

На правах рукописи

АВДЕЕНКО АННА СЕРГЕЕВНА

**ПОВЕДЕНИЕ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОЙ СИСТЕМЫ В
ПРОЦЕССАХ КОНТАМИНАЦИИ МАГМ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ФЛЮИД-ПОРОДА (НА ПРИМЕРЕ НЕОГЕНОВЫХ
ГРАНИТОИДОВ И МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД РАЙОНА
КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД)**

Специальность

25.00.09 – геохимия,

геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Учреждение Российской Академии Наук Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН.

Научные руководители: кандидат геолого-минералогических наук
Дубинина Елена Олеговна
доктор геолого-минералогических наук
Носова Анна Андреевна

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
Покровский Борис Глебович
доктор геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
Курчавов Анатолий Михайлович

Ведущая организация: Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН

Защита состоится 26 ноября 2009 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.122.01 ИГЕМ РАН по адресу 119017, Москва, Старомонетный пер., д.35

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЕМ РАН

Автореферат разослан 21 октября

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук



Юдовская М. А.

Актуальность темы. Гранитоидный магматизм проявляется на всех стадиях формирования континентальной коры, но наибольший масштаб гранитообразования характерен для пред-, син- и постколлизийных обстановок. С этим типом магматизма генетически связаны разнообразные (Cu-порфировые, Sn, W-Mo, редкометальные и др.) месторождения. В последние годы выявлена большая металлогеническая роль гранитов высоко-Ba-Sr (латитового) типа, высокодифференцированные разновидности которых (Li-F гранитоиды) обладают высокой рудоносностью с широким спектром месторождений - молибден-меднопорфировых, редкометальных, урановых.

Образование гранитов высоко-Ba-Sr типа на сегодняшний день связывают с плюмовым магматизмом [Tarney, 1994]. Для этих гранитов характерны высокие концентрации Ba, Sr и P, низкие концентрации Rb, Th, U, Y, Nb и тяжелых редкоземельных элементов (HREE), а так же высокое отношение K/Rb. Источником таких пород могут быть «обогащенные» мантийные расплавы. Однако одной из проблем, возникающей при исследовании гранитов высоко-Ba-Sr типа, являются довольно радиогенные изотопные отношения Sr, умеренно радиогенные Nd и высокие значения величины $\delta^{18}\text{O}$, которые не характерны для магматических пород, в образовании которых существенная роль отводится мантийным расплавам. Формирование изотопных параметров этого типа гранитов в основном объясняют процессами фракционной кристаллизации и ассимиляции осадочных пород «обогащенными» расплавами [Fowler, Henney 2001; Qian, 2003; Reiners, Nelson 1996]. Однако, этими процессами не всегда удается полностью описать поведение изотопных систем в высоко-Ba-Sr гранитах.

Данная работа посвящена исследованию проблемы формирования изотопных (Sr, Nd, O) параметров высоко-Ba-Sr гранитоидов. Для этого в качестве **объекта исследования** были выбраны высоко-Ba-Sr гранитоиды района Кавказских Минеральных Вод (КМВ), с которыми связано редкометальное и урановое оруденение. Изучение гранитоидов КМВ проводилось на основе исследования изотопной геохимии Sr, Nd и O с привлечением необходимых петрологических, геохимических и геологических данных. Комплексное изучение поведения изотопных систем (O, Sr, Nd,) позволяет решать широкий круг задач: исследование механизмов и установление степени контаминации магм, определение роли флюидной фазы в постмагматических процессах, решать ряд других вопросов.

Район Кавказских Минеральных Вод, в котором расположены высоко-Ba-Sr гранитоиды, отличается современной термальностью, выражающейся в многочисленных проявлениях деятельности минерализованных водных

источников. Параллельно с изучением самих гранитоидов КМВ было проведено изотопное (O, H) изучение минеральных вод данного района с целью установления их типа питания и механизма формирования изотопных параметров. Полученные данные представляют интерес как для прогноза дальнейшего геохимического и гидрогеологического состояния уникального природного объекта – минеральных вод района КМВ, так и для решения общих проблем генезиса минерализованных вод.

Настоящее исследование имело следующие **цели**: (1) Определить роль процесса контаминации расплавов при формировании изотопно-кислородного состава высоко-Ba-Sr гранитоидных пород на примере гранитоидов КМВ; (2) Выявить роль взаимодействия водный флюид-порода при становлении гранитных интрузивных тел по данным изучения изотопно-кислородной системы гранитоидов КМВ; (3) Установить степень взаимодействия вода-порода при низких температурах на примере изучения изотопного состава водной фазы минеральных источников района КМВ.

Исходя из намеченных целей, были поставлены следующие **задачи исследования**: (1) Усовершенствование методики фторирования для повышения точности измерения изотопного состава кислорода в валовых пробах и мономинеральных фракциях силикатных пород, модернизация метода изотопного уравнивания для определения $\delta^{18}\text{O}$ в природных водах; (2) Анализ изотопного состава кислорода в породах и минералах-вкрапленниках гранитоидных тел КМВ; (3) Анализ изотопного состава кислорода и водорода минерализованных и пресных вод района КМВ; (4) Интерпретация данных по изотопному составу кислорода и радиогенным изотопам (Sr, Nd) с использованием моделей, описывающих их поведение в процессах взаимодействия расплав-ассимилянт и вода-порода.

Фактический материал. В основу диссертации легли результаты исследований, проведенных автором в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН. Образцы пород для изотопных исследований были отобраны при участии автора в течение двух полевых сезонов (2003-2004 гг.) в районе Кавказских Минеральных вод (КМВ), часть образцов любезно предоставлены А.Я. Докучаевым и А.А. Носовой (ИГЕМ РАН). Изотопные исследования сопровождались петрографическим и геохимическим исследованием пород.

Главные методы исследования. При исследовании гранитных и вмещающих пород района КМВ было проанализировано 23 образца пород Rb-Sr методом, 18 образцов пород Sm-Nd методом, в 39 образцах пород определен изотопный состав кислорода и в 14 образцах пород определен изотопный состав

углерода. Для 18 минеральных фракций из гранитных пород изучался изотопный состав кислорода. Было выполнено 20 парных определений изотопного состава водорода и кислорода в образцах минерализованных вод района КМВ. Изотопные исследования пород сопровождалось микроскопическим изучением образцов гранитных пород и микронзондовым исследованием составов минералов (геологический факультет МГУ, Н.Н. Коротаева), породообразующие оксиды в породах определялись методами химического анализа в ИГЕМ РАН (О.Г. Унанова). Редкие элементы в породах определялись методом ICP-MS в ИМГРЭ (Д.З. Журавлев) и методом инструментального нейтронно-активационного анализа (INAA) в ИГЕМ РАН (А.Л. Керзин).

Научная новизна работы. Впервые для гранитоидов КМВ проведено комплексное изотопно-геохимическое (O, Sr и Nd) и геохимическое изучение. Изотопный состав кислорода в породах КМВ изучен впервые. Показана принципиальная возможность преимущественно корового происхождения высоко-Ba-Sr гранитоидов с формированием их геохимической специфики в результате химического взаимодействия кислого расплава с высоко-Mg карбонатной породой. Проведены расчеты формирования изотопных параметров гранитоидов КМВ в рамках одностадийного процесса AFC(+X) без привлечения дополнительного источника мантийных расплавов. Предложен механизм флюидно-магматического взаимодействия, приводящего к формированию высоких величин $\delta^{18}\text{O}$ в лейкогранитах. Подтверждено инфильтрационное происхождение минерализованных углекислых вод КМВ, впервые получена количественная оценка гипсометрической высоты области их питания.

Практическая значимость работы. С гранитами высоко-Ba-Sr типа часто связаны рудные месторождения: молибден-порфировые (Клаймакс), полиметаллические и золоторудные (Забайкалье (Приаргунье)), урановые (район КМВ), месторождения бора (Дальний Восток) и ряд других. Проведенные исследования условий формирования гранитов высоко-Ba-Sr типа дают информацию, которая может быть использована при построении генетических моделей рудообразования, связанного с позднеколлизийным магматизмом. Выявление роли взаимодействия флюид-порода и установление механизма контаминации магм, которым посвящена значительная часть работы, имеют большое значение для расшифровки источника и процессов транспорта рудного вещества.

