии отражающие состав палеопротерозойских ультраметаморфических гранитоидов в шарыжалгайской серии (5), резко отличны от линий для неоархейских ультраметагенных гранитоидов шарыжалгайского (1) и китойского (2,3) комплексов, тоналит-трондьемитовых ассоциаций Булунского блока (4). Это обусловлено обогащением палеопротерозойских гранитоидов по сравнению с неоархейскими – Fe, Mg, Zn, Cr, V, Ni, Co, Sc. Эти элементы присущи основным метавулканитам, которые широко развиты в палеопротерозое в полихронной шарыжалгайской толще.

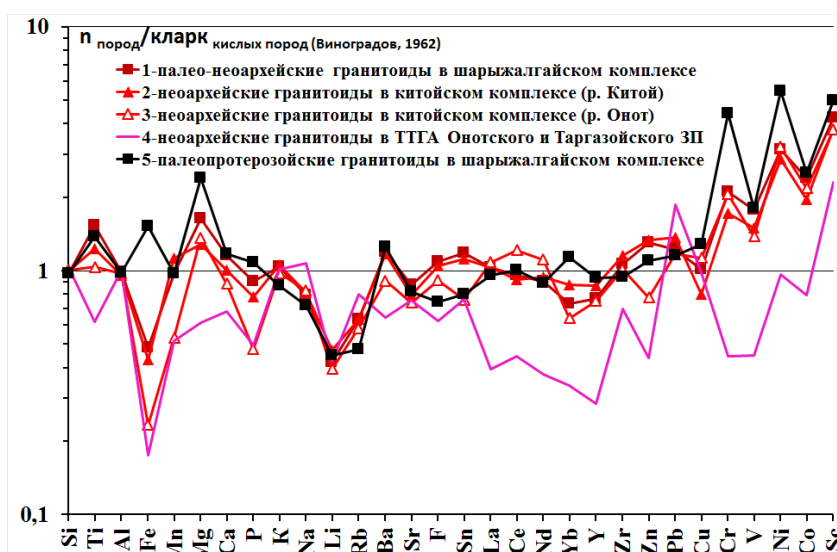


Рисунок 1. Спайдердиаграмма нормирования средних содержаний в субстрате к кларку кислых пород по А.П. Виноградову (1962)

1.2 Исследование тектонических взаимоотношений Таланчанского гранитогнейсового купола и метаморфитов селенгинской серии и проведение оценки их влияния на геохимические особенности кварцитов Черемшанского месторождения.

Выходы пород таланчанской серии и перекрывающих ее свит селенгинской толщи изучены нами в районе Таланчанского гранитогнейсового купола по р.Сухой и правым притокам р.Итанцы (юго-восточные склоны хр.Морского). Купол сложен интенсивно мигматизированными биотитовыми и биотит-амфиболовыми гнейсами. Породы итанцинской свиты селенгинской серии, вскрытые в верховьях правых притоков р.Итанцы (Бурля, Дабаты, М.Билюта), сильно милонитизированы и окварцованы. Контакт с таланчанскими гранитогнейсами не вскрыт. Наиболее близкая к нему проба по ручью Дабаты представлена милонитом по гранодиориту, с хлоритизированным биотитом,

гранулированным кварцем, расположенным линзами. Далее вниз по р.Бурля чередуются хлорит-актинолитовые, эпидот-биотит-карбонатные сланцы с мраморами, углисто-серицитовыми кварцитами, то есть зелеными сланцами. Ближе к р Итанца породы уже менее катаклазированы и видно, что изначально степень их метаморфизма достигала амфиболитовой фации. Можно предположить, что низкотемпературные изменения и мощное перетиравание пород связаны с движением итанцинской свиты вниз по контакту с гранитогнейсами таланчанской толщи.

В верховьях рек Малая и Большая Билюта в итанцинской свите разрабатывается Черемшанское месторождение чистых кварцитов. Карьером вскрыт разрез итанцинской свиты. Вверх по разрезу углистые сланцы и бурые песчаники сменяются горизонтом кварцитов около 30-40 м мощностью (продуктивный горизонт). Перекрываются они пачкой мраморизованных известняков. Вдоль северо-западного борта карьера по всем уступам прослеживаются ярко выраженные зеркала скольжения, под углом 25-30° падающие на юго-восток. В белых разностях кварцитов к контакту с песчаниками увеличивается количество и размер округлых включений, иногда зональных, таких же бурых, как песчаники. Похоже, что это реликты не до конца окварцованных или очищенных (перекристаллизованных) песчаников. Светлые разности кварцитов содержат 800-1000 г/т суммы петрогенных компонентов с резким преобладанием Al, Ti, Fe, небольшие максимумы Cr, V, Zn – 0.1 г/т. Из гранитофильных наибольший максимум у Zr (10) и Hf, меньшие – у Ba, Sr, CeREE. Возможно, кварциты содержат немного цирконов.

Непосредственный контакт таланчанской и селенгинской толщ не найден, а может быть и вовсе уничтожен молодыми баргузинскими гранитами. Однако мощная тектоническая переработка сланцев и кварцитов итанцинской свиты вблизи контакта с гранитогнейсами Таланчанского купола со снижением ее интенсивности при удалении от него может объясняться соскальзыванием пластов сланцев и кварцитов в юго-восточном направлении, что подтверждается широким развитием зеркал скольжения этой же ориентировки в сланцах и кварцитах.

Раздел 2 Петрологические и изотопно-геохимические индикаторы процессов мантийно-корового взаимодействия при формировании коллизионных и внутриплитных гранитоидов.

2.1 Установление соотношения коровых и мантийных источников разных типов кислых и щелочных образований о. Ольхон по изотопно-геохимическим данным.

