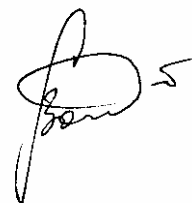


На правах рукописи



ВОЙТЕНКО Дмитрий Николаевич

**ПЕТРОЛОГИЯ КИЯ-ШАЛТЫРСКОГО МАССИВА  
(КУЗНЕЦКИЙ АЛАТАУ)**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск 2007

Работа выполнена в НИЛ структурной петрологии и минерагении и на кафедре петрографии ФГОУ ВПО «Томский государственный университет».

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент И.Ф. Гертнер

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор А.Э. Изох,  
лаборатория «Петрология и рудоносность  
магматических формаций»  
(ИГиМ СО РАН, г. Новосибирск)

кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент Н.А. Макаренко,  
кафедра динамической геологии  
(Томский государственный университет)

Ведущая организация ФГОУ ВПО  
«Сибирский Федеральный Университет»  
Институт цветных металлов и золота  
(г. Красноярск)

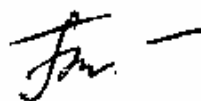
Защита состоится 12 ноября 2007 г. в 16:30 час. на заседании диссертационного  
совета К 212.267.04 в Томском государственном университете в ауд. № 154

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
Томского государственного университета.

Автореферат разослан 5 октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических  
наук, доцент



О.В. Бетшер

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Уртиты Кия-Шалтырского щелочно-базитового плутона представляют собой уникальные интрузивные образования и служат высокосортным сырьем для получения глинозема. Их изучение имеет большое значение для понимания как условий проявления щелочного магматизма в складчатых регионах, так и процессов формирования месторождений богатых нефелиновых руд.

**Цель исследований** состояла в выявлении закономерностей структурно-вещественной эволюции габбро-уртитовой ассоциации Кия-Шалтырского массива.

**Основными задачами работы являлись:** 1) реконструкция вероятностного деформационного режима формирования массива; 2) моделирование внутренней неоднородности уртитового тела; 3) оценка эволюции магмогенерирующего мантийного резервуара и геодинамического режима формирования пород габбро-уртитовой ассоциации; 4) оценка вероятного абсолютного возраста массива.

**Фактический материал.** В основу диссертационной работы положены результаты полевых и лабораторных исследований пород Кия-Шалтырского массива, проводимых автором в 1999-2004 гг. в рамках научных исследований НИЛ структурной петрологии и минерагении и кафедры петрографии Томского государственного университета, и при выполнении проектов ФЦП «Интеграция» (№№ Е0254, 6-33245), НИР (№ гос. регистрации 01200215452, № РИ-111.0/003/053), РФФИ (грант № 04-05-64331), Министерства образования и науки России (№ Е 02-9.0-92), НП «Университеты России» (проект № УР.09.01.042), Федерального агентства по образованию (грант № АО4-2.13-480). В результате проведения полевых работ было составлено пятнадцать детальных опорных структурных разрезов с замерами трещиноватости в 11 пунктах наблюдения. Всего изучено 210 образцов и прозрачных шлифов, из них ориентированных 200. Петроструктурные исследования выполнены в 17 образцах, в которых проведен анализ ориентировки кристаллооптических осей нефелина и пироксена уртитов, а также в трех образцах вмещающих пород для кальцита. Микрорентгеноспектральные исследования были проведены для 116 минеральных фракций. В 30 валовых пробах определены содержания петрогенных окислов методом РФА, а также редких и рассеянных элементов методом ICP-MS-спектрометрии. Методом лазерной абляции были изучены пироксены габбро и фойдолитов (2 усредненных анализа по 25 сканов каждый). В 23 валовых и мономинеральных пробах изучен изотопный состав неодима, стронция, кислорода.

**Методы исследований.** Базисной схемой научного исследования была оригинальная методика комплексного структурно-петрологического картирования, включающая синтез геометрического, петрографического, микроструктурного, геохимического и минералогического анализов горных пород. Вещественный состав горных пород изучался с применением современных методов анализа геологических объектов, а именно: микрорентгеноспектральный, рентгенофлуоресцентный (РФА), ICP-массспектрометрия, лазерная абляция. Определения изотопных составов пород и минералов выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261 в статическом режиме в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) и в ИМГРЭ (г. Москва). Аналитические результаты обрабатывались методами математической статистики (корреляционный, факторный анализ) с помощью соответствующего программного обеспечения на ЭВМ.

**Основные защищаемые положения.**

1. Формирование Кия-Шалтырского массива связано с внедрением и кристаллизацией расплава в магматических камерах типа «pull-apart» и «gash», образование которых обусловлено левосдвиговыми деформациями вдоль тектонических срывов северо-западного простирания в ядре антиклинальной структуры кембрийского надвигового ансамбля.
2. Минералогическая и петроструктурная анизотропия уртитов Кия-Шалтырского плутона является отражением объемно-ячеистой макроритмичности, возникшей при кристаллизации вязкопластического фойдитового расплава "in situ".
3. Особенности вещественного состава изученных пород обусловлены автономной эволюцией родоначальных фойдитовой и базитовой магм в сложной окраинно-континентальной обстановке при участии вещества плюмового и надсубдукционного компонентов.
4. Вариации изотопного состава неодима, стронция и кислорода в породах изученной ассоциации свидетельствуют о генерации исходных магм из источника умеренно деплетированной мантии типа PREMA, производные которых испытали селективную коровую контаминацию.

**Научная новизна.** В результате проведенных исследований автором предложена оригинальная структурная динамо-кинематическая схема формирования плутона. Впервые для уртитов проведен петроструктурный анализ нефелина и пироксена, отразивший скрытую магматическую анизотропию пород. Новые данные о закономерностях вариаций вещественного состава породообразующих минералов

уртитов, совместно с результатами петроструктурного анализа, послужили основой для обоснования модели кристаллизационной дифференциации исходной фойдитовой магмы. Получены новые современные аналитические данные о петрохимических и геохимических особенностях пород, позволившие обосновать и охарактеризовать источник вещества, а также провести реконструкцию геодинамической палеобстановки формирования пород массива. Получены новые изотопные данные по стронцию, а также, впервые, по изотопному составу неодима, на основе которых установлен вероятный возраст формирования массива на рубеже  $406 \pm 2$  млн. лет и оценены масштабы мантийно-корового взаимодействия при генерации исходных магм.

