

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



« 12 » 01 2016 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

№ 0350-2015-0006

(промежуточный)

Научный руководитель темы


В.С. Антипин 11.01.2016  
подпись, дата

д.г.-м.н. В.С. Антипин

Иркутск 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

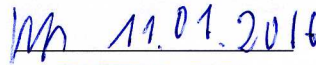
Научный руководитель темы, доктор  
геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

В.С. Антипин

Ответственные исполнители темы:

доктор геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

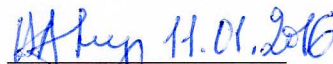
В.И. Левицкий  
(раздел 1.1)

доктор геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

В.А. Макрыгина  
(раздел 1.2)

доктор геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

В.С. Антипин,  
(раздел 1.3)

доктор геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

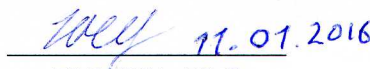
А.Б. Перепелов  
(раздел 2)

доктор геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

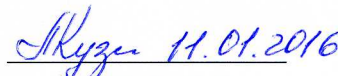
И.С. Перетяжко  
(раздел 3.1)

кандидат геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

Ю.Д. Щербаков  
(раздел 3.2)

кандидат геолого-минералогических наук

  
подпись, дата

Л.Г. Кузнецова  
(раздел 4)

## Реферат

Отчет включает 47 стр., 13 илл., 39 ист.

Ключевые слова: геохимия, мантия, земная кора, магматизм, метаморфизм, геодинамические обстановки, гранитоиды, процессы образования и эволюции кислых магм.

Цели исследования состояли в анализе индикаторных изотопно-геохимических критериев для установления коллизионной, тесно связанной с метаморфизмом, и внутриплитной геодинамической природы разновозрастных гранитоидов и выявлении среди них рудоносных геохимических типов в пределах исследуемых регионов Центральной Азии; в изучении процессов образования и роли полигенных источников адакитовых магм на границах литосферных плит в современных и палеогеодинамических обстановках; в исследовании процессов флюидно-магматической дифференциации кислых K-Na щелочных магм при формировании трахит-трахириолит-комендитовой ассоциации пород; в изучении возрастных взаимоотношений, вещественного состава и геохимии редкометалльных пегматитов различной специализации (Li, Li-Cs-Ta) Центрального Сангилен (Тыва) и пространственно ассоциированных Елашско-Тенишетского и Топорокского гранитоидных массивов Восточного Саяна.

Выявлены сходства и различия между палеопротерозойскими ультраметаморфическими и анатектическими гранитоидами, развитыми по разному субстрату в гранулитовых и зеленокаменных комплексах обрамления Сибирского кратона. Показано, что в восточной части Балтийского щита и в Присаянском краевом выступе Сибирского кратона присутствуют одинаковые типовые элементы континентальной коры с близкими петрогеохимическими характеристиками пород и металлогенетической спецификой. Установлено, что начало магматизма в Приольхонском районе Прибайкалья положили EMORB спрединговой зоны и надсубдукционные андезитоиды, вплоть до наземных излияний щелочных базальтов Ангино-Таланчанской островной дуги, а развитие сдвиговой тектоники стимулировало процессы мигматизации и выплавления синколлизионных гранитоидов шаранурского комплекса. Показано, что широкий спектр состава и геохимии внутриплитных магматических пород в пределах позднепалеозойского и раннемезозойского ареалов магматизма Прибайкалья и Монголии от щелочных, субщелочных до редкометалльных гранитоидов определяет перспективность в отношении генетической связи с ними разнообразных типов оруденения. Предложена «эклогитовая» модель формирования расплавов Mg-андезитовой и NEB-адакитовой вулканических ассоциаций южного фланга Центральной Камчатской депрессии (ЦКД). Детально изучены и описаны минералогические и фазовые особенности образцов трахибазальта, муджиерита, трахидацита, комендитов и пантеллеритов вулкана Немрут

(Восточная Турция), определены условия образования минералов, анализируются составы стекол расплавных включений в оливинах и матриксе пород. Появление остаточных комендитовых и пантеллеритовых расплавов объясняется вариациями условий кристаллизации анортоклаза (преобладающей фазы), геденбергита, фаялита, оксидов Fe и Ti в исходной трахит-комендитовой магме в зависимости от давления и содержания растворенной в расплавах воды. Установлено, что умеренно-щелочной щелочно-базальт-трахит-комендитовый вулканизм проявлен в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время после завершения в среднем плиоцене вулканизма надсубдукционного геохимического типа. Определены вещественные признаки пород щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии Камчатки. Доказано, что происхождение трахитов, комендитовых трахитов и комендитов в составе умеренно-щелочной серии обусловлено процессами кристаллизационной дифференциации трахиандезитовых и затем трахитовых магм. Источники умеренно-щелочных магм вулканического пояса Срединного хребта Камчатки имеют гетерогенное происхождение и отвечают составам деплетированной литосферной мантии «тихоокеанского» MORB типа и рециклированной литосферы с вещественными характеристиками, близкими к MORB «индийского» типа. Получены новые данные о различном возрасте редкометалльных пегматитов Южно-Сангиленского и Центрально-Сангиленского пегматитовых поясов (ранне- и позднепалеозойском, соответственно), которые свидетельствуют о минимум двукратном проявлении импульсов редкометалльного гранитного магматизма на Сангиле и существенно расширяют его временные рамки.

## Содержание

Введение	6
Раздел 1 Анализ индикаторных изотопно-геохимических критериев для установления коллизионной и внутриплитной геодинамической природы фанерозойских гранитоидов и выявление среди них рудоносных геохимических типов в пределах исследуемых регионов Центральной Азии.	8
Раздел 2 Исследование процессов образования и роли полигенных источников адакитовых магм на границах литосферных плит в современных и палеогеодинамических обстановках...	15
Раздел 3 Изучение процессов флюидно-магматической дифференциации кислых К-На щелочных магм в формировании трахит-трахириолит-комендитовой ассоциации пород.	21
Раздел 4 Изучение возрастных взаимоотношений и геохимии редкометалльных пегматитов различной специализации (Li, Li-Cs-Ta) Центрального Сангилена (Тыва).	32
Основные результаты проведенного исследования	34
Список материалов, опубликованных по теме отчета	37
Список использованных источников	43

## Введение

При выполнении научных исследований по программе проекта основное внимание уделялось анализу источников при формировании кислых магматических и метаморфических комплексов и связанных с ними процессов мантийно-корового взаимодействия на примере складчатого обрамления и выступов фундамента Сибирского кратона.

В отчетный период проводились исследования ряда гранитоидных объектов с целью установления индикаторных изотопно-геохимических критериев для определения коллизионной, тесно связанной с метаморфизмом, и внутриплитной геодинамической природы разновозрастных гранитоидов и выявления среди них рудоносных геохимических типов в пределах отдельных регионов Прибайкалья и Монголии. Наряду с изучением палеозойского и мезозойского гранитоидного магматизма Центральной Азии специальное внимание было уделено процессам образования и роли полигенных источников адакитовых магм на границах литосферных плит в современных и палеогеодинамических обстановках, что расширяет возможности для расшифровки процессов мантийно-корового взаимодействия. Одной из важных задач по проекту является исследование процессов флюидно-магматической дифференциации кислых K-Na щелочных магм и их роли в формировании трахит-трахириолит-комендитовой ассоциации пород, которые являются потенциально рудоносными образованиями. Непосредственно фундаментальное и практическое значение придавалось изучению возрастных взаимоотношений, вещественного состава и геохимии редкометалльных пегматитов различной специализации (Li, Li-Cs-Ta) Центрального Сангилен (Тыва).

Проведен анализ сходства и различий между палеопротерозойскими ультраметаморфическими и анатектическими гранитоидами, развитыми по разному субстрату в гранулитовых и зеленокаменных комплексах обрамления Сибирской платформы. При исследовании магматических комплексов в Приольхонском районе Прибайкалья установлено, что начало магматизма положили EMORB спрединговой зоны и надсубдукционные андезитойды, вплоть до наземных излияний щелочных базальтов Ангино-Таланчанской островной дуги, а развитие сдвиговой тектоники стимулировало процессы мигматизации и выплавления синколлизионных гранитоидов шаранурского комплекса. В результате сравнительного петрогеохимического анализа показано, что широкий спектр состава и геохимии пород в пределах позднепалеозойского и раннемезозойского ареалов внутриплитного магматизма Прибайкалья и Монголии от щелочных, субщелочных до редкометалльных гранитоидов определяет перспективность в отношении генетической связи с ними разнообразных типов оруденения. Впервые предложена «эклогитовая» модель формирования расплавов Mg-андезитовой и NEB-адакитовой вулканических ассоциаций южного фланга

Центральной Камчатской депрессии (ЦКД). Получены новые минералого-геохимические результаты исследований трахибазальта, муджиерита, трахидацита, комендитов и пантеллеритов вулкана Немрут (Восточная Турция), рассчитаны условия образования минералов и проанализированы составы стекол расплавных включений в оливинах и матриксе пород. Показано, что умеренно-щелочной щелочно-базальт-трахит-комендитовый вулканизм в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки проявился в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время после завершения вулканизма надсубдукционного геохимического типа. Установлено, что происхождение трахитов, комендитовых трахитов и комендитов в составе умеренно-щелочной серии обусловлено процессами кристаллизационной дифференциации трахиандезитовых и трахитовых магм. Результатами изотопно-геохимических исследований определено, что источники умеренно-щелочных магм вулканического пояса Срединного хребта Камчатки имеют гетерогенное происхождение и отвечают составам деплетированной литосферной мантии «тихоокеанского» MORB типа и рециклированной литосферы с вещественными характеристиками, близкими к MORB «индийского» типа. По результатам изучения редкометальных пегматитов Южно-Сангиленского и Центрально-Сангиленского пегматитовых поясов (ранне- и позднепалеозойском, соответственно), получены новые данные, свидетельствующие о двукратном проявлении импульсов редкометального гранитного магматизма этой провинции, что существенно расширяет возрастной интервал его развития.

## **Раздел 1 Анализ индикаторных изотопно-геохимических критериев для установления коллизионной и внутриплитной геодинамической природы фанерозойских гранитоидов и выявление среди них рудоносных геохимических типов в пределах исследуемых регионов Центральной Азии.**

### *1.1 Обоснование механизмов зарождения магм ультраметаморфических и интрузивных гранитоидов. Установление вещественной и металлогенической специфики гранитного магматизма при становлении континентальной коры в Сибирском кратоне и на Балтийском щите.*

Юго-западная часть Сибирского кратона сложена блоками (Булунский, Китойский, Иркутный, Жидойский, Бирюсинский), каждый из которых представляет полихронное структурно-тектоническое образование. Геологические процессы в блоках обусловлены проявлением мезо-неоархейской и палеопротерозойской коллизии и фиксируют периоды становления континентальной коры Сибирского кратона. В шарыжалгайском комплексе (юго-запад Сибирского кратона – Иркутный, Жидойский блоки; Колтыгейский и Голоустненский выступы) палеопротерозойские ультраметаморфические гранитоиды, в отличие от архейских, пользуются региональным распространением (Булунский, Китойский блоки). Палеопротерозойские ультраметаморфические гранитоиды развиваются на завершающих этапах гранулитового метаморфизма и представлены рядами пород: сланцы или гнейсы – плагиомигматиты – калишпатовые мигматиты – калишпатовые теневые мигматиты – автохтонные и аллохтонные гранитоиды. Последние три разновидности являются конечными продуктами ультраметаморфических преобразований разного субстрата и отражают процессы формирования и перемещения гранитных магм от мест своего зарождения. Наиболее распространенными субстратами в шарыжалгайском комплексе являются метавулканические двупироксеновые плагиогнейсы и плагиосланцы, метатерригенные биотитовые и биотит-гранатовые гнейсы. В меньшей степени ультраметаморфические граниты развиты по редким в структуре высокоглиноземистым гнейсам, силлиманитовым и магнетитовым кварцитам, что подтверждается появлением гранатовых, кордиеритовых, силлиманитовых, магнетитовых, корундовых гранитоидов и гранодиоритов. При формировании гранитов по всем видам субстрата фиксируются отношения  $n_{\text{гранита}}/n_{\text{субстрата}}$  больше 1 (Рисунок 1.1.1), указывающие на привнос из внешних источников в алюмосиликатные породы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  (кроме Би-Ги гнейсов), Rb, Ba, Sr, Pb и вынос Fe, Mn, Ca, Cr (кроме Fe кварцитов), F, Zn, V, Ni, Co. Содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в субстрате и гранитоидах находятся на одном уровне, но возрастают при формировании по Сил и Мгт кварцитам. Кроме ультраметаморфических гранитоидов в шарыжалгайском комплексе присутствуют анатектические граниты, сформированные только



по обогащенным кварцем биотит-гранатовым гнейсам, которые и определяют вещественную их специфику. В породах китойского комплекса, тоналит-трондьемитовых гранитогнейсах фундамента Онотского зеленокаменного пояса и в пределах самого пояса состав ультраметаморфических гранитоидов также определяется субстратом, но в палеопротерозое они развиты ограничено и представлены аллохтонными фациями гранитоидов натрового ряда – тоналитами, диоритами, трондьемитами.