В результате проведенных комплексных исследований установлена многоэтапность фанерозойского гранитоидного магматизма Западного Прибайкалья, позволяющая относить гранитоиды к коллизионным и постколлизионным образованиям. Сравнительная характеристика геологических и изотопно-геохимических особенностей раннепалеозойских гранитоидов хр. Хамар-Дабан (Солзанский массив) и о. Ольхон (шаранурский комплекс) показала, что они близки по возрасту и составу и относятся к синколлизионным образованиям, сформированным из сланцево-гнейсового субстрата хамардабанской и ольхонской метаморфических толщ. Гранитоиды проявлены в автохтонной и аллохтонной фациях и представлены преимущественно мигматитами, плагиогранитами, гранитогнейсами и К-На гранитами. Среди пород шаранурского комплекса выделены также субщелочные граносиениты и кварцевые сиениты, пространственно сближенные с К-На гранитами, но контактирующие с амфиболитами. На острове Ольхон исследованы щелочные сиениты Будунского массива, которые могут иметь связь с Хужирским массивом основных пород. Впервые на о. Ольхон выявлен геохимический тип пегматоидных редкометалльных гранитов с бериллиевой минерализацией, которые отличаются от Ве-мусковитовых пегматитов Хамар-Дабана высокими содержаниями Rb, Cs, Sn, Nb, Ta, W, но низкими Li и F. Эти геохимические особенности подчеркивают унаследованность состава протолита на всех этапах синколлизионного и постколлизионного гранитообразования.

По данным U-Pb датирования (SHRIMP-II, ВСЕГЕИ) средний возраст ядер магматических цирконов в К-На гранитоидах шаранурского комплекса равен 505 млн лет, краевых оболочек - 477 ± 3 млн лет. Возраст граносиенитов и кварцевых сиенитов о. Ольхон 495 ± 6 млн лет [Гладкочуб и др., 2010] близок к К-На шаранурским гранитам и подтверждает генетическое родство этих известково-щелочных и субщелочных гранитоидов. Изотопно-геохимические и морфологические данные свидетельствуют о том, что раннепалеозойские гранитоиды Прибайкалья относятся к образованиям S-типа, имеют коровый источник расплавов и формировались в коллизионной геодинамической

обстановке. В результате сравнительной характеристики К-На гранитоидов Прибайкалья с коллизионными гранитоидами других провинций (Гималаи и Центральная Испания) выявился ряд индикаторных геолого-геохимических особенностей, характерных для гранитоидов, сформированных в обстановке континентальной коллизии.

По распределению РЗЭ уровень их нормированных содержаний в мигматитах и гранитах Солзанского массива заметно выше, чем в этих же породах шаранурского комплекса Ольхона (рисунок 2). Это коррелируется с различиями в распределении РЗЭ во вмещающих сланцево-гнейсовых толщах, которые являлись субстратом при выплавлении гранитоидных магм. Кроме того гранитоиды Хамар-Дабана показывают Eu минимум, не свойственный шаранурским гранитоидам. По содержанию легких лантаноидов гранитоиды шаранурского комплекса близки к полю коллизионных гранитоидов Гималаев (рисунок 2а). Коллизионные гранитоиды Испании (плутон Педробернардо) [Веа F. et al., 1994; Веа F., 2010] являются наиболее дифференцированными образованиями и характеризуются отчетливым Eu-минимумом, как и гранитоиды Хамар-Дабана. Практически перекрываются на диаграмме спектры распределения РЗЭ в гранитоидах Испании и о. Ольхон, однако в шаранурских гранитоидах Eu-минимум почти не проявлен (рисунок 2б). Важно подчеркнуть, что гранитоиды Прибайкалья, Гималаев и Испании объединяют индикаторные геохимические особенности: они являются пералюминиевыми ($ASI > 1,1$), существенно калиевыми по составу, в них отмечаются повышенные содержания Rb, Pb, но пониженные концентрации тяжелых редкоземельных и летучих (F, V) элементов. На основании проведенных геохимических исследований показано, что источником расплавов раннепалеозойских гранитоидов шаранурского комплекса, вероятно, служил коровый субстрат, что также является критерием их образования в коллизионной геодинамической обстановке.

Наряду с раннепалеозойскими коллизионными гранитоидами шаранурского комплекса особое геологическое положение занимают щелочные сиениты м. Будун, а также редкометалльные пегматоидные граниты. Получены первые возрастные данные для этих двух типов пород: редкометалльные пегматоидные граниты имеют возраст 390 ± 5 млн. лет, щелочные сиениты – 440 ± 5 млн лет (SHRIMP-II, ИГ КНЦ, г. Апатиты). Щелочные сиениты о.Ольхон образуют отдельную группу пород, которые имеют наиболее высокие содержания Na_2O (5.36-9.48) и K_2O (3.18-6.61) и содержат корунд и анортотлаз. Они обогащены Ta, Nb, Zr и Sn, однако в них наблюдаются минимумы концентраций Ba, Sr, U и

Th. Приуроченность всех щелочных проявлений как Будунского массива на о.Ольхон, так и Приольхонья к габброидам и зависимость их редкоэлементного состава от вмещающих пород свидетельствует о повышении щелочности за счет взаимодействия кислых коровых выплавок и основных магм.