Для рационального использования и обоснования мероприятий по защите основного природного ресурса района - месторождений минерализованных вод, результаты мониторинга их изотопных параметров во времени могут дать

информацию об изменении пропорций вод разного происхождения, являющихся основными компонентами минеральных вод КМВ, соотношение которых определяет качество воды.

Основные защищаемые положения.

1. Впервые определен изотопный состав кислорода в валовых пробах и сквозных минералах-вкрапленниках гранитоидов КМВ. Установлены закономерности поведения изотопно-кислородной системы пород, коррелирующиеся с их минералого-петрологическим типом: для группы граносиенитов и сиенитов характерен узкий диапазон вариаций величины $\delta^{18}\text{O}$ (от 9.1 до 10.4 ‰), для группы амфиболовых гранитов диапазон вариаций величины $\delta^{18}\text{O}$ шире и характерны в целом ее более низкие значения (от 7 до 9.1 ‰), наибольший размах вариаций и наиболее высокие значения величины $\delta^{18}\text{O}$ характерны для группы лейкогранитов (от 8.9 до 13.8 ‰). Изотопно-кислородное равновесие в сквозных минералах-вкрапленниках всех исследованных типах гранитоидов отсутствует.
2. На основе комплексного изотопно-геохимического (O, Nd, Sr) и геохимического изучения гранитоидных пород структуры КМВ установлено, что в истории их формирования имел место процесс контаминации исходных расплавов осадочными породами на глубине. Поведение изученных изотопных систем может быть описано в рамках реакции кислого силикатного расплава с породами карбонатного состава.
3. На основе расчета по линейной модели изотопного обмена в процессе кристаллизации расплава показано, что высокие значения и значительный интервал вариаций величин $\delta^{18}\text{O}$ в лейкогранитах КМВ могут быть следствием взаимодействия флюид-порода на стадии становления интрузивных тел в близповерхностных условиях.
4. Усовершенствованы методики изотопного анализа кислорода и водорода в образцах природных вод. С применением этих методик изучен изотопный состав минерализованных и пресных вод района КМВ. Показано, что основным компонентом минеральных источников КМВ являются инфильтрационные метеорные воды, испытавшие процесс изотопно-кислородного обмена с силикатными породами при низких температурах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5-ти глав, введения, заключения и дополнительных материалов, включающих результаты химических анализов пород (Приложение 1). Основной материал работы изложен на 133 страницах, которые содержат 15 таблиц и 50 рисунков. Список цитируемой литературы включает 125 наименований.

Апробация работы. По теме диссертации в рецензированных журналах опубликовано 3 статьи и одна сдана в печать. Результаты исследований докладывались на 3-х российских и одной международной конференции: XVI Симпозиуме по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова, (Москва, 2001); 14th V.M. Goldschmidt conference (Copenhagen, 2004); XVIII Симпозиуме по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова (Москва, 2007) и IV Российской конференции по изотопной геохронологии (Санкт - Петербург, 2009).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своим научным руководителям Е.О. Дубининой и А.А. Носовой за советы и консультации в процессе работы над диссертацией. Автор благодарен заведующему лабораторией изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ член-корреспонденту РАН И.В. Чернышеву за постоянную помощь и ценные советы при написании работы. Автор благодарен Э.Д. Баировой, Т.И. Олейниковой и Ю.В. Гольцману за помощь в проведении изотопного анализа стронция и неодима. К.Н. Шатагину, А.В. Самсонову, Ю.О. Ларионовой и М.М. Аракелянц за ценные комментарии и полезные замечания, полученные при обсуждении результатов исследования. Особая благодарность А.В. Перкову, Н.И. Сердюку, Г.И. Сердюку и А.В. Леляеву, за помощь в усовершенствовании и поддержании работоспособности масс-спектрометрического оборудования лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

Автор признателен А.Я. Докучаеву за помощь в проведении и организации полевых работ, Л.В. Сазоновой за помощь в минеральных и петрологических исследованиях каменного материала, Ю.А. Костицыну (ГЕОХИ РАН) за ценные замечания при обсуждении отдельных положений диссертации.

Глава 1. Происхождение и изотопно-геохимические характеристики высоко-Ва-Sr гранитоидов

Данная глава представляет собой литературный обзор, отражающий современные представления о происхождении высоко-Ва-Sr типа гранитов и гипотезы образования гранитоидов района КМВ, как типичных представителей этого типа гранитов.

Геохимическими критериями выделения высоко-Ва-Sr гранитов в отдельный тип являются высокие содержания Ва и Sr в этих породах по сравнению с традиционными S-, I- и A- типом гранитов. Происхождение этого типа гранитов чаще всего связывают с плюмовым магматизмом [Tarney, 1994], считая, что источником высоко-Ва-Sr гранитов могут быть «обогащенные» мантийные расплавы, которые образовались в результате: 1) плавления вещества

субдуцированных океанских островов или плато, обогащенных Ba и Sr (и P); 2) плавления в присутствии воды вещества континентальной коры за счет тепла расположенных под ней либо мафических магм, либо мантийных плюмов; 3) плавления вещества низов литосферы при внедрении карбонатных расплавов из астеносферы. Для указанного типа гранитов характерны высокие значения изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, которые многие исследователи [Reiners, Nelson 1996; Qian, 2003; Fowler, Henney, 1996 и др.] считают результатом процессов фракционной кристаллизации и ассимиляции мантийных расплавов. Однако данными процессами не всегда удается объяснить наблюдаемые изотопные параметры высоко-Ba-Sr гранитов.

Исследование высоко-Ba-Sr гранитов района КМВ имеет богатую историю, однако почти все предшествующие исследования, достаточно разносторонние, обошли вниманием методы изотопной геохимии, весьма информативные в вопросах происхождения гранитоидов. Исключением является работа [Поль и др., 1993], в которой приведены результаты изучения Sr и Pb изотопных систем для отдельных интрузивов КМВ.

Анализ литературных данных показывает, что на сегодняшний день существуют три гипотезы образования гранитоидов КМВ: 1) ассимиляция гранитной магмой вмещающих карбонатных пород в зоне становления интрузивных тел [Соболев и др., 1959; Короновский и др., 1986]; 2) смешение кислой трахириолитовой магмы с мантийными щелочными базальтами и их дериватами [Поль и др., 1993]; 3) магматическая дифференциация расплавов, которая сопровождалась незначительной контаминацией вмещающими породами и участием флюидной фазы на поздних стадиях дифференциации [Носова и др., 2005]. Тем не менее, выдвинутые гипотезы не дают исчерпывающих объяснений полученным в настоящей работе новым данным, в частности, по поведению изотопно-кислородной системы в гранитоидах КМВ.

Глава 2. История изучения, геологическая, геохимическая и минералогическая характеристика гранитоидов района Кавказских Минеральных вод

Район КМВ является составной частью Кавказского сегмента Альпийского складчатого пояса и располагается на северном фланге Эльбрусской вулканической области. Гранитоиды КМВ являются одними из самых ранних проявлений постколлизийного магматизма в регионе: их внедрение произошло в позднем миоцене (8.3 млн. лет. назад [Лебедев и др., 2005]). Все гранитоиды района КМВ приурочены к крупному Транскавказскому субмеридиональному поперечному

разлому. Интрузивные тела КМВ прорывают мезозойско-кайнозойский осадочный чехол Скифской плиты, сложенный главным образом терригенно-карбонатными отложениями юры (в юрское время для Кавказа было характерно и образование эвапоритовых толщ), песчаниками и известняками мелового возраста, глинами и мергелями палеогена.

Выходы интрузивов района КМВ образуют структуру, близкую к кольцевой (рис.1). Эта структура хорошо выражена в гравитационном и магнитном полях [Смирнова, 1999]. Структура имеет зональное строение: во внешней части распространены интрузивы сиенитового и граносиенитового состава (гг. Верблюд, Лысая, Золотой Курган, Змейка, Развалка, Железная, Юца, Острая, Тупая, Медовая, Кинжал). Ядро структуры слагают интрузивы гранитного и лейкогранитного составов (гг. Бештау, Козьи Скалы, Бык, Шелудивая).