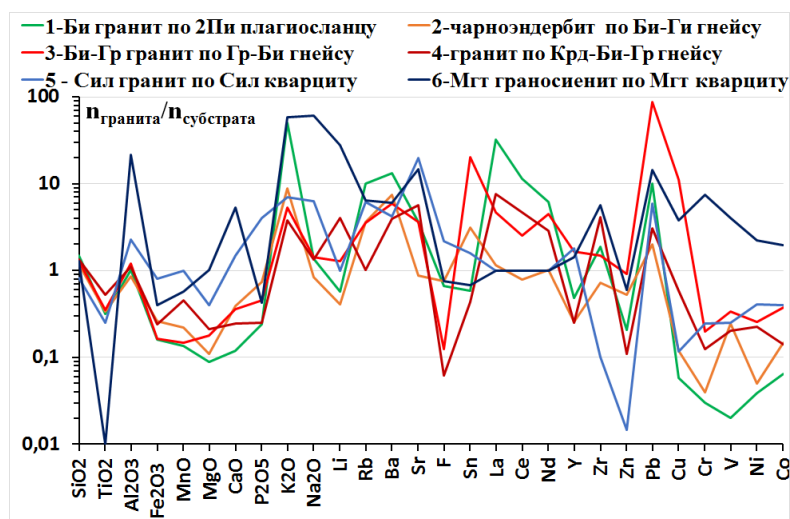


Рисунок 1.1.1 График отношений содержаний петрогенных и редких элементов в гранитоидах и исходных для них породах субстрата (метавулканические: 1-двупироксеновые сланцы, 2-биотит-гиперстеновые гнейсы; метаосадочные: 3-биотит-гранатовые гнейсы, 4-кордиерит-биотит-гранатовые гнейсы, 5-силлиманитовые кварциты, 6-магнетитовые кварциты)

В Присяянском краевом выступе Сибирского кратона распространены раннепалеопротерозойские позднеколлизионные посткинematические гранитоиды саянского, шумихинского, приморского, гуникского, игнокского комплексов (Карта магматических формаций, 1988), образующих массивы удлиненной формы. Их массивы приурочены к краевым зонам разломов между Иркутным, Жидойским, Китойским, Булунским, Бирюсинским блоками. Вне зон разломов и в центральных частях блоков они редки. Установлено, что в палеопротерозое главным источником магм для интрузивных посткинematических гранитоидов были граниты ультраметаморфической природы, формировавшиеся в синколлизионной обстановке по механизму корового-мантийного взаимодействия флюидов с породами главным образом шарыжалгайского, вероятно китойского гранулитовых и возможно гранито-гнейсов онотского и таргазойского комплексов. За счет двух последних формировались интрузивные и ультраметаморфические гранитоиды в мезо-и неогархее. В шарыжалгайском комплексе главным субстратом для них были двупироксеновые кристаллосланцы (метабазальтовые вулканиты). Палеопротерозойские рубежи становления ультраметаморфических гранитоидов в шарыжалгайском (1.851-1.876 млрд лет) и китойском комплексах (1.852-1.872 млрд лет)

совпадают с периодами формирования интрузивных гранитоидов саянского, шумихинского, приморского и игнокского комплексов – 1.85-1.87 млрд лет (Сальникова и др., 2007; Poller et al., 2005).

На Рисунке 1.1.2 четко проявлена симбатность линий для средневзвешенного состава ультраметаморфических гранитоидов (тенивые калишпатовые мигматиты, автохтонные и аллохтонные граниты) шарыжалгайского комплекса с постколлизийными гранитоидами шумихинского и саянского комплексов, в меньшей степени приморского. Наблюдаемые различия гранитоидов разных комплексов обусловлены локальными особенностями субстрата в блоках краевого выступа и проявлением эманационной дифференциации только в постколлизийных гранитоидах. Для коллизийных гранитоидов однозначна роль и степени перемещенности магм от мест их генерации. Менее перемещенными являются гранитоиды шумихинского комплекса, а более перемещенными – саянского и особенно приморского. Это подтверждается и их минеральным составом – в шумихинском, залегающем в районе п. Тальяны, как и во вмещающих сланцах шарыжалгайского комплекса отмечается гиперстен, а в саянском и приморском – он редок, его обычно нет. Традиционно в литературе постколлизийные посткинematические гранитоиды приморского, саянского и шумихинского комплексов относят к гранитам рапакиви. Судя по характеру распределения петрогенных и редких элементов (Рисунок 1.1.2, линии 1-3,5) с классическими рапакиви Салминского массива (среднее по 3 фазам), они не имеют ничего близкого. К тому же они формировались в континентальной обстановке и значительно моложе сибирских – 1.445 млрд лет.

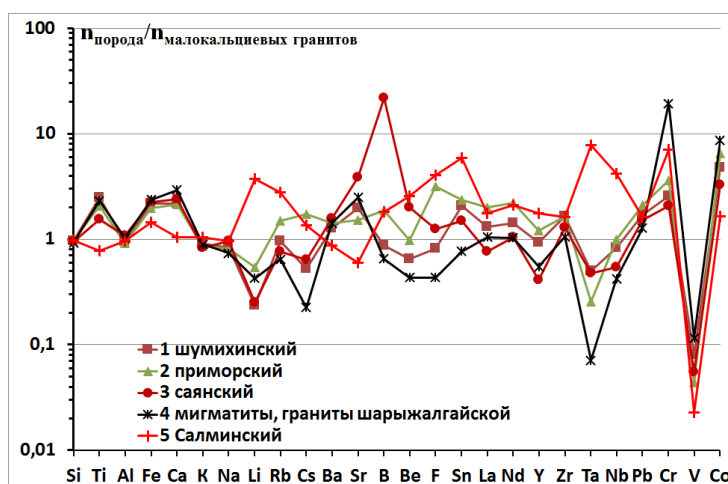


Рисунок 1.1.2 График нормирования содержаний петрогенных и редких элементов к кларкам малокальциевых гранитов.

В Восточной части Балтийского щита и в Присяянском краевом выступе Сибирского кратона присутствуют одинаковые типовые элементы континентальной коры: гранито-гнейсы, сложенные тоналит-трондъемит-гранодиоритовыми ассоциациями, зеленокаменные и

гранулитовые пояса, гранитные комплексы, гранито-гнейсовые ареалы. В обоих регионах выявлена близкая последовательность проявления раннедокембрийских процессов. На Балтийском щите по сравнению Присаянским выступом большее распространение имеют архейские гранито-гнейсы ТТГА, зеленокаменные пояса с коматиитами, габбро-анортозиты, породы гранулитовой и амфиболитовой фации повышенных давлений, меньшее - гранулитовые комплексы. На Балтийском щите рост континентальной коры происходил, главным образом, в мезоархее, то в Присаянском выступе - в раннем палеопротерозое. Для одних и тех же временных периодов фиксируются близкие петрогеохимические характеристики: палеоархейских гранито-гнейсов ТТГА Карельской гранит-зеленокаменной области и Присаянского краевого выступа; неоархейских ультраметаморфических гранитоидов кольского и китойского метаморфических комплексов, развитых по метамагматическим и метаосадочным породам; палеопротерозойских постколлизийных гранитоидов в восточной части Балтийского щита и в юго-западной части Сибирского кратона. Это позволяет считать, что они являлись частями единого древнего континента и формировались по одному механизму в архее и палеопротерозое.

### ***1.2 Восстановление условий седиментации всех разновидностей пород Приольхонья и острова Ольхон, их метаморфизма, метасоматоза, с выявлением причин разнообразия магматизма при последовательной смене этапов тектогенеза.***

Осадочный материал ольхонской серии накапливался в слабосоленом бассейне (низкие В, Li) окраинного моря с восстановительным режимом (высокие С, Sr, Cr, V, Ag, Mo). На склонах сопряженной островной дуги в окислительном режиме осадки ангинской толщи обогащались Mn, Ba, P. Граувакково-карбонатно-туфовый материал осадков без пелитов и модельные возрасты  $T(DM)=1239-1550$  Ма свидетельствуют о преобладании незрелого материала разрушенных островных дуг. На Рисунке 1.2.1 метаосадки образуют почти полный осадочный цикл без метапелитов.

Начало магматизма положили EMORB спрединговой зоны и надсубдукционные андезитоида, вплоть до наземных излияний щелочных базальтов Ангино-Таланчанской островной дуги, о чем свидетельствуют сопряженные с ними коры выветривания (Рисунок 1.2.1). Развитие сдвиговой тектоники стимулировало процессы мигматизации и выплавления синколлизийных гранитоидов шаранурского комплекса. Близко во времени по границам сдвигов проникают основные расплавы, достигающие приповерхностных уровней (зоны закалки Тажеранского и анортоклазы Будунского массивов, минглинговые дайки) и образующие габброидные массивы. Это обеспечивает взаимодействие кислых и основных

расплавов с образованием щелочных метасоматитов и сиенитов с отсутствием мантийных меток.

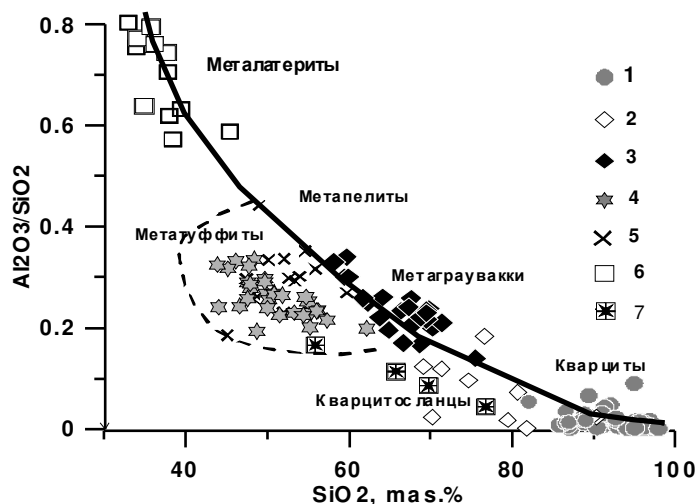


Рисунок 1.2.1 Метаосадки ольхонской и ангинской толщ.

1 – кварциты и 2 - кварцитосланцы ольхонской и ангинской толщ; 3 – гранат-биотитовые и биотитовые гнейсы; 4 – диопсидовые и диопсид-скаполитовые сланцы (туффиты) ольхонской и 5 – ангинской толщ; 6 – непереотложенные коры выветривания по щелочным базальтам островной палеодуги; 7 – кордиерит-силлиманитовые кварцито-сланцы с примесью туффового материала.

Щелочные сиениты обеднены по сравнению с мантийными щелочными породами всеми редкими элементами при основном и карбонатном субстрате (Тажеранский массив) и обогащены Zr, Nb, REE (Будун) при богатом этими элементами гнейсовом субстрате (Шаранурский гранитогнейсовый купол) (Рисунок 1.2.2). Именно таким механизмом образования объясняется тесная связь щелочных сиенитов и метасоматитов с массивами основных пород.

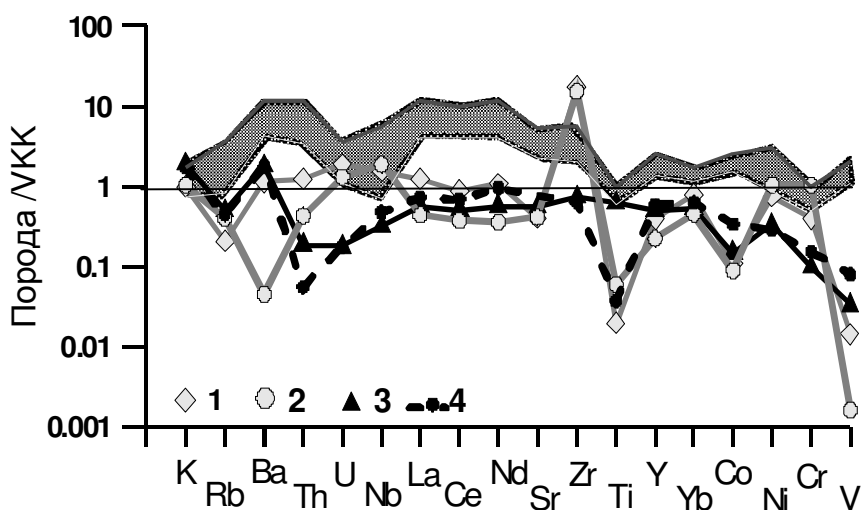


Рисунок 1.2.2

1-2 – щелочные сиениты массива Будун, о.Ольхон; 3-4 – калиевые щелочные и нефелиновые сиениты массива Тажеран. Поле – мантийные щелочные сиениты.

### *1.3 Установление природы происхождения гранитоидов (коллизионное или постколлизионное) различных геохимических типов на примере модельных объектов Прибайкалья и Монголии.*

Установлено вещественное сходство раннепалеозойских гранитоидов шаранурского и хамардабанского комплексов Прибайкалья с коллизионными гранитоидами Гималаев и Центральной Испании, что подтверждает их единую геодинамическую природу. Главные типы раннепалеозойских гранитоидов являются высококалийевыми и высокоглиноземистыми породами, что характерно для коллизионных гранитоидов S-типа [Crawford, Windley, 1990; Bea, 1994, 2010]. Гранитоиды Прибайкалья (о. Ольхон. хр. Хамар-Дабан), представленные автохтонными и аллохтонными фациями, находятся в тесной пространственной ассоциации с гнейсами, мигматитами и плагиогранитами, обычно приурочены к гранитогнейсовым куполам и процессы магматической дифференциации в них почти не проявлены. Они характеризуются повышенными, относительно среднего состава континентальной коры, содержаниями R, Rb, Th и иногда обогащены Pb, Zr, Cr, Ni. Обычно они имеют пониженные содержания тяжелых редкоземельных элементов относительно легких лантаноидов. Продолжительность формирования гранитоидов Солзанского массива и шаранурского комплекса составляет 26-28 млн лет, что можно расценивать как индикаторную особенность развития коллизионного гранитоидного магматизма.

Синколлизионные гранитоиды Ольхонского региона приурочены к выходам гранат-биотитовых и биотитовых гнейсов ольхонской серии, остальная часть которой приходится на мраморы, кварциты, пара- и ортосланцы. По составу гнейсы реставрируются как метаграувакки. Возраст области сноса  $T(DM)_{Nd}=1549$  млн лет и отсутствие метапелитов свидетельствуют, что гнейсы – продукт разрушения островных дуг, а не кратона. Обрамляющие гнейсы пласты амфиболитов по геохимическим параметрам реставрируются как EMORB спрединговых зон задугового бассейна. Перекрывающие туфогенно-кварцито-карбонатные сланцы, обогащенные C, Ag, Mo, Zn, Sr, но бедные B и Li, характеризуют восстановительный режим мелководного бассейна седиментации. Именно в пачках гнейсов развивается интенсивная мигматизация, которая приводит к росту гранитогнейсовых куполов и последующему анатексису. Выплавки раннепалеозойских гранитоидов наследуют геохимические особенности вмещающих пластин и взаимодействуют с близко одновременно (475-480 млн лет) внедряющимися габброидными расплавами с появлением на контактах щелочных метасоматитов и щелочных пород. Метаосадки ангинской толщи обогащены Mn, Ba, P, что характеризует их отложение на хорошо аэрируемых склонах зрелой островной палеодуги, названной нами Ангино-Таланчанской, сопряженной в пространстве и времени с Ольхонским задуговым бассейном.

Выявленные и исследованные в Прибайкалье редкометалльные пегматоидные граниты с Ве-минерализацией являются среднепалеозойскими постколлизионными образованиями ( $390\pm 5$  млн

лет) и не должны относиться к коллизионному шаранурскому комплексу. Позднепалеозойский и раннемезозойский ареалы магматизма, проявленные в регионах Центральной Азии (Прибайкалье, Монголия), характеризуются развитием на их периферии субщелочных гранитоидов, плюмазитовых и редкометалльных гранитов интрузивно-субвулканических комплексов, которые фиксируют переход к внутриплитному магматизму с проявлением разнообразных геохимических типов пород. Геохимическая эволюция внутриплитного магматизма выражается в процессах дифференциации многофазных интрузий гранитоидов, ростом концентраций F, Li, Rb, Cs, Sn, W, Be, Ta и Pb и уменьшением содержаний Ba, Sr, Zn, Zr, Th и U (Рисунок 1.3.1). Эта же закономерность характерна для субвулканических пород, являющихся вещественными аналогами гранитоидов, что подчеркивает генетическое единство исследованных интрузивно-дайковых серий магматических пород (Уругудей-Утуликская в Прибайкалье, Абдар-Хошутулинская в Монголии). Геохимические особенности редкометалльных гранитов являются свидетельством важной роли процессов магматической и флюидно-магматической дифференциации при образовании внутриплитных вулcano-плутонических комплексов.