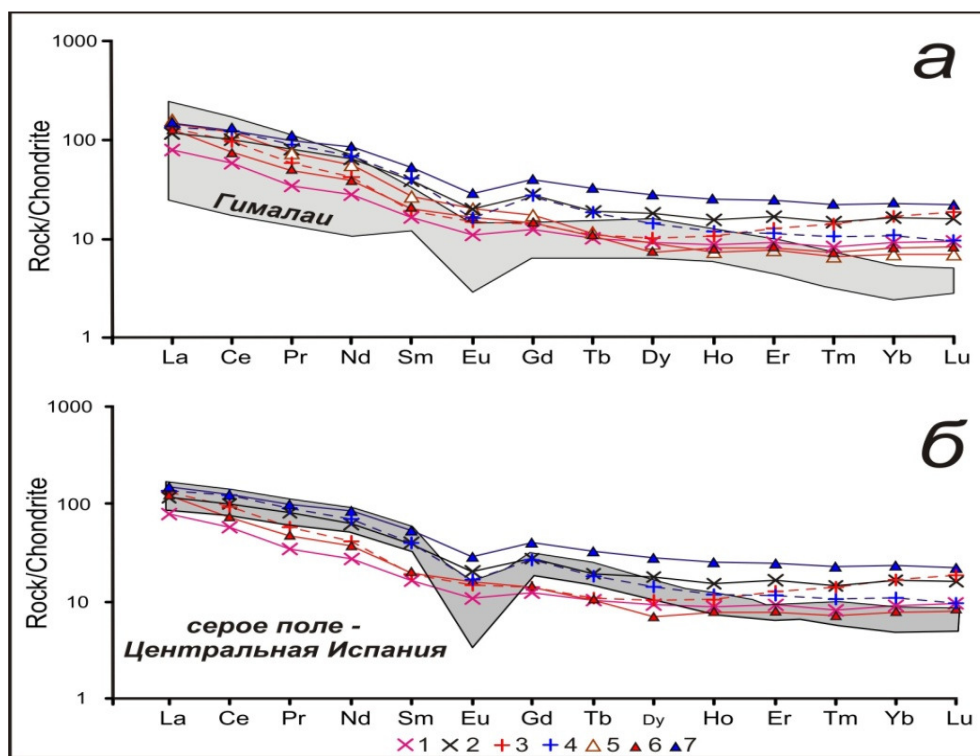


Рисунок 2. Распределение редкоземельных элементов в гранитоидах и вмещающих породах Прибайкалья и коллизионных гранитоидах Гималаев (а) и Центральной Испании (б).

Плагиограниты, плагиомигматиты (1 – о. Ольхон, 2 – хр. Хамар-Дабан), К-Na гранитоиды (3 – о. Ольхон, 4 – хр. Хамар-Дабан) – пунктир, граносиениты и кварцевые сиениты о. Ольхон (5), гнейсы и сланцы, вмещающие гранитоиды Прибайкалья, (6 – о. Ольхон, 7 – хр. Хамар-Дабан). Серым полем показано распределение РЗЭ в коллизионных гранитоидах: а - Гималаев [Crawford, Windley, 1990] и б - Центральной Испании (батолит Авила) [Bea F., 2010]. Нормировано по РЗЭ в хондрите C1 [McDonough, Sun, 1995].

Существенно калиевыми породами ($K_2O=5.66-8.60$) являются обнаруженные нашими исследованиями на о. Ольхон жильные пегматоидные редкометалльные микроклин-альбитовые граниты с бериллиевой минерализацией. Таким образом, эти редкометалльные и щелочные породы значительно моложе шаранурских гранитоидов, отличаются от них по составу и не принадлежат данному комплексу пород. Вероятно, они относятся уже к постколлизионному этапу внутриплитного тектогенеза.

Сходство геохимических особенностей раннепалеозойских гранитоидов Прибайкалья (Хамар-Дабан, о. Ольхон), наряду с проявлениями одинаковой экзотической минерализации в метаосадочных породах, подтверждает существование Ольхон-Хамардабанского блока Прибайкалья как единого террейна.

Раздел 3 Источники вещества, процессы формирования и эволюции кислых магм в различных геодинамических обстановках (на основе минералогических, термобарогеохимических и изотопно-геохимических данных).

3.1 Исследование процессов флюидно-магматической и кристаллизационной дифференциации кислых К-Na щелочных, высококалиевых и ультракалиевых магм Центральной и Южной Камчатки.

3.1.1 Рассмотрена трахиандезит-трахит-комендитовая ассоциация пород, входящая в щелочно-базальт-трахит-комендитовую серию, которая проявлена в тыловой зоне Срединного хребта Камчатки в районе вулканического центра Белоголовский. Целью работы было установить условия образования кремнекислых щелочных расплавов в составе ЩБТК серии на основе данных, полученных при помощи EDS и LA-ICP-MS методов.

Вулканический центр Белоголовский располагается в юго-западной части Срединного хребта Камчатки в его тыловой области. Возраст слагающего его одноименного вулканогенного комплекса по K/Ar датировкам соответствует интервалу 1.6-2.8 млн лет. Редкоэлементный состав минералов-вкрапленников был изучен методом LA-ICP-MS. Как показано на примере распределения редкоземельных элементов в минералах трахитов, полевые шпаты трахитов имеют умеренные концентрации РЗЭ с высокой степенью их фракционирования и ярко выраженными максимумами нормированных концентраций Eu (рисунок 3). Близки к ним по содержаниям РЗЭ биотиты, для которых Eu аномалия не характерна. Пироксены трахитов отчетливо обогащены как легкими, так и тяжелыми элементами редкоземельной группы в сравнении с полевыми шпатами. Для графиков распределения РЗЭ в пироксенах характерен отчетливый Eu минимум. Наиболее высокими концентрациями лантаноидов обладают апатиты. Уровни концентраций в них РЗЭ на 1-2 порядка выше, чем в других исследованных минералах.

Для апатитов наблюдается высокая степень фракционирования РЗЭ и слабо выраженная отрицательная Eu аномалия. Из других примечательных особенностей в распределении редких элементов в минералах трахитов следует отметить высокие концентрации в полевых шпатах Ba (1500-2800 ppm), в пироксенах Sc (174-338 ppm) и Y (89-143 ppm), в биотитах Ba (3260 ppm) и Nb (73 ppm), в апатитах, помимо РЗЭ, также Y (824 ppm), Th (18 ppm) и U (6 ppm). Методами баланса масс и микроэлементного моделирования показано, что формирование трахиандезит-трахит-комендитового ряда пород в составе ЩБТК серии

определяется протеканием процессов кристаллизационной дифференциации или «фильтр-прессинга» в малоглубинных магматических камерах с участием минерального парагенезиса Pl-Kfs-Cpx-Orx-Amph-Bt-Mgt-Ilm-Ap и преобладающей ролью полевошпатового компонента.

