

**Аннотация выполнения Государственного контракта
№ П736 от 20 мая 2010 г. и Дополнению от 21 марта 2011 г. № 1, Дополнению от 28
июня 2011 г. № 2 (2010-2012 гг)**

Научно-исследовательские работы по проблеме «Базит-гипербазитовый магматизм в геологической эволюции Земли» I этапа были направлены на выполнение теоретического исследования по теме: Мантийные источники кайнозойских вулканических пород надслэбовой области и конвектирующей мантии на основе обработки коллекции образцов кайнозойских вулканических пород района оз. Кизи и о. Сахалин. Дополнительные материалы были получены при экспедиционных исследованиях на кайнозойских вулканических полях Монголии. Представлен обзор основных закономерностей геологической эволюции Прибайкалья и других территорий Азии. Подготовлен вариант направления исследования по проекту. Разработан и детализирован план проведения экспериментальных и теоретических исследований. Установлены соотношения выплавов из надслэбовой области и конвектирующей мантии в рифте Татарского пролива.

По результатам работ I этапа получены представительные аналитические данные для обоснования соотношения выплавов из надслэбовой области и конвектирующей мантии в рифте Татарского пролива. Изученная среднекайнозойская лавовая последовательность района оз. Кизи характеризует активность источников Северной зоны Восточного Сихотэ-Алия: среднеэоценовый импульс надслэбового магматизма и продолжительное позднеолигоценовое поступление магм из подлитосферной конвектирующей мантии. В среднеэоценовом даците возрастом ~43.5 млн лет определены низкие концентрации высокозарядных микроэлементов Nb, Ta при низких отношениях Nb/Ta, Ce/Pb, Nb/La и высоком отношении K/Nb и измерено низкое $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 0.703399. В позднем олигоцене выделены три фазы вулканических извержений: 1) андезибазальтов (29-27 млн лет назад), 2) трахиандезибазальтов-трахиандезитов (27-24 млн лет назад) и 3) андезитов (~23 млн лет назад). В лавах первой и третьей фаз измерены низкие отношения Ce/Pb, Nb/La, Ba/La и высокое отношение K/Nb, также характеризующие надслэбовые процессы. В лавах второй фазы установлено относительное смещение этих отношений к составу базальтов океанических островов. Для всей позднеолигоценовой вулканической последовательности определен узкий интервал начальных изотопных отношений стронция $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 0.703661-0.703853. При сравнительном анализе материалов установлено, что такие отношения свойственны вулканическим и субвулканическим породам всего побережья Татарского пролива возрастом ~37, 31-23 и ~16 млн лет.

Выполнены экспедиционные исследования кайнозойских вулканических пород Монголии. Всего отобрано около 230 образцов вулканических и субвулканических пород для геохимических исследований и радиоизотопного датирования и представительные коллекции глубинных включений. Собранная коллекция дает возможность детально изучить состав пород, уточнить возраст и проследить эволюцию мантийного магматизма поля Дариганга и полей сопредельных территорий Юго-Восточной Монголии, а также бассейна р. Чулутын-Гол Центральной Монголии. Геохимические исследования образцов позволят реконструировать типы мантийных магматических источников и представить эволюцию магматизма во внутренней части Азии.

В процессе выполнения аналитических работ I этапа осуществлялся систематический сбор материалов, обеспечивающих возможность воспроизведения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Привязка образцов при проведении экспедиционных работ осуществлялась с использованием прибора GPS. Масс-спектрометрические измерения на приборе Finnigan MAT 262 с получением прецизионных данных по изотопным системам Th,U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd для изотопно-геохимических оценок источников базитов и гипербазитов проводились в чистых комнатах химической пробоподготовки с ультрачистыми реактивами и водой, полученной

в перегонной системе Ellix-3 Millipor (Франция). Эти же условия соблюдались при анализе микроэлементов методом методом ICP-MS. Измерения на приборах серий проб сопровождались измерениями международных стандартных образцов.

Теоретические и экспериментальные исследования II этапа проводились по теме: Мантийные источники мезозойских и кайнозойских вулканических пород Азии: производные слэбов, подлитосферной конвекции и литосферы. Работы включали экспедиционные исследования

Целью работ II этапа было создание модели эволюции мантийных процессов под внутренней частью Азии на основе геохимических аналитических данных по коллекции образцов мезозойских и кайнозойских базальтов и их глубинных включений из районов Прибайкалья, Забайкалья, Монголии, Китая, Приморья, Приамурья и о. Сахалин, используемых для сравнительной характеристики мантийных магматических процессов активной континентальной окраины и внутренней части континента. Основным результатом работ II этапа явилось выявление характера изотопно-геохимической гетерогенности подлитосферной мантии территории с выделением подлитосферных активных слэбовых и надслэбовых источников конвергентного типа, а также литосферно-астеносферных источников рифтового типа в конвектирующих субдоменах Забайкальского и Саяно-Монгольского низкоскоростных доменов. Решена основная задача исследований мезозойских и кайнозойских вулканических пород – получена комплексная информация о их возрасте и геохимических параметрах на исследуемых территориях Азии и представлены обобщенные модели эволюции магматизма.

Для выделения трендов позднекайнозойских комплементарных мантийных источников слэбов и надслэбовых областей в зонах конвергентных границ Азии, обосновано использование данных по их комплементарности на диаграмме $10^{-3} \times K/Ta - La/Ta$ в сочетании с изотопными данными по характеру относительного обеднения-обогащения этих источников радиогенными изотопами Sr и Nd. Показано отличие трендов выплавки зон конвергенции от трендов выплавки Гавайского горячего пятна. Установлено, что процессы, развивавшиеся в зоне Индо-Азиатской коллизии на юге Азии, способствовали надслэбовой магматической активности, а субдукционные процессы на востоке – смене надслэбовых выплавки слэбовыми. Выделена также особая тенденция $K/La = const$, не свойственная выплавкам зон конвергенции и проявляющаяся в осевых рифтовых долинах континентальных рифтов. Эта тенденция характеризует процесс вовлечения в плавление материала литосферы при ее рифтогенном утонении.

На II этапе получены представительные аналитические данные для характеристики пространственно-временных соотношений материала источников вулканических пород позднего мела и кайнозоя Центральной Монголии. Анализ полученных материалов приводит к выводу о том, что в течение позднего мела и кайнозоя в Центральной Монголии преобладало поступление материала слэбовых источников с активизацией надслэбовых во временных интервалах 76-71, 37-31, 13-11 и <3.6 млн лет назад и литосферно-астеносферных - в течение последних 15.5 млн лет.

До начала Индо-Азиатской коллизии, в интервале 88-71 млн лет назад, выплавки из слэбовых и надслэбовых источников начали поступать в Южно-Гобийском вулканическом ареале. Индо-Азиатская коллизия сопровождалась «веерным» распределением активизации слэбовых источников в интервале 66-43 млн лет назад, распространившейся от этого ареала в Южной и Средней Гоби с перекрытием территории вдоль Урало-Монгольского линеймента на расстояние около 700 км. Завершение коллизии ознаменовалось сменой слэбовых источников умереннокалиевых базальтов на надслэбовые, давшие выплавки высококалиевых базальтов и получившие развитие 37-31 млн лет назад в Южной Гоби, на территории от сомона Хурмэн и хр. Ноен на юге до восточного окончания Долины Озер на севере. В интервале 32-31 млн лет назад активизировались источники слэбового типа, производные умереннокалиевых базальтовых расплавов вдоль 500-километровой западно-северо-западной Дзабхан-

Долино-Озерской зоны.