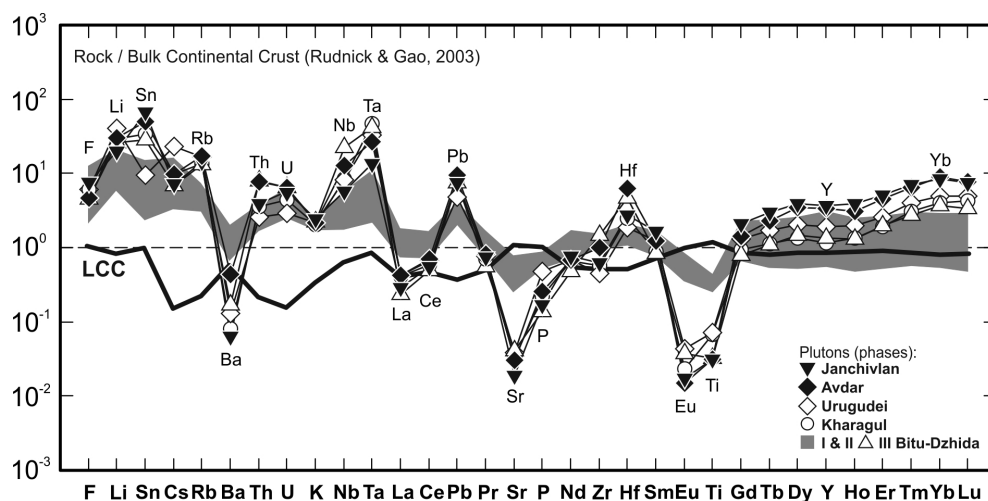


Рисунок 1.3.1 Распределение редких элементов в редкометалльных гранитах Прибайкалья и Монголии. Содержания элементов (г/т) нормированы по среднему составу континентальной коры (Rudnick, Gao, 2003).

В отличие от коллизионного магматизма, связанного своим происхождением с гранито-гнейсовыми куполами в Прибайкалье, петрогенезис внутриплитных гранитоидов не зависит от состава и возраста вмещающих пород. Разнообразие геохимических типов этих гранитоидов, связанных как с коровыми, так и с мантийными источниками, а также с процессами мантийно-корового взаимодействия, может быть обусловлено влиянием плюма на геологическую историю внутриплитного магматизма. Широкий спектр состава и геохимии пород в пределах позднепалеозойского и раннемезозойского ареалов магматизма Прибайкалья и Монголии от щелочных, субщелочных до редкометалльных гранитоидов определяет перспективность в отношении генетической связи с ними разнообразных типов оруденения.

## **Раздел 2 Исследование процессов образования и роли полигенных источников адакитовых магм на границах литосферных плит в современных и палеогеодинамических обстановках.**

### *2.1 Определение условий образования примитивных адакитовых магм на основе перидотитовых, амфиболитовых, пироксенитовых и эклогитовых моделей (Камчатка, Восточный Саян).*

#### **2.1.1 Камчатка**

В островодужной системе Камчатки развитие примитивного магнезиального андезитового и NEB магматизма впервые установлено на Корякском перешейке (Керезжинский et al., 1989; 1995; 1996), а Mg#-андезитового в Северном сегменте Центральной Камчатской депрессии и структуре Алеутско- Камчатского сочленения (Вольнец и др., 1997-2000; Yagodinski et al., 2000, 2001; Portnyagin et al., 2007) (Рисунок 2.1.1.1). В структуре раннеэоценового вулканогенно-осадочного фундамента и среди плиоцен-четвертичных комплексов Восточно-Камчатского вулканического пояса породы, близкие по составам к адакитам, установлены К. Ноернле с соавторами (Noernle et al., 2009), а также Г.П. Авдейко для района вулкана Бакенинг на основе анализа данных по составу дацитов и риодацитов (Dorendorf et al., 2000; Авдейко и др., 2011).

В ходе проведенных исследований на Западной и Южной Камчатке, а также в южном сегменте Центральной Камчатской депрессии обнаружены ранее неизвестные неоген-четвертичные ареалы развития Mg#-андезитового и NEB-адакитового вулканизма (Рисунок 2.1.1.1). К ним относятся ассоциация низкокремнистых адакитов, Mg#-андезитов и андезибазальтов, NEB, NEBA вулканического массива в междуречье рек Озерная и Правая Камчатка (Перепелов, 2014), ассоциация Mg#-андезитов, высококремнистых адакитов, базальтов NEB и HNB типов вулканического массива горы Оленья и горы Большая Едома на южных флангах Центральной Камчатской Депрессии (Перепелов, 2014), четвертичные базальты NEB типа Южной Камчатки (вулканический конус ручья Медвежий и лавовый фундамент Саванской ареальной зоны), экструзии высококальциевых Mg#-андезитов района горы Тюрпора на Западной Камчатке.

Обнаружение новых ареалов магнезиального андезитового, адакитового и NEB вулканизма требует критического анализа или дополнений к ранее разработанным моделям геодинамического развития Камчатки в связи с особыми условиями формирования таких магм.

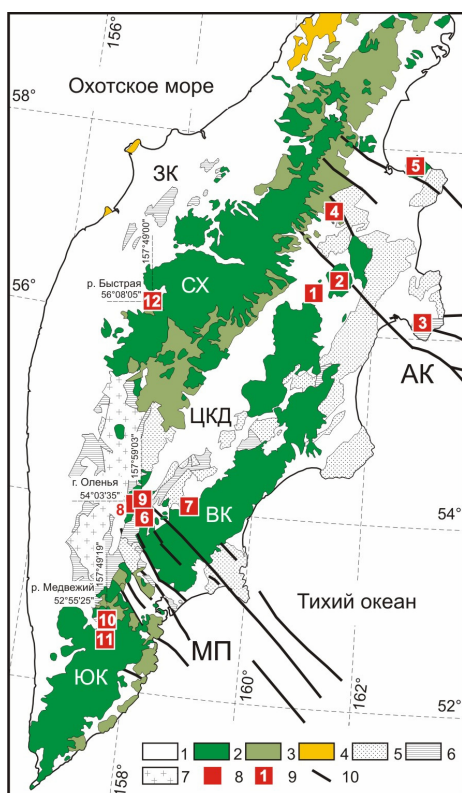


Рисунок 2.1.1.1 Районы развития Mg#-андезит-NEB-адакитового магматизма Камчатки на схеме кайнозойских вулканических поясов.

1 – вулканогенно-осадочные и терригенно-осадочные отложения; 2 – плиоцен-четвертичные вулканические пояса Южной Камчатки (ЮК), Восточной Камчатки (ВК) и Срединного хребта (СХ); 3 – миоценовые вулканогенные толщи; 4 – палеоценовый вулканический пояс Западной Камчатки (ЗК); 5 – палеогеновые вулканогенно-осадочные комплексы; 6 – позднемеловые вулканогенно-осадочные комплексы; 7 - палеозой-мезозойские гранитно-метаморфические комплексы; 8, 9 – районы развития Mg#-андезит-NEB-адакитового магматизма Камчатки; 9 – разломные дислокации; 10 – разломные зоны с проявлениями умеренно-щелочных магм. Поперечные разломные структуры: МП – Малко-Петропавловская, АК – Алеутско-Камчатская. Районы развития (9): по литературным данным – 1 – вулканы Заречный, Харчинский (Mg#-андезиты), 2 – вулкан Шивелуч (Mg#-андезиты), 3 – полуостров Камчатский Мыс (Mg#-андезиты, адакиты), 4 – Шишейский комплекс (Mg#-андезиты), 5 – вулкан Начикинский (NEB), 6 – вулкан Бакенинг (адакиты, NEB), 7 – Валагинский хребет (адакиты, NEB); по данным автора – 8 – междуречье рек Озерная Камчатка и Правая Камчатка (Mg#-андезиты, NEB, адакиты), 9 – г. Оленья (Mg#-андезиты, NEB, адакиты), 10 – руч. Медвежий (NEB), 11 – Саванская ареальная зона (NEB), 12 – район г. Тюрпора (Mg#-андезиты).

*Средне-позднеплиоценовый магнезиальный андезитовый и NEB-адакитовый вулканизм Малко-Петропавловской зоны поперечных разломных дислокаций.* Вулканический массив высоты 646 м в междуречье рек Озерная Камчатка и Правая Камчатка (Рисунок 2.1.1.1) представляет собой эродированный щитовой вулкан размером ~ 4 на 6 км. Проведенное инструментальное  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование обогащенных Nb базальтоидов и адакитов вулканической постройки показало их средне-позднеплиоценовый возраст в диапазоне ~3.4-2.0 млн лет назад. Время лавовых извержений базальтоидов NEB типа определено в  $3.08 \pm 0.15$  млн лет, Amph-содержащих адакитов ~3.13 млн лет, Pl-Cpx адакитов ~2.72, высококремнистых адакитов г. Оленьей – 3.4 млн лет, а высоко Nb базальтов (HNB) ~2 млн лет.



В строении вулканических массивов участвуют магнезиальные андезито-базальты (Mg# АВ) и андезиты (Mg# А), обогащенные Nb базальты и андезито-базальты (NEB, NEBA) и различные типы адакитов. Минеральные парагенезисы пород вулкана существенно различаются. Базальтоиды NEB типа содержат многочисленные вкрапленники ОI и редкие фенокристаллы Сrx и Pl. Для Mg# андезибазальтов свойственно широкое развитие вкрапленников ОI и в меньшей степени фенокристаллов Сrx, при этом вкрапленники Pl в них отсутствуют. Mg-А вулкана отличаются развитием среди вкрапленников исключительно Орх, которые в ядрах кристаллов имеют бронзитовый состав, а в краевых зонах представлены гиперстенами (En<sub>66-64</sub>). Во вкрапленниках бронзитов обнаружены редкие включения кремнекислого стекла (SiO<sub>2</sub> 73.5-75.2 мас.%) с «трондjemитовым» и калиевым химизмом. Среди адакитов по минеральному составу выделяются две группы пород. Первые из них обладают специфическим ОI-Сrx-Amph парагенезисом вкрапленников. Amph представлены резорбированными магнезиальными гастингситами (Mg# 75-70). Другая группа адакитов характеризуется широким развитием вкрапленников Pl и Сrx. Высококремнистые адакиты (дациты и риодациты) характеризуются Amph-Pl-Сrx-Орх парагенезисом вкрапленников. Все породы Mg#-андезит-NEB-адакитовой ассоциации отличаются высокой магнезиальностью (Mg# 70-58) и являются примитивными по химизму (Kelemen et al., 2003). Они имеют высоконатровый состав (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O=0.28-0.45, Na<sub>2</sub>O=3.8-4.7 мас.%), обогащены Ni, Cr и в отличие от IAB Камчатки имеют, в целом, повышенные концентрации HFSE (Nb, Ta) и более низкие содержания HREE. Базальтоиды NEB типа (SiO<sub>2</sub>≤53 мас.%) классифицированы согласно работе (Sajona et al., 1996). Относительно IAB они имеют высокие содержания TiO<sub>2</sub> (1.45-1.34 мас.%), Nb (12-14 ppm) и низкие значения La<sub>PM</sub>/Nb<sub>PM</sub>=1.3-1.1. Классификация Mg#-андезибазальтов (54<SiO<sub>2</sub><57 мас.%, Mg# 70-67), Mg#-андезитов (58<SiO<sub>2</sub><60 мас.%, Mg# 70-69) и низкокремнистых адакитов (55≤SiO<sub>2</sub><59 мас.%, Mg# 64-60) основана на положениях (Defant, Drummond, 1990; Kelemen et al., 2003). В отличие от Mg# пород среднего состава (La/Yb=8-12, Sr/Y=32-52, Sr=480-650 ppm), адакиты выделяются в связи с их обогащенностью LREE и Sr (La/Yb=18-24, Sr/Y=66-89, Sr=890-1260 ppm) (Рисунок 2.1.1.2). На диаграммах распределения магматофильных элементов для пород исследуемой ассоциации (Рисунок 2.1.1.3) наблюдаются как признаки принадлежности их составов к IAB геохимическому типу, так и отличительные особенности. С IAB типами базальтоидов Камчатки их сближает наличие на графиках минимумов Th, Nb, Ta, Zr, Hf и Y, а также небольших максимумов Ba, K, Pb и Sr. При этом для исследуемых пород наблюдаются более высокие содержания HFSE (Nb, Ta), Th, U и LREE в сравнении с IAB. Основные по составу породы NEB типа и Mg андезибазальты и андезиты NEB-адакитовой ассоциации имеют низкие величины индикаторных отношений CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.38-0.52) и Ni/MgO (23-30).

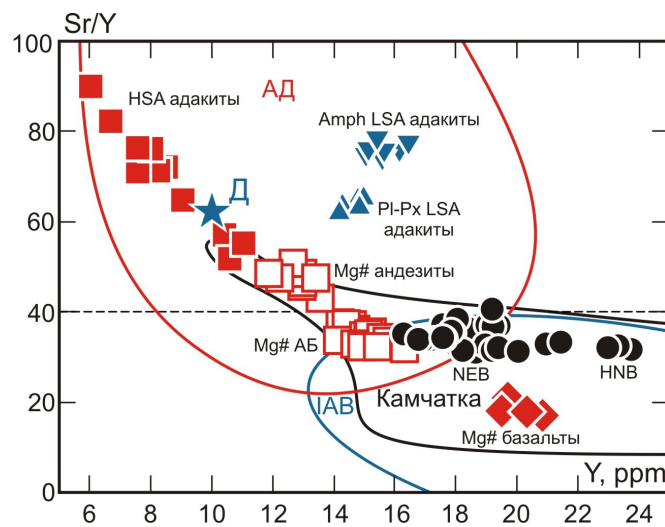


Рисунок 2.1.1.2 Составы пород NEB-адакитовой и Mg# андезитовой ассоциаций южного фланга ЦКД на диаграмме Sr/Y-Y (г/г).