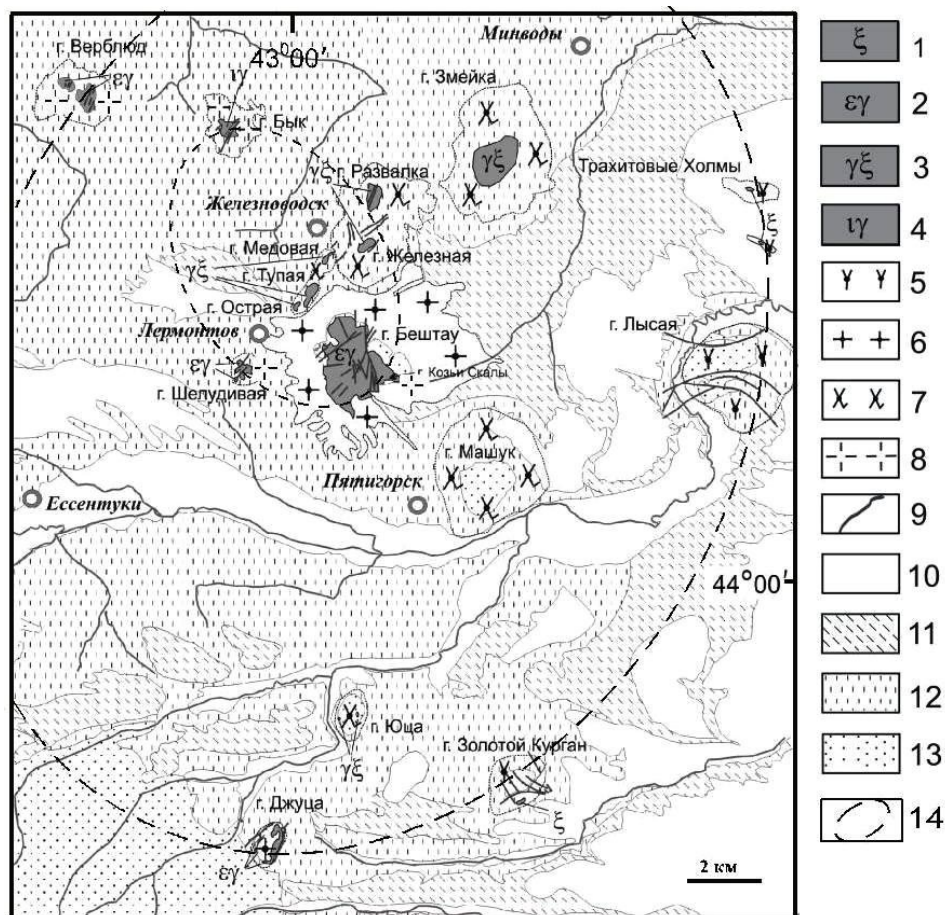


Рис. 1. Геологическая схема района Кавказских Минеральных Вод

Условные обозначения: 1-4 – выходящие на поверхность сиениты (1), субщелочные граниты (2), граносиениты (3) и лейкограниты (4); 5-8 – нескрытые эрозией (прерывистый контур - по геоморфологическим данным, состав – предполагаемый по аналогии со вскрытой частью) сиениты (5), субщелочные граниты (6), граносиениты (7), лейкограниты (8); 9 – установленные в пределах интрузивов разломы; 10-13 – осадочные образования: четвертичные (10), неогеновые глины (11), палеогеновые глины и мергели (12), меловые песчаники, аргиллиты, алевролиты, мергели и известняки (13); периферическая и центральная часть кольцевой структуры КМВ (14).
Схема составлена с использованием [Носова и др., 2005]

Во многих интрузивах района встречается большое количество ксенолитов (иногда до 20% объема породы), имеющих осадочное, метаморфическое и магматическое происхождение. Среди ксенолитов кристаллических пород доминируют две группы: габброиды и включения апатит–карбонат–клинопироксен–флогопит–плагиоклазовой (Ap-Carb-CPx-Phlog-Pl) породы.

Все гранитоиды КМВ имеют порфиroidную структуру и содержат от 10-15 до 20-30% минералов-вкрапленников, среди которых наиболее распространены плагиоклаз, K-Na полевой шпат, кварц, флогопит, амфибол и клинопироксен. По минеральному составу гранитоидные породы КМВ можно разделить на три группы. Первая группа – амфиболовые граниты, в которых из вышеперечисленных минералов-вкрапленников практически отсутствуют флогопит и клинопироксен. Вторая группа – сиениты и граносиениты, в которых нет кварца и роговой обманки. Третья группа – лейкограниты, для которых характерно отсутствие такого минерала-вкрапленника как клинопироксен. Массивы, сложенные первой и второй группами пород, отличаются друг от друга положением в структуре и составом ксенолитов. Если группа амфиболовых гранитов располагается в центре структуры КМВ и в ней нет ксеногенных включений Ap-Carb-CPx-Phlog-Pl породы, то группа сиенитов и граносиенитов располагается на периферии структуры КМВ и характеризуется большим количеством ксеногенных включений Ap-Carb-CPx-Phlog-Pl состава.

По геохимическим особенностям гранитоиды КМВ являются типичными представителями гранитов высоко-Ba-Sr типа. Для гранитоидных пород КМВ характерны высокие концентрации Ba (до 2360 мкг/г), Sr (до 1380 мкг/г), Pb (до 400 мкг/г) и умеренные – Rb (до 290 мкг/г). Спектры РЗЭ гранитоидов КМВ имеют сильно фракционированный характер ($(La/Yb)_N > 20$).

Глава 3. Методы изотопных исследований

В главе приведено описание изотопных методов, которые были использованы при изучении гранитных пород и минеральных вод района КМВ.

Основное внимание в этой главе уделено методам определения изотопного состава кислорода и водорода в изучаемых образцах. Все измерения изотопного состава водорода и кислорода выполнялись на масс-спектрометре DELTA^{plus} фирмы ThermoQuest (Finigan). Подготовка образцов для определения величин $\delta^{18}O$ в породах и минералах проводилась с использованием метода фторирования [Vennemann and Smith., 1990], каждый образец подвергался разложению в присутствии BrF₅ и анализировался не менее 4-6 раз. Правильность полученных значений $\delta^{18}O$ контролировалась регулярными измерениями международных

стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}\text{O}$ находилась на уровне $\pm 0.3\text{‰}$ для мономинеральных фракций и не хуже $\pm 0.3 - 0.4\text{‰}$ для образцов валовых проб. Определение изотопного состава кислорода в водных образцах проводилось методом изотопного уравнивания кислорода воды с CO_2 в одноразовых шприцах [Авдеенко, Дубинина, 2001]. Правильность определения величины $\delta^{18}\text{O}$ в водных образцах контролировалась повторными измерениями международных образцов сравнения МАГАТЭ, погрешность использованного метода составила $\pm 0.2\text{‰}$. Изотопный состав водорода в минеральных водах КМВ анализировался путем разложения водных проб на горячем ($800\text{ }^\circ\text{C}$) хrome с помощью периферийного устройства H/Device фирмы ThermoQuest (Finigan). Точность определения величин δD в водных пробах составила $\pm 0.3\text{‰}$.

Измерения изотопного состава неодима и стронция валовых проб пород КМВ проводились из тех же порций, что и анализ изотопного состава кислорода. Измерения изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ образцов проводились на многоколлекторном термоионизационном масс-спектрометре Micromass Sector 54 (Великобритания). Погрешность анализа ($\pm 2\sigma$) не превышала 0.003% для $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и 0.002% для $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Правильность измерений изотопного состава стронция контролировалась по международному стандартному образцу SRM-987. При изотопном анализе Nd использовался внутрилабораторный стандартный образец с изотопным отношением $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512406$, нормализованным к международному стандартному образцу La Jolla. Среднее значение, полученное по внутрилабораторному стандартному образцу в период измерения проб гранитоидов КМВ, составило $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512401 \pm 0.000003$.

Глава 4. Формирование изотопных (Sr, Nd, O) параметров высоко-Ba-Sr гранитоидов позднемиоценовых интрузивов района КМВ

Для гранитоидов КМВ характерен узкий интервал начальных изотопных отношений $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{8.3} = 0.7083-0.7086$ и небольшие отрицательные значения величины $\epsilon\text{Nd}(T)$ - от -4.2 до -2.1 . Близость начальных изотопных отношений Sr в гранитоидах КМВ (в совокупности с другими геологическими и петрологическими данными) позволяет сделать вывод о том, что расплав, из которого формировались данные породы, по-видимому, был когда-то одним и тем же. В общей последовательности поведения изотопных отношений стронция и неодима эффузивных и интрузивных пород в Кавказском регионе (рис. 2) гранитоиды КМВ занимают крайнее положение - в области наиболее радиогенных изотопных

составов Sr и наименее радиогенных Nd, что указывает на минимальное участие в их формировании расплавов с мантийными изотопными характеристиками (Рис. 2).