В центральной части Восточного Хангая конвергентная магмогенерация с меняющимися пропорциями вовлеченного в плавление слэбового и надслэбового материала конвергентного типа обозначилась извержениями в интервале 17.0-9.7 млн лет назад. Плавление литосферно-астеносферного материала рифтогенного типа было инициировано в Орхон-Селенгинском среднегорье 15.5-14.2 млн лет назад. После перестройки магматической системы Центральной Монголии около 10 млн лет назад, произошедшей на фоне ослабления конвергентного магматизма, имел место интервал 9.6-2.1 млн лет назад импульсного противофазного проявления конвергентных (надслэбовых) и рифтогенных (литосферно-астеносферных) магматических процессов в Чулутынской зоне. В ее северной части, на Тарят-Чулутынском поле, фазы рифтогенного плавления литосферы 7.1-5.8 и 4.6-3.8 млн лет назад чередовались с фазами плавления материала надслэбовых источников в интервалах 5.8-5.6 и ~2.7 млн лет назад. В южной части зоны, на Верхне-Чулутынском поле, изливались только лавы, связанные с импульсами рифтогенного плавления литосферы. В западной части хр. Восточный Хангай материал слэбового источника смешивался с изотопно-обогащенным материалом литосферы в высококалийных расплавах 5.5-4.8 млн лет назад и сменялся около 4 млн лет назад выплавками изотопно-обогащенного материала. В последние 3.6 млн лет поступал конвергентный надслэбовый материал. Подобный переход от плавления изотопно-обогащенного материала литосферного источника ~1.9 млн лет назад к плавлению материала надслэбового источника в последние 1.2 млн лет имел место на Тарят-Чулутынском поле. В магмообразовании под Орхон-Селенгинским среднегорьем, соответствующей центральной части Центрально-Монгольской рифтовой зоны, преобладали процессы плавления литосферного и астеносферного материала, подобные процессам в западных частях Байкальской и Окинско-Тоджинской рифтовых зон. Тренды лав этой территории возрастного диапазона от 15.5 до 2.8 млн лет Угей-Нурского, Нижне-Орхонского, Хануйского полей и диапазона <2 млн лет Селенгинского поля соединялись между собой в точке, соответствующей общему компоненту юго-западной части Байкальской рифтовой системы (астеносферному компоненту А). Изотопно-обогащенный надслэбовый компонент в магматических процессах не проявлялся.

Пространственно-временные закономерности магматизма в Восточной Азии рассмотрены с акцентом на соотношения выплавок, производных: 1) сильно изотопно-обедненных источников I слэбов Кула-Изанаги и Тихоокеанского ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7028-0.7033$), 2) умеренно изотопно-обедненных источников конвектирующей мантии II ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7038$) и III ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7042$), 3) подобного источника IV с изотопно-обогащенным составом ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7052$) и 4) литосферной мантии.

По изотопно-геохимическим параметрам Sr и Pb вулканических пород предполагается распространение однородного изотопно-обогащенного слоя астеносферы (источника IV) под обширной территорией Восточной Азии. Изотопно-обогащенный астеносферный компонент континентальной окраины проявился в надсубдукционном магматизме островной дуги Северо-Восточной Японии во временном интервале 30–20 млн лет назад. Вследствие процессов, повлекших за собой раскрытие впадины Японского моря около 15 млн лет назад и последующую эволюцию Японской дуги с 15 до 9 млн лет назад, связь островодужного магматизма с астеносферой континентальной окраины оказалась прерванной. Астеносферный материал этого типа продолжал вовлекаться в магмогенерирующие процессы только под континентальной окраиной в сочетании с материалом субдуцированных океанических слэбов и литосферы.

Проведены экспедиционные исследования кайнозойских и мезозойских вулканических пород о. Сахалин и Витимского плоскогорья. Задача работ на о. Сахалин заключалась в опробовании дацит-риолитовых экструзий, которые, как предполагается, внедрялись на востоке Азии в эпохи структурных перестроек и маркировали их. Во время полевых работ изучено 5 труднодоступных экструзий ичарского комплекса с

параллельным опробованием базальтов вмещающих пород орловской и чеховской свит. Кроме того, выполнено представительное опробование дацит-риолитовых экструзий, обнаженных в новом карьере п. Взморья на восточном берегу острова и м. Кузнецова на западном берегу. Отобрано 50 образцов дацит-риолитового состава и сопоставимое количество образцов базальтов. Основная задача работ на Витимском плоскогорье состояла в опробовании керн скважин, пробуренных в кайнозойских и мезозойских вулканических толщах Байкальским филиалом «Сосновгеология» ФГУПП «Урангео». Опробован керн представительных скважин глубиной 200-300 м, вскрывших перемежающиеся лавы и осадки. Отобрано 146 проб базальтов для геохимических исследований по проекту.

Проведен систематический сбор материалов, обеспечивающих возможность воспроизведения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Привязка образцов при проведении экспедиционных работ осуществлялась с использованием прибора GPS.

Масс-спектрометрические измерения микроэлементов и изотопов для изотопно-геохимических исследований источников базальтовых расплавов проводились в чистых комнатах химической пробоподготовки с ультрачистыми реактивами и водой, полученной в перегонной системе Ellix-3 Millipor (Франция). Для систематических геохимических исследований кайнозойских вулканических пород калиевой и калинатровой серий Центральной Монголии и Северо-Восточного Китая использовались результаты их предшествующего K–Ar и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования с представлением новых K–Ar датировок. Впервые выполнены измерения возраста позднеплейстоценовых лав Центральной Монголии по неравновесной серии радионуклидов цепочки распада ^{238}U .

При первичной аналитической обработке собранной коллекции разновозрастных лав всего кайнозоя Центральной Монголии на площади около 300 тыс. км² в сопоставлении с коллекцией позднекайнозойских лав Северо-Восточного Китая на площади около 75 тыс. км² для всех проб определялся состав петрогенных оксидов (классический метод) и микроэлементов (метод ICP MS). В качестве наиболее показательной характеристики мантийного источника магматического расплава исследовались изотопные отношения Sr с выделением его микроколичеств для изотопного анализа по экспрессной методике с использованием одноразовой смолы Sr Spec фирмы EIChroM Industries, США. Анализ изотопов Nd и Pb проводился выборочно по пробам, имеющим ключевое значение в интерпретации изотопов Sr. Результаты измерений приводились к значениям международных стандартных образцов. Rb–Sr-изотопная система чувствительна к пост-магматическим изменениям и процессам выветривания пород, поэтому значения $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ могут быть искажены. Для исследований возможного влияния фактора наложенных изменений проводились исследования изотопного состава стронция с предварительной кислотной обработкой проб. Они показали хорошую воспроизводимость результатов измерений изотопов Sr с кислотной обработкой и без нее в неизмененных породах позднего кайнозоя и существенное уменьшение значений изотопных отношений в пробах измененных пород среднего–позднего кайнозоя, обработанных кислотой, по сравнению с теми же пробам, не подвергавшимися обработке.

Опубликована 1 статья в журнале ВАК, подготовлен 1 путеводитель, опубликовано 8 тезисов докладов в материалах конференции с международным участием и всероссийской конференции со ссылкой на проведение поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы. В отчетный период, 22 ноября 2010 г., защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук участника НИР преподавателя ГОУ ВПО ИГУ Чувашовой Ирины Сергеевны на тему: Пространственно-временная эволюция и источники кайнозойского вулканизма Центральной Монголии и Северо-Восточного Китая, специальность 25.00.04 - петрология, вулканология. Тема соответствует II этапу выполнения НИР.

Теоретические и экспериментальные исследования III этапа НИР проводились по теме: Архейские гипербазиты повышенной железистости и базит–гипербазитовые комплексы офиолитов. Целью работ этого этапа заключалась в реконструкциях магматических процессов раннего этапа геологической эволюции Земли и условий формирования базит–гипербазитовых комплексов и базальтоидных серий ранних стадий формирования островодужных систем Палеоазиатского океана и сопряженных с ними задуговых бассейнов.