Поля составов пород по (Defant, Drummond, 1990): IAB – островодужные базальты и андезиты, АД – адакиты. Камчатка – поле составов базальтов и андезитов IAB геохимического типа плиоцен-четвертичных вулканических поясов островодужной системы Камчатки (n=1033). Д – «примитивный» дацитовый компонент по (Portnyagin et al., 2007). HNB – высоко Nb базальты, NEB – обогащенные Nb базальты, Mg# АБ – магнезиальные андезибазальты, LSA адакиты – низкокремнистые адакиты, HSA адакиты – высококремнистые адакиты г. Оленьей.

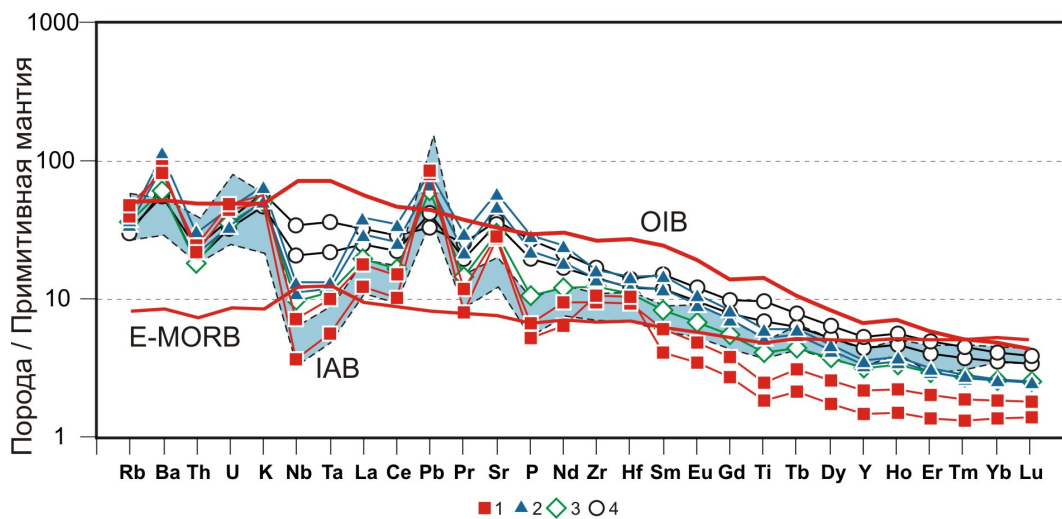


Рисунок 2.1.1.3 Распределение магматофильных элементов для пород Mg# андезит-NEB-адакитовой ассоциации южного сегмента Центральной Камчатской депрессии.

Содержания элементов нормированы на средний состав MORB по (Sun, McDonough, 1989). Поля составов вулканических пород IAB геохимического типа Камчатки. Точки и графики составов пород: 1 – высококремнистые адакиты (дациты, риодациты), 2 – низкокремнистые адакиты, 3 – Mg# андезиты, 4 – обогащенные Nb базальты (NEB, HNB).

Результаты исследований магнезиальных андезитов Камчатки приводят ряд авторов к выводам, что в их происхождении могли принимать участие примитивные высококремнистые магмы дацитового состава (Portnyagin et al., 2007). Образование примитивных кислых расплавов рассматривается в рамках адакитового магмогенеза и связывается с плавлением в водных условиях эклогитизированных фрагментов субдуцируемой океанической плиты или пироксенитов. Петрологическое значение таких моделей трудно переоценить, так как позволяет

предполагать возможность генерации первичных кислых магм в современных обстановках конвергенции литосферных плит. Предполагается, что взаимодействие примитивных дацитовых магм с перидотитами надсубдукционной мантии могло являться необходимым условием при формировании Mg#-андезитов.

Примитивные дациты и риодациты, или высококремнистые адациты (HSA), установлены среди вулканических комплексов южного фланга Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) в строении вулканических массивов гор Оленья, Большая Едома и западных отрогов Валагинского хребта. Породы такого состава слагают здесь крупные экструзии, дайки и реже лавовые покровы среднеплиоценового возраста в ассоциации с Mg# андезитами и базальтами NEB типа. Ареал их распространения протягивается в ЮЗ направлении вплоть до вулкана Бакенинг. Среди них выделяются Pl-Amph-Orx и Pl-Orx-Crx разности пород, Амфиболы представлены магнезиальными роговыми обманками (Mg# 65-75), а Orx бронзитом и гиперстеном (En<sub>65-82</sub>). В виде включений в темноцветных минералах обнаруживается стекло трондъемитового состава, а в основной массе пород присутствуют выделения Qtz. Особенности распределения в породах петрогенных и редких элементов заключаются в их повышенной магнезиальности (Mg# 64-52), высокой натровой щелочности, обеднении REE, Y и в повышенных концентрациях Sr (Sr/Y=50-90).

Условия развития NEB-адакитового вулканизма в южной части ЦКД могут быть рассмотрены с позиций существующих моделей формирования примитивных плиоцен-четвертичных магм на северном фланге ЦКД и зоне Алеутско-Камчатского сочленения (Portnyagin et al., 2007). Развитие Малко-Петропавловской поперечной зоны, связанное с нарушением сплошности субдуцируемой океанической литосферы, также могло послужить причиной взаимодействия астеносферного вещества с эклогитизированным слэбом и привести к формированию NEB и высокомагнезиальных андезитоидных магм на южном фланге ЦКД. Для принятия этой модели следует снять ряд ограничений. Альтернативной моделью может служить предположение о вовлечении в процессы плавления вещества океанической плиты Кула, деструкция, а также погружение фрагментов которой после завершения субдукции способны объяснить характер локализации NEB и магнезиального андезитоидного магматизма.

Предложена «эклогитовая» модель формирования расплавов Mg# андезитовой и NEB-адакитовой вулканических ассоциаций южного фланга ЦКД. Погружение в позднем миоцене или раннем-среднем плиоцене деструктивных фрагментов океанической литосферной плиты в область астеносферной мантии в структуре Малко-Петропавловской зоны поперечных разломных дислокаций вызывает последовательные фазовые преобразования вещества плиты. В процессе погружения литосферного фрагмента происходит амфиболизация океанической коры, породы которой преобразуются в Amph габбро с возникновением кварцсодержащих

прожилков, затем при погружении в область более высоких давлений происходит формирование Grt содержащих эклогитизированных габбро, в них формируется прожилкование с коэситом, цоизитом и рутилом, и в завершение процесса образуются безводные эклогиты, что влечет за собой прекращение процессов плавообразования. На первом этапе преобразований вблизи границы фазовых переходов в условиях последовательного снижения степени плавления формируются магмы Mg# андезибазальтов, Mg# андезитов и высококремнистых адакитов, на заключительных этапах фазовых трансформаций происходит образование NEB, HNB и низкокремнистых адакитов. Вовлечение в процессы маглообразования цоизита и рутила и формирование гранатового рестита определяют повышенные содержания в расплавах Ti, HFSE, Sr и других LILE компонентов в низкокремнистых адакитах. При этом какие-либо данные о существенном участии в формировании магнезиальных и адакитовых магм вещества астеносферной мантии или метасоматизированной мантии надсубдукционного клина не обнаружены. Положения данной модели базируются не только на оригинальных материалах по составам и минералогии пород, но и на многочисленных работах по эксгумированным эклогитам палеосубдукционных обстановок – Альпы (Dale et al., 2008).

### **Раздел 3 Изучение процессов флюидно-магматической дифференциации кислых К- Na щелочных магм в формировании трахит-трахириолит-комендитовой ассоциации пород**

*3.1 Установление условий образования, роли процессов дифференциации и смешения магм в формировании трахибазальт-трахит-трахириолит-комендитовых ассоциаций в обстановках континентальной коллизии и на конвергентных границах литосферных плит (Камчатка, Центральная Азия)*

#### **3.1.1 Обстановки континентальной коллизии (Восточная Турция)**

Детально описаны минералогические и фазовые особенности образцов трахибазальта, муджиерита, трахидацита и комендитов вулкана Немрут (Восточная Турция), рассчитаны условия образования минералов, анализируются составы стекол расплавных включений в оливинах и матриксе пород. На основе анализа минералого-геохимических особенностей пород и масс-балансовых расчетов предлагаются наиболее вероятные модели образования муджиеритовой и бенморейтовой магм.

Определены параметры кристаллизации оливина, полевых шпатов, оксидов Fe и Ti (титаномагнетита, ильменита). Титаномагнетит и ильменит образовались при следующих условиях: муджиерит (960-922°C,  $\Delta \lg f_{O_2}$  NNO от -1.54 до -0.73), бенморейт (940-890°C,  $\Delta \lg f_{O_2}$  NNO от -1.46 до -0.79), трахидацит (870-845°C,  $\Delta \lg f_{O_2}$  NNO от -2.11 до -1.82), комендит (705-667°C,  $\Delta \lg f_{O_2}$  NNO от -2.48 до -2.18). Температуры кристаллизации полевых шпатов: трахибазальт (1150-950°C), бенморейт (920-800°C), комендит (760-720°C). По расчетным оценкам захват расплавных включений в оливинах ( $Fe_{0.75-0.40}$ ) из трахибазальта, муджиерита, бенморейта и трахидацита происходил в интервале температур 1270-860°C.

За исключением трахибазальта, в каждом образце обнаружены частично растворенные фенокристы и/или ксенокристы минералов, что свидетельствует о неравновесных условиях их образования. Из масс-балансовых расчетов состава пород (модели FC, AFC, FCA) и минералогических наблюдений следует, что магмы или расплавы муджиеритового и бенморейтового составов могли формироваться как в результате фракционной кристаллизации щелочно-базальтового расплава (массовая доля расплава,  $F=0.63-0.79$ ), который ассимилировал небольшое количество корового вещества, так и в процессе смешивания трахибазальтовой ( $F=0.16-0.45$ ) и трахидацитовой ( $F=0.45-0.58$ ) магм при наличии избыточных для этой модели фаз оливина, плагиоклаза, магнетита и апатита (в сумме 10-24 мас.%) (Рисунок 3.1.1.1).

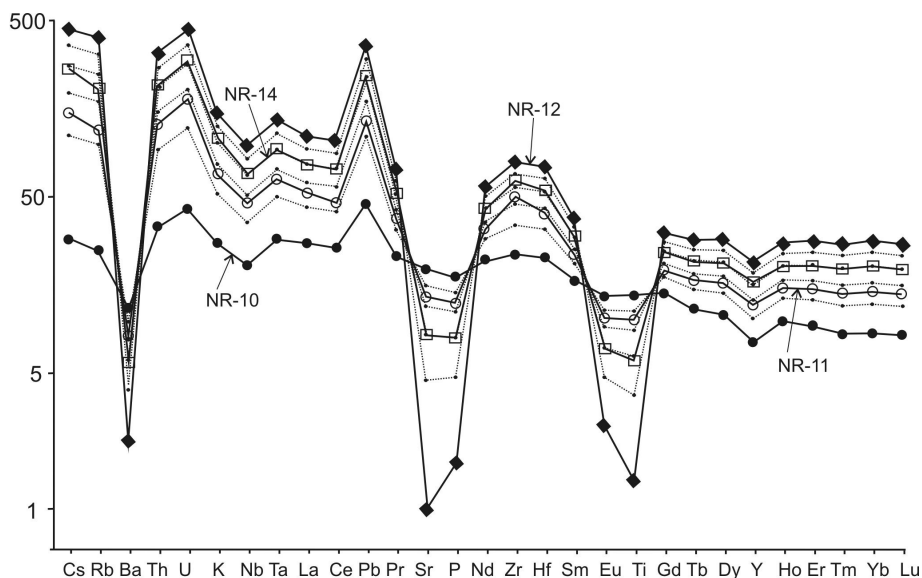


Рисунок 3.1.1.1. Модель смешения щелочно-базальтового и низкожелезистого комендитового расплава вулкана Немрут.

Составы проб NR-10 и NR-12. Нормированные к значениям в примитивной мантии по (McDonough, Sun, 1995) спектры распределения элементов для бенморейта (NR-11) и гибридной породы (NR-14) трахидацитового состава наилучшим образом описываются этой моделью. Пунктирные линии с точками – нормированные спектры смешанных расплавов с шагом 20 мас. %.

Докальдерные комендиты обогащены железом (4-5 мас. % FeO общ.) и примесными элементами по сравнению с посткальдерными комендитами, содержащими 2-3 мас. % FeO<sub>общ.</sub> Из анализа геохимических данных и масс-балансовых расчетов следует, что посткальдерная бенморейтовая магма не могла образоваться при фракционировании щелочно-базальтового расплава. Для такой магмы и сформированных из нее бенморейтов характерны аномально низкие концентрации Ba (46-54 ppm) и Sr (203-269 ppm), которые невозможно получить в моделях фракционной кристаллизации щелочно-базальтового расплава с участием ассимилированного корового вещества. Составы посткальдерных бенморейтов и гибридных пород трахидацитового состава, имеющих признаки магматического смешения (наличие ксенокристов бенморейтовой и комендитовой магм, стекла переменного состава), наилучшим образом рассчитываются как смеси щелочно-базальтового ( $F=0.7-0.5$ ) и низкожелезистого комендитового ( $F=0.3-0.5$ ) расплавов.

Очаги низкожелезистого комендитового расплава появились на посткальдерной стадии в процессе фракционной кристаллизации щелочных магм (трахитовой и высокожелезистой комендитовой). По-видимому, многократные извержения низкожелезистых комендитов в кальдере и «рифтовой» зоне вулкана Немрут были вызваны внедрениями бенморейтовой магмы в такие очаги.

Изучены минералого-геохимические и фазовые особенности комендитов и пантеллеритов вулкана Немрут (Восточная Турция), получены оценки условий образования минералов, анализируются составы стекол матрикса пород и расплавных включений из фенокристов

анортоклаза, фаялита, геденбергита. Методом лазерной абляции определены составы стекол матрикса и фенокристов минералов, рассчитаны коэффициенты распределения R, B, Li, Rb, Cs, Ba, Sr, Zr, Hf, Ta, Nb, Sc, V, Cr, Ni, Cu, Pb, Th, U, Y, PЗЭ между фазами и стеклом (Рисунок 3.1.1.2). На основе масс-балансового моделирования составов комендитов и пантеллеритов, экспериментальных данных и результатов изучения расплавных включений анализируются модели образования, процессы накопления и кристаллизации минералов в комендитовых и пантеллеритовых магмах, а также взаимосвязи между трахит-комендитовыми, комендитовыми и пантеллеритовыми расплавами.