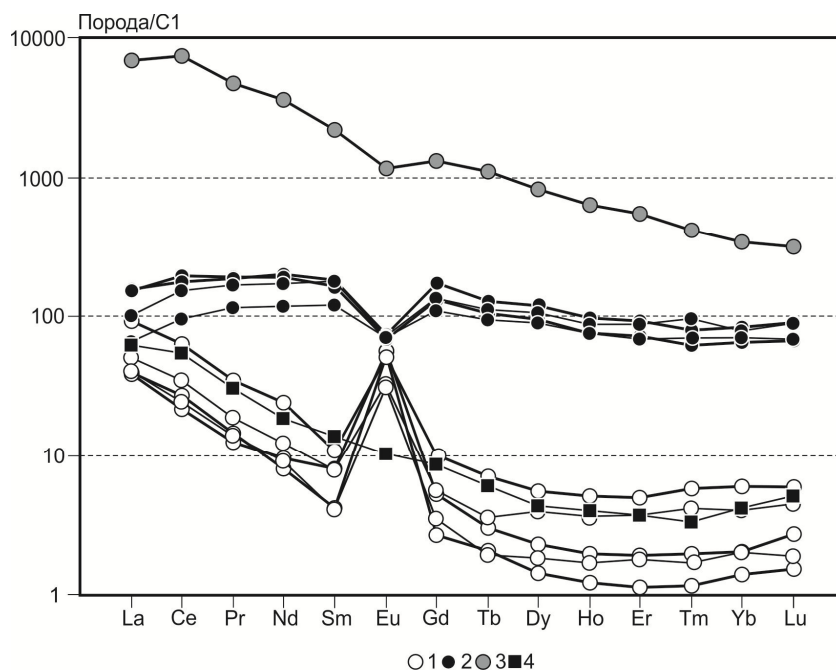


Рисунок 3. Распределение REE в трахитах вулканического центра Белоголовский.
 Условные обозначения: 1 – плагиоклазы, 2 – пироксены, 3 – апатит, 4 – биотит парагенезиса Pl-Kfs-Cpx-Orx-Amph-Bt-Mgt-Ilm-Ap и преобладающей ролью полевошпатового компонента.

Направленное снижение объема кристаллического компонента в указанном ряду пород предполагает протекание процессов кристаллизационной дифференциации. Проверка этого предположения может быть выполнена методом баланса масс с применением в расчетах модальных составов минералов-вкрапленников, составов фельзитовой и гиалопилитовой основной массы и составов пород. Результаты расчетов показывают удовлетворительное решение при установлении вещественно-минеральных связей между различными типами трахитов вулкана Белоголовский, в данном случае между обильно порфиоровыми Pl + Fsp + Cpx + Bt трахитами, отличающимися заметно более высокими концентрациями Ba (Н-Ва трахиты), и плагиопорфиоровыми Pl + Fsp + Cpx + Orx + Bt трахитами с умеренными концентрациями Ba (М-Ва трахиты). Можно предполагать существование двух линий дифференциации магм: 1. трахиандезибазальт-трахиандезит-трахит-комендитовой и 2. трахиандезибазальт-трахиандезит-трахитовой. По результатам проведенного микроэлементного моделирования с использованием данных о распределении редких элементов в минералах из пород серии, была получена схема дифференциации пород

массива Белоголовский.

Для установления роли различных источников магматического вещества в формировании магм на этапах смены геодинамических режимов в истории развития Камчатки определены изотопные характеристики Sr, Nd и Pb главных типов пород исследованных кайнозойских щелочных и субщелочных базальтоидных и примитивных андезитоидных комплексов. Сравнение изотопных характеристик проводилось для инициальных значений с поправками на установленный изотопным датированием возраст пород (рисунок 4).

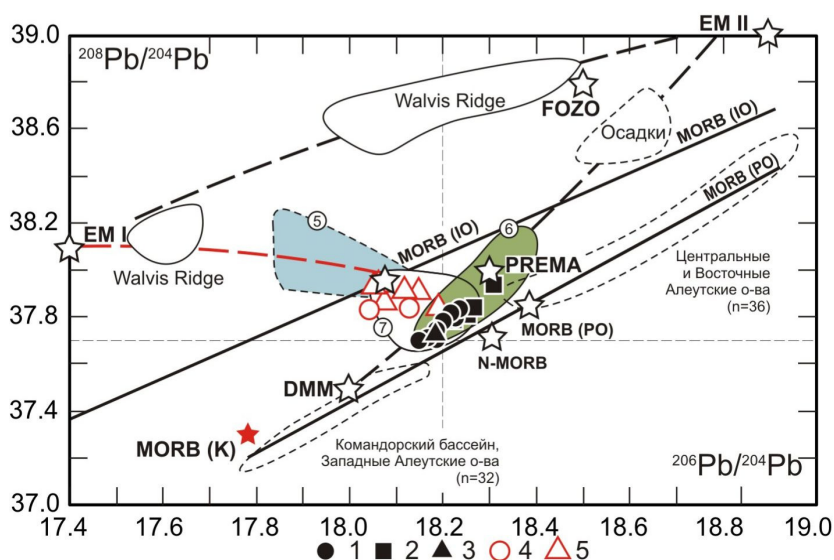


Рисунок 4. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ изотопные характеристики базальтоидов этапов смены геодинамических обстановок и надсубдукционных вулканических поясов Камчатки.