**Практическая значимость.** На примере Кия-Шалтырского месторождения предложена структурно-петрологическая модель формирования уникальных природных залежей практически мономинеральных нефелиновых руд, основанная на особенностях кристаллизационной дифференциации исходной фойдитовой магмы.

Проведена оценка природы источника магм, показаны основные этапы их эволюции. Выполнена оценка геодинамического режима формирования ассоциации щелочно-базитовых пород. Установлен вероятный возрастной рубеж магматического этапа в истории становления Кия-Шалтырского массива.

**Апробация работы и основные публикации.** Результаты проведенных исследований опубликованы в 15 статьях и тезисах докладов. Основные материалы и положения работы представлены в докладах РАН (2004), докладах МАНВШ (2005), на 12-ой ежегодной международной геохимической конференции им. В.М. Гольдшмидта (Давос, Швейцария, 2002), на всероссийских и региональных конференциях по петрологии, геохимии и рудоносности магматических пород (Томск, 2001-2004; Санкт-Петербург, 2003; Саратов, 2003; Новосибирск, 2004; Москва, 2005; Апатиты, 2005).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 179 страниц, включая 61 иллюстрацию, 13 таблиц с аналитическими данными и список литературы из 146 наименований.

**Благодарности.** Автор признателен своему научному руководителю доценту, кандидату геолого-минералогических наук, И.Ф. Гертнеру за всемерную поддержку и помощь при осуществлении всех этапов работы.

При проведении полевых и камеральных работ неоценимую поддержку оказали сотрудники НИЛ СПМ ТГУ, кафедры петрографии и кафедры минералогии и геохимии: профессор В.В. Врублевский, доценты П.А. Тишин, Т.С. Краснова, магистры А.Н. Войтенко, Н.Н. Войтенко, заведующий лабораторией пробоподготовки ГГФ С.В. Кузьмин, ассистент А.А. Баева, а также профессор А.М. Сазонов (Институт цветных металлов и золота, Красноярск), главный геолог Кия-Шалтырского рудника Н.Н. Садкин, геологи РЭП «Мартайга» (п. Тисуль) С.А. Корчагин, А.И. Мостовской, заведующий лабораторией пробоподготовки ТПУ Ю.Е. Зыков, научный сотрудник лаборатории «Магматические формации» ОИГГМ СО РАН С.И. Ступаков. Автор выражает им свою благодарность. Автор искренне признателен научным сотрудникам лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН и ИМГРЭ Б.Г. Покровскому, Д.З. Журавлеву, В.П. Ковачу (ИГГД РАН), Г.Н. Аношину (ОИГГМ СО РАН), А.М. Селятицкому (ОИГГМ СО РАН) за проведение аналитических исследований.

В процессе работы автор получал поддержку и ценные советы своих старших коллег, докторов геол.-минерал. наук В.В. Врублевского, А.И. Чернышова, кандидатов геол.-минерал. наук П.А. Тишина, Т.С. Красновой.

Организация научной работы во многом обеспечивалась помощью декана геолого-географического факультета Г.М. Татьянина.

## **ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ МАССИВОВ ПОВЫШЕННОЙ ЩЕЛОЧНОСТИ В СТРУКТУРАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ**

Особенности строения и возраст Кия-Шалтырского массива и его позиция в составе раннедевонского щелочно-габброидного комплекса отражены в разные годы в работах И.К. Баженова (1945, 1963), А.М. Прусевича (1959), М.П. Кортусова (1962), Ю.Д. Скобелева (1963), Е.Д. Андреевой (1968), А.В. Бозина (1962), А.В. Ключкиной (1963), А.И. Мостовского (1972), Е.Д. Станкевича (1963), В.Г. Родыгиной (1980), Н.А. Макаренко (1987), О.М. Гринева (1990), А.М. Сазонова (2000) и многих других.

Область распространения массивов повышенной щелочности в северо-восточной части Кузнецкого Алатау (Мариинская Тайга) небольшая и составляет около 4500 км<sup>2</sup>. Она приурочена к раннекаледонским складчатым сооружениям Мариинского поднятия и к рифтоподобным раннедевонским структурам. Структурно-тектонический контроль в размещении щелочных интрузивов определяется распо-

ложением их в зонах пересечения разломов двух систем – северо-восточного и северо-западного простирания (Прусевич, 1978 и другие), по которым часто наблюдается развитие сдвиговых деформаций с формированием специфических зон растяжения («pull-apart» и «gash») (Гертнер и др., 2002). К району развития щелочных массив приурочены протяженные дайковые пояса субщелочных и щелочных пород (Гертнер и др., 1987).

Многочисленные, но небольшие по площади, щелочно-базитовые интрузии Мариинской Тайги, объединяются в раннедевонский горячегорский комплекс и по своему петрографическому составу представляют сочетание ультраосновных и основных фойдолитов с субщелочными габброидами и нефелиновыми сиенитами. Практически полный ряд пород комплекса представлен в Белогорском, а в виде гипабиссальных разновидностей – в Университетском массивах. В Кия-Шалтырском массиве в основном преобладают субщелочные габброиды и уртиты.

Формирование магматитов повышенной щелочности обычно связывается с режимом деструкции или рифтогенеза консолидированной окраины Сибирского кратона в раннем-среднем девоне (Кортусов и др., 1968; Яшина, 1981; Макаренко, 1984; Марков, 1984; Парначев, Смагин, 1985; Уваров, 1986; Гринев, 1987; Континентальный .., 1996).