Появление остаточных комендитовых и пантеллеритовых расплавов объясняется вариациями условий кристаллизации анортоклаза (преобладающей фазы), геденбергита, фаялита, оксидов Fe и Ti в исходной трахит-комендитовой магме в зависимости от давления и содержания растворенной в расплавах воды. Акцессорные фазы (PЗЭ-, Sr-содержащий фтор-апатит и циркон), вероятно, участвовали во фракционировании расплавов. Условия образования фенокристов геденбергита, фаялита, ильменита по данным QUILF-расчетов (минимальные параметры без кварца в расплавах): высокожелезистый комендит (3 кбар, 763°C,  $\Delta FMQ$  -1.27), пантеллерит (3.3-3.8 кбар, 715°C,  $\Delta FMQ$  -1.08), низкожелезистые комендиты (2.3 кбар, 748°C,  $\Delta FMQ$  -1.16).

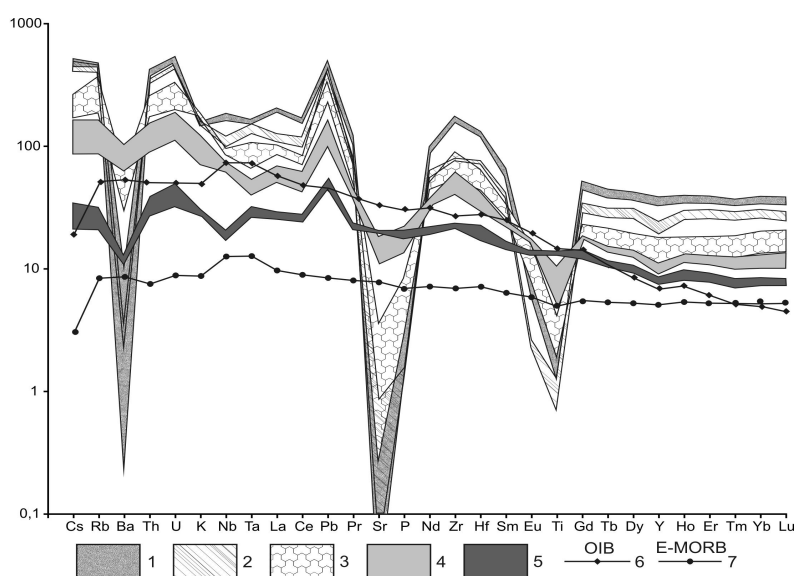


Рисунок 3.1.1.2. Мультиэлементная диаграмма нормированных к примитивной мантии по (McDonough, Sun, 1995) значений для пород вулкана Немрут.

1 – пантеллериты, высокожелезистые комендиты; 2 – низкожелезистые комендиты в кальдере и “рифтовой” зоне; 3 – трахиты и комендитовые трахиты; 4 – мудиериты; 5 – трахибазальты “рифтовой” зоны; 6, 7 – базальты OIB и E-MORB.

Равновесная кристаллизация фенокристов анортоклаза в комендитовых расплавах происходила при температуре около 750°C. По данным изучения стекол расплавных включений комендитовые и пантеллеритовые расплавы содержали 1-3 мас.% H<sub>2</sub>O. Из анализа

литературных источников и оценок условий образования магм вулкана Немрут следует, что локальные камеры с комендитовыми и пантеллеритовыми ненасыщенными водой расплавами могут существовать в центрах щелочного вулканизма на глубинах от 5 до 10-15 км в интервале температур  $<750^{\circ}\text{C}$  при летучести кислорода ниже буфера FMQ и литостатическом давлении 1-4 кбар.

### **3.1.2 Обстановки конвергентных границ литосферных плит (Камчатка)**

Возможность участия мантийного диапира (плюма) в магмогенезе была рассмотрена в обстановке активной континентальной окраины на примере трахибазальт-трахит-комендитового (ТТК) магматизма, проявленного в позднекайнозойском вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки. Развитие ТТК магматизма в Срединном хребте в поздеплиоцен-раннеплейстоценовое время ограничено структурами двух крупных вулканических центров, это вулканический центр Белоголовский и окружающие его фрагменты эродированных вулканических сооружений на северо-западном фланге Ичинской группы вулканов, а также вулканический центр Большой-Кекунайский в тыловой западной зоне пояса (Рисунок 3.1.2.1).

На основе анализа изотопных данных следует ряд выводов о роли тех или иных источников вещества в формировании умеренно-щелочных магм ТТК серии Срединного хребта Камчатки. Во-первых, следует отметить, что изотопные источники К-Na умеренно-щелочных магм имеют признаки гетерогенности. С одной стороны, это деплетированный мантийный источник, сходный по характеристикам с источником «командорского» MORB типа, а с другой – относительно обогащенный источник, имеющий характеристики, близкие к «индийскому» MORB. Третьим вероятным источником вещества могла быть надсубдукционная мантия, метасоматизированная в процессе погружения океанической литосферы в зоне миоцен-плиоценовой субдукции относительно «древней» океанической плиты Кула или Изагаги.

Роль последнего источника представляется возможной, но не определяющей. Изотопный источник надсубдукционной метасоматизированной мантии, наряду с флюидным компонентом, является главным для надсубдукционного этапа формирования магм в вулканическом поясе Срединного хребта на позднемиоцен-среднеплиоценовом этапе его развития.



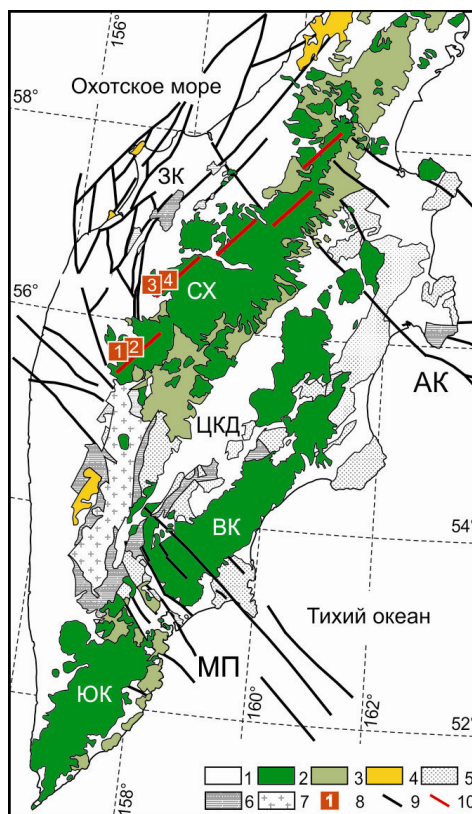


Рисунок 3.1.2.1 Районы развития умеренно-щелочного ТТК вулканизма на схеме вулканических поясов Камчатки.

1 – вулканогенно-осадочные и терригенно-осадочные отложения; 2 – плиоцен-четвертичные вулканические пояса Южной Камчатки (ЮК), Восточной Камчатки (ВК) и Срединного хребта (СХ); 3 – миоценовые вулканогенные толщи; 4 – палеоценовый вулканический пояс Западной Камчатки (ЗК); 5 – палеогеновые вулканогенно-осадочные комплексы; 6 – позднемиоценовые вулканогенно-осадочные комплексы; 7 – палеозой-мезозойские гранитно-метаморфические комплексы; 8 – вулканические центры Срединного хребта Камчатки (1-2 – Белоголовский вулканический центр, 1 – вулкан Белоголовский, 2 – вулкан Носичан, 3-4 – вулканический центр Большой-Кекукнайский, 3 – вулкан Большой, 4 – вулкан Кекукнайский и ареальная зона Дола Геологов); 9 – разломные дислокации; 10 – разломные зоны с проявлениями умеренно-щелочных магм. Поперечные разломные структуры: МП – Малко-Петропавловская, АК – Алеутско-Камчатская.

Наиболее радиогенными изотопными составами пород по величинам  $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  обладают обогащенные LILE и HFSE элементами и наиболее щелочные породы позднеплиоцен-раннеплейстоценовой ТТК серии Срединного хребта, в составе которой присутствуют трахибазальты, трахиандезиты, трахиты и комендиты (Рисунок 3.1.2.2). На следующем плейстоцен-голоценовом этапе в структурах Белоголовского и Большой-Кекукнайского массивов проявляются трахибазальты и субщелочные ОI-базальты К-На типа, среди которых присутствуют как обогащенные, так и умеренно-обогащенные LILE и HFSE породы, нередко обладающие геохимическими характеристиками, переходными к IAB типу магм. Большинство базальтоидов этого этапа имеют отчетливо менее радиогенные изотопные составы и наиболее близки к источнику MORB типа.

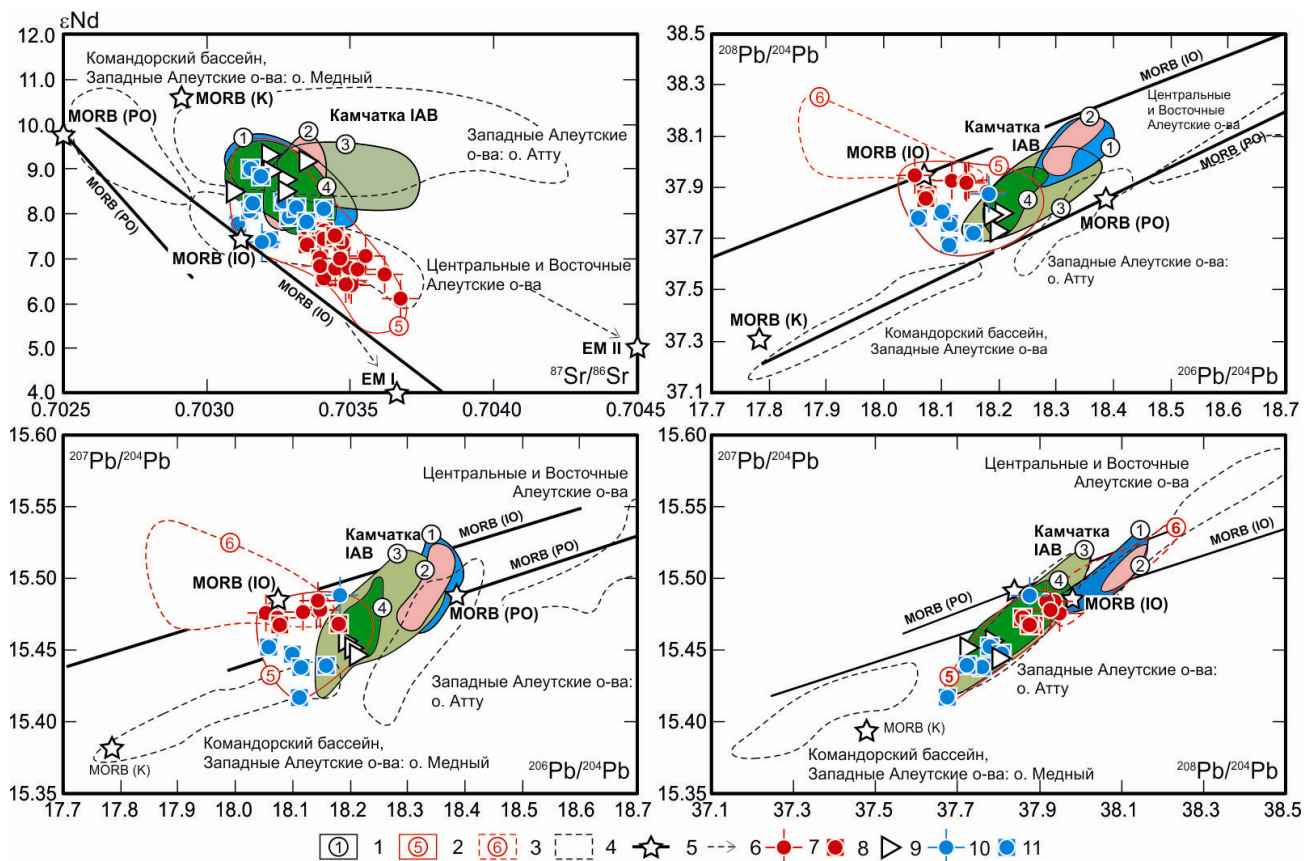


Рисунок 3.1.2.2 Изотопные характеристики пород надсубдукционных вулканических поясов Камчатки и вулканических центров Белоголовский и Большой-Кекукнайский.

1 – поля изотопных характеристик базальтов и андезитов надсубдукционного геохимического типа вулканических поясов Камчатки (цифры в кружках составы пород вулканических поясов: 1 – Восточной Камчатки, 2 – Южной Камчатки, 3 – Центральной Камчатской депрессии, 4 – Срединного хребта); 2 – поле изотопных характеристик пород умеренно-щелочной серии и субщелочных К-На базальтоидов Срединного хребта Камчатки; 3 – поле составов субщелочных и щелочных К-На базальтоидов Восточной Камчатки; 4 – поля составов базальтов и андезитов Командорского бассейна и Западных Алеутских островов, Западных Алеутских островов (о. Атту), Центральных и Восточных Алеутских островов, п – количество проб; 5 – тренды эволюции и средние значения изотопных характеристик для индийского MORB-(IO) и тихоокеанского MORB (PO), MORB(K) – базальтов Командорского бассейна, EM I и EM II – обогащенной и мантии; 6 – направления к меткам изотопных резервуаров; 7-8 – точки составов пород умеренно-щелочных серий вулканического центра Белоголовский (7 – позднеплиоцен-раннеплейстоценовой дифференцированной серии центра и 8 – ранне-среднеплейстоценовых щитовых вулканов); 9-11 – точки составов пород вулканического центра Большой-Кекукнайский (9 – высококалийевой нормально-щелочной серии вулкана Кекукнайский, 10 – умеренно-щелочной серии вулкана Большой, 11 – зоны ареального вулканизма Дола Геологов). Использованы данные [Щербаков 2015].

Можно предположить, что роль обогащенного изотопного источника типа «индийского» MORB была максимальной при образовании исходных магм ТТК серии, тогда как при формировании пород более позднего этапа более значительную роль приобретает деплетированный источник, сходный с «командорским» MORB. Природа деплетированного источника умеренно-щелочных магм Срединного хребта в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время выглядит вполне однозначной. Этим источником должно было быть вещество деплетированной океанической литосферы MORB типа, близкой по составу к MORB Тихого океана, а точнее к «командорскому» MORB. Сравнение полей изотопных меток

Sr-Nd-Pb для пород надсубдукционного геохимического типа различных вулканических поясов Камчатки показывает следующее. Изотопные составы пород наиболее молодых позднеплиоцен-четвертичных и активных до настоящего времени вулканических поясов Южной и Восточной Камчатки демонстрируют тренды эволюции между областью изотопных составов MORB Тихого океана и осадочным компонентом. В сравнении с ними породы IAB типа тылового и более раннего по времени начала формирования позднемиоцен-среднеплиоценового вулканического пояса Срединного хребта и отдельные комплексы вулканических пород Центральной Камчатской депрессии обладают менее радиогенными составами Pb. Таким образом, деплетированный источник IAB магм указанных структур должен связываться с другой более ранней субдуцированной литосферой MORB типа, каковым на современном уровне исследований необходимо считать источник, сходный по изотопному составу с океанической литосферой Командорского бассейна. Влияние этого источника, судя по изотопным данным, отражается и в формировании вулканических пород, близких к Командорскому бассейну океанических поднятий Мейдзи и Детройт. Согласно геодинамическим построениям для северо-западного сегмента Тихого океана [Yin, 2010; Safonova, Santosh, 2014] таким источником должна была быть деплетированная литосферная мантия субдуцируемой в миоцен-плиоценовое время под структуру активной окраины Камчатки океанической литосферной плиты Изагаги и, возможно, фрагмента плиты Кула. В настоящее время фрагмент плиты Изагаги-Кула сохранился, вероятно, в составе литосферы Командорского бассейна и в составе литосферы под океаническими поднятиями Мейдзи и Детройт.