Проведен систематический сбор материалов, обеспечивающих возможность воспроизведения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Привязка образцов при проведении экспедиционных работ осуществлялась с использованием прибора GPS. Определения петрогенных оксидов выполнены в аналитическом центре Института земной коры СО РАН классическим «мокрым» методом. Концентрации микроэлементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS, inductively coupled plasma mass spectrometry) на масс-спектрометре Agilent 7500ce и Element 2 Байкальского аналитического центра коллективного пользования. Для контроля правильности измерений проведено многократное определение концентраций редкоземельных элементов, Sc, Rb, Sr, Zr, Nb, Ba, Hf, Pb, Th, U в семи международных стандартных образцах горных пород (BIR–1, JB–2, BHVO–1, AGV–1, QL–O, BCR–1, STM–1) и в лабораторном стандарте базанита U–94–5. Градуировка проводилась по многоэлементным стандартным растворам SPEX и Perkin Elmer, для некоторых элементов (например, V, Ni, Ba, Zn, Hf) вместе с растворами использовали также международные стандартные образцы горных пород. Петрографические исследования и анализ минералов проводились в прозрачно-полированных шлифах на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus Camedia 5200 (Япония), электронном микроскопе LEO 1430VP (Oxford Instruments, Англия) и рентгеноспектральных микроанализаторах SUPERPROBE–733 и JXA8200 (JEOL, Япония) с волновыми и энергодисперсионными спектрометрами. Определение основных породообразующих элементов в перидотитах проводилось методом РФА по стандартной методике на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ–25, Na и К – методом пламенной фотометрии, Cr и Ni – методом атомной абсорбции на спектрометре модели 503 Analyst 800 фирмы Perkin–Elmer.

В работе использовались коллекции пород офиолитов Джидинского пояса Западного Забайкалья, Байкало-Муйского пояса Северного Забайкалья, фрагментов офиолитов на побережье оз. Байкал, Дунжугурского офиолитового комплекса из складчатого обрамления Гарганского блока Восточного Саяна, а также коллекции образцов архейских гипербазитов повышенной железистости из фундамента Сибирской платформы и массивов в ее сопредельном складчатом обрамлении. Проведены дополнительные экспедиционные исследования с геохимическим опробованием офиолитов Джидинского пояса Западного Забайкалья, Байкало-Муйского пояса Северного Забайкалья, фрагментов офиолитов на побережье оз. Байкал и Дунжугурского офиолитового комплекса из складчатого обрамления Гаганского блока Восточного Саяна, а также архейских гипербазитов повышенной железистости из фундамента Сибирской платформы. Отобраны эталонные коллекции для детальной геохимической характеристики наиболее представительных базит–гипербазитовых ассоциаций Прибайкалья.

При всей скудности информации об обломочных цирконах и породах ранней Земли в настоящее время имеются основания рассматривать ее как гетерогенное космическое тело, находившееся в хадии в расплавленном состоянии и испытывавшее бомбардировки другими космическими телами. В это время формировалась кора океанического типа (с низким μ) и континентального типа (с высоким μ). Важное событие, способствовавшее преобразованию части океанической коры в континентальную, произошло на рубеже хадиа и архея. По датировке рудных свинцов из месторождений южного края Сибирского кратона его протолит образовался около 3.82 млрд лет назад после последней тяжелой

бомбардировки Земли космическими телами.

По результатам геохимических исследований массивов и мелких тел базит–гипербазитового состава южного края Сибирского кратона и сопредельных территорий различаются ассоциации: 1) низкотитанистая, коматиито-подобных по химическому составу пород, 2) высокотитанистая, перидотит–пироксенитовая и 3) глиноземистая, габбро–перидотитовая. Низкотитанистые породы представлены небольшими телами, залегающими в архейской шарыжалгайской серии, метаморфизованной в гранулитовой фации. В процессе избирательного синкинематического метаморфизма компетентных слоев эти тела создавали физическую неоднородность среды и служили центрами концентрации гранитных пегматитов, формировавшихся за счет мигматизированного субстрата. Первичные низкотитанистые гипербазиты, возможно, соответствовали эталонным коматиитам зеленокаменных поясов, но под воздействием флюидно–расплавных компонентов пегматитов испытали существенные изменения содержания петрогенных и малых элементов. Высокотитанистые породы перидотит–пироксенитовой ассоциации слагают небольшие тела, залегающие в полихронных метаморфических комплексах, формировавшихся с архея до раннего палеозоя. Они отличались от коматиито-подобных пород менее магнезиальным составом. Перидотитовый источник выплавки этой ассоциации был подобен источнику исходного расплава глиноземистой серии габбро–перидотитовой ассоциации раннего палеозоя.

Дунжугурский офиолитовый комплекс, входящий в состав юго-восточного складчатого обрамления Северо-Азиатского кратона, является фрагментом рифейского палеоокеанического бассейна. Комплекс в составе сложного пакета тектонических пластин надвинут на основание Гарганской глыбы архейского возраста. В составе комплекса выделяются метаморфизованные перидотиты (апогарцбургиты), ультрамафиты и габброиды расслоенного комплекса, породы дайковой серии, вулканиты и силлы. Породы дайковой серии и вулканиты представлены как сериями нормальной щелочности (резко преобладают), так и субщелочными (единичные разности). Петрохимические особенности пород определяются главным образом процессом кристаллизации котектического парагенезиса оливина, плагиоклаза и клинопироксена. Однако, в породах повышенной магнезиальности – бонинитах и магнезиальных андезибазальтах, в качестве раннего кристаллизующегося минерала присутствует ортопироксен.

В Дунжугурском комплексе выделяются пикриты, базальты, базальтовые андезиты, андезиты и андезито-дациты в составе серии пород нормальной щелочности. Серия пород является переходной между типичными толеитовой и известково-щелочной сериями. Ограниченно присутствуют бониниты и породы повышенной щелочности – трахибазальты и трахиандезибазальты. Составы габброидов соответствуют ультраосновным и основным кумулятам расслоенного комплекса офиолитов.

Геодинамическая типизация пород дайковой серии, вулканитов и силлов указывает на принадлежность магматических образований Дунжугурских офиолитов как к обстановке спрединга океанического дна, так и к субдукционной обстановке. Присутствие среди вулканических образований офиолитов бонинитов указывает на то, что субдукционная обстановка соответствовала начальной стадии формирования энсиматической островной дуги, т.е. островной дуги, заложенной на океаническом фундаменте. Существование серий пород различной щелочности в Дунжугурской зоне свидетельствует о различиях в природе первичных магматических расплавов. Составы пород даек и лав группируются главным образом между трендами СОХ и островодужных толеитовых базальтов, тяготея к последнему, что указывает на несомненную генетическую связь с субдукционной геодинамической обстановкой. Меньшее количество составов группируется возле трендов ОІВ.

В пределах Нармандальского серпентинитового меланжа Джидинской офиолитовой зоны выделена серия крутопадающих тектонических пластин шириной выходов в сотни метров и протяженностью в километры. Они разделены субмеридионально

ориентированными тектоническими швами, которые маркируются зонами милонитзации, бластеза, пропилитизации и лиственитизации. Отдельные тектонические пластины представляют собой: 1) серпентинитовый меланж, матрикс которого представлен тектонизированными серпентинитами с включениями тектонических блоков и линз массивных апоперидотитовых серпентинитов, бонинитов, метабазальтов, метагаббро, пироксенитов, 2) тектонический меланж с блоками известняков, метабазальтов и метагабброидов, 3) матрикс меланжа, образованный апобазитами, участками апогипербазитовыми тектонитами (бластомилонитами), 4) известняки и доломиты в тектонических блоках представлены различными фациями карбонатной платформы, включая приливно–отливные фации с водорослевыми матами, а также тонкослоистые известняки с прослоями туфов и туффитов основного состава, 5) метабазальты известково-щелочной серии – амфиболовые, хлорит–амфиболовые, альбит–хлорит–амфиболовые порфирибластовые ортосланцы, 6) ассоциацию дифференцированных (от основных до кислых) метавулканитов – интенсивно тектонизированные полосчатые ортопороды (сланцы, бластомилониты) с включениями линз известняков.