## **ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

**1. Формирование Кия-Шалтырского массива связано с внедрением и кристаллизацией расплава в магматических камерах типа «pull-apart» и «gash», образование которых обусловлено левосдвиговыми деформациями вдоль тектонических срывов северо-западного простирания в ядре антиклинальной структуры кембрийского надвигового ансамбля.**

Кия-Шалтырский массив представляет собой дифференцированную многофазную интрузию, в виде комбинации трех автономных тел штокообразной формы с почти вертикальными контактами (рис. 1). Северо-восточная часть массива сложена лейкократовым трахитоидным субщелочным габбро, сменяющимся на юго-западе вытянутым телом мезо- и меланократовых пойкилоофитовых габброидов, с которыми ассоциируют мелкие проявления тералитов. Уртиты образуют обособленное линейное тело с преобладающим северо-западным простиранием, которое распо-

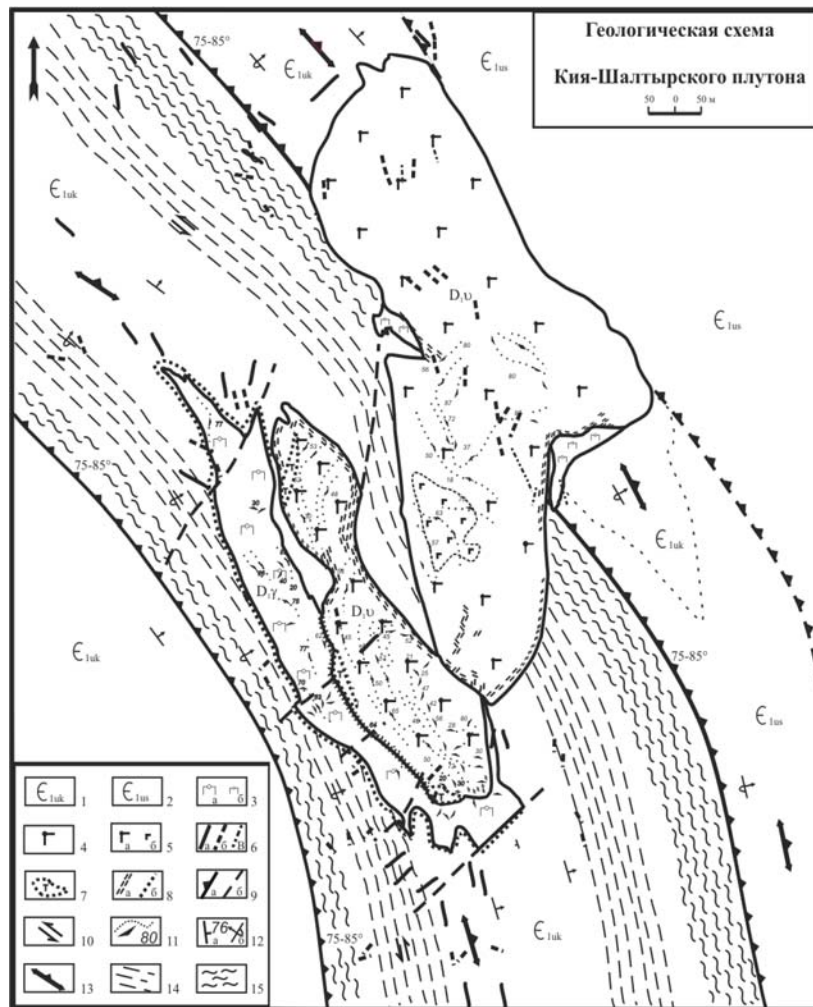


Рис. 1. Геологическая схема Кия-Шалтырского плутона

Составлена по материалам ФГУП “Запсибгеология”, А.И. Мостовского (1972), О.М. Гринева (1990) с детализацией автора.

Условные обозначения: 1 – 2 – отложения нижнего кембрия: 1 – усть-кундатская свита; 2 – усинская свита; 3 – 7 – интрузивные образования: 3 – уртиты (а); ийолиты (б); 4 – пойкилитовое мелано- и мезогаббро; 5 – трахитоидное лейкогаббро (а); порфиоровидное трахитоидное лейкогаббро (б); 6 – дайковые образования (вне масштаба): фойдолиты (а); субщелочные и щелочные габброиды (б); нефелиновые и щелочные сиениты (в); 7 – тералиты; 8а – эндоконтактовые пироксениты; 8б – ореол скарнированных пород; 9а – плоскости надвигов; 9б – плоскости второстепенных разломов; 10 – направление смещения в зоне пластических деформаций; 11 – элементы залегания структур анизотропии (трахитоидности, минеральной уплотненности и расслоенности); 12 – элементы нормального (а) и опрокинутого (б) залегания слоистости нижнекембрийских отложений; 13 – залегание осевой плоскости надвиговой антиформы; 14 – зона пластических деформаций в известняках и 15 – в эффузивно-карбонатной толще.

лагаются на южном и юго-западном фланге Кия-Шалтырского массива. В пределах массива отмечаются проявления нескольких групп дайковых тел: фойдолитов, субщелочных габброидов, фойяитов и щелочных сиенитов.

На основании полученных нами данных, структура вмещающей толщи интерпретируется как серия тектонических пакетов северо-западного простирания, возникших в результате эшелонированного надвигообразования (Войтенко и др.,



2001). Центральный надвиг, вмещающий тела уртитов и мезогаббро, ограничен поверхностями, имеющими простирание в северной части  $310^\circ \text{С}$ , а на юге  $340^\circ \text{С}$ , с крутым падением на северо-восток ( $75\text{-}85^\circ \text{С}$ ). Внутренняя структура надвига представляет собой ядро опрокинутой на юго-запад антиклинали с простиранием осевой плоскости, соответствующей плоскостям ограничения надвига и углам падения крыльев складки  $60\text{-}85^\circ \text{С}$ . В строении надвиговой структуры принимают участие известняки, реже эффузивы, туфы и туффиты. В теле надвига отмечаются многочисленные несогласные дайковые образования камптонитов, ийолитов и субщелочных диабазов.