Природа обогащенного источника для магм ТТК серии Срединного хребта может быть объяснена с позиций рециклинга древнего литосферного вещества океанической, но возможно и нижнекоровой природы, с формированием диапира (плюма) в астеносферной мантии под Западным сегментом структуры Камчатки. Основанием для такого вывода служат, в частности, изотопные особенности умеренно-щелочных пород исследованных вулканических массивов (трахибазальты, трахиандезибазальты, трахиты и комендиты). Сближение их изотопных характеристик  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  с полем изотопных составов Индийского MORB может говорить о близкой природе их источников вещества. Как известно, наиболее широко признанной моделью формирования, свойственной базальтам MORB Индийского океана изотопной аномалии DUPAL, является модель с участием в магмообразовании обогащенного источника в виде древнего рециклированного литосферного материала [Meuzen et al., 2005]. Участие источника типа «индийского» MORB для тыловой зоны Курильской островной дуги было показано в работе [Мартынов и др., 2012]. В этом исследовании установлено, что обогащенный мантийный источник, роль которого зафиксирована в образовании умеренно-

щелочных магм Срединного хребта, обладает относительно низкими величинами  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  отношений в сравнении с IAB Камчатки и в увеличении значений  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  изотопных отношений в прямой зависимости от степени обогащения пород LILE и HFSE компонентами. В этом же направлении происходит снижение значений изотопных отношений  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и рост величин  $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$  (Рисунок 3.1.2.2). Таким образом, следует считать, что обогащенным источником магм ТТК серии может быть древнее рециклированное литосферное вещество океанической или нижнекоровой континентальной природы. При этом роль источника вещества типа ЕМ1 или О1В в формировании умеренно-щелочных магм тылового вулканического пояса Срединного хребта, в отличие от предложенных ранее моделей [Churikova et al., 2001; Volynets et al., 2010], не может быть применена к исследуемым комплексам пород.

Согласно томографическим данным [Gorbatov et al., 2000] под тыловой областью Срединного хребта и далее в западном направлении существуют низкоскоростные аномальные зоны мантии, которые идентифицируются как субдуцированные литосферные плиты, их фрагменты или объемы вещества, происхождение которых не определено. Согласно представленной здесь модели и новым представлениям о времени развития субдукционных процессов под вулканическим поясом Срединного хребта [Перепелов, 2014], в позднемиоцен-среднеплиоценовое время в восток-северо-восточном направлении происходила субдукция океанической плиты Изагаги или фрагмента плиты Кула. В этот период в Срединном хребте проявлялся активный вулканизм, связанный с образованием комплексов пород надсубдукционного или «островодужного» геохимического типа нормально-щелочного, низкокалиевого, умеренно-калиевого и высококалиевого рядов (базальты, андезиты, дациты, риолиты). Среди исследованных в IAB комплексов к ним относятся вулканы Носичан и Кекукнайский.

Начиная со среднего плиоцена, вследствие приращения к континентальной окраине Камчатки Кроноцкой внутриокеанической островной дуги, активное развитие процессов субдукции прекращается, а надсубдукционный вулканизм затухает. Источниками надсубдукционных магм в этот период, согласно общим представлениям об условиях магмообразования в зонах перехода «океан-континент», было вещество деплетированной литосферной мантии MORB надсубдукционного мантийного клина и метасоматический агент или водосодержащий флюид, отделяющийся от субдуцированной океанической плиты в результате процессов ее преобразования и дегидратации. Участие этих источников вещества подтверждается изотопно-геохимическими индикаторными признаками составов позднемиоцен-среднеплиоценовых пород IAB типа Срединного хребта Камчатки. В позднем плиоцене в тыловой зоне вулканического пояса Срединного хребта Камчатки начинается этап

развития умеренно-щелочного вулканизма, несущего «внутриплитные» геохимические признаки. Начало вулканизма такого типа может быть связано с геодинамической перестройкой и вовлечением в процессы магмообразования других или дополнительных источников вещества.

Предполагается, что одна из наиболее крупных низкоскоростных аномалий в мантии под Срединным хребтом Камчатки и к западу от него представляет собой погруженный в астеносферную мантию фрагмент относительно древней континентальной или океанической литосферы, вероятно, блока нижней коры или субдуцированной океанической плиты. Вероятность таких событий следует из длительной мезозой-раннекайнозойской истории развития зон конвергенции литосферных плит в Северо-Западном секторе Тихого океана. В позднемиоценовое время при движении литосферных плит в северо-восточном направлении произошло приращение Охотоморской плиты к Азиатскому материку и завершилось формирование надсубдукционного Охотско-Чукотского вулканического пояса. Затем, в раннепалеогеновое время к Охотоморской плите была приращена Западно-Камчатская микроплита, что повлекло за собой завершение развития Западно-Камчатского надсубдукционного вулканического пояса [Богданов, Чехович, 2002, 2004]. Все эти события сопровождались не только процессами субдукции океанической литосферы, но и процессами аккреционной тектоники и могли служить причинами расслоения, отрыва и погружения в мантию литосферных блоков. В результате таких процессов астеносферная мантия между областью позднекайнозойских субдукционных обстановок и окраиной Азии могла стать гетерогенной по строению и составу. Погружение древних литосферных блоков или фрагментов плит в астеносферу влечет за собой их высокобарические метаморфические преобразования с перекристаллизацией и формированием эклогитов и пироксенитов с зонами (жилами), обогащенными многими литофильными элементами [Dale et al., 2008, 2012].

Обогащенное вещество такого типа, достигающее в результате преобразований в астеносферной мантии «плавучести», способно подниматься к области литосферной мантии, формировать диапир (плюм) и служить одним из источников расплавов при магмообразовании на определенных этапах развития зон конвергенции литосферных плит. Протекание таких глубинных геодинамических процессов может являться причиной формирования умеренно-щелочных магм Срединного хребта Камчатки на этапе прекращения здесь процессов позднемиоцен-среднеплиоценовой субдукции, так как требует достижения условий прямого астеносферно-литосферного взаимодействия.

Другим источником вещества умеренно-щелочных магм Срединного хребта, судя по полученным изотопно-геохимическим характеристикам пород, должен быть деплетированный мантийный субстрат, сходный по своим характеристикам с литосферной мантией MORB типа.

Происхождение такого источника в зонах конвергенции и субдукции литосферных плит следует связывать с веществом надсубдукционной литосферной мантии или субдуцированной океанической плиты.

Как показано на Рисунке 3.1.2.3, достижение условий астеносферно-литосферного взаимодействия, которое обусловило участие в магмообразовании гетерогенных по составам источников вещества и формирование умеренно-щелочных магм Срединного хребта, может быть объяснено в рамках нескольких гипотез. Первая из них предполагает (Рисунок 3.1.2.3Б), что в результате прекращения субдукции становится возможным подъем астеносферного материала в область надсубдукционного мантийного клина вдоль границы палеослэба в результате затухания процессов сжатия. Другая гипотеза (Рисунок 3.1.2.3В) основана на предположении об образовании в структуре субдуцированной океанической плиты под Срединным хребтом зоны деструкции или разрыва (slab-window) и поступление в эту зону деструкции вещества астеносферного диапира. Наконец третье предположение (Рисунок 3.1.2.3Г) связано с возможностью поступления рециклированного вещества в виде астеносферного плюма в область между внешней деструктивной границей палеослэба и современной субдуцируемой океанической литосферной плитой. Принимая во внимание отчетливый структурно-тектонический контроль районов проявления умеренно-щелочных магм в тыловой зоне вулканического пояса Срединного хребта в северо-восточном направлении по его простирацию, представляется, что такой контроль был определен формированием зоны деструкции палеослэба, то есть в рамках второй из представленных гипотез.

Образованные в результате плавления вещества астеносферного диапира и литосферы MORB типа в области их взаимодействия умеренно-щелочные магмы отличаются в сравнении с магмами IAB типа более высокими концентрациями ряда LILE и HFSE компонентов, а также особенностями их изотопного состава. При этом в зависимости от роли того или иного источника вещества в процессах магмообразования, наблюдаются значительные вариации указанных параметров. Предполагается, что при формировании позднеплиоцен-раннеплейстоценовых умеренно-щелочных магм, которые явились родоначальными для образования трахибазальт-трахиандезит-трахит-комендитового ряда пород, роль обогащенного рециклированного источника была определяющей.

Следует отметить, что этап формирования умеренно-щелочных магм в Срединном хребте предварялся формированием позднеплиоценовых вулканогенных толщ с породами, близкими к IAB типу, но уже несущими признаки участия в их образовании обогащенного источника. Кроме того, вслед за завершением вулканической деятельности с проявлениями умеренно-щелочных магм происходило образование раннеплейстоценовых вулканогенных комплексов пород, также сходных с IAB, но отличающихся от них повышенными концентрациями ряда

HFSE компонентов. Эти данные свидетельствуют об определяющем участии в магмообразовании в эти периоды, помимо обогащенного источника, вещества метасоматизированной надсубдукционной мантии и последовательном усилении, и ослаблении процессов астеносферно-литосферного взаимодействия в области надсубдукционной мантии, в зоне деструкции субдуцируемой океанической плиты и проникновения в эту область вещества астеносферного диапира (плюма).

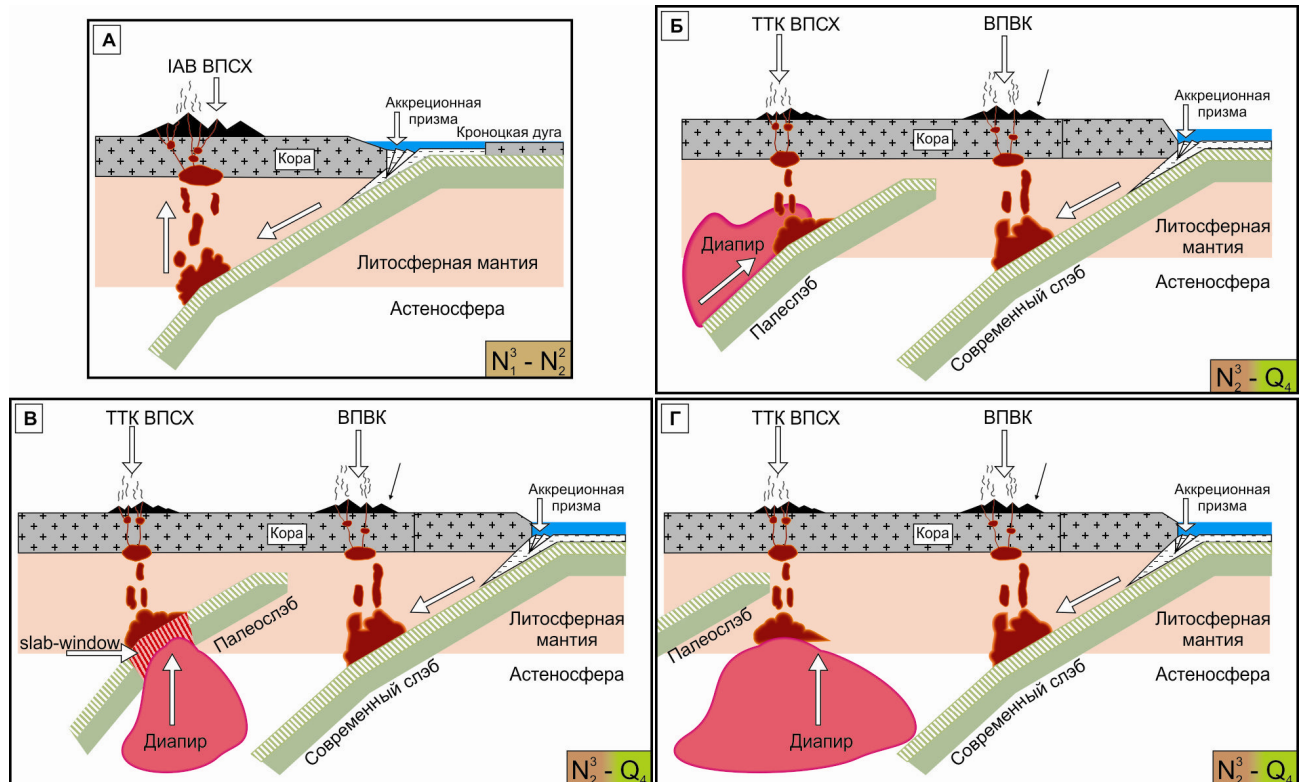


Рисунок 3.1.2.3 Схема геодинамического развития Камчатки в обстановке конвергенции литосферных плит и астеносферно-литосферного взаимодействия для позднеплиоцен-плейстоцен-голоценового этапа. Сокращения на графике: ТТК ВПСХ – район развития трахибазальт-базальт-трахит-комендитового вулканизма (ТТК) в вулканическом поясе Срединного хребта (ВПСХ); ВПКВ – вулканический пояс Восточной Камчатки.



## **Раздел 4 Изучение возрастных взаимоотношений и геохимии редкометалльных пегматитов различной специализации (Li, Li-Cs-Ta) Центрального Сангилен (Тыва). Исследование возраста и вещественного состава пространственно ассоциированных Елашско-Тенишетского и Топорокского гранитоидных массивов, Восточный Саян**

### *4.1 Обоснование модели петрогенезиса редкометалльных пегматитов различной специализации в Сольбельдерском поле (Сангилен). Установление генетических типов и возраста гранитных массивов, с которыми пространственно ассоциируют поля редкометалльных пегматитов.*

Сольбельдерское поле редкометалльных пегматитов, вытянутое более, чем на 20 км. вдоль субмеридиональной зоны разломов принадлежит к Центрально-Сангиленскому пегматитовому поясу (ЦСП). Установлено, что пегматиты этого поля отличаются от пегматитов более протяженного Южно-Сангиленского пояса гораздо более разнообразной минерализацией и относятся как к чисто литиевому, так и к комплексному литий-цезий-танталовому геохимическим типам. Выявлено, что редкометалльная специализация пегматитов меняется с юго-востока на северо-запад от Li к комплексной Li-Cs-Ta, что связано с эволюцией очага редкометалльных расплавов.