Терригенная толща Джидинской офиолитовой зоны включает тонкослоистые алевролиты и алевропелиты с прослоями песчаников, крупные оползневые тела осадочных олистостромов с алевропелитовым матриксом, тектоно-гравитационных олистостромов с офиолитокластовым матриксом и олистолитами водорослевых известняков. Часто отмечаются тела темных силицитов и тонкослойчатых алевропелитов. На левобережье р. Зун-Баян-Гол установлен фациальный переход терригенной толщи в турбидитовые отложения флиша, представленного ритмичным чередованием песчаников, алевролитов, алевропелитов. Осадочные текстуры (тонкая параллельная слоистость) и вещественный состав отложений (чередование глин и илов, прослой силицитов) этой толщи указывают на гемипелагическую обстановку седиментации. Присутствие прослоев турбидитов, пространственная ассоциация с терригенным флишем и породами офиолитового разреза, наличие многочисленных оползневых тел и тектоногравитационных олистостром позволяют рассматривать эти отложения как осадки нижнего внутреннего склона глубоководного желоба.

В серпентинитовом меланже Баянгольской аккреционной призмы Джидинской зоны установлены тектонически совмещенные породы, формировавшиеся на разных стадиях развития палеостровной дуги. Охарактеризованы высококальциевые бониниты, комплементарные наиболее деплетированным перидотитам Баянгольского меланжа, которые имеют геохимические особенности надсубдукционных перидотитов. Менее деплетированные перидотиты могут представлять собой остатки от более раннего эпизода плавления в этой же зоне спрединга, так как они имеют явные признаки преобразования островодужными расплавами. Дифференцированный характер бонинитовых расплавов согласуется с присутствием кумулятивных пироксенитов. Базальты, по-видимому, формировались так же, как известково-щелочные вулканиты SR Камчатской островной дуги на больших глубинах в результате плавления деплетированных перидотитов мантийного клина, обогащенных субдукционным компонентом.

Со ссылкой на проведение поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно–педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы за период III этапа опубликованы тезисы доклада отечественного совещания, посвященного памяти В.Е. Хаина, и расширенные тезисы двух докладов в материалах международной конференции в Харбине, Китай.

Теоретические исследования IV этапа НИР проводились по теме: Мантийный магматизм позднего докембрия и палеозоя. Цель работ этого этапа заключалась в реконструкциях магматических процессов позднего докембрия и палеозоя по геохимическим данным для дайковых комплексов. Для реконструкций первичной природы расплавов изучение дайковых пород предпочтительнее изучения пород габброидных массивов, в которых может иметь место кристаллизационная

дифференциация и контаминация *in situ*, а небольшие дайковые тела быстро кристаллизуются и сохраняют микроэлементные и изотопные характеристики глубинных магматических расплавов. В отчете, на примере докембрийских и палеозойских даек в сопоставлении с миоценовыми эффузивами Урикского вулканического поля юго-восточной части Восточного Саяна, а также раннерифейскими эффузивами медвежеской свиты Патомского нагорья показана общая смена источников мантийных магматических расплавов и характер их унаследованности в геологическом времени.

Проведен систематический сбор материалов, обеспечивающих возможность воспроизведения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Привязка образцов при проведении экспедиционных работ осуществлялась с использованием прибора GPS. Определения петрогенных оксидов выполнены в аналитическом центре Института земной коры СО РАН классическим «мокрым» методом. Концентрации микроэлементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS, inductively coupled plasma mass spectrometry) на масс-спектрометре Agilent 7500ce и Element 2 Байкальского аналитического центра коллективного пользования. Для контроля правильности измерений проведено многократное определение концентраций редкоземельных элементов, Sc, Rb, Sr, Zr, Nb, Ba, Hf, Pb, Th, U в семи международных стандартных образцах горных пород (BIR-1, JB-2, BHVO-1, AGV-1, QL-O, BCR-1, STM-1). Градуировка проводилась по многоэлементным стандартным растворам SPEX и Perkin Elmer, для некоторых элементов (например, V, Ni, Ba, Zn, Hf) вместе с растворами использовали также международные стандартные образцы горных пород.

В работе использовались коллекции пород, имеющиеся у участников НИР. Проведены дополнительные экспедиционные исследования с геохимическим опробованием позднедокембрийских и палеозойских дайковых тел, обнаженных в Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирской платформы и сопредельных с ним складчатых структурах Восточного Саяна, а также раннерифейских лав медвежеской свиты Байкало-Патомского нагорья. Отобраны эталонные коллекции для детальной геохимической характеристики наиболее представительных дайковых комплексов Прибайкалья.

В девонском хундыгольском комплексе восточной части Окинской зоны: выделены три группы пород: 1) базальт-андезибазальтовая толеитовой серии Урик-Бельского пояса, 2) трахибазальт-трахиандезибазальтовая умереннощелочной серии Шагайтэ-Гол-Урикского пояса и 3) трахибазальт-фонотефритовая серии повышенной щелочности, пространственно связанной с последним поясом. В толеитовых базальтах установлены микроэлементные характеристики состава MORB при высоких начальных отношениях изотопов Sr. Это несоответствие свидетельствует, с одной стороны, о контаминации мантийных базальтовых расплавов материалом коры, с другой стороны, – о накоплении радиогенных изотопов в мантийном материале с рифейского эпизода проявления магматизма из модифицированного источника типа MORB. Предполагается, что базальтовые и трахибазальтовые расплавы девона были производными единого мантийного источника подлитосферной конвектирующей мантии, образующего тренды смешения с материалом мантийной части литосферы и коры. Из этого же подлитосферного источника с трендом смешения, направленным к изотопно-обогатенному материалу, изливались миоценовые лавы Урикского вулканического поля.

Геохимические исследования эффузивов медвежеской свиты нижнего рифея выявили три типа пород: базальты известково-щелочной серии, высокотитанистые ферробазальты толеитовой серии и трахибазальты умереннощелочной серии. Предполагается, что совместное нахождение базальтов известково-щелочной серии и высокотитанистых ферробазальтов толеитовой серии могло отражать сложную обстановку растяжения континентальной окраины. Подобные ассоциации были распространены в Юго-Западном Приморье во временном интервале среднего кайнозоя

38-33 млн лет назад, когда субдукция Тихоокеанской плиты под окраину Азии отсутствовала, а между ними осуществлялось место боковое скольжение.

Геохимические исследования базитового магматизма позднего докембрия выполнены на примере барунхолбинского комплекса, представленного силлами и дайками, распространенными в северной и северо-западных частях Гарганского блока. Породы комплекса имеют базальт–андезибазальтовый состав толеитовой серии. Предполагается, что силлы и дайки внедрялись во временном интервале 1000–790 млн лет назад. Внедрение толеитовых силлов и даек комплекса сопровождало рифтогенное растяжение древней континентальной литосферы, в результате которого могло произойти структурное обособление Гарганского континентального блока.

Породы барунхолбинского комплекса характеризуются повышенными концентрациями легких лантаноидов и на диаграмме распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), нормированных к хондриту, образуют спектры, подобные спектру обогащенного базальта срединных океанических хребтов (E–MORB). Отмечается слабая отрицательная европиевая аномалия, которая становится более резкой в наиболее дифференцированных разностях пород. В мультиэлементных спектрах, нормированных к составу недифференцированной мантии, наблюдаются отрицательные аномалии по Th–U, Nb–Ta и Р и положительные – по Ba, К и Pb. Содержания Rb, Ba, Th, U в породах сильно варьируют, а концентрации слабо подвижных элементов Nb, Ta, Ti, Y и Yb сопоставимы с концентрациями в базальтах срединных океанических хребтов (N–MORB).

По полученным микроэлементным и изотопным данным предполагается, что базальтовые расплавы барунхолбинского дайкового комплекса были производными малоглубинного магматического источника континентальной литосферной мантии. В процессе эволюции расплавов происходила их фракционная кристаллизация и контаминация веществом древней континентальной коры. По Pb-изотопной систематике установлено время дифференциации протолита источника около 2.7 млрд. лет назад с изменением в нем соотношений U-Th-Pb.