Методами стрейн-анализа по мелкомасштабным кинематическим индикаторам (ориентировка будин, линейность течения, микроструктурные узоры кальцита) и распределению систем трещин и дайковых образований в пределах массива установлены деформации двух стадий. Наиболее ранней стадии соответствует надвигообразование в условиях осевого сжатия с ориентировкой максимального стресса в СВ-ЮЗ румбах. Деформации второй стадии вызвали сдвиговые или сбросо-сдвиговые смещения вдоль заложенных ранее тектонических зон северо-западного простирания, с образованием структур зияния «pull-apart» и «gash», которые послужили камерами для интрузивных фаз массива.

Общая динамо-кинематическая схема образования массива предусматривает заполнение фойдитовым расплавом полостей зияния «pull-apart» – основной северо-западной ветви тела и «gash» – ответвление рудного тела на южном фланге, образовавшихся при левостороннем сдвиге в ядерной части антиклинальной структуры надвига. Формирование пойкилитового габбро происходило из базитового расплава в смежной камере «pull-apart». Более сложен механизм внедрения для магматического расплава лейкократового габбро. Магматическая камера, вмещающая северную часть тела этих пород, вероятно, также формировалась при левосдвиговом режиме вдоль структур северо-западного простирания в пределах соседней надвиговой пластины. При этом, клинообразная полость южной части трахитоидного габбро образовалась при заполнении магматическим расплавом зоны разрыва, образовавшейся в условиях общего плана сдвиговых деформаций.

**2. Минералогическая и петроструктурная анизотропия уртитов Кия-Шалтырского плутона является отражением объемно-ячеистой макроритмич-**

ности, возникшей при кристаллизации вязкопластического фойдитового расплава "in situ".

Проведенные нами исследования главных породообразующих минералов фойдитов (Войтенко, 2004, Войтенко и др., 2004) показывают, что вариации состава нефелина, по результатам факторного анализа, выражаются в виде обособления трех групп: "высоконатровых", "высококремнистых" и "высококалиевых" кристаллов. Состав клинопироксена уртитов соответствует безнатровым ( $Na < 0,1$  формульной единицы – ф. ед.), высококальциевым ( $Ca = 0,9-1$  ф. ед.), среднежелезистым ( $f = 30-70\%$ ) разновидностям и отвечает салитам. Клинопироксены по распределению элементов главных формульных единиц также разделяются на группы, обогащенные энстатитовым ("магнезиальные"), волластонитовым ("кальциевые") или авгитовым и акмитовым ("железистые" разновидности) компонентами.

При сопоставлении сосуществующих минералов в пределах уртитов выделены два минеральных парагенезиса: а) "высоконатровые" нефелины + "магнезиальные" пироксены; б) "высококремнистые" нефелины + "железисто-кальциевые" пироксены (рис. 2).

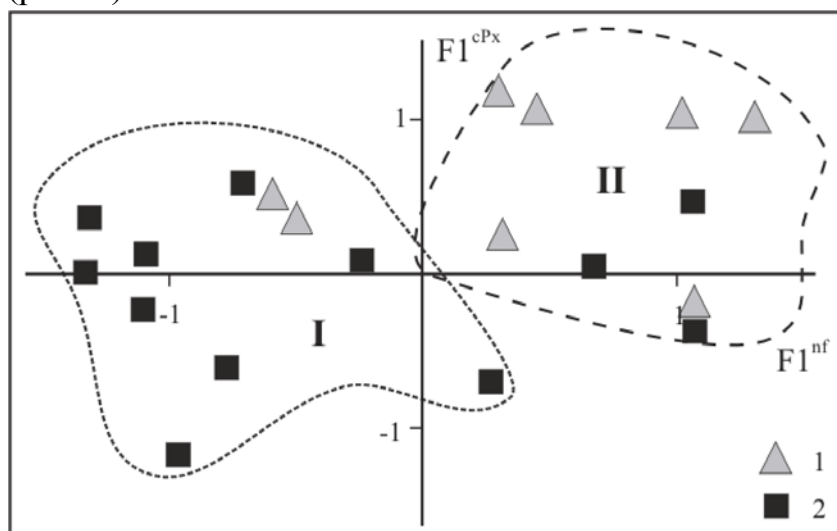


Рис. 2. Компонентная диаграмма химических составов сосуществующих нефелинов и пироксенов уртитов. Парагенезисы из 1 – южной части уртитового тела; 2 – центральной и северной частей уртитового тела. Римскими цифрами показаны выделенные минеральные парагенезисы.

Первый, относительно неравновесный парагенезис, преобладает в породах северной и центральной частей рудного тела, выполняющих полость «pull-apart». Его особенностью, вероятно, является низкий уровень обменных реакций между кристаллизующимися фазами, который предполагает достаточно быструю консолидацию вязкой фойдитовой магмы. Ассоциация «высоконатровые» нефелины + «магнезиальные» пироксены более типична для руд южного фланга месторождения, выполняющих полость отрыва («gash») вблизи предполагаемого подводящего канала. Ее относительно равновесный характер допускает более медленное остыва-

ние пород с возможным пополнением интрузивной камеры новыми порциями расплава. Свидетельством подобного многоактного внедрения могут служить дайки микройолитов с резкими прямолинейными контактами и «ксенолитоподобными» включениями полнокристаллических уртитов, которые прорывают достаточно консолидированный субстрат.

Вариации петроструктурных узоров уртитов определяются кристаллической ориентировкой зерен нефелина. Среди них диагностируются три основных типа, которые допускают существование кристаллов двух морфологических типов – удлиненных и укороченных вдоль оси шестого порядка (Войтенко, Гертнер, 2003). Удлиненные кристаллы отражают формирование минеральной линейности в породе, которая в южной части уртитового тела субвертикальная (1 тип), а в северной – субгоризонтальная (2 тип). Преобладание укороченных кристаллов нефелина создают планпараллельную директивную текстуру пород (3 тип). Их сортировка контролировалась в большей степени не вектором, а плоскостью ламинарного течения в магматической системе. Выявленные особенности кристаллографической ориентировки нефелина можно объяснить его кумулятивной природой, которые приспособивались к существующим кинематическим условиям внедрения и становления магмы. Пироксен, выступающий в виде ойкокристаллов в урритах, кристаллизовался уже из интеркумулусной жидкости и, по-видимому, его ориентировка может служить индикатором условий окончательной консолидации уртитов (Войтенко, 2003).