Практически все вулканические породы Большого Кавказа характеризуются значительными концентрациями стронция (в среднем около 550 ppm). Это обогащение Sr связывают с ассимиляцией корового вещества мантийными расплавами [Бубнов, 2003, Лебедев и др., 2006], которая могла протекать как до, так и после внедрения расплавов.

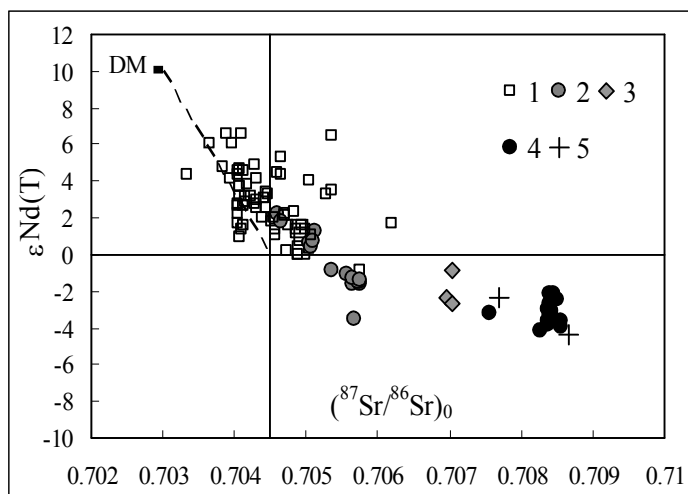


Рис. 2. Изотопный состав Nd и Sr гранитоидов КМВ и неогеновых магматических пород Кавказа

1- вулканические породы Восточной Анатолии и Большого Кавказа [Pearce et al., 1990; Бубнов, 2003; Лебедев и др., 2003 и др.];
2-вулканы Эльбрусской области [Бубнов, 2003, Лебедев и др., 2006];
3 – Эльджуртинские граниты [Носова, неопубликованные данные]; 4, 5- гранитоиды КМВ и ксеногенные включения в них [данная работа]

По сравнению с вулканиками Большого Кавказа, концентрации Sr в гранитоидах КМВ еще более высокие (до 1380 ppm), что заставляет предполагать ассимиляцию пород, богатых Sr, например, осадочных карбонатов. Как показало сопоставление изотопно-геохимических параметров гранитоидов КМВ и вмещающих интрузивы пород, гипотеза об ассимиляции боковых пород расплавами гранитоидов КМВ в зоне становления интрузивов оказалась несостоятельной. Карбонатные породы, находящиеся в непосредственном контакте с интрузивами, характеризуются отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7078-0.7085) близкими и частично перекрывающимися с диапазоном начальных отношений Sr в гранитоидах КМВ, но при этом обладают низкими содержаниями стронция (в среднем около 700 ppm) по сравнению с гранитными породами (1000-1300 ppm). Следовательно, боковые породы не могут рассматриваться как источник повышенных концентраций Sr, характерных для гранитоидов КМВ.

Вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ в гранитоидах КМВ являются существенными и зависят от минералого-петрологического типа исследованных пород (рис. 3). Для амфиболовых гранитов установлен интервал от 7.0 до 9.1 ‰; для сиенитов и граносиенитов - от 9.1 до 10.4 ‰; для лейкогранитов - от 8.9 до 13.8 ‰. Наличие существенных вариаций и закономерное поведение величин $\delta^{18}\text{O}$ в пределах структуры КМВ (рис. 3) может также указывать на ассимиляцию осадочных пород

расплавами гранитоидов. Изотопный состав кислорода минералов-вкрапленников (кварца, полевого шпата, флогопита, амфибола и диопсида) амфиболовых

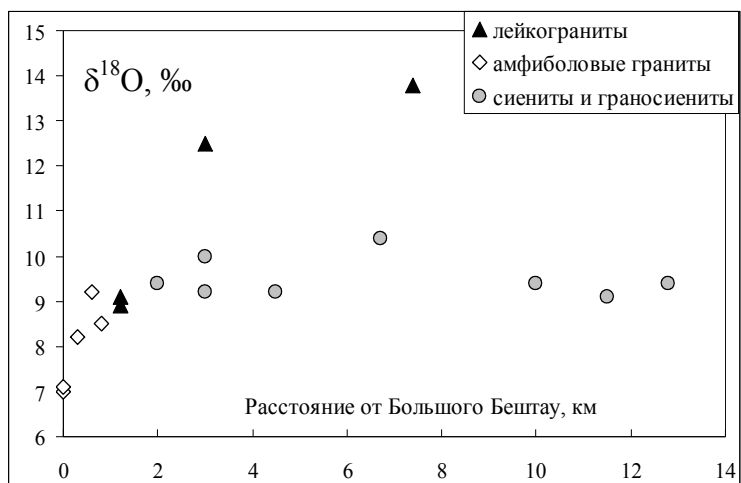


Рис. 3. Изотопный состав кислорода валовых проб гранитоидов КМВ в зависимости от расстояния от центральной части структуры КМВ (г. Большой Бештау)

гранитов, сиенитов, граносиенитов и лейкогранитов КМВ указывает на отсутствие изотопно-кислородного равновесия между минералами-вкрапленниками всех изученных типов пород. На рис. 4 нанесены рассчитанные температуры изотопного уравнивания «сквозных» минералов-вкрапленников - флогопита и полевого шпата для четырех интрузивов КМВ. Полученные температуры ($>900^{\circ}\text{C}$) нереальны для условий кристаллизации гранитного расплава.

Результаты изучения изотопного состава кислорода и стронция явно указывают на определенную роль в истории формирования гранитоидов КМВ

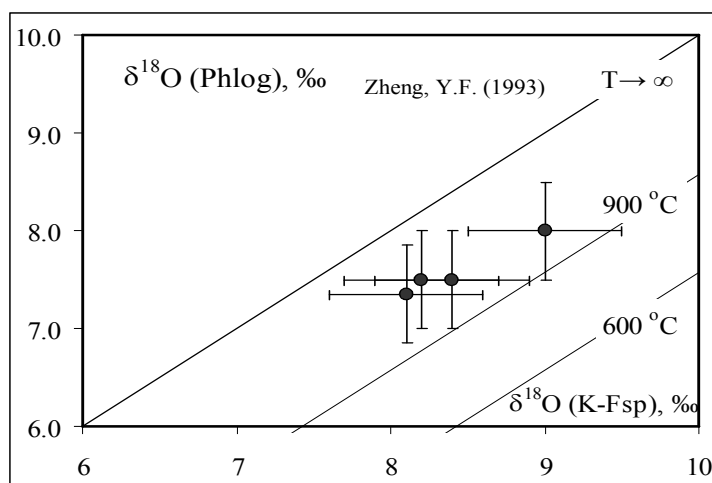


Рис. 4. Изотопный состав кислорода «сквозных» минералов-вкрапленников флогопита и полевого шпата в гранитоидах КМВ

процессов ассимиляции, которые, однако, не могли протекать в зоне становления интрузивных тел, вследствие низких концентраций стронция и неконтрастных величин $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ во вмещающих интрузивные тела породах.

Вероятно, что ассимиляция могла иметь место еще до внедрения интрузивных тел, на более значительных глубинах. Информацию о подобных процессах могут предоставить обнаруженные в сиенитах и граносиенитах КМВ ксеногенные включения пород разного состава. Среди ксенолитов, присутствующих в интрузивных телах КМВ, доминируют включения габброидов и пород Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl состава. Последние заслуживают особого внимания, поскольку по своим геохимическим параметрам (высокие концентрации Sr (около 4000 ppm), Ba (около 1700 ppm) и P (около 8000 ppm)) они близки к «обогащенным» мантийным расплавам, с которыми обычно связывают образование высоко-Ba-Sr пород. Ксеногенные включения этого типа встречаются практически во всех интрузивных массивах КМВ (исключением являются только амфиболовые граниты группы Бештау).