Выявлены существенные отличия между микроэлементными и изотопными параметрами барунхолбинского комплекса даек и силлов Гарганского блока и нерсинского комплекса даек и силлов Шарыжалгайского выступа Сибирского кратона. По сравнению с породами барунхолбинского комплекса, породы нерсинского комплекса обогащены легкими РЗЭ и литофильными элементами, а также обнаруживают более изотопно-обогащенный состав стронция и неодима. Такие характеристики свидетельствуют о существенной коровой контаминации мантийных выплавов края кратона материалом древней коры. На диаграмме изотопных отношений свинца в породах барунхолбинского и нерсинского комплексов наблюдается различное распределение фигуративных точек. Точки даек нерсинского комплекса распределены вдоль линии с наклоном 2.2 млрд. лет, что свидетельствует о более поздней дифференциации U-Pb-изотопной системы субстрата источников магматических расплавов, чем дифференциация субстрата источников расплавов Гарганской глыбы.

Диабазовые силлы неопротерозойского возраста, распространенные в Окинской зоны северо-западнее Гарганского блока, имеют возраст 753 ± 16 млн лет [Кузьмичев, 2004]. Наиболее магнезиальные породы ($Mg\# = 69-72$) характеризуются распределением редкоземельных элементов, типичным для N–MORB. В спектрах несовместимых элементов, нормированных к недифференцированной мантии, выявляется обогащение крупноионными литофильными элементами и обеднение высокозарядными. Низкие начальные изотопные отношения стронция (0.703597–0.703895) и высокое ($^{143}Nd/^{144}Nd$)_t указывают на выплавление базальтов из источника обедненной мантии.

При экспедиционных исследованиях проведено геохимическое опробование позднедокембрийских и палеозойских дайковых тел, обнаженных в Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирской платформы и сопредельных с ним складчатых структурах Восточного Саяна, а также раннерифейских лав медвежьей свиты Байкало-Патомского

нагорья.

В ходе выполнения IV этапа НИР:

- проведена систематизация геохимических данных по эволюции источников базитового дайкового магматизма в докембрии и фанерозое на территории Прибайкалья;
- задачи этапа выполнены полностью, достигнута основная цель работ – найдена изотопно-геохимическая связь источников миоценового магматизма ключевой территории юго-восточной части Восточного Саяна с эволюцией мантийных источников, запечатленной в докембрийских и палеозойских магматических событиях;
- выполнено сопоставление и обобщение результатов исследований на основе анализа научно-информационных источников и теоретических исследований по магматизму докембрия и палеозоя в сопоставлении с поздним кайнозоем;
- работы выполнены на современном научно-техническом уровне с постоянным контролем качества измерений;
- результаты исследований будут положены в основу разработок рекомендаций по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики в ходе выполнения VI этапа;
- результаты исследований будут положены в основу при создании трех запланированных по НИР методических пособий для научно-образовательных курсов в ходе выполнения VI этапа НИР.

Со ссылкой на проведение поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы за период IV этапа опубликована монография «Байкал. Геология. Человек» (составители: участники НИР М.И. Грудинин и И.С. Чувашова), одна статья в ж. «Петрология» и 6 тезисов докладов отечественных совещаний с международным участием.

Теоретические исследования V этапа НИР проводились по теме: Первичные магматические породы гетерогенных габбро-сиенитовых массивов докембрия и палеозоя. Цель работ заключалась в выделении геохимических параметров неизменных магматических пород габбро-сиенитовых массивов и их сопоставлении с параметрами пород таких же дифференцированных комплексов кайнозоя и мезозоя Азии для ответа на вопрос о характере эволюции процессов в геологическом прошлом территории. Решалась основная задача - определить место проявлений габбро-сиенитового магматизма в позднем докембрии и палеозое в общем ходе геологических процессов на юге Сибири.

Проведен систематический сбор материалов, обеспечивающих возможность воспроизведения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Привязка образцов при проведении экспедиционных работ осуществлялась с использованием прибора GPS. Определения петрогенных оксидов выполнены в аналитическом центре Института земной коры СО РАН классическим «мокрым» методом. Концентрации микроэлементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS, inductively coupled plasma mass spectrometry) на масс-спектрометре Agilent 7500ce и Element 2 Байкальского аналитического центра коллективного пользования. Для контроля правильности измерений проведено многократное определение концентраций редкоземельных элементов, Sc, Rb, Sr, Zr, Nb, Ba, Hf, Pb, Th, U в семи международных стандартных образцах горных пород (BIR-1, JB-2, BHVO-1, AGV-1, QL-O, BCR-1, STM-1). Градуировка проводилась по многоэлементным стандартным растворам SPEX и Perkin Elmer, для некоторых элементов (например, V, Ni, Ba, Zn, Hf) вместе с растворами использовали также международные стандартные образцы горных пород.

В работе использовались коллекции пород, имеющиеся у участников НИР. Проведены дополнительные экспедиционные исследования с геохимическим опробованием габбро-сиенитовых массивов. В Озерском массиве дополнительно отобраны породы из его наименее измененной центральной части, в которой сохранились

первичные парагенезисы габброноритов. В Осиновском массиве обнаружены безамфиболовые породы и изучены соотношения сиенитов и габброидов. В Снежинском массиве основные работы были направлены на определение структурных условий его становления. В результате работ составлена схема пространственных соотношений габброидов, гранодиоритов и сиенитов Снежинского массива. Установлено, что 1) гранодиориты локализованы в поле первичных габброидов, 2) сиениты распространяются за пределы первичного контура габброидного массива. Определены участки первичного габброидного массива без наложения более поздних процессов, связанных с внедрением гранодиоритов и сиенитов.

Для выявления характера гетерогенности источников габбро-сиенитовых массивов выполнены исследования трех обстановок развития магматических процессов, которые приводили к образованию сиенитов на примере Снежинского, Хушагольского и Арсентьевского массивов. Первый массив представляет собой одно из габбро-сиенитовых тел, расположенных на северо-западном и южном побережье оз. Байкал, в которых сиениты образовались в пост-коллизийной обстановке, повлекшей за собой вовлечение в магмообразование гетерогенного субстрата из разных источников. Второй массив находится в юго-восточной части Восточного Саяна и характеризует кульминационное состояние магматической системы в зоне сочленения Окинской и Гарганской структурно-формационных зон, которая претерпевала неоднократную активизацию и поэтому также обнаруживает существенную гетерогенность источников. Третий относится к монотойскому комплексу Западного Забайкалья, в котором сиениты явились результатом «внутриплитной» фракционной эволюции единого мантийного родоначального расплава. В первом сиениты проявились на финальном этапе, во втором – за сиенитами высокощелочного состава следовали внедрения щелочных гранитов, в третьем – сиениты формировались в ходе становления массива с относительным повышением их щелочности на финальном этапе. Для сопоставлений с эффузивным аналогом габбро-сиенитовых комплексов привлечены данные по серии щелочной оливиновый базальт – трахит позднекайнозойского Удоканского вулканического поля.

В последовательности магматических событий Снежинского массива габброиды являются наиболее ранними. Они могли внедриться до зонального метаморфизма, проявившегося вследствие раннеордовикской коллизии. Базитовые расплавы имели субдукционные характеристики. Более поздние гранодиориты относятся к породам S-типа, формировавшимся при плавлении метаморфизованных осадочных пород. Их выплавление, по-видимому, сопутствовало коллизийному этапу. Сиениты следовали после коллизии и образовались за счет плавления базитового корового субстрата.

Одним из важных показателей особенностей пород Снежинского массива служат соотношения в них концентраций Eu с концентрациями других редкоземельных элементов. Аномалия Eu отсутствует в рудных габбро и частично в нерудных габброноритах и нередко проявлена в гранодиоритах, монцонитах и сиенитах. Наличие и отсутствие европиевых аномалий и комплементарных соотношений редкоземельных спектров (показанных на рис. 3, А) свидетельствуют о частичном контроле процессов дифференциации фракционированием плагиоклаза.