В результате изучения флюидных включений в минералах сподуменовых пегматитов установлено, что они кристаллизовались из расплавов, недосыщенных в отношении В, F, H<sub>2</sub>O, в присутствии C-O-H-N флюидов. При формировании пегматитов Сольбельдерского поля повышенное флюидное давление (до 5.8 кбар при T = 600 °C) усиливало активность CO<sub>2</sub>, преобладавшей в газовой смеси, способствуя явлениям контаминации и более интенсивной кристаллизационной дифференциации пегматитовых расплавов. Это обусловило зональное внутреннее строение и более разнообразный минеральный состав пегматитовых жил Сольбельдерского поля.

Изучение геологических взаимоотношений и вещественного состава магматических пород Сольбельдерского пегматитового поля с целью установить генетические связи редкометалльных пегматитов показало, что в районе выделяются: 1) полихронные Быстринско-Каргинский и Дахунурский плутоны, сложенные ранними плагиогранитоидами и более поздними натро-калиевыми слюдяными гранитами и лейкогранитами, 2) два небольших массива щелочных пород (малиньитов, миаскитов, мариуполитов), 3) малые тела щелочных габбро, сиенитов и пегматоидных лейкогранитов, а также сподуменосодержащие пегматитовые жилы и дайки.



Изотопное датирование U-Pb методом по цирконам (SHRIMP-II) в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) позволило установить следующую последовательность их формирования (млн лет): гнейсовидные биотитовые плагиограниты главной фазы Быстринско-Каргинского массива – 492, биотитовые K-Na лейкограниты фазы дополнительных интрузий – 470, щелочные сиениты (мариуполиты) небольшого массива в левом борту р. Сольбельдер – 378, сподуменовые пегматиты проявлений Кара-Адыр и Шук-Бюль 292 и 272, соответственно, щелочные габброиды (малиньиты) Караадырского массива – 182. Таким образом, редкометалльные пегматиты Сольбельдерского поля оказались значительно моложе гранитов Быстринско-Каргинского массива (492-470 млн лет), а также K-Na биотитовых гранитов кыстарысского комплекса (489 млн лет) и сподуменовых пегматитов Южно-Сангиленского пегматитового пояса (490-483 млн лет), с которыми они всегда считались одновозрастными и генетически едиными.

Новые данные о различном возрасте редкометалльных пегматитов Южно-Сангиленского и Центрально-Сангиленского пегматитовых поясов (ранне- и позднепалеозойском, соответственно) свидетельствуют о минимум двукратном проявлении импульсов редкометалльного гранитного магматизма на Сангилене и существенно расширяют его временные рамки. При этом возникают вопросы об источниках рудного вещества и связи пегматитов с гранитами, поскольку если раннепалеозойский импульс (490-480 млн лет) совпал с мощным проявлением гранитного магматизма на Сангилене, то позднепалеозойский импульс (290-270 млн лет) приходится на период, для которого гранитный магматизм здесь не характерен.

## Основные результаты исследования

Установлены сходства и различия между палеопротерозойскими ультраметаморфическими и анатектическими гранитоидами, развитыми по разному субстрату в гранулитовых и зеленокаменных комплексах, и обоснованы механизмы зарождения магм в породах разного субстрата под воздействием флюидов, обогащенных Si, K, Na, Rb, Ba, Sr, Pb при выносе Fe, Mn, Ca, Cr, F, Zn, V, Ni, Co. Показано, что в восточной части Балтийского щита и в Присаянском краевом выступе Сибирского кратона присутствуют одинаковые типовые элементы континентальной коры с близкими петрогеохимическими характеристиками пород, металлогенетической спецификой: гранито-гнейсы, сложенные тоналит-грондьемитовыми ассоциациями, зеленокаменные и гранулитовые пояса, архейские и палеопротерозойские гранитные комплексы.

В Прибайкалье установлено, что начало магматизма положили EMORB спрединговой зоны и надсубдукционные андезитоиды, вплоть до наземных излияний щелочных базальтов Ангино-Таланчанской островной дуги. Развитие сдвиговой тектоники стимулировало процессы мигматизации и выплавления синколлизийных гранитоидов шаранурского комплекса. Это обеспечивает взаимодействие кислых и основных расплавов с образованием щелочных метасоматитов и сиенитов с отсутствием мантийных меток. Щелочные сиениты обеднены по сравнению с мантийными щелочными породами всеми редкими элементами при основном карбонатном субстрате (Тажеранский массив) и обогащены Zr, Nb, REE (Будун) при богатом этими элементами гнейсовом субстрате. Именно таким механизмом образования объясняется тесная связь щелочных сиенитов и метасоматитов с массивами основных пород.

В отличие от коллизионного магматизма, породившего гранито-гнейсовые купола в Прибайкалье, петрогенезис внутриплитных гранитоидов не зависит от состава и возраста вмещающих пород. Разнообразие геохимических типов этих гранитоидов, связанных как с коровыми, так и с мантийными источниками, а также с процессами мантийно-корового взаимодействия, может быть обусловлено влиянием плюма на геологическую историю внутриплитного магматизма. Широкий спектр состава и геохимических особенностей пород в пределах позднепалеозойского и раннемезозойского ареалов магматизма Прибайкалья и Монголии от щелочных, субщелочных до редкометалльных гранитоидов определяет перспективность в отношении генетической связи с ними разнообразных типов оруденения.

Предложена «эклогитовая» модель формирования расплавов Mg# андезитовой и NEB-адакитовой вулканических ассоциаций южного фланга Центральной Камчатской депрессии (ЦКД). Погружение в позднем миоцене или раннем-среднем плиоцене деструктивных фрагментов океанической литосферной плиты в область астеносферной мантии в структуре

Малко-Петропавловской зоны поперечных разломных дислокаций вызывает последовательные фазовые преобразования вещества плиты. В процессе погружения литосферного фрагмента происходит амфиболизация океанической коры, породы которой преобразуются в Amph габбро с возникновением кварцсодержащих прожилков, затем при погружении в область более высоких давлений происходит формирование Grt содержащих эклогитизированных габбро, в них формируется прожилкование с коэситом, цоизитом и рутилом, и в завершение процесса образуются безводные эклогиты, что влечет за собой прекращение процессов расплавообразования. На первом этапе преобразований вблизи границы фазовых переходов в условиях последовательного снижения степени плавления формируются магмы Mg# андезибазальтов, Mg# андезитов и высококремнистых адакитов, на заключительных этапах фазовых трансформаций происходит образование NEB, HNB и низкокремнистых адакитов. Вовлечение в процессы магмообразования цоизита и рутила и формирование гранатового рестита определяют повышенные содержания в расплавах Ti, HFSE, Sr и других LILE компонентов в низкокремнистых адакитах. При этом какие-либо данные о существенном участии в формировании магнезиальных и адакитовых магм вещества астеносферной мантии или метасоматизированной мантии надсубдукционного клина не обнаружены. Положения данной модели базируются не только на оригинальных материалах по составам и минералогии пород, но и на многочисленных работах по эксгумированным эклогитам палеосубдукционных обстановок – Альпы.

Детально описаны минералогические и фазовые особенности образцов трахибазальта, муджиерита, трахидацита и комендитов вулкана Немрут (Восточная Турция), определены условия образования минералов, анализируются составы стекол расплавных включений в оливинах и матриксе пород. На основе анализа минералого-геохимических особенностей пород и масс-балансовых расчетов предлагаются наиболее вероятные модели образования муджиеритовой и бенморейтовой магм. Изучены минералого-геохимические и фазовые особенности комендитов и пантеллеритов вулкана Немрут (Восточная Турция). Появление остаточных комендитовых и пантеллеритовых расплавов объясняется вариациями условий кристаллизации анортоклаза (преобладающей фазы), геденбергита, файлита, оксидов Fe и Ti в исходной трахит-комендитовой магме в зависимости от давления и содержания растворенной в расплавах воды.

Установлено, что умеренно-щелочной щелочно-базальт-трахит-комендитовый вулканизм проявлен в вулканическом поясе Срединного хребта Камчатки в позднеплиоцен-раннеплейстоценовое время после завершения в среднем плиоцене вулканизма надсубдукционного геохимического типа. Тектонический контроль проявлений умеренно-щелочных магм в структуре тыловой зоны вулканического пояса определяется развитием

кулисообразных разломных зон и не имеет рифтогенного характера. Вещественные признаки пород щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии выражены в относительно повышенных концентрациях в них высокозарядных и редкоземельных элементов (Ti, Ta, Nb, Zr, Hf, Th, U, P, REE), свойственных породам внутриплитных обстановок, а также в повышенных концентрациях литофильных элементов (K, Rb, Ba, Sr, Pb), характерных для надсубдукционных магм, и в специфически низких содержаниях элементов платиновой группы (Pt, Pd), отражающих особые условия их формирования в обстановке конвергенции литосферных плит. Происхождение трахитов, комендитовых трахитов и комендитов в составе умеренно-щелочной серии обусловлено процессами кристаллизационной дифференциации трахиандезитовых и затем трахитовых магм в малоглубинных магматических камерах с фракционированием главных породообразующих (Ol, Орх, Срх, Pl, Kfs, Bi) и акцессорных минеральных фаз (Mgt, Пт, Ар) и преобладающей ролью полевошпатового компонента. Трахибазальты не являются родоначальными для пород трахиандезит-трахит-комендитового ряда составов и не связаны с ними процессами дифференциации. Источники умеренно-щелочных магм вулканического пояса Срединного хребта Камчатки имеют гетерогенное происхождение и отвечают составам деплетированной литосферной мантии «тихоокеанского» MORB типа и рециклированной литосферы с вещественными характеристиками, близкими к MORB «индийского» типа. Образование умеренно-щелочных магм в обстановке активной континентальной окраины происходило в результате подъема обогащенного астеносферного вещества в область деплетированной литосферной мантии на этапе прекращения субдукции и в условиях деструкции океанической плиты.

Новые данные о различном возрасте редкометалльных пегматитов Южно-Сангиленского и Центрально-Сангиленского пегматитовых поясов (ранне- и позднепалеозойском, соответственно) свидетельствуют о минимум двукратном проявлении импульсов редкометалльного гранитного магматизма на Сангилене и существенно расширяют его временные рамки.

## Список публикаций по теме

### Статьи

1. Ivanov A.V., Demonterova E.I., He N.Y., Perepelov A.B., Travin A.V., Lebedev V.A. Volcanism in the Baikal rift: 40 years of active-versus-passive model discussion // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 148. P. 18-43.
2. Антипин В.С., Покровский Б.Г., Федоров А.М. Патомский кратер – результат фреатического взрыва: геологические и изотопно-геохимические свидетельства // *Литология и полезные ископаемые*. 2015. № 6. С. 538-548.
3. Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Перепелов А.Б. Вулканический массив Большой Семячик (Камчатка): состав пород, минералов, вопросы петрогенезиса // *Вулканология и Сейсмология*, 2015, Т. 9, № 2, С. 20-43.
4. Ефремов С.В. Выделение ореолов рудных стадий по результатам геохимических съемок // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2015, № 2 (51), С. 19-25.
5. Ефремов С.В. Океаническая литосфера как потенциальный источник профилирующих элементов рудных месторождений, связанных с адакитовым магматизмом // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2015, № 3 (52), С. 13-23.
6. Загорский В.Е. Пегматитовое тело Соседка Малханского месторождения цветного турмалина в Забайкалье: состав, внутреннее строение, петрогенезис // *Петрология*, 2015, Т. 23, № 1, С. 75-100.
7. Загорский В.Е., Шокальский С.П., Сергеев С.А. Возраст, длительность формирования и геотектоническая позиция Завитинской литиеносной гранитно-пегматитовой системы (Восточное Забайкалье) // *Доклады Академии наук*, 2015, Т. 460, № 2, С. 198-203.
8. Макрыгина В.А., Суворова Л.Ф., Толмачева Е.В. Флюидный режим начальных этапов гранитообразования в метаморфических комплексах разных давлений (Прибайкальский метаморфический пояс) // *Геохимия*, 2015, № 4, С. 328-343.
9. Некрылов Н.А., Плечов П.Ю., Бычков К.А., Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Шур М.Ю., Дирксен О.В., Базанова Л.И. Родоначальные расплавы последнего пульса вулканизма Седанкинского дола (Срединный хребет, Камчатка) // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2015. Вып. 3. С. 55-61.
10. Перетяжко И.С., Савина Е.А., Карманов Н.С., Щербаков Ю.Д. Генезис муджиеритов и бенморейтов вулкана Немрут (Восточная Турция): процессы смешения магм и фракционной кристаллизации щелочно-базальтового расплава // *Петрология*, 2015, Т. 23, № 4, С. 410-439.

11. Перетяжко И.С., Савина Е.А., Карманов Н.С. Комендиты и пантеллериты вулкана Немрут (Восточная Турция): условия образования и взаимосвязи между трахит-комендитовыми, комендитовыми и пантеллеритовыми расплавами // *Петрология*. 2015. Т. 23. № 6. С. 624-672.

12. Солодилова В.В., Завадич Н.С., Левицкий В.И., Павлова Л.А., Левицкий И.В. Минералого-геохимические особенности габбро-долеритовой формации Бобруйской кольцевой структуры // *Литасфера*. № 2(43). 2015. С. 46-59.

13. Chubarov V., Suvorova D., Mukhetdinova A., Finkelshtein A. X-ray fluorescence determination of the manganese valence state and speciation in manganese ores // *X-Ray Spectrometry*, 2015, V. 44, № 6, P. 436-441.

14. Одгэрэл Д., Антипин В.С., Перепелов А.Б. Геохимические типы палеозойских и мезозойских гранитоидных комплексов Монголии, особенности их происхождения и потенциальная рудоносность – редкометалльные граниты Li-F типа хребта Бага-Хэнтэй. Научное сотрудничество Сибирского отделения РАН с Монголией в первой половине XXI. Выпуск 1: 2011-2013 гг. Новосибирск издательство СО РАН. 2015. С. 165-171.

15. Левицкий В.И. История Восточно-Сибирского отделения Российского минералогического общества, его роль в создании минерально-сырьевой базы страны и развития минералогических знаний // Российское минералогическое общество глазами современников. Сборник статей по истории геологических знаний. Санкт-Петербург. 2015. С. 99-108.