Проведенное изотопное исследование включения Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl породы (образец 3-03-17) показало, что данный тип ксеногенных включений в гранитодах КМВ имеет скорее осадочное, а не магматическое происхождение. Макро- и микроскопически установлено, что включение 3-03-17 имеет зональное строение - в центре его преобладает кальцит, а по краям - преимущественно флогопит. В области контакта включения с вмещающими граносиенитами наблюдаются микропустоты, к которым приурочены выделения барита. Измеренный в образце 3-03-17 изотопный состав кислорода карбонатной фазы находится в интервале, характерном для измененных осадочных карбонатных пород ($\delta^{18}\text{O}=18.8\text{‰}$), а изотопный состав серы барита из этого же образца ($\delta^{34}\text{S}=13.5\text{‰}$) характерен для сульфатов древнего морского происхождения. Все изложенное указывает на то, что ксеногенные включения пород Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl состава могут являться реститами захваченных расплавом высоко-Mg карбонатных пород, которые взаимодействовали с кислым расплавом по реакции типа:



где *Dol* – ассимилянт, представленный высоко-Mg карбонатной породой, *L* – кислый расплав.

Высокие концентрации Sr, Ba, величина $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения (0.70867), близкая к интервалу начальных отношений Sr в гранитоидах КМВ, наличие карбонатной фазы и барита с «осадочными» изотопными метками, указывают на породы Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl состава как на остаточный материал ассимилированных расплавами карбонатных пород.

Предполагаемый возраст ассимилянта

С большой долей осторожности можно провести оценку возраста ассимилированных карбонатных пород, базируясь на предположении об осадочном

происхождении включений Ap-Carb-CPx-Phlog-Pl состава. Изотопный состав серы барита в образце 3-03-17, предоставляет возможность оценить возрастные рамки, используя хемотратиграфическую кривую для сульфатов морского происхождения, а изотопный состав стронция, полученный для этого же образца, может быть сопоставлен с аналогичной кривой для стронция морской воды. Сопоставление полученных данных с возрастными кривыми, представляющими изменение величин $\delta^{34}\text{S}$ сульфата морской воды и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ морской воды в течение фанерозоя, приведено на рис.5, пунктирная линия соответствует изотопным характеристикам образца 3-03-17.

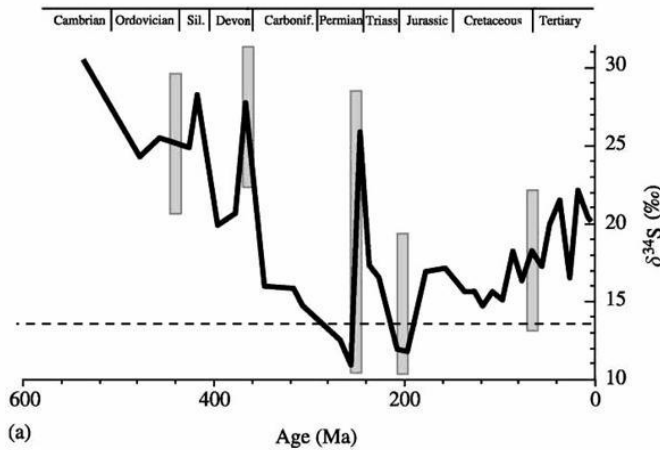


Рис. 5.а. Изотопный состав серы сульфата морской воды в фанерозое [Китр, 2003]

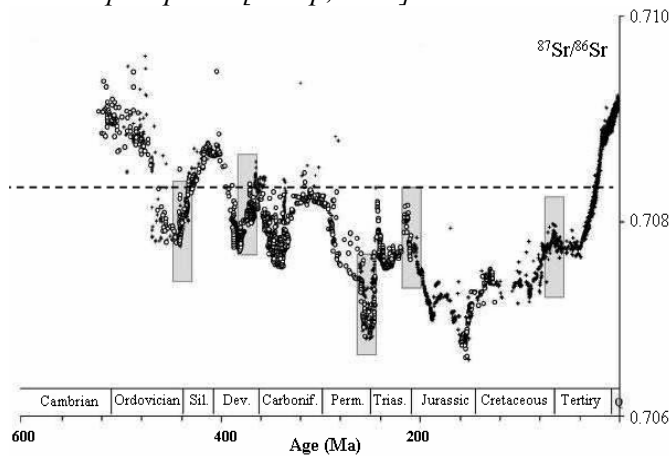


Рис. 5.б. Распределение отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в морских карбонатах в фанерозое [Китр, 2003]

Из двух пересечений с возрастной кривой на рис. 5а, более реальной является граница триаса и юры, поскольку в геологическом разрезе осадочных отложений, известных в районе КМВ, более древних пород не наблюдается. Изотопный состав стронция морских осадков в это же время мог оказаться близким к измеренному в образце 3-03-17 (рис. 5б). Именно в это время для изучаемого района было широко проявлено образование эвапоритовых толщ [Шевченко, 1992; Богашова, 2007 и др.], что могло обеспечить геохимическую специфику ассимилянта (высокие концентрации Sr и Ba).

Моделирование поведения изотопных систем в процессе контаминации

Количественная оценка вклада ассимилянта была проведена в рамках модифицированной модели AFC(+X) [Ray, 1998], которая, в отличие от классической модели AFC [DePaolo, 1981], подразумевает, что на фоне ассимиляции происходит не только кристаллизация, но и обособление

дополнительной фазы X. В приложении к гранитоидам КМВ, под фазой X понималось образование «остаточных» фаз после взаимодействия высоко-Mg карбонатной породы с кислым (Fsp+Otz) расплавом по реакции (1), аналогичных включениям Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl состава. Под процессом кристаллизации понималось формирование ассоциаций минералов-вкрапленников (флогопита и полевого шпата). Все модельные расчеты описывают измеренные величины в области $1 > f > 0.95$ (где f - доля оставшегося расплава), т.е. когда количество вкрапленников в соответствии с реакцией (1) должно составлять от 0 до 8 %, что не превышает наблюдаемое содержание вкрапленников в гранитоидах КМВ.

Результаты расчетов по модели AFC(+X) для Sr и Nd систем показали (рис. 6), что формирование изотопных параметров и содержаний Sr и Nd в гранитоидах КМВ может быть описано в рамках одностадийного процесса AFC(+X) при исключительно коровых параметрах исходного кислого расплава без привлечения дополнительного мантийного компонента.

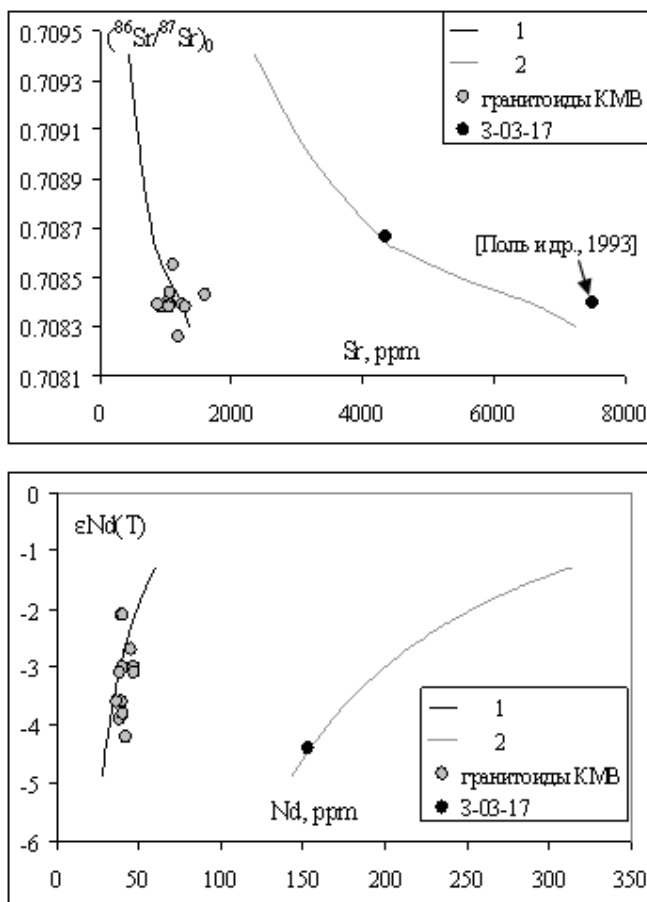


Рис. 6. Сопоставление расчета поведения изотопного состава и концентраций Sr и Nd по модели AFC (+X) [Ray, 1998] с измеренными значениями в гранитоидах КМВ и Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl включениях (образец 3-03-17)