Снежинский, Быстринский и Безымянский габбро-сиенитовые массивы Юго-Западного Прибайкалья характеризуются сходными ассоциациями умереннощелочных и переходных базитов с сиенитами. Снежинский массив имеет сходство с массивами сопредельных территорий хр. Монотой (Южная Бурятия), Восточного и Западного Саян, Кузнецкого Алатау, Горной Шории и Урала. К габбро-сиенитовому комплексу могут относиться массивы, размещенные в складчатом обрамлении Сибирской платформы, сложенные габброидами и прорывающими их сиенитами. Однако условия образования массивов могут существенно меняться. Если габбро-сиенитовые массивы Юго-Западного Прибайкалья отчетливо связаны с процессами, последовавшими после образования зонального метаморфического комплекса, подобные массивы других территорий могли

формироваться в иных геодинамических условиях.

Среди щелочных кварц–эгирин–авгит(эгирин–геденбергит)–рибекитовых сиенитов Хушагольского массива выделяются составы с повышенными и пониженными концентрациями Rb и Sr (соответственно, 357–405 и 254–290, 17–31 и 4–5 мкг/г), с коэффициентами агапайности $(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}$ 1.3–1.5 и 1.04–1.06, коэффициентами глиноземистости $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}+\text{Ca})$ 0.6–0.7 и 0.89–0.92 и отношениями Rb/Sr 11–23 и 60–64. Среди щелочных гранитов различаются натровые эгириновые и калинатровые эгирин–рибекитовые разновидности ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, соответственно, 0.05–0.26 и 0.8–1.0). Натровые породы обладают наиболее низким коэффициентом агапайности (0.9–1.0), высоким коэффициентом глиноземистости (0.9–1.1), низкими концентрациями Rb, Sr и Nb (соответственно, 82–280, 2–3 и 2–9 мкг/г) и K/Rb (46–52), а калинатровые породы приближаются по этим характеристикам к щелочным сиенитам. Предполагается, что расплавы щелочных гранитов с наиболее низким $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7126$ связаны с щелочными сиенитами процессами дифференциации. По дифференциатам рассчитан возраст около 319 млн лет. Неоднородность Rb/Sr изотопной системы источников с повышением $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ до 1.711 образовалась около 800 млн лет назад и частично около 512 млн лет назад. По расчетам изотопной эволюции различаются выплавки из источника с Rb/Sr = 0.42, приближающегося к составу континентальной коры, и субстрата, испытавшего сильный щелочной метасоматоз с повышением Rb/Sr до интервала 19–52 (возможно, выше).

Раннепалеозойские магматические тела Хушагольского массива отражают начальную активность Хушагол–Билютинской зоны полихронного магматизма в среднем–позднем кембрии (517–490 млн лет назад). В ордовике (480–457 млн лет назад) на территории северо-восточной части Окинской структурно–формационной зоны образовалась обширная магматическая дуга гранитоидных массивов и батолитов. В силуре (440–405 млн лет назад) магматизм вновь проявился в Хушагол–Билютинской магматической зоне внедрением Сахир–Шулутинского массива сильно дифференцированных Li–F гранитоидных расплавов. Эпизод внедрения щелочных сиенитов и гранитов Хушагольского массива в позднем палеозое, около 319 млн лет назад, предшествовал пространственному перераспределению интрузивного магматизма из Хушагол–Билютинской магматической зоны на 25 км к северо-востоку в Самсал–Хоньчинскую магматическую зону, проявившую активность в позднем карбоне и ранней перми (307–261 млн лет назад). В ней распространились литий–фтористые, щелочные и субщелочные гранитоиды, а также амазонитовые граниты.

Магматизм Хушагол–Билютинской зоны изначально сопровождал аккрецию Тувино–Монгольского массива к Сибирскому континенту. Пространственное перераспределение магматизма в Самсал–Хоньчинскую зону свидетельствует о позднекарбоневой структурной перестройке в Окинской структурно–формационной зоне.

По Rb–Sr–изотопной и микроэлементной систематике в Хушагол–Билютинской и Самсал–Хоньчинской зонах полихронного магматизма различаются магматические тела, сложенные 1) дифференциатами, эволюционировавшими с повышением Rb/Sr непосредственно от состава источника, 2) дифференциатами с существенно более высоким Rb/Sr по сравнению с отношением в источнике и 3) такими же дифференциатами в сочетании с порциями выплавки из геохимически неоднородных источников, отличавшимися по Rb/Sr. Интрузивы первого типа слабо обогащены F (Самсальский плутон, дайки и штоки в его пределах). Интрузивы второго типа существенно обогащены F и отвечают Li–F геохимическому типу (Сахир–Шулутинский массив и дайки хоньчинского комплекса). Магматические тела третьего типа характеризуются более низкими концентрациями F и Sr при относительно низком Rb/Sr (в Хушагольском массиве) или более высоком (в Шагайтэгольской диатреме).

Арсентьевский массив формировался в два этапа: этап внедрения расслоенных габброидов эволюционировавших до сиенитов ~279 млн лет назад и этап внедрения

щелочнополевошпатовых сиенитов ~238 млн лет назад. Дайковые пояса Западного Забайкалья, формировавшиеся во временном интервале 303-286 млн лет назад, до Арсентьевского массива и Хоринской вулканоплутонической структуры, характеризовались контрастной ассоциацией пород базитового и среднего-кислого состава. Породы Арсентьевского массива соотносились с близкими по возрасту породами Хоринской вулканоплутонической структуры как начальная и конечная части дифференцированной серии. С повышением SiO_2 содержания Sr снижались от пород расслоенной серии I этапа Арсентьевского массива через породы его II этапа к породам Хоринской структуры одновременно с возрастанием Rb. Из этих соотношений следует вывод о тесной петрогенетической общности пород этих комплексов, возможно, отразившей локализацию процессов в магматических центрах. Такой характер геохимической эволюции мог проявляться в магматизме Западного Забайкалья во временном интервале 288-238 млн лет назад. Переход от дайкового магматизма к магматизму центрального типа произошел 288-286 млн лет назад.

Во временном интервале внедрения даек в Западном Забайкалье 303-286 млн лет назад изотопный состав Sr в источниках был сравнительно однородным ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7059-0.7063$). При активности вулканоплутонических центров в интервале 288-238 млн лет назад магматизм определялся поступлением материала из источников от сильно обедненных ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7033$) до обогащенных ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.707$).

Выявленная смена источников с переходом от трещинных магматических внедрений к магматическим внедрениям в вулканических центрах в Западном Забайкалье нуждается в подтверждении дополнительными систематическими исследованиями других одновозрастных вулканоплутонических и интрузивных комплексов территории.

4. Вулканическая толща Удоканского вулканического поля имеет сложное строение. Выявлена латеральная неоднородность вулканических последовательностей, обусловленная активностью четырех вулканоструктур: 1) Северной (Ингамакитской), 2) Восточной, 3) Центральной и 4) Западной. В Ингамакитской ВС трахиты отсутствовали. В трех других – трахиты были представлены вулканическими некками, экструзиями, лавовыми потоками и пирокластическими отложениями. Ингамакитская вулканоструктура контролировалась активизацией Кодаро-Удоканской зоны, Восточная, Центральная и Западная – активизацией Чукчудинской зоны, в которой трахитовые субвулканические тела и вулканы были отчетливо локализованы в пространстве

Полученные изотопные данные свидетельствуют о том, что позднекайнозойские вулканические серии образовались в Чукчудинской ослабленной зоне при плавлении пород литосферного субстрата обедненного и обогащенного типа. Базаниты выплавлялись из обедненной мантии. Редкие выплавки относятся к обогащенной мантии. Щелочные оливиновые базальты содержат менее обедненный компонент мантии или компонент коры. В лавовых сериях Центральной и Восточной вулканоструктурах присутствует компонент более молодого корового материала, чем в Западной и Ингамакитской. Компонентный состав лавовой серии Западной ВС более сложный. Повышение отношений $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ вдоль простирания Чукчудинской зоны с востока на запад - от Восточной и Центральной вулканоструктур к Западной и смещение фигуративных точек правее геохроны может отражать смешение выплавки более древнего материала на северо-западе с более молодым материалом на юго-востоке. Имеющиеся расхождения в изотопном составе лейкократовых гавайитов-бенморитов и трахитов указывают на их образование из различных источников.