Наши представления о динамо-кинематических и физико-химических условиях кристаллизации уртитов дополняют результаты мониторинга качества руды и изучение рудной минерализации (Родыгина, Гринев, 1988; Сазонов и др., 2000; Вульф, 2003). Были установлены ритмические вариации порообразующих окислов в вертикальном и латеральном разрезах с шагом максимального накопления порядка 70-80 м. Учитывая данные по экспериментальному моделированию кристаллизации силикатных систем, можно утверждать, что макроритмичное строение фойдолитовой интрузии обусловлено направленными тепловыми и гравитационными потоками, обеспечивающими возникновение автономных конвективных ячеек. Их образование возможно при высокой скорости консолидации расплава в пределах основной магмолокализирующей структуры "pull-apart" с распадом общей магматической колонны на ряд относительно автономных ячеек, в пределах которых конвекция осуществляется в большей степени. При этом с восходящими тепловыми потоками связано

флотационное перераспределение относительно легких фенокристов нефелина, а с нисходящими – оседание и кумуляция ликвационных обособлений сульфидов и, частично, остаточного субэвтектоидного расплава, который в последующем выжимался в верхние горизонты в виде жильных тел ийолитов. Следствием таких механизмов, вероятно, являются специфические нефелин-пирротиновые породы, которые имеют локальное, не выдержанное в вертикальном разрезе уртитов распространение.

### **3. Особенности вещественного состава изученных пород обусловлены автономной эволюцией родоначальных фойдитовой и базитовой магм в сложной окраинно-континентальной обстановке при участии вещества плюмового и надсубдукционного компонентов.**

Среди вулканических и плутонических пород повышенной щелочности, развитых в северной части Кузнецкого Алатау, традиционно выделяются продукты трех автономных серий: субщелочнобазальт-трахитовой, базанит-фонолитовой и собственно нефелинитовой (Геохимия ..., 1987; Гертнер и др., 2001). Петрохимическая аттестация и анализ распределения петрогенных оксидов в изученных нами петрографических разновидностях позволяют диагностировать в составе Кия-Шалтырского массива производные только двух из них, а именно: нефелинитовой (уртиты и ийолиты) и щелочно-базитовой (пойкилитовые и трахитоидные габброиды, трахидиабазы, камптониты) и различать петрогенетическую гетерогенность базитов и фойдолитов. Нефелиновые и щелочные сиениты, имеющие крайне незначительное распространение, могут интерпретироваться в качестве поздних дифференциатов, скорее всего, субщелочнобазитовой ассоциации.

Поведение редкоземельных (REE) и некогерентных (HFSE) элементов определяется тенденцией роста их концентраций по мере уменьшения значений индекса магнизиальности, которая четко проявлена в породах субщелочной базитовой серии. Для фойдолитов фиксируется обратный тренд. Уртиты обнаруживают заметное обеднение REE (рис. 3а): ( $\Sigma(\text{REE})=29-84$  г/т,  $\text{Ybn}=3-7$ ) относительно своих жильных производных – пегматоидных ийолитов ( $\Sigma(\text{REE})=71-88$  г/т,  $\text{Ybn}=9-17$ ) и микроийолитов ( $\Sigma(\text{REE})=125-177$  г/т,  $\text{Ybn}=17-21$ ), но степень фракционирования для них выше:  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{ср.зн.}}=9$  в урритах,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{ср.зн.}}=5,5$  в пегматоидных ийолитах и  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{ср.зн.}}=6,5$  в микроийолитах. Подобная закономерность вполне объяснима, если принимать во внимание кумулятивную природу уртитов и рассматривать