Точки состав пород: 1 – Mg#-андезит-NEB-адакитовой ассоциации, 2 – калиевых щелочных базальтоидов, абсарокитов и шшонитов Западной Камчатки, 3 – раннеплиоценовых базанитов Западной Камчатки, 4 – среднеэцен-раннеолигоценовых K-Na щелочных базальтоидов Западной Камчатки, 5 – K-Na щелочных базальтоидов Срединного хребта. MORB (K) – океанический базальт Командорского бассейна [Yogodzinski et al., 1995]. Поля составов базальтов и андезитов: Командорского бассейна и Западных Алеутских островов (о. Медный) [Yogodzinski et al., 1994, 1995] Западных Алеутских островов (о. Атту) [Yogodzinski et al., 1993], Центральных и Восточных Алеутских островов [Kelemen et al., 2003; Jicha et al., 2004]. Поля составов базальтов и андезитов IAB типа плиоцен-четвертичных вулканических поясов островодужной системы Камчатки по литературным данным (n=137): 1 – Южная Камчатка, 2 – Восточная Камчатка, 3 – Центральная Камчатская депрессия, 4 – Срединный хребет. 5 – поле составов K-Na щелочных базальтоидов Восточной Камчатки по [Волынец и др., 1997], 6 – островодужных базальтоидов Камчатки в целом, 7 – поле составов K-Na щелочных базальтоидов Срединного хребта по оригинальным данным и по [Churikova et al., 2001; Volynets et al., 2010].

Анализ полученных данных показывает (рисунок 4): происхождение позднеплиоцен-четвертичных K-Na щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии связано с процессами взаимодействия мантийных источников DMM, PREMA и EM I ($\Delta 8/4\text{Pb}=36-40$). Изотопные данные по магматизму этапов смены геодинамических обстановок не противоречат моделям участия в магмообразовании вещества рециклированной океанической литосферы, обогащенного астеносферного источника и метасоматизированной литосферной мантии. При этом по результатам анализа изотопных характеристик

базальтоидов надсубдукционного геохимического типа следует заключить, что состав литосферной мантии под вулканическим поясом Срединного хребта и частично под Центральной Камчатской депрессией имеет более деплетированный состав в сравнении с надсубдукционной мантий Восточной и Южной Камчатки.

3.1.2 В раннемеловых риолитах Нилгинской депрессии (Центральная Монголия) обнаружены реликты силикатно-железистых флюидных сред. Они содержатся в кавернах матрикса пород и во включениях из вкрапленников кварца и санидина. Изучен минеральный состав риолитов и агрегатов силикатно-железистых фаз. Расчетные условия кристаллизации ильменита и титаномагнетита в матриксе пород: 593-700°C при летучести кислорода $\Delta\text{lgf}_{\text{O}_2}$ NNO от -2.29 до 1.68 (рисунок 5).

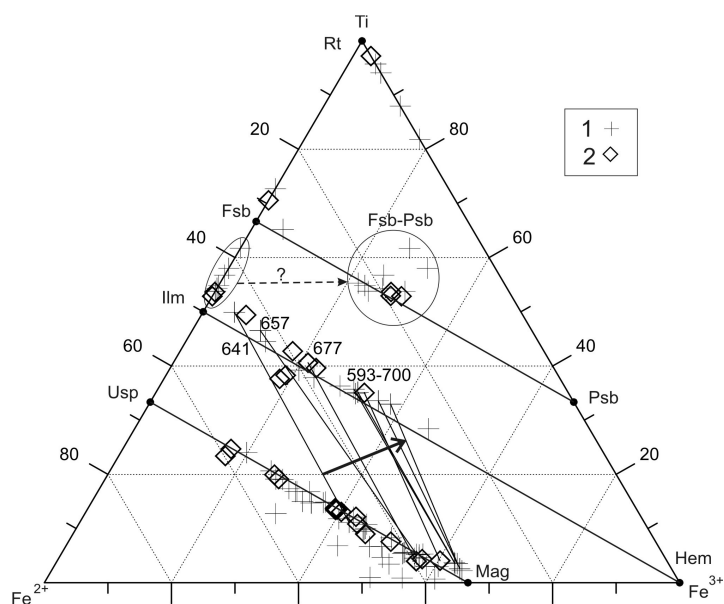


Рисунок 5. Диаграмма состава минералов-оксидов Fe и Ti из матрикса риолитов (1) и кристаллических включений (2) во вкрапленниках минералов.

Линиями соединены точки конечных членов изоморфных рядов и точки сосуществующих пар минералов в изоморфных рядах магнетит-ульвошпинель и гематит-ильменит, приведены температуры кристаллизации для этих пар по [Ghiorso, Evans, 2008]. Толстой стрелкой показано увеличение степени окисления и летучести кислорода. Выделены поля составов ильменитов с общим железом в форме Fe^{2+} и минералов изоморфного ряда ферропсевдобрукит-псевдобрукит.

Средние составы риолитов и остаточных стекол в расплавных включениях (РВ) имеют значение индекса A/CNK 1.03-1.05. Составы стекол РВ образуют тренд от агпаитовых до плюмазитовых разностей (величины A/NK и A/CNK изменяются 0.8-0.9 до 1.1-1.2). По расчетным оценкам риолитовый расплав стекловался при температуре 640-750°C. Включения с силикатно-железистыми фазами по данным катодолюминесцентного изучения находятся в ранних и промежуточных зонах роста кристаллов кварца и санидина обособленно либо совместно с РВ. Во включениях обнаружены следующие агрегаты:

рыхлое вещество, состоящее из кремнезема с небольшой примесью Al, Na, K, Cl; силикатно-железистые с большими вариациями содержаний Fe и Si; существенно железистые; слюдистые и слюдисто-силикатно-железистые. Наиболее часто среди агрегатов встречаются разности переменного состава (мас.%): 30-60 SiO₂, 10-25 Al₂O₃, 10-30 FeO, до 3 TiO₂, 1.5-4 MgO, до 3 CaO, до 3 Na₂O, до 3 K₂O, до 4 P₂O₅. В агрегатах, по-видимому, содержится до 10-15 мас.% H₂O. В некоторых включениях встречаются крупные обособления сидерофиллита, богатого F (3-10 мас.%) и Cl (0.1-3.3 мас.%).