При экспедиционных исследованиях основное внимание уделялось отбору ключевых образцов для датирования первичных магматических пород массивов. В Озерском массиве дополнительно отобраны породы из его наименее измененной центральной части, в которой сохранились первичные парагенезисы габброноритов. В Осиновском массиве обнаружены безамфиболовые породы и изучены соотношения сиенитов и габброидов. В Снежнинском массиве основные работы были направлены на определение структурных

условий его становления. В результате работ составлена схема пространственных соотношений габброидов, гранодиоритов и сиенитов Снежинского массива. Установлено, что 1) гранодиориты локализованы в поле первичных габброидов, 2) сиениты распространяются за пределы первичного контура габброидного массива. Определены участки первичного габброидного массива без наложения более поздних процессов, связанных с внедрением гранодиоритов и сиенитов.

В ходе выполнения V этапа НИР:

- проведена систематизация геохимических данных по эволюции источников габбро-сиенитовых массивов в докембрии и фанерозое на территории юга Сибири;

- задачи этапа выполнены полностью, достигнута основная цель работ – найдена изотопно-геохимическая связь источников пород представительных габбро-сиенитовых массивов территории, Снежинского, Хушагольского и Арсентьевского, с эволюцией мантийных источников, запечатленной в докембрийских и палеозойских магматических событиях;

- представлены сравнительные данные о развитии позднекайнозойской серии щелочной оливиновый базальт – трахит на Удоканском вулканическом поле в области структурного сочленения Байкальской и Олекмо-Становой подвижных систем;

- работы выполнены на современном научно-техническом уровне с постоянным контролем качества измерений;

- результаты исследований будут положены в основу разработок рекомендаций по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики в ходе выполнения VI;

- результаты исследований будут положены в основу трех запланированных по НИР методических пособий для научно-образовательных курсов в ходе выполнения VI этапа НИР.

Со ссылкой на проведение поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы за период V этапа опубликовано 2 тезисов докладов Генеральной Ассамблеи Европейского Союза геологических наук в Вене и 3 тезисов докладов отечественных.

Исследования VI этапа НИР заключались в синтезе материалов по базит-гипербазитовым комплексам всего временного диапазона Земли от архея до кайнозоя с использованием и анализом новых аналитических данных по рудоносным базит-гипербазитовым комплексам. Основная задача состояла в определении по микроэлементным и изотопным отношениям характера смены мантийных источников разновозрастных базит-гипербазитовых комплексов.

Результаты работ по проекту сводятся к решению проблемы образования основных типов базит-гипербазитовых магм и смены их источников в историческом аспекте – в рамках четырех стадий эволюции Земли: 1) лунной, 2) нуклеарной, 3) кратонной и 4) континентально-океанической [Богатиков, Коваленко, 1993; Богатиков и др., 1989, 2001]. Для решения этой проблемы, прежде всего, рассмотрены новейшие данные о строении и составе современной мантии, анизотропных и изотропных мантийных структурах и на этой основе сделан анализ теоретических моделей глубинного магмообразования.

В настоящее время теоретически обосновано, что ведущим процессом эволюции мантии является ее частичное плавление с истощением легкоплавкими компонентами. Литосфера древних кратонов отличается от литосферы складчатых областей обедненным составом (низким содержанием Fe), большой мощностью и низким тепловым потоком. Предполагается комплементарность кратонной литосферы высокотемпературным коматиитовым расплавам, а литосферы складчатых областей – базальтовым. При изучении ксенолитов из оливиновых меланефелинитов Хэнтэй-Даурского поднятия установлен факт относительного обеднения мантии в зоне перехода от шпинелевых перидотитов к гранатовым. Процесс извлечения частичных выплавов и обеднения

мантийных пород был локальным.

На территории Азии пространственные соотношения анизотропных и изотропных областей мантии являются в настоящее время предметом интерпретации скоростей сейсмических волн. Независимую информацию о мантийной структуре даёт изучение микроструктуры мантийных ксенолитов и пространственно-временного распределения мантийного базальтового магматизма. Впервые анизотропия мантии, соответствующая новообразованному плиоценовому хребту, была обнаружена при изучении микроструктуры мантийных ксенолитов из щелочных базальтоидов северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны. Исследования кайнозойского магматизма территории Центральной и Восточной Азии, выполненные в последние годы обеспечили реконструкции глубинной динамики в пространстве и времени.

Верхняя часть мантии характеризуется общей азимутальной анизотропией, на фоне которой выделяются локальные изотропные структуры. Анизотропное состояние может отражать и древние, и новейшие движения. Из анализа структуры мантийных ксенолитов и пространственно-временного распределения мантийного магматизма сделан вывод о сходном характере деформаций верхней части мантии под хр. Восточный Хангай и сопредельными впадинами Центрально-Монгольской рифтовой зоны с деформациями под хр. Удокан и сопредельной Чарской впадиной. Анизотропия свойственна литосферной части малоглубинной мантии шпинелевой фации (т.е. интервалу глубин 50–80 км) и характеризует деформации, развивающиеся под формирующимися линейными поднятиями (горными хребтами). Пространственный переход от анизотропной мантийной структуры к изотропной соответствует переходу от поднятия к рифтовой впадине. Рифтогенное поднятие плавучего (гарцбургитового) мантийного материала соответствует одноосной деформации внедряющегося диапира с изотропной азимутальной структурой.

Частичное плавление мантии имеет место в литосфере и под литосферой в верхней и нижней мантии. В расплавах, излившихся на земную поверхность, представлен материал источников верхней мантии с глубин не более 200 км. В настоящее время отсутствуют какие-либо убедительные доказательства поступления материала из более глубоких мантийных источников. На территории Центральной Азии аномально низкими скоростями сейсмических волн обозначился Саяно-Монгольский домен, пространственно совпадающий с распространением кайнозойских вулканических пород. Для домена характерно снижение скоростей в интервале глубин 200–50 км. Он подстилается слоем с более высокими скоростями сейсмических волн и перекрывается литосферой. Домен представляет собой плоский слой нестабильной мантии и должен характеризоваться свойствами, возникающими в таком слое. Мы предполагаем, что пространственно-временное развитие глубинных процессов в Саяно-Монгольском домене определялось мантийной динамикой, вызванной сближением Индийского индентора с Сибирским кратоном. Утолщённая кратонная литосфера играла роль своеобразных штампов. В процессе сближения киль Сибирского кратона обеспечивал проскальзывание материала под него только на глубине более 200 км (ниже кратонного раздела Леман). Тем самым создавались благоприятные условия для движения мантийного материала в приподошвенной части Саяно-Монгольского домена, игравшей роль нижнего пограничного термального слоя. В Центральной Монголии находится обширная асейсмичная область, охватывающая Хангайское нагорье и сопредельную часть Орхон-Селенгинского среднегорья. Снижение сейсмичности объясняется аномально высоким разогревом коры [Bayasgalan et al., 2005]. С этой областью пространственно связан неоген-четвертичный магматизм. Изучение общего кайнозойского пространственно-временного распределения магматизма свидетельствует о пространственном наложении в этой области процессов Индо-Азиатской конвергенции и рифтогенеза.