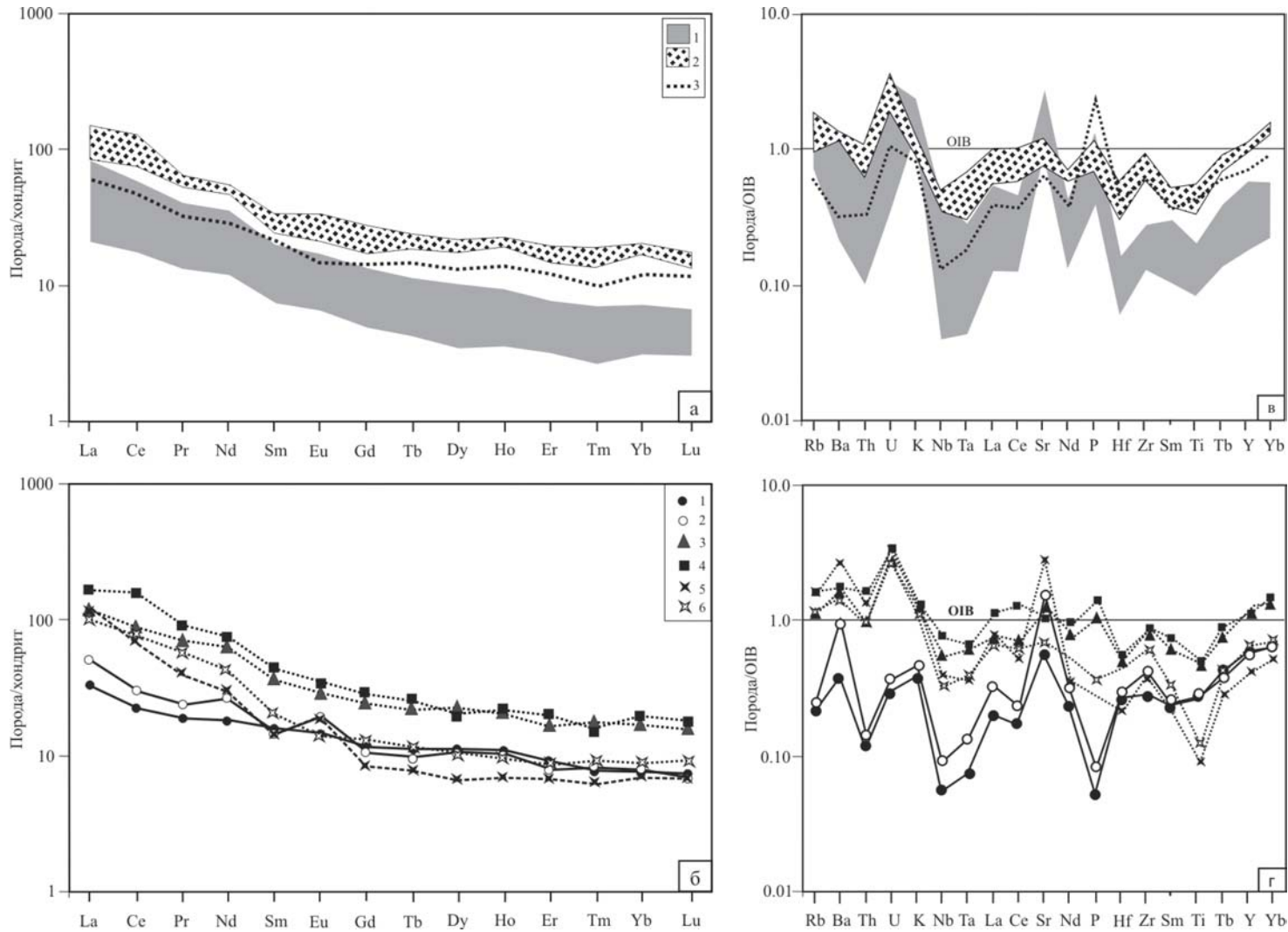


Рис. 3. Распределение редкоземельных и гидромагматофильных элементов в породах Кия-Шалтырского массива (а) и (в) Фоидолиты: 1 – уртиты, 2 – микройолиты; 3 – пегматоидные йолиты (среднее по 2 ан.); (б) и (г) Габбро, базальтоидные дайки и нефелиновые сиениты: 1 – пойкилитовое мелано-, мезогаббро (среднее по 2 ан.), 2 – трахитоидное лейкогаббро; 3 – камптонит; 4 – трахидиабаз; 5 – нефелиновый сиенит; 6 – микросиенит. Содержания элементов нормализованы по хондриту CI (Sun, McDonough, 1989).

ийолиты в качестве остаточного эвтектоидного расплава. Габброиды главных интрузивных фаз массива между собой имеют не столь значимые различия по уровню накопления REE (рис. 3б) ( $\Sigma(\text{REE})=34-60$  г/т;  $\text{Yb}_n=7-9$  для пойкилитовых и  $\Sigma(\text{REE})=55$  г/т;  $\text{Yb}_n=8$  для трахитоидных разновидностей). Заметное обогащение редкоземельными элементами (РЗЭ) характерно для камптонитов ( $\Sigma(\text{REE})=150$  г/т) и трахидиабазов ( $\Sigma(\text{REE})=219$  г/т). Вместе с тем, степень фракционирования РЗЭ закономерно возрастает в петрогенетическом ряду «пойкилитовое габбро-трахитоидное габбро–камптониты и трахидиабазы» от 3-6 до 7-9. В спектре РЗЭ трахитоидных разновидностей базитов характерна также слабая положительная аномалия Eu, которая указывает на вероятное фракционирование плагиоклаза. Данный процесс мог иметь место в глубинной промежуточной камере.

Нефелиновые и щелочные сиениты по уровню накопления РЗЭ занимают промежуточное положение между интрузивными и дайковыми разновидностями габброидов ( $\Sigma(\text{REE})=97$  г/т и 137 соответственно) (рис. 3б). Однако более высокая степень фракционирования РЗЭ ( $\text{La}/\text{Yb}=11-18$ ) подтверждает их вероятное происхождение из остаточного расплава. Слабо выраженные обратные аномалии европия указывают на комагматичность этих пород.

В целях реконструкции геодинамической палеообстановки формирования исследуемого объекта проведен анализ распределения рассеянных элементов в слагающих его разновидностях пород на основе спайдер-диаграмм, построенных по принципу нормирования к эталону для продуктов внутриплитного (плюмового) магматизма – базальту океанических островов. (ОИВ) (рис. 3в,г). Фоидолиты и габброиды главных интрузивных фаз обнаруживают заметную обедненность большинства рассеянных элементов относительно модельного источника ОИВ. Повышенные концентрации фиксируются, в основном, для LIL-элементов, таких как Rb, Sr и локально для Ba и P. Достаточно инертные HFSE-элементы (Th, Nb, Ta, Hf, Zr, тяжелые REE) характеризуются низкими концентрациями, не свойственными аналогичным породам щелочных провинций из других регионов мира. Как и в случае с РЗЭ, наблюдается общая тенденция накопления рассеянных элементов в жильных и дайковых производных фоидитовой и базитовой магм. Тем не менее, уровень их концентраций только приближается к ОИВ, но не достигает его. Характерной особенностью мультиэлементных спектров пород Кия-Шалтырского плутона являются отрицательные аномалии Th, Nb, Ta, Hf, Zr и Ti, которые обычно наблю-

даются в продуктах островодужного магматизма и объясняются плавлением над-субдукционного мантийного субстрата.

Сопоставление геохимических параметров исследуемых фойдолитов и базитов с их петрографическими аналогами из типоморфных рифтогенных провинций, таких как Маймеча-Котуйская, Кольская, Восточно-Африканская и Центрально-Германская, выявляет заметное обеднение пород Кия-Шалтырского и других щелочно-габброидных массивов Кузнецкого Алатау большинством рассеянных элементов, прежде всего HFSE (Zr, Hf, Nb, Ta, Th, LREE). По ряду индикаторных отношений Ce/Y, La/Nb, Th/Yb и Ta/Yb (рис. 4) габброиды изученного объекта соответствуют обогащенным базальтам срединно-океанических хребтов (E-MORB), а в некоторых случаях и N-MORB типу (по значениям Zr/Nb) (рис. 4а). Фигуративные точки уртитов и ийолитов в целом тяготеют к плюмовому источнику OIB, однако для них наблюдается смещение от композиционных полей «рифтогенных» нефелинитов по направлению к компоненту E-MORB и в область магматитов активных континентальных окраин (рис. 4г).