### **Тезисы**

1. Antipin V.S., Perepelov A.B., Odgerel D. Geochemical evolution of Paleozoic and Mesozoic rare metal granites and their origin (Baikal region and Mongolia) // 8th Hutton - Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks. Abstract. Brazil. 2015. PT.012.

2. Peretyazhko I., Savina E. Petrogenesis of quartz-devoid comendites and pantellerites of Nemrut volcano (eastern Turkey) // *Goldschmidt Abstracts*. 2015. 2454

3. Антипин В.С., Гэрэл О., Перепелов А.Б., Одгэрэл Д. Позднепалеозойские и раннемезозойские редкометалльные граниты в составе крупных изверженных провинций Прибайкалья и Монголии: сравнительная геохимия и источники магм. Тезисы международной конференции «Large Igneous Province, Mantle, Plumes and Metallogeny in the Earth's History». Иркутск. 2015. С. 7-9.

4. Антипин В.С., Шептякова Н.В. Коллизионные и внутриплитные гранитоиды Прибайкалья: сравнительная геохимия и потенциальная рудоносность // Материалы XII Всероссийского Петрографического совещания. Петрозаводск. 2015. С. 89-91.

5. Высоцкий С.В., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А., Левицкий В.И., Левицкий И.В. Изотопная аномалия  $^{33}\text{S}$  в сульфидах из раннедокембрийских пород юго-западной части Сибирского кратона – индикатор «глобальной кислородной катастрофы»? // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского складчатого пояса (от океана к континенту). Материалы научного совещания. 13–16 октября 2015. ИЗК СО РАН. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2015. С. 51-52.

6. Gornova M.A., Dril S.I., Perepelov A.B., Wang K.-L., Belyaev V.A. Mineralogical and geochemical study of lherzolites from Tumusun volcano alkaline basalts (Baikal rift): refertilization or partial melting? // Abstract volume of International Conference «Large igneous Provinces, mantle plumes and metallogeny in the Earth's history». IGC SB RAS. Irkutsk. 2015. P. 49-50.

7. Кузнецова Л.Г., Дриль С.И. Первые данные изучения изотопных систем Sr и Nd раннепалеозойских гранитоидов Южно-Сангиленского пояса редкометальных пегматитов // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. VI Российская конференция по изотопной геохронологии. 2-5 июня 2015. ИГГД РАН. Санкт-Петербург. С. 136-137.

8. Кузнецова Л.Г. Петрохимические особенности разнотипных раннепалеозойских гранитов Южного Сангиленга и ассоциированных с ними редкометальных пегматитов как отражение сложного сочетания палеогеодинамических режимов // Петрография магматических и метаморфических горных пород. XII Всероссийское петрографическое совещание. 15-20 сентября 2015. Институт геологии Карельского НЦ РАН. Петрозаводск. С. 177-179.

9. Левицкий В.И., Павлова Л.А., Харинский А.В., Кожевников Н.О., Кустов М.С., Иванова Г.Н., Снопков С.В., Левицкий И.В. Минералогические методы в выявлении технологий древнего железоделательного производства в Прибайкалье // XII съезд РМО. Минералогия во всем пространстве сего слова. Санкт-Петербург. 13-16 октября 2015. С. 224-226. Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С., Павлова Л.А., Левицкий И.В. Самородные и интерметаллические соединения в Бобруйской кольцевой структуре (Республика Беларусь) // XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва 8–10 апреля). М.: МГРИ-РГГРУ. 2015. Т. 1. С. 212-214.

10. Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С., Павлова Л.А., Левицкий И.В. Самородные и интерметаллические соединения – индикаторы флюидного режима и генетической природы Бобруйской структуры (Республика Беларусь) // Флюидный режим

эндогенных процессов континентальной литосферы (Материалы Всероссийского совещания. 6-9 октября. ИЗК СО РАН). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2015. С. 99-101.

11. Левицкий В.И., Сапожников А.Н., Суворова Л.Ф., Канева Е.В. Источники вещества в процессах формирования лазуритовых месторождений Южного Прибайкалья // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы (Материалы Всероссийского совещания. 6-9 октября. ИЗК СО РАН). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2015. С. 97-99.

12. Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С., Павлова Л.А., Левицкий И.В. Генетическая природа минерализации с самородными и интерметаллическими соединениями (Бобруйская кольцевая структура, республика Беларусь // Петрография магматических и метаморфических горных пород (Материалы XII Всероссийского петрографического совещания с участием зарубежных ученых, 15–20 сентября 2015 г., г. Петрозаводск). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2015. С. 334-336.

13. Левицкий В.И., Левицкий И.В. Раннедокембрийские образования восточной части Балтийского щита и юго-запада Сибирского кратона // Петрография магматических и метаморфических горных пород. Материалы XII Всероссийского петрографического совещания с участием зарубежных ученых. 15–20 сентября 2015. Петрозаводск. Карельский научный центр РАН. 2015. С. 449-451.

14. Макрыгина В.А., Куш Л.В., Антипин В.С. Петрогеохимические доказательства взаимосвязи формирования разных типов гранитоидов, основных и щелочных пород при геодинамическом развитии Ольхонского региона // Материалы XII Всероссийского петрографического совещания с участием зарубежных ученых. 15-20 сентября 2015. Петрозаводск, 2015. С. 190-193.

15. Макрыгина В.А. Геохимия метаморфических и магматических пород Ольхонского региона // Материалы XIII Всероссийского научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы ЦАПП: от океана к континенту. 13-16 октября 2015, Иркутск. 2015. С.146-149.

16. Павлова Л.А., Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С. Муассанит в породах Бобруйской кольцевой структуры (Республика Беларусь) // XIX Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел и 3-й Школы молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов». РЭМ – 2015. Черногловка. 1 – 4 июня 2015. Черногловка: ИЭМ РАН. С. 454-455.

17. Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Травин А.В., Щербаков Ю.Д., Дриль С.И., Цыпукова С.С. Надсубдукционный и внутриплитный вулканизм Камчатки по изотопно-геохимическим данным – вещественные и возрастные ограничения для палеогеодинамических реконструкций // Материалы XIII Всероссийского научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы



Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». ИЗК СО РАН. Иркутск. 2015. Вып. 13. С. 181-183.

18. Перетяжко И.С. Флюидно-магматические среды в процессах формирования гранитоидных пород: P-V-T-X свойства флюидов, данные изучения включений в минералах, петрологические следствия // Металлогения современных и древних океанов. Научная школа. Миасс. 2015. С. 186-190.

19. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Необычные свойства расплавных включений в анортоклазе из комендитов и пантеллеритов вулкана Немрут // XVII Всероссийское совещание по экспериментальной минералогии. Новосибирск, 2015. С.122.

20. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Бескварцевые комендиты и пантеллериты вулкана Немрут (Восточная Турция): процессы эволюции щелочных магм // Материалы XII Всероссийского Петрографического совещания с участием зарубежных ученых. Петрозаводск. С. 564-566.

21. Tsyrukova S.S., Perepelov A.B., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Travin A.V., Dril S.I., Scherbakov Yu.D., Odgerel D., Puzankov M.Yu. Cenozoic alkaline-basaltic magmatism of Darkhat depression in North Mongolia: evolution, sources and origin of magma, tectonic activity // Abstract volume of International Conference «Large igneous Provinces, mantle plumes and metallogeny in the Earth's history». IGC SB RAS. Irkutsk. 2015. P. 132-133.

22. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Щербаков Ю.Д., Одгэрэл Д. Кайнозойский вулканизм Дархатской котловины (Северная Монголия): эволюция и источники // Материалы XIX Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию Иркутского государственного технического университета и 40-летию Керуленской международной геологической экспедиции «Геология и минерагения Центральной Азии». Иркутск. 2015. С. 88-92.

23. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Травин А.В., Дриль С.И., Щербаков Ю.Д., Одгэрэл Д., Пузанков М.Ю. Позднепалеоген-неогеновый щелочно-базальтовый вулканизм Дархатской впадины (Северная Монголия) – этапы развития и связь с процессами плюм-литосферного взаимодействия // Материалы XII Всероссийского петрографического совещания «Петрография магматических и метаморфических горных пород». Карельский научный центр РАН. Петрозаводск. 2015. С. 267-270.

24. Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Дриль С.И. Признаки и возможные причины направленной вещественной эволюции кайнозойского вулканизма юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Материалы XIII Всероссийского научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)». ИЗК СО РАН. Иркутск. 2015. Вып. 13. С. 251-252.

25. Щербаков Ю.Д. Геохимия и петрология щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии Срединного хребта Камчатки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых. Издательство института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Иркутск. 2015. 22 с.

26. Щербаков Ю.Д., Перепелов А.Б., Дриль С.И., Пузанков М.Ю., Флеров Г.Б., Колосков А.В. Источники расплавов щелочно-базальт-трахит-комендитовой серии Срединного хребта Камчатки по изотопным данным // Материалы XII Всероссийского петрографического совещания «Петрография магматических и метаморфических горных пород». Карельский научный центр РАН. Петрозаводск. 2015. С. 271-273.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Dale C.W., Luguet A, Macpherson C.G., Pearson D.G., Hickey-Vargas R. Extreme platinum-group element fractionation and variable Os isotope compositions in Philippine Sea Plate basalts: Tracing mantle source heterogeneity // *Chemical Geology*. 2008. V. 248. P. 213–238.
6. Dale C.W., Macpherson C.G., Pearson D.G., Hammond S.J., Arculus R.J. Inter-element fractionation of highly siderophile elements in the Tonga Arc due to flux melting of a depleted source // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. V. 89. P. 202–225.
7. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*. 1990. V. 347. P. 662–665.
8. McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*, 1995, V. 120, P. 223-253.
9. Dorendorf F., Churikova T., Koloskov A., Worner G. Late Pleistocene to Holocene activity at Bakening volcano and surrounding monogenetic centers (Kamchatka): volcanic geology and geochemical evolution // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2000. V. 104. № 1-4. P. 131-151.
10. Gorbatov A.S., Widiyantoro S., Fukao Y., Gordeev E. Signature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography // *Geophysical Journal International*. 2000. V. 142. P. 27-36.
11. Hoernle K., Portnyagin M.V., Hauff F., van den Bogaard P., Avdeiko G. The origin of alkaline magmas during Cenozoic reorganization of subduction zone of Kamchatka // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2009. V. 73. №. 13S. P. 538.
12. Kelemen P.B., Hanghoj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust / In: Rudnick R.L., editor. *The Crust. Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon. 2003. P. 593-659.
13. Kepezhinskas P.K. Origin of the hornblende andesite of northern Kamchatka // *Intl. Geol. Review*. 1989. V. 31. P. 246-252.

14. Kepezhinskas P.K., Defant M.J., Drummond M.S. Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt–peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the North Kamchatka arc. *Journal of Petrology*. 1995. V. 36. P. 1505-1527.
15. Kepezhinskas P.K., Defant M.J., Drummond M.S. Progressive enrichment of island arc mantle by melt–peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. V. 60. P. 1217-1229.
16. Meyzen C.M., Ludden J.N., Humler E., Luais B., Toplis m.J., Mével C., Michael S. New insights into the origin and distribution of the DUPAL isotope anomaly in the Indian Ocean mantle from MORB of the Southwest Indian Ridge. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. V. 6. № 11. 34 p.
17. 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.
18. Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F. Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma generation at the edge of the Pacific Plate // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series*. Washington, D.C.: 2007. V. 172. P. 199-239.
19. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*. 2003. V. 3. P. 1-64.
20. Safonova I.Yu., Santosh M. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. Issue. 1. P. 126-158.
21. Sajona F.G., Maury R.C., Bellon H., Cotten J., Defant M. High field strength element enrichment of Pliocene–Pleistocene Island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines) // *Journal of Petrology*. 1996. V. 37. № 3. P. 693–726.
22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes / *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society special publication № 2* // Blackwell Scientific Publications. 1989. P. 313-346.
23. 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.
24. Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis // *Tectonophysics* 2010. V. 488. №. 1. P. 293-325.

25. Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Wörner G., Volynets, O. N. Slab edge geochemical effects on arc magmatism and the torn Pacific Plate beneath Kamchatka and the Western Aleutians // *Nature*. 2000. V. 409. P. 500–504.
26. Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Wörner G., Volynets O.N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*. 2001. V. 409. P. 500-504.
27. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Кувикас О.В. Адакиты в зонах субдукции Тихоокеанского кольца: обзор и анализ геодинамических условий образования. // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2011. №1(17). С. 45-60.
28. Богданов Н.А., Чехович В.Д. О коллизии Западно-Камчатской и Охотоморской плит // *Геотектоника*. 2002. № 1. С. 72-85.
29. Богданов Н.А., Чехович В.Д. Геодинамические аспекты кайнозойского окраинно-континентального вулканизма Тихоокеанского и Беринговоморского секторов Камчатки // *Геология и геофизика*. 2004. Т. 45. № 4. С. 421-429.
30. Волынец О.Н., Карпенко С.Ф., Кэу Р.У., Горринг М. Изотопный состав поздненеогеновых К-На щелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника // *Геохимия*. 1997. № 10. С. 1005-1018.
31. Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Д.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке. Часть 1. Структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение вулканов. // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 4-5. С.5-18.
32. Волынец О.Н., Овчаренко А.Н., Бояринова М.Е. Кэй Р.У., Аношин Г.Н., Агапова А.А., Гольцман Ю.В. Первая находка магнезиальных андезитов А (Адак) -типа на Камчатке. // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 11. С. 1553-1564.
33. Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Д.М. Харчинский и Заречный вулканы – уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород. // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 1. С. 31-45.
34. Волынец О.Н., Бабанский А.Д., Гольцман Ю.В. Изотопные и геохимические вариации в лавах Северной группы вулканов (Камчатка) в связи с особенностями процессов субдукции // *Геохимия*. 2000. № 10. С. 1-17.
35. Карта магматических формаций юга Восточной Сибири и Северной части МНР. Масштаб 1:1500 000. Редакторы Г.Я.Абрамович, Г.Л.Митрофанов, Г.В.Поляков, П.М.Хренов. Министерство геологии СССР. ВОСТСНИИГИМС. 1988.

36. Мартынов Ю.А., Кимура Д.И., Мартынов А.Ю., Рыбин А.В., Катакузи М. Присутствие мантии индийского MORB-типа под Курильской островной дугой: результаты изотопных исследований мафических лав о-ва Кунашир // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 102-110.

37. Перепелов А.Б. Кайнозойский магматизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геол.-мин. наук. Иркутск. 2014. 41 с.

38. 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.

39. Щербаков Ю.Д. Геохимия и петрология щелочно-базальт – трахит – комендитовой серии Срединного хребта Камчатки. Автореферат на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Иркутск. 2015. 23 с.