Линии 1 и 2 - расчет изменения составов гранитоидного расплава и Ar-Carb-CPx-Phlog-Pl включений соответственно. Параметры, использованные при расчете - для исходного расплава: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71$; $\epsilon\text{Nd} = -5$; $C(\text{Sr})=320$, $C(\text{Nd}) = 27$ ppm при $D_{\text{Sr}} = 2.5$ и $D_{\text{Nd}} = 0.1$. Для высоко-Mg карбонатной породы, принятой в качестве ассимилянта: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7083$; $\epsilon\text{Nd} = 0$; $C(\text{Sr}) = 3500$ ppm и $C(\text{Nd}) = 14$ ppm. Коэффициент распределения «фаза X – расплав» для Sr принят равным 5.3, для Nd = 5.2

Количественные оценки поведения изотопно-кислородной системы были основаны на сравнительном анализе величин $\delta^{18}\text{O}$ «сквозных» минералов-вкрапленников – полевого шпата и флогопита в зависимости от изменения изотопного состава валовых проб, которые в случае порфировых пород с

небольшим содержанием вкрапленников могут быть отождествлены с составом расплава. Расчеты проводились таким образом, чтобы описать полученные для гранитоидов КМВ зависимости в координатах « $\delta^{18}\text{O}$ флогопит - $\delta^{18}\text{O}$ вал» и « $\delta^{18}\text{O}$ полевой шпат - $\delta^{18}\text{O}$ вал» (рис. 7). При расчете $\delta^{18}\text{O}$ исходного расплава был принят равным составу амфиболовых гранитов Большого Бештау (+7‰), величина $\delta^{18}\text{O}$ ассимилирующихся карбонатных пород принята равной 24.5 ‰. Коэффициенты фракционирования «риолит–полевой шпат» и «риолит–флогопит» при $T = 750\text{--}800$ °C рассчитаны по уравнениям Жао и Ченга [Zhao, Zheng, 2003].

При расчетах допускалось, что формирование минералов-вкрапленников начинается одновременно с началом ассимиляции расплавом карбонатной породы, при этом кристаллизующийся вкрапленник находится в локальном равновесии с

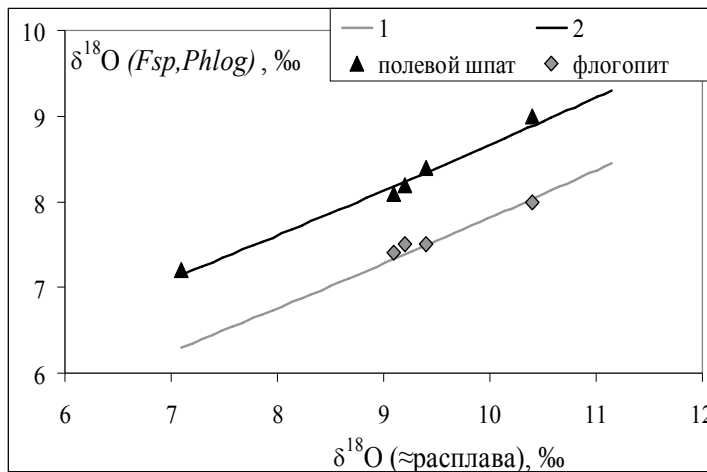


Рис. 7. Расчет изменения $\delta^{18}\text{O}$ вкрапленников полевого шпата и флогопита по мере возрастания $\delta^{18}\text{O}$ расплава (линии 1 и 2)

На диаграмму нанесены измеренные значения для четырех гранитоидных тел КМВ

расчеты, только такой вариант поведения изотопно-кислородной системы способен объяснить наблюдаемые для гранитоидов КМВ линейные зависимости в координатах « $\delta^{18}\text{O}$ минерал - $\delta^{18}\text{O}$ вал», наклон которых отличается от 45 ° (рис. 7). Расчеты показывают, что в процессе ассимиляции кислым расплавом карбонатных пород по реакции (1) могли сформироваться минералы-вкрапленники (ПШ и флогопит) с изотопным составом кислорода, неравновесным с изотопным составом расплава.

Формирование изотопно-геохимических параметров лейкогранитов КМВ

Среди гранитоидов КМВ группа лейкогранитов занимает особое положение. В истории образования лейкогранитов ведущая роль отводится процессам фракционной кристаллизации [Носова и др., 2005], а не процессам ассимиляции, как было предложено выше для остальных гранитоидов КМВ. Микроэлементный

расплавом. По мере протекания реакции (1) величина $\delta^{18}\text{O}$ расплава возрастает. Если допустить, что диффузионный обмен между растущим минералом-вкрапленником и расплавом отсутствует, становится очевидным, что суммарный изотопный состав минерала будет постепенно отклоняться от равновесия кристалл-расплав. Как показывают

состав лейкогранитов хорошо моделируется процессами фракционной кристаллизации из расплава, отвечающего составу амфиболовым гранитам группы Б. Бештау. Величины $\delta^{18}\text{O}$ амфиболовых гранитов КМВ находятся в интервале от 7 до 9.2 ‰, в то время как лейкограниты имеют значения величины $\delta^{18}\text{O}$ от 8.9 до 13.8 ‰. Объяснить такой существенный изотопный сдвиг процессами фракционной кристаллизации невозможно, в силу высоких температур и малых величин коэффициентов фракционирования кристалл-расплав. Процесс заметной ассимиляции вмещающих (боковых) пород в зоне остывания интрузивов, как уже было показано, не мог иметь место. Рассмотренный выше процесс контаминации до момента внедрения расплавов, хорошо описывающий поведение изотопных параметров сиенитов и граносиенитов, также не способен объяснить высокие значения величин $\delta^{18}\text{O}$ в лейкогранитах. Остается предполагать, что наблюдаемый изотопно-кислородный сдвиг в лейкогранитах возникает в процессе взаимодействия флюид-порода на магматической стадии или на стадии остывания интрузивного тела.

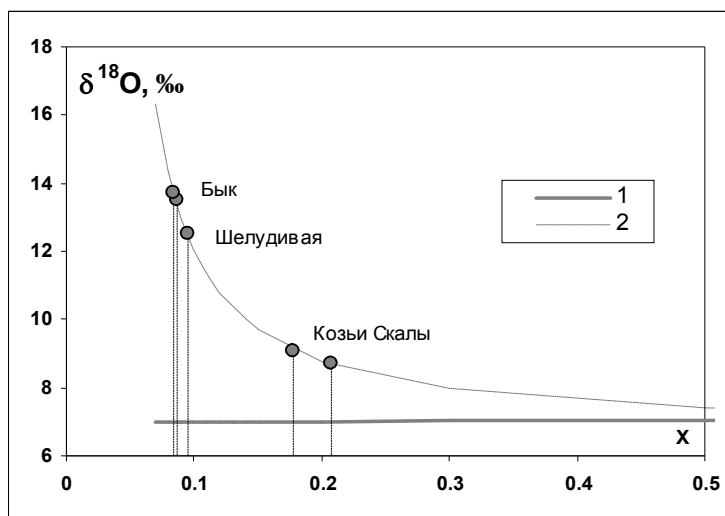


Рис. 8. Изменение изотопного состава кислорода по мере кристаллизации интрузивного тела

1- $\delta^{18}\text{O}$ кристаллизующегося расплава, 2- $\delta^{18}\text{O}$ остывающей породы на периферии интрузива в момент закрытия изотопно-кислородной системы минералов ее основной массы

движение выделяющегося при кристаллизации расплава водного флюида происходит в обратном направлении. Таким образом, участки породы, которые образованы из первых порций кристаллизующегося расплава (расположенные в краевых зонах интрузивного тела), испытают на себе максимальное воздействие флюида, выделившегося в процессе дальнейшей кристаллизации. Наименее сильно

Для интрузивов лейкогранитов КМВ был проведен расчет по линейной модели взаимодействия флюид-порода, изложенного в работе [Дубинина и др., 2009 в печати].

Схема взаимодействия подразумевает, что остывание внедрившегося расплава приводит к движению фронта кристаллизации от периферийных частей интрузива к его центру, а

воздействие флюида проявится для участков пород, удаленных от периферии интрузива и кристаллизовавшихся на заключительной стадии.