Эволюция состава риолитового расплава при излиянии привела к снижению в нем концентрации F. Максимальное содержание F (1-1.8 мас.%) свойственно стеклам РВ, а минимальное (0.05-0.1 мас.%) – стекловатому матриксу и пробам риолитов. Дегазация расплава сопровождалась выделением обогащенного F флюида, содержащего до 1.3 мас.% F (по коэффициенту распределения $D_F^{\text{fluid/melt}}$) или 0.2-0.8 моль/дм³ HF (по составам слюд в матриксе и во включениях). В риолитовой магме существовали обособления силикатно-железистых флюидных сред. При формировании покрова риолитов такие среды находились в жидком состоянии. Захваченные в РВ и матриксе риолитов силикатно-железистые среды не могли быть истинными флюидами либо силикатными расплавами. По-видимому, такие среды образовались в процессе флюидно-магматического взаимодействия и преобразования флюидных фаз разной плотности (паровых и жидких истинных растворов), существовавших в обогащенном F расплаве. Высокие концентрации F, Cl и повышенная щелочность флюидов способствовали обогащению их кремнеземом и другими элементами. Предполагается, что в риолитовой магме при быстром изменении *P-T* условий истинные флюиды переходили в гидросиликатные вязкие жидкости или гели за счет последовательной агрегации и гелирования растворенных в них силикатных компонентов. В дисперсионном (коллоидном) состоянии такие жидкости (гели) экстрагировали Fe и многие элементы-примеси (P, Ti, Mg, Ca, РЗЭ, As, Nb, Th, V) из окружающей их риолитовой магмы. Гидросиликатные жидкости коллоидной природы, в т.ч. обогащенные железом, могут быть переходными средами между силикатным расплавом либо гидротермальным истинным флюидом.

Раздел 4 Изучение возрастных и генетических соотношений пегматитов и гранитоидов и геохимической эволюции редкометалльных гранитно-пегматитовых систем (на примере Южного-Сангиленского и Восточного Забайкалья)

4.1 На примере нескольких модельных объектов изучены возрастные и генетические взаимоотношения сподуменовых пегматитов Южно-Сангиленского пегматитового пояса (ЮСП) с гранитоидами из расположенных рядом массивов. И для тех, и для других установлен раннепалеозойский возраст (U-Pb, SHRIMP по цирконам): 489-488 млн лет для двуполевошпатовых биотитовых гранитов кыстарысского комплекса и 494-483 млн лет для ассоциированных с ними сподуменовых пегматитов. Выявлено, что формирование сподуменовых пегматитов ЮСП приходится на период мощного проявления гранитного магматизма в условиях сложного сочетания палеогеодинамических режимов (аккреционно-коллизийного и плюмового). Наряду с крайне неоднородным составом коры, это обусловило очень разнообразный состав гранитоидов близкого возраста, которые в ЮСП встречаются как автономно, так и в одних полихронных и полигенных массивах. Для решения вопросов о генетических связях редкометалльных пегматитов с гранитами и источниках рудного вещества проведен анализ состава гранитов и выделены несколько их геохимических типов (рисунок 6)

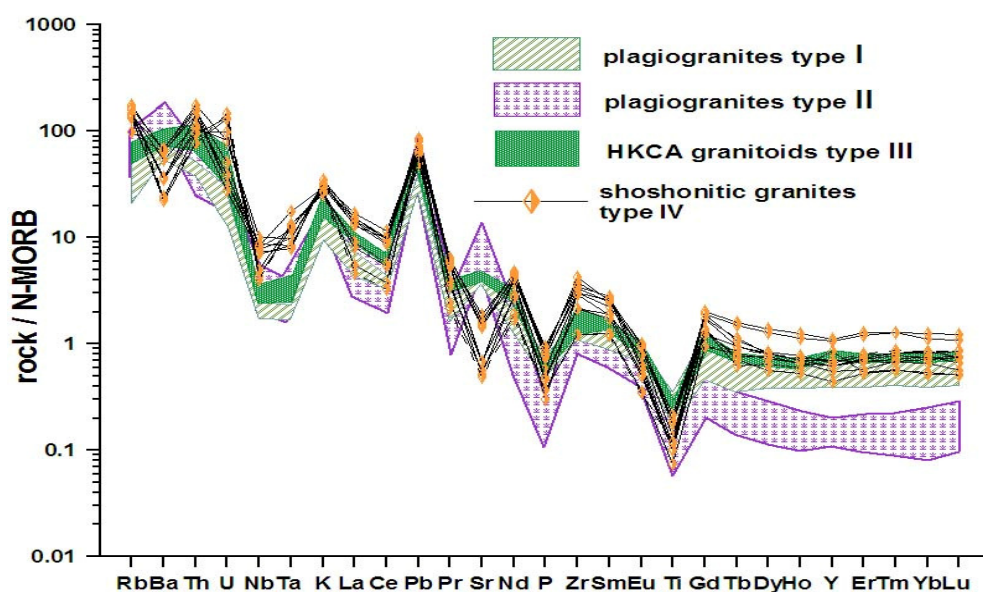


Рисунок 6.

4.2 Выполнен комплекс геолого-геохимических и изотопно-геохронологических исследований Дурулгуевской гранитно-пегматитовой системы [Загорский, 2014], расположенной в центральной части Ононского террейна (Вост. Забайкалье). Данная система объединяет Дедовогорский гранитный массив и Дурулгуевское пегматитовое поле

в его восточном экзоконтакте. Большая часть Дедовогорского массива сложена известково-щелочными порфиroidными биотитовыми гранитами. В его восточной части развиты субщелочные двуслюдяные и мусковитовые лейкограниты. Последние в дайкообразных апофизах массива постепенно переходят в гранит-пегматиты с непостоянными соотношениями гранитной и пегматитовой составляющих и далее – в пегматиты.