Учитывая повышенную глиноземистость и пониженную титанистость щелочных и субщелочных пород Кузнецкого Алатау, наблюдаемые соотношения некогерентных элементов, при относительном обогащении стронцием, ураном и калием, свидетельствуют о сложной геодинамической палеообстановке их формирования, допускающей конвергенцию признаков островодужного, окраинно-континентального и внутриплитного магматизма. Примером такого сложного сочетания тектонических режимов, инициирующих магматическую деятельность, может служить современная активная континентальная окраина калифорнийского или средиземноморского типов. Благодаря кривой ориентировке аккрецирующих литосферных блоков, здесь, на фоне общего сжатия, создаются условия для сдвиговых деформаций и возникновения глубокопроникающих локальных зон растяжения, контролирующих дискретное проявление магматизма повышенной щелочности (Гертнер и др., 2002).

**4. Вариации изотопного состава неодима, стронция и кислорода в породах изученной ассоциации свидетельствуют о генерации исходных магм из источника умеренно деплетированной мантии типа PREMA, производные которых испытали селективную коровую контаминацию.**

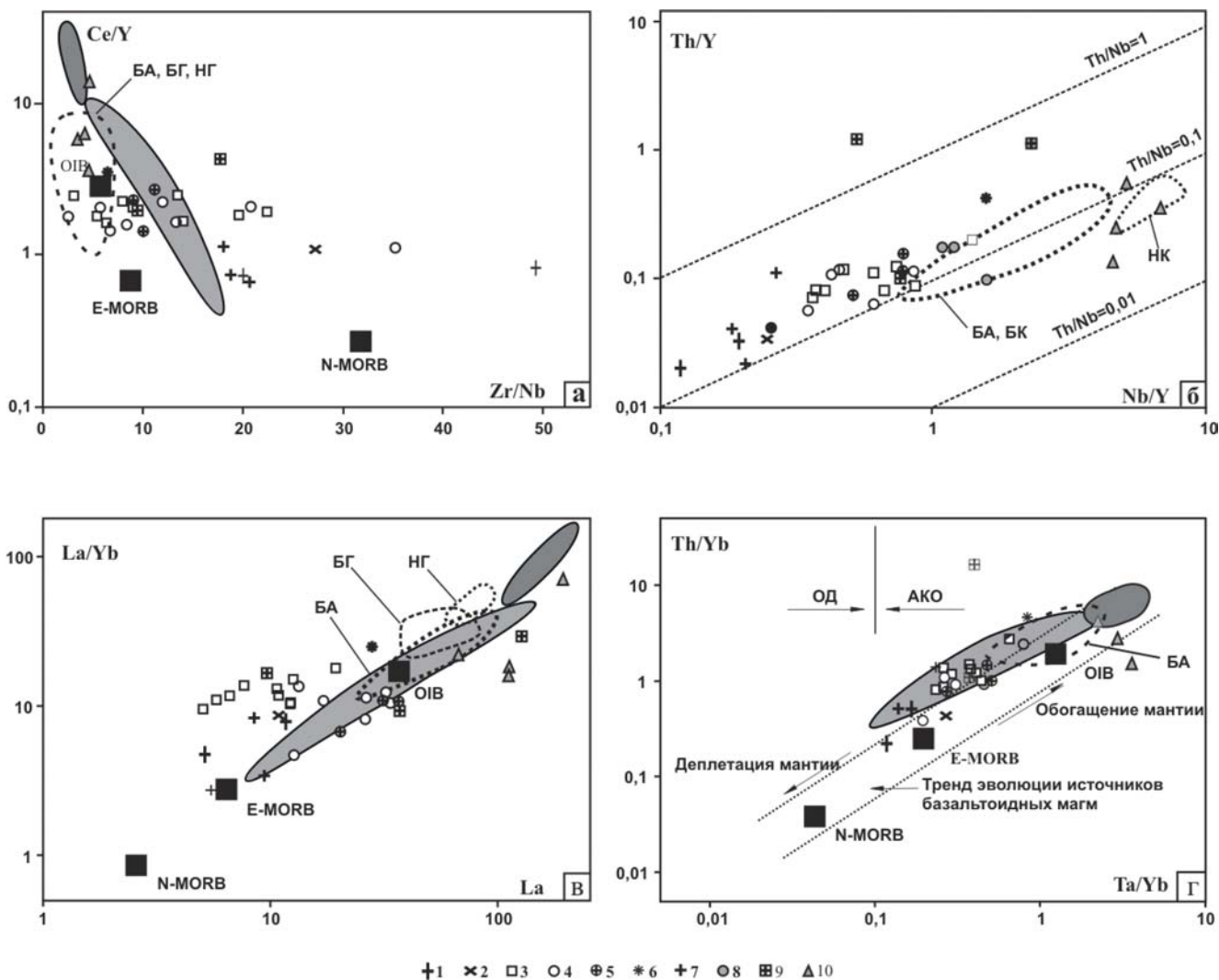


Рис. 4. Соотношения некогерентных элементов в субщелочных и щелочных породах и мантийных источниках базальтоидных магм

1-6 – Кия-Шалтырский массив: 1 – мелано-, мезократовое габбро, 2 – лейкократовое габбро, 3 – уртиты; 4 – пегматоидные и эндоконтактовые ийолиты; 5 – микроийолиты; 6 – нефелиновые сиениты. 6-9 породы “горячегогорского комплекса” (Верхнепетропавловский, Горячегогорский, Дедовогогорский массивы): 6 – субщелочное габбро, 7 – полевошпатовый уртит, 8 – тералиты и основные фойдолиты, 9 – нефелиновые сиениты; 10 – ийолиты щелочно-ультраосновной формации Хибинского массива (Кольский п-ов) (Арзамасцев и др., 2002). Выделены поля составов пород нефелинитовой (темно-серый фон) (НК) и базальтоидной (светло-серый фон) (БК) серий Крестовской ВПС (Маймеча-Котуйская провинция) (Платиноносные ..., 2000), рифтовых систем восточной Африки (вулканическая провинции Киву, Мейдоб Хил: БА – базальтоидная серия) (Franz et al., 1999; Furman, Graham, 1999) и центральной Германии (вулканическая провинция Рейна: БГ – базальтоидная, НГ – нефелинитовая серии) (Jang, Hoernes, 2000). ОД – островные дуги, АКО – активные континентальные окраины. Значения для мантийных источников (N-MORB, E-MORB, OIB) по (Sun, McDonough, 1989).