При расчетах было принято исходное содержание воды в расплаве, равное 5%, $\delta^{18}\text{O}$ расплава = 7‰, $T=700\text{ }^\circ\text{C}$ кристаллизации расплава и $T=300\text{ }^\circ\text{C}$ - закрытия изотопно-кислородной системы полевых шпатов основной массы лейкогранитов. На рис. 8 показана динамика изменения величин $\delta^{18}\text{O}$ кристаллизующегося расплава (линия 1), и минералов основной массы породы на периферии интрузива в момент закрытия их изотопно-кислородной системы (линия 2). Величина X , отложенная по оси абсцисс - массовая доля закристаллизованной породы в системе, т.е. доля оставшегося расплава в системе равна $(1-X)$. Проведенный расчет показывает, что измеренные величины $\delta^{18}\text{O}$ в лейкогранитах массивов Бык, Шелудивая и Козьи Скалы могут являться следствием расположения отобранных образцов в периферийных зонах этих плохо вскрытых эрозией интрузивных тел (рис. 8). Из расчета следует, что изотопный сдвиг в процессе взаимодействия остывающей породы с «собственным» флюидом может быть весьма значителен на ранних стадиях кристаллизации интрузивного тела ($x < 0.2$). Далее изотопный сдвиг становится менее 1‰, и ко времени кристаллизации половины расплава почти исчезает.

Глава 5. Происхождение вод минеральных источников КМВ

Процесс взаимодействия флюид-порода, отражается не только на изотопном составе пород, но и на изотопном составе флюида или природных вод, и его исследования можно проводить, изучая изотопные сдвиги как в породах, так и в природных водах, которые участвовали во взаимодействии с горными породами. Район КМВ, для которого известно большое количество теплых минеральных источников [Углекислые..., 1963], является уникальным объектом для исследований. В литературе имеется ограниченное количество данных по изотопному составу вод района КМВ, в основном, эти данные получены для проб, отобранных в 80-х годах прошлого века. Наши исследования проведены на пробах минерализованных и пресных вод (полевые работы 2003–2004 гг) спустя 25 лет, в течение которых шла интенсивная эксплуатация этих минеральных источников.

Измеренные нами величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ в углекислых водах КМВ варьируют в довольно узком интервале: от (-79.2) до (-63.8) ‰ и от (-12.2) до (-10.4) ‰ соответственно. Изотопный состав водорода соответствует интервалу среднегодовых осадков, выпадающих в этом районе на высотах 1500 м и ниже (рис. 9), что подтверждает метеорное происхождение вод минеральных источников КМВ [Ляшенко, Потапов, 1984; Федоров, 1999; Яковлев, Поляк, 1997].

На рис. 9 видно, что полученные величины δD и $\delta^{18}O$ в минерализованных и пресных водах КМВ, расположены немного левее как глобальной линии метеорных вод, предложенной Крейгом [Craig, 1961], так и локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), рассчитанной для района КМВ, с использованием базы данных МАГАТЭ. Составы вод в районе КМВ с таким же изотопно-кислородным сдвигом обнаруживались и ранее [Fedorov, 1989], это объяснялось протеканием процессов подземного испарения. Полярной точки зрения придерживается группа исследователей из ВСЕГИНГЕО [Поляков, Соколовский, 2005], которые предполагают сугубо инфильтрационный характер вод КМВ. Новые данные по геохимии микроэлементов и РЗЭ в водах района КМВ и Приэльбрусья, также свидетельствуют об активности процессов взаимодействия в системе «вода-порода» [Дубинина и др., 2005]. В этом случае положение точек слева от ЛЛМВ может быть следствием изотопно-кислородного обмена вод с силикатными и карбонатными породами при низкой температуре в условиях доминирования кислородного резервуара пород. Расчеты показывают, что изотопный состав кислорода воды, находящейся в равновесии с породами карбонатного (+20 ‰) и силикатного (+10 ‰) составов при температурах 70⁰С и 40⁰С (оценки температуры минерализованных вод КМВ на глубине 1000 м [Поляков, Соколовский, 2005]), может показать наблюдаемый сдвиг влево от ЛЛМВ только при взаимодействии с силикатными породами.

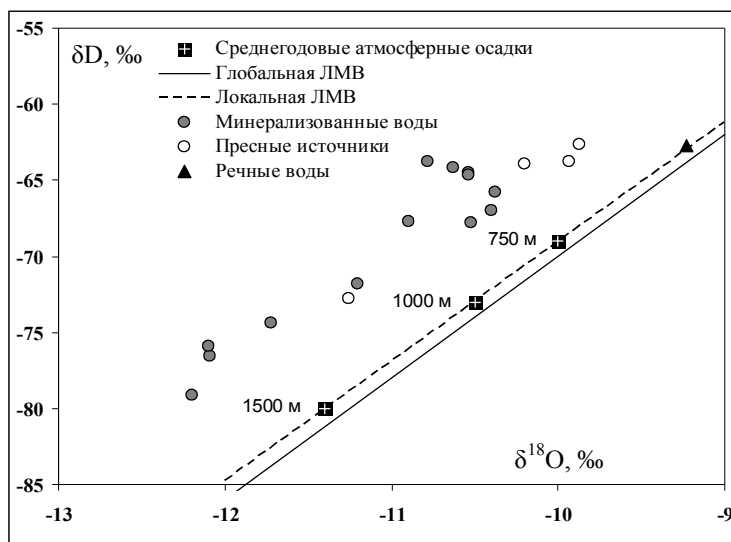


Рис. 9. Изотопный состав минерализованных и пресных вод района КМВ

Линия локальных метеорных вод и среднегодовые составы осадков рассчитаны с использованием базы данных МАГАТЭ [Bowen, Revenaugh, 2003; Bowen et al., 2002; Bowen et al., 2005]. Цифры около точек среднегодовых атмосферных осадков - абсолютные высоты, для которой произведен расчет.

Поскольку при низких температурах изотопный обмен «вода-порода» протекает эффективно только в процессах химического выщелачивания, наиболее вероятными минералами, контролирующими изотопно-кислородный сдвиг, по-видимому, являются полевые шпаты.

Проведенные расчеты показали, что если вода, прошедшая стадию изотопного обмена с силикатными породами при низких температурах, в дальнейшем будет разбавляться локальными атмосферными водами, то можно получить составы, близкие к составам вод КМВ. Разбавляемый компонент при этом должен обладать пониженными величинами δD . Сопоставление полученных нами данных по изотопному составу минерализованных вод района КМВ и с имеющимися в литературе [Поляков, Соколовский, 2005] показало, что таким компонентом могут являться талые ледниковые или атмосферные воды. На рис. 10 видно, что пересечение двух трендов, построенных по литературным и нашим данным, дает общую точку (A2) с координатами (-14.5; -93). Предполагаемый механизм смешения единого для всех компонента с разными типами поверхностных или захороненных вод позволяет рассматривать координаты этой точки как изотопные характеристики общего компонента. Его природа, несомненно, метеорная, поскольку при экстраполяции на ЛЛМВ (точка A1) получаются составы, соответствующие ледникам Большого Кавказа. Интерполяция с использованием базы данных МАГАТЭ показывает, что атмосферные осадки, имеющие такой изотопный состав водорода, должны выпадать на более высоких гипсометрических отметках, чем район КМВ - около 2400 м над уровнем моря.

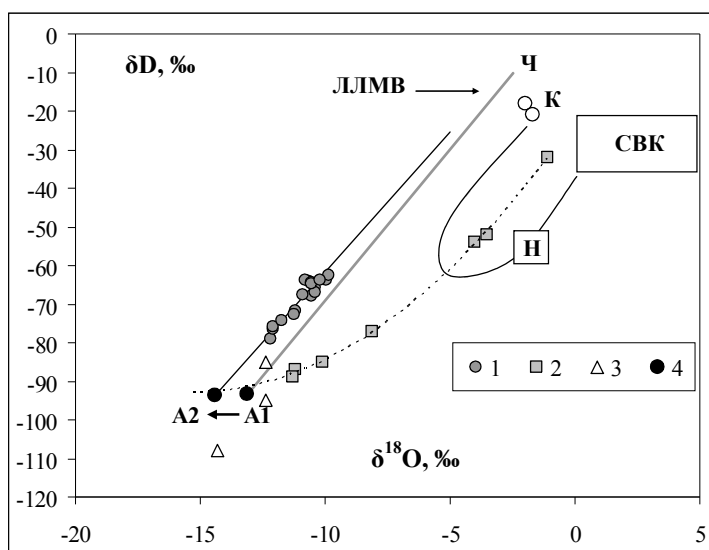


Рис.10 Изотопный состав вод КМВ по данным настоящей работы и опубликованным данным [Поляков, Соколовский, 2005]

ЛЛМВ - линия локальных метеорных вод, поле «Н» - хлоридные воды Нагута, «Ч», «К» - усредненный состав вод Черного [Иконникова и др., 2007] и Каспийского [Поляков, Соколовский, 2005] морей, «СВК» - седиментационные воды флишевых толщ Северо-Западного Кавказа [Поляков, Соколовский, 2005]. 1- минеральные и пресные воды КМВ, данная работа, 2 - группа вод, в формировании которых принимает участие седиментогенный водный компонент [Поляков, Соколовский, 2005], 3 – ледниковые воды Большого Кавказа [Поляков, Соколовский, 2005], 4 - фигуративные точки инфильтрационного компонента в области питания (A1) и в зоне формирования вод КМВ (A2)

Таким образом, областью питания минерализованных вод КМВ могут являться воды атмосферных осадков или тающих ледников, которые попадают в моноклиналильные структуры осадочного чехла на склонах горных сооружений Большого Кавказа. Дальнейшая их фильтрация приводит к изотопно-кислородному сдвигу (A1→A2 на рис. 10) за счет обмена с терригенными толщами, слагающими моноклиналильные структуры осадочного чехла. Разбавление этих вод локальными атмосферными водами в зоне разгрузки источников КМВ приводит к уменьшению изотопно-кислородного сдвига.