Дурулгуевское пегматитовое поле представлено «свитой» жильных тел. Длина поля 6 км, ширина до 1.2 км. По минеральному составу выделяются три типа пегматитов: микроклиновыи, микроклин-альбитовый и альбитовый. Последние два типа являются рудами Чалотского месторождения бериллия. Для пегматитового поля характерна зональность. По простиранию жильной серии (продольная зональность), а также вкрест ее простирания (поперечная зональность) с удалением от гранитов происходит смена гранит-пегматитов пегматитами микроклинового, микроклин-альбитового и альбитового типов. Элементы этой зональности проявляются также по простиранию отдельных жильных тел.

Ar-Ar-возраст гранитов и пегматитов укладывается в интервал 128.5-131.2 млн лет и совпадает с этапом широко проявленного в Забайкалье нижнемелового рифтогенеза, обусловившего образование многочисленных впадин, в том числе и Дурулгуевской впадины, пространственно тесно ассоциирующей с одноименной гранитно-пегматитовой системой. Проблема геодинамической позиции последней наиболее корректно решается в рамках концепции «комплекса метаморфических ядер», использованной для объяснения природы рифтогенных впадин «забайкальского» типа.

Постепенные фациальные переходы между породами в ряду «двуслюдяные, мусковитовые граниты → гранит-пегматиты → (микроклиновые → микроклин-альбитовые → альбитовые) пегматиты» в пределах, как отдельных жильных тел, так и серии жил в целом свидетельствуют об их внедрении в течение одного магматического импульса. При этом расплавы, из которых кристаллизовались гранит-пегматиты и пегматиты, представляют собой передовой фронт внедрения гетерогенной магмы.

Полученные геолого-геохимические и изотопно-геохронологические данные приводят к выводу, что совокупность гранитов Дедовогорского массива и пегматитов Дурулгуевского поля представляет собой специфический тип гранитно-пегматитовых систем, которым свойственна тесная прямая связь пегматитов с конкретными гранитными массивами при одинаковом возрасте гранитов и пегматитов. В этих случаях расплавы пегматитоносных двуслюдяных и/или мусковитовых гранитов и пегматитов, занимающие разное положение

на тренде эволюции кислой магмы в глубинных магматических очагах, совместно внедряются на более высокие уровни коры, где они кристаллизуются одновременно. При этом кристаллизация экзогранитных жильных пегматитовых тел, в связи с их относительно малыми объемами и более быстрым остыванием, может закончиться раньше, чем завершится кристаллизация пегматитоносных гранитов в пределах массива.

Основные результаты проведённого исследования

В результате геолого-петрологических и изотопно-геохимических исследований установлены коллизионный и постколлизионный этапы фанерозойского гранитоидного магматизма Западного Прибайкалья. Сравнительная характеристика раннепалеозойских гранитоидов хр. Хамар-Дабан (Солзанский массив) и о. Ольхон (шаранурский комплекс) показала, что они близки по возрасту и составу и относятся к синколлизионным образованиям, сформированным из сланцево-гнейсового субстрата хамардабанской и ольхонской метаморфических толщ. Наряду с раннепалеозойскими коллизионными гранитоидами шаранурского комплекса получены первые возрастные данные для постколлизионных образований Прибайкалья: щелочные сиениты 440 ± 5 млн лет и редкометалльные пегматоидные граниты 390 ± 5 млн лет.

По результатам изотопных исследований Sr, Nd и Pb установлено, что происхождение магм позднеплиоцен-четвертичных K-Na щелочно-базальт-трахит-комендитовых серий в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки связано с мантийными источниками вещества DMM, PREMA и EM I ($\Delta 8/4\text{Pb}=36-40$). Источник EM I представлен веществом рециклированной океанической литосферы типа Индийского MORB.

Установлены близкие возрастные и тесные генетические взаимоотношения сподуменовых пегматитов Южно-Сангиленского пегматитового пояса (ЮСП) с гранитоидами. Определен их раннепалеозойский возраст (489-488 млн лет – граниты, 494-483 млн лет - пегматиты). Выявлено, что формирование сподуменовых пегматитов ЮСП приходится на период мощного проявления гранитного магматизма в условиях сложного сочетания палеогеодинамических режимов (аккреционно-коллизионного и плюмового).

Список публикаций по теме

1. Антипин В.С., Горлачева Н.В., Макрыгина В.А. Геохимия раннепалеозойских гранитоидов Прибайкалья и их геодинамическая интерпретация (хр. Хамар-Дабан, о. Ольхон) // Геология и геофизика, 2014, №2, С. 228-243.
2. Антипин В.С., Кузьмин М.И., Печерский Д.М., Цельмович В.А., Язев С.А. Вещество метеорита «Челябинск»: результаты геохимических и термомагнитных исследований // Доклады Академии наук, 2014, Т. 458, № 1, С. 57-60.
3. Высоцкий С.В., Игнатъев А.В., Левицкий В.И., Нечаев В.П., Веливецкая Т.А., Яковенко В.В. Геохимия стабильных изотопов кислорода и водорода корундоносных пород и минералов северной Карелии как индикатор необычных условий формирования // Геохимия, 2014, № 9, С. 843-853.
4. Горохов И.М., Дубинина Е.О., Кузнецов А.Б., Левицкий В.И., Константинова Г.В., Турченко Т.Л., Левицкий И.В. Изотопный состав стронция, углерода и кислорода в магнезиальных карбонатах Онотского зеленокаменного пояса // Доклады Академии наук, 2014, Т. 455, № 3, С. 323-328.
5. Ефремов С.В. Геохимические свидетельства концентрирования урана при эволюции редкометалльных гранитоидных систем // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2014, № 1 (44), С. 6-12.
6. Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Дьячков Б.А., Анникова И.Ю., Шокальский С.П., Уваров А.Н. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика, 2014, №2, С. 303-322.
7. Золбоо Ц., Канакин С.В. Геохимия и минералогия Биту-Джидинского многофазного интрузивного массива редкометалльных Li-F гранитов (Южное Прибайкалье – Северная Монголия) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2014, № 2 (45) С. 35-41.
8. Куц Л.В., Макрыгина В.А. Сравнительная характеристика щелочных приразломных метасоматитов и гранитоидов зон региональных разломов в интервале 2.1-1.6 млрд лет в южном обрамлении Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2014, №3, С. 417-431.
9. Макрыгина В.А., Толмачева Е.В., Лепехина Е.Н. История кристаллизации палеозойских гранитоидов по цирконам (SHRIMP-II), Ольхонский регион, озеро Байкал // Геология и геофизика, 2014, № 1, С. 41-55.

10. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Силикатно-железистая жидкостная несмесимость в риолитовой магме // Доклады Академии наук, 2014, Т. 457, № 6, С. 704-709.
11. Перетяжко И.С., Савина Е.А., Карманов Н.С., Павлова Л.А. Силикатно-железистые флюидные среды в риолитовой магме: данные изучения риолитов Нилгинской депрессии в Центральной Монголии // Петрология, 2014, Т. 22, № 3, С. 287-326.
12. Флеров Г.Б., Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Колосков А.В., Философова Т.М., Щербаков Ю.Д. Пространственно-временные соотношения вулканических ассоциаций разной щелочности Белоголовского массива (Срединный хребет Камчатки). Часть 1. Геология, минералогия и петрология вулканических пород // Вулканология и сейсмология, 2014, № 3, С. 3-23.
13. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Павлова Л.А., Травин А.В., Пузанков М.Ю. Происхождение и эволюция неогеновых щелочно-базальтовых магм плато Хэвэн на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны (Северная Монголия) // Геология и геофизика, 2014, №2, С. 244-275.
14. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Карманов Н.С., Пузанков М.Ю., Цыпукова С.С. Первые данные о редкоземельных силикатах в вулканических породах Камчатки // Доклады Академии наук, 2014, Т. 459, № 5, С. 618-623.
15. Юсупов Т.С., Исупов В.П., Владимиров А.Г., **Загорский В.Е.**, Кириллова Е.А., Шумская Л.Г., Шацкая С.С., Ляхов Н.З. Исследование вещественного состава и делимости минералов техногенного сырья с целью оценки возможности получения литиевых концентратов // Физико-химические проблемы разработки полезных ископаемых, 2014, № 6, С. 144-150.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Левицкий В.И. и др. Возрастные рубежи высокотемпературного метаморфизма в кристаллических комплексах Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы: результаты U-Pb датирования единичных зерен циркона // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2007, Т. 15, № 4, С. 3-19.
2. Poller, U., Gladkochub, D., Donskaya, T. et al. Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian craton: Archean and Paleoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS // Precambrian Research, 2005, V. 136, P. 353-368.
3. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев С.А. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика, 2010, Т. 51, № 5, С. 571–588.
4. Bea F., Pereira M.D., Corretge L.G., Fershtater G.B. Differentiation of strongly peraluminous, perphosphorus granites: The Pedrobernardo pluton, central Spain // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1994. V. 58. № 12. P. 2609–2627.
5. Bea F. Crystallization dynamics of granite magma chambers in the absence of regional stress: multiphysics modeling with natural examples // Journal of Petrology, 2010, v. 51, № 7, P. 1541-1569.
6. Crawford M.B. and Windley B.F. Leucogranites of the Himalaya/Karacoram: implications for magmatic evolution within collisional belts and the study of collision-related leucogranite petrogenesis // J. Volc. Geotherm. Res., 1990, 91. 3573-3589.
7. McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical Geology, 1995, V. 120, P. 223-253.
8. Yogodzinski G.M., Kay R.W., Volynets O.N., Koloskov A.V., Kay S.M. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge // Geological Society of America Bulletin. 1995. V. 107. P. 505-519.
9. Yogodzinski G.M., Volynets O.N., Koloskov A.V., Seliverstov N.I., Matvenkov V.V. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc-alkaline series at Piip Volcano, FarWestern Aleutians // J. Petrology. 1994. V. 35. P. 163-204.

10. Yogodzinski G.M., Rubenstone J.L., Kay S.M., Kay R.W. Magmatic and tectonic development of the Western Aleutians - an oceanic arc in a strike-slip setting // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. N B7. P. 11807-11834.
11. Kelemen P.B., Yogodzinski, G.M., Scholl D.W. Along strike variation in the Aleutian Island arc: genesis of high Mg# andesite and implications for continental crust // *Inside the Subduction Factory* (ed. Eiler. J.). American Geophysical Union Monograph. 2003. V. 138. P. 1-54.
12. Jicha B.R, Singer B.S, Brophy J.G, Fournelle J.H, Johnson C.M, Beard B.L, Lapen T.J, Mahlen N.J. Variable impact of the subducted slab on Aleutian island arc magma sources: evidence from Sr, Nd, Pb, and Hf isotopes and trace element abundances // *J. Petrology*. 2004. V. 45. P.1845-1875.
13. Волынец О.Н., Карпенко С.Ф., Лэй Р.У., Горринг М. Изотопный состав позднеэоценовых К-На щелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника магм // *Геохимия*. 1997. № 10. С. 1005-1018.
14. Churikova T., Dorendorf F., Worner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *J. Petrology*. 2001. V.42. № 8. P. 1567-1593.
15. Volynets A., Churikova T., Wörner G., Gordeychik B., Layer P. Mafic Late Miocene - Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific-Aleutian junction // *Contributions to mineralogy and petrology*. 2010. V. 159. P. 659-687.
16. Ghiorso, M. S., Evans B. W. Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti oxide geothermometer and oxygen-barometer // *Am. J. Sci.*, 2008. 308, 957-1039.