По моделям скоростей сейсмических волн и экспериментальной минералогии ультравысоких давлений и температур допускается плавление на разделе 410 км с участием воды. Для разработки такой модели глубинного верхнемантийного

магмообразования представляется перспективным изучение пространственно-временной смены источников магматизма Забайкальского низкоскоростного домена.

Из обзора геологической структуры суперконтинента Евразия сделан вывод о важнейшей роли в его образовании процессов конвергенции, происходивших на фоне закрытия палеоокеанов позднего докембрия и фанерозоя. При наращивании его массы в мантию погружались многочисленные океанические слэбы и с юга, и с востока. Стагнирующие слэбовые фрагменты выявлены сейсмической томографией на разных мантийных уровнях в виде высокоскоростных неоднородностей, пространственно сопряженных с низкоскоростными. Ко времени кайнозойской активизации вся мантия представляла собой «кладбище» стагнирующих слэбов. Для суждения о характере источников новейшего континентального мантийного магматизма и соотношениях процессов конвергенции и дивергенции важен постулат о том, что под территорией Внутренней Азии могли сохраниться стагнирующие слэбовые фрагменты и надслэбовые области закрывшихся палеоокеанов, Монголо-Охотского, Солонкерского и Урало-Монгольского. В моделях сейсмической томографии с высоким разрешением под вулканическими полями Центральной Монголии и сопредельной части юга Сибири установлены низкоскоростные аномалии интервала глубин 50–200 км, а на более глубоких уровнях определены высокие скорости. Между тем, под обширной территорией Забайкалья низкие скорости зафиксированы до переходной зоны мантии.

Разработанные модели новейшего магматизма сравниваются с моделями базит-гипербазитового (коматиитового) магматизма, протекавшего в контрастных условиях ранней Земли на лунной и нуклеарной стадиях. На кайнозойском этапе коматиитовый магматизм не проявлялся. Последнее известное извержение коматиитов о-ва Горгона произошло около 90 млн лет назад. Высокие содержания MgO (и высокие температуры) коматиитов и пикритов Горгоны приближаются по этим характеристикам к архейским лавам, значительно превышая характеристики каких-либо других магм извергавшихся в течение последнего миллиарда лет. Установлено, что 1) ультраосновные магмы коматиитов различного типа образовались в мантии при высокой степени плавления перидотитов источника и/или при плавлении на больших глубинах; 2) в качестве источника коматиитов предполагается мантийный плюм с температурой значительно выше температуры в окружающей мантии; 3) коматииты Барбертонского типа являются продуктами равновесного плавления при давлении выше 8 ГПа или глубине более 240 км. В этих условиях частичный расплав обладал примерно такой же плотностью, как твердые мантийные минералы и изначально оставался в источнике. Он удалялся только при подъеме плюма выше порога нейтральной плавучести. Мейджоритовый гранат является остаточной фазой. Присутствие этой фазы в рестите выражается в образовании магмы коматиитов Барбертонского типа с низким Al_2O_3/TiO_2 ; 4) коматииты тапа Манро и Горгона формировались за счет фракционного плавления на меньших глубинных уровнях мантии. Раннее отделение расплавов способствовало образованию тугоплавких реститов, которые испытывали дальнейшее плавление с образованием коматиитов, обедненных микроэлементами; 5) коматииты типа Карасйок формировались из источника, который был обогащен FeO и несовместимыми элементами-примесями, по сравнению с источниками других коматиитов; 6) часть коматиитовых базальтов является продуктом фракционной кристаллизации коматиитов. Другая часть представляет собой совместный результат кристаллизации и коровой контаминации, в то время как имеются и продукты независимого плавления мантийного источника; 7) толеитовые базальты, связанные с коматиитами архейских зеленокаменных поясов или с пикритами фанерозойских вулканических плато имеют единый, сравнительно эволюционированный состав. Эти базальты, вероятно, формировались за счет плавления в особых частях мантийных источников, приобретая однородный состав посредством переработки в больших магматических очагах открытых систем земной коры; 8) архейские коматиитоподобные породы из фундамента южной части Сибирского кратона, охарактеризованные нами в

ходе выполнения этапа III НИР, сопоставляются по низкому Al_2O_3/TiO_2 и другим геохимическим параметрам с архейскими коматиитами типа Барбертон.

В ходе выполнения всех этапов НИР мы постоянно обращались к базит-гипербазитовым ассоциациям, сформировавшимся на продвинутой (континентально-океанической) стадии эволюции Земли: на этапах I и II рассмотрели кайнозойские и мезозойские комплексы, на этапе III – офиолиты, на этапе IV – палеозойские и докембрийские дайки и эффузивы, на этапе V – гетерогенные габбро-сиенитовые массивы в сопоставлении с позднекайнозойским базальт-трахитовым комплексом хр. Удокан в северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны. Ключевое значение для понимания роли базит-гипербазитового магматизма в эволюции Земли имеют офиолиты, поэтому мы сделали акцент на их маркирующей роли для выделения главных тектонических структур континентально-океанической стадии. Другие комплексы имеют второстепенное значение и служат для дальнейшей конкретизации соотношений между ними. Представленные данные свидетельствуют о том, что Центральноеазиатский складчатый пояс представляет собой коллаж террейнов, разделенных структурными швами, сформировавшимися в процессе сложной геологической эволюции Земли на континентально-океанической стадии. Мантийная структура, созданная в Азии на этой стадии, определила в конечном итоге и характер источников новейшего магматизма в сочетании литосферных и подлитосферных (палеослабых, надпалеослабых) компонентов.

С базит-гипербазитовыми комплексами связан широкий спектр рудных и нерудных полезных ископаемых. В эволюционном аспекте, имеющем прямое отношение к выполняемому проекту НИР, рассмотрен характер сквозной рудной минерализации, проявляющейся в комплексах ранних и продвинутых стадий эволюции Земли. По этой причине сосредоточено внимание только на Ni-Cu-PGE-месторождениях (PGE – элементов платиновой группы). Месторождения других металлов (за исключением Cr) могут проявляться либо на ранней, либо на поздней стадиях эволюции Земли.

В кратонных блоках юга Сибири и Дальнего Востока (в шарыжалгайской серии юга Сибирского кратона и в Алданском щите) распространены потенциально-рудноносные коматииты и коматиитоподобные породы. Приведенный обзор проблемы поисков Ni-Cu-PGE-месторождений позволяет дать общую положительную оценку перспектив кратонных блоков в отношении минерализации этого типа. С использованием имеющихся радиоизотопных датировок и геохимических данных по составу пород мы сопоставляем коматиитоподобные породы из шарыжалгайской серии с архейскими коматиитами Барбертонского типа, а коматииты кунманьенского комплекса Алданского щита - с более молодой группой коматиитов Гилмор, Томпсон и Раглан.

В ходе выполнения VI этапа НИР:

- проведена систематизация геологических и геохимических данных по базит-гипербазитовым комплексам всей геологической истории Земли;
- задачи этапа выполнены полностью, достигнута основная цель работ – охарактеризован характер смены базит-гипербазитового магматизма в эволюции мантийных процессов;
- представлен сравнительный анализ магматизма ранних (лунной и нуклярной) и продвинутой (континентально-океанической) стадии эволюции Земли;
- разработаны рекомендации по поискам Ni-Cu-PGE-месторождений, связанных с базит-гипербазитовыми комплексами ранней и продвинутой эволюции Земли.

Со ссылкой на проведение поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы за период VI этапа подготовлено 3 учебных пособия по темам: «Современные проблемы геологии: базит-гипербазитовый магматизм в эволюции Земли», «Радиоизотопные методы хронологии геологических процессов» и «Компьютерная графика в геологии», опубликовано 2 статьи и 2 тезисов докладов отечественных совещаний, 3 статьи представлено в печать.

Руководитель проекта

зав. кафедрой, проф., д.г.-м.н. С.В. Рассказов

Кафедра динамической геологии
геологического факультета
Иркутского государственного университета

Базовая кафедра современных аналитических методов
в динамической и инженерной геологии Института земной коры СО РАН