Разбавление компонента А происходит не только локальными атмосферными водами, о чем свидетельствует группа вод Нагутского месторождения, точки которых расположены вдоль пунктира на рис. 10.

Объяснить изотопные параметры этих вод невозможно без привлечения вод седиментогенной природы – захороненных морских вод или рассолов древних эвапоритов. Наиболее контрастны в этом ряду хлоридные воды Нагута (поле «Н» на рис.10), для которых отмечается аномально высокая минерализация и специфический солевой состав [Поляков, Соколовский, 2005].

На сегодняшний день можно лишь сказать, что эти воды не соответствуют изотопному составу вод Черного и Каспийского морей, и не соответствуют полю седиментационных вод Северо-Запада Кавказа, захороненных во флишевых отложениях (поле «СВК» на рис.10).

Разнообразие солевого и изотопного состава минерализованных вод КМВ определяется типом компонента, разбавляемого единым источником метеорного происхождения. Разбавляющие воды имеют область питания, удаленную от КМВ к югу, по-видимому, она расположена на склонах горных сооружений Большого Кавказа. Наиболее вероятным типом пород, которые взаимодействуют с этим водным компонентом, по-видимому, являются силикатные породы.

Заключение

Проведенные изотопно-геохимические исследования гранитоидов КМВ показали, что все породы изученных интрузивных тел могли сформироваться из единого исходного расплава. Изотопно-кислородные данные коррелируют с геолого-петрологическим разделением пород интрузивных тел КМВ на три группы – амфиболовых гранитов, группу сиенитов и граносиенитов и группу лейкогранитов.

Процесс ассимиляции карбонатных пород кислыми расплавами, который обусловил формирование геохимических и изотопных особенностей сиенитов и граносиенитов КМВ, по-видимому, протекал по механизму химического

взаимодействия гранитного расплава с высоко-Mg карбонатными породами, содержащими эвапоритовый компонент. Реститами ассимилянта, вероятно, являются обнаруженные в сиенитах и граносиенитах КМВ ксеногенные включения Ap-Carb-CPx-Phlog-Pl пород. Проведенные изотопные ($^{87}\text{S}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{34}\text{S}$) исследования карбонатной фазы и барита во включении этого типа позволяют предполагать возраст ассимилянта, приходящийся на границу триаса и юры. В это время для Предкавказья характерно образование эвапоритовых толщ, что могло обеспечить геохимическую специфику ассимилянта - высокие концентрации стронция и бария.

На основе расчетов, проведенных по изотопным (Sr, Nd и O) данным, показано, что формирование изотопных параметров и содержаний Sr и Nd в гранитоидах КМВ может быть описано в рамках одностадийного процесса AFC(+X) при исключительно коровых параметрах исходного кислого расплава без привлечения дополнительного мантийного компонента. Расчеты показывают, что в данном процессе могли сформироваться минералы-вкрапленники (ПШ и флогопит) с наблюдаемым изотопным составом кислорода, неравновесным с изотопным составом кислорода основной массы пород.

Формирование изотопно-кислородной системы лейкогранитов не подчиняется описанию процессами кристаллизационной дифференциации и ассимиляции боковых пород, и взаимодействием гранитного расплава с высоко-Mg карбонатными породами на глубине. Расчетным путем показано, что при формировании расплавов лейкогранитов КМВ, по-видимому, ведущую роль играло флюидно-магматическое взаимодействие, имевшее место на стадии остывания интрузивных тел.

Проведенные изотопные (δD и $\delta^{18}\text{O}$) исследования минеральных и пресных вод района КМВ показывают, что основным источником их водного компонента являются метеорные воды. Область питания удалена от выходов источников КМВ и находится на гипсометрических отметках около 2400 м над уровнем моря. Наблюдаемый дефицит ^{18}O в водах КМВ может быть объяснен процессом взаимодействия инфильтрационного водного компонента с силикатными породами при низких температурах. Разнообразие в солевом и изотопном составе вод КМВ определяется процессами смешения метеогенных инфильтрационных вод либо с атмосферными водами в зоне выхода источников, либо с водами седиментационного генезиса.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Авдеенко А.С., Дубинина Е.О. Изотопный анализ кислорода воды с применением метода уравнивания с CO_2 в одноразовых шприцах // Тезисы докладов XVI Симпозиума по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова. Москва, 2001. С. 152.
2. Лаврушин В.Ю., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С., Костенко О.Е. Углекислые воды Северного Кавказа: происхождение и условия формирования // Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование. М.:РУДН, 2003, С. 431-443
3. Dubinina E.O., Avdeenko A.S., Lavrushin V. Yu. The genesis of the North Caucasian mineral waters: an isotope and geochemistry study // 14th V.M Goldschmidt conference: Copenhagen: Denmark, 2004, V. 68, Suppl. 1, A251
4. Лебедев В.А., Чернышев И.В., Авдеенко А.С., Носова А.А., Докучаев А.Я, Олейникова Т.И., Гольцман Ю.В. Неуравновешенность начального изотопного состава Ag и Sr в сосуществующих минералах миоценовых гипабиссальных гранитоидов района Кавказских Минеральных Вод // Докл. РАН, 2006, Т.410, №1, С. 95-100
5. Авдеенко А.С., Дубинина Е.О. Оценка эффекта “памяти” при измерении изотопного состава водорода в водных пробах с помощью приставки H/Device // Тезисы докладов XVIII Симпозиума по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова. Москва, 2007, С. 23
6. Авдеенко А.С., Дубинина Е.О., Носова А.А., Гольцман Ю.В., Олейникова Т.И. Источник и эволюция расплавов позднемиоценовых гранитоидов района Кавказских Минеральных Вод // Тезисы докладов XVIII Симпозиума по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова. 2007, С. 24-25
7. Авдеенко А.С., Дубинина Е.О., Носова А.А., Гольцман Ю.В., Олейникова Т.И. Изотопные (Nd, Sr, $\delta^{18}\text{O}$) характеристики как отражение природы протолита позднемиоценовых высоко-Sr-Ba гранитоидов района Кавказских Минеральных Вод (Северный Кавказ) // Докл. РАН, 2008, Т. 422, №. 1, С. 1-5.
8. Авдеенко А.С., Дубинина Е.О., Носова А.А. Неравновесность изотопного состава кислорода минералов-вкрапленников порфиридных гранитоидов КМВ (Северный Кавказ) // Тезисы докладов IV Российской конференции по изотопной геохронологии. С-Петербург, 2009, Т.1, С. 17-20.
9. Дубинина Е.О., Носова А.А., Авдеенко А.С. О механизме контаминации расплавов гранитоидов карбонатными породами на примере высоко-Sr-Ba гранитоидов района КМВ (Северный Кавказ) // Тезисы докладов IV Российской конференции по изотопной геохронологии. С-Петербург, 2009, Т.1, С. 169-171

10. Дубинина Е.О., Носова А.А., Авдеенко А.С., Аранович Л.Я. Формирование изотопных (Sr, Nd, O) параметров высоко-Sr-Ba гранитоидов позднемиоценовых интрузивов района КМВ (Северный Кавказ) // Петрология (в печати)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Авдеенко' (Avdeenko), with a long horizontal stroke extending to the right.