Первые изотопные исследования щелочных пород Кия-Шалтырского плутона (Андреева, 1968; Кононова и др., 1973 и другие) были ориентированы на определение абсолютного возраста К-Аг –изотопным методом. Результатом этих определений стал вывод о вероятном достаточно продолжительном (более 50 млн. лет) формировании данного массива, который начался в силуре и продолжился в первой половине девона (Яшина, 1982). Позднее, Покровским с соавторами (1991), на основе анализа изотопного состава стронция и кислорода пород и минералов фойдитовой и габброидной серий, были оценены вероятные масштабы коровой контаминации исходных магм (Покровский и др., 1991).

Нами впервые проведено комплексное изучение изотопного состава неодима, стронция и кислорода в валовых составах и отдельных минералов основных петрографических разновидностей горных пород Кия-Шалтырского месторождения, которое позволило существенно уточнить природу источника их вещества и характер контаминационных процессов. Слабая вариативность значений Sm/Nd и Rb/Sr в исследованных образцах не позволила в полной мере решить вопрос о возрастном диапазоне формирования плутона. Большинство изохрон, построенных для фойдитов, пойкилитовых и трахитоидных габбро, характеризуются неопределенностью возраста ( $\pm 30-40$  млн. лет) и широким разбросом средних значений (от 430 до 390 млн. лет). Тем не менее, достаточно точная оценка финальной стадии формирования главных интрузивных фаз массива была получена по минеральной Rb/Sr изохроне, рассчитанной по биотиту, клинопироксену и валовому составу пойкилитового меланогаббро (обр. КШ 26/1) (рис. 5). Ее регрессионная линия отвечает наклону с возрастом  $406 \pm 2$  млн. лет при MSWD=0,725 и первичном отношении

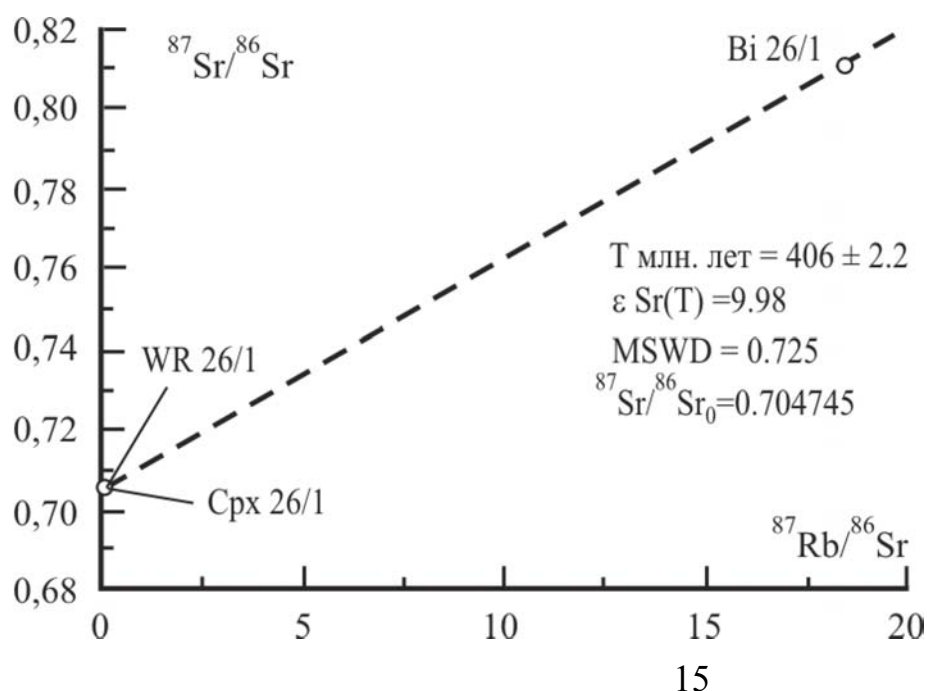


Рис. 5. Минеральная Rb-Sr изохрона для пойкилитового меланогаббро Кия-Шалтырского массива  
WR- валовый состав породы, Cpx- моноклинный пироксен, Bi – биотит.

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0=0,704745$  (рис. 5). Для остальных образцов исходные параметры изотопного состава Nd и Sr ( $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ ,  $\varepsilon(\text{Sr})_T$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(T)$ ) были пересчитаны именно на этот возраст.

Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в валовых составах пород субщелочной серии закономерно увеличиваются от 8-8,4‰ (пойкилитовое мелано-, мезогаббро) до 10,2 ‰÷10,5‰ (трахитоидное лейкогаббро и нефелиновый сиенит) (рис. 6). Для фойдолитов эти вариации менее значительны (9,4-9,7‰ в ийолитах, 9,3-10,2‰ в уртитах). Очевидно, что величина  $\delta^{18}\text{O}$  заметно превышает мантийные значения  $5,5\pm 0,5\text{‰}$  (по Taylor, Sheppard, 1986 и др.), что указывает на вероятную контаминацию первичного источника компонентами земной коры. Изотопные Rb-Sr системы пород и минералов массива проявляют следы смешения вещества мантии и земной коры с постепенным увеличением первичных значений  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  от 0,704797-0,705252 в валовых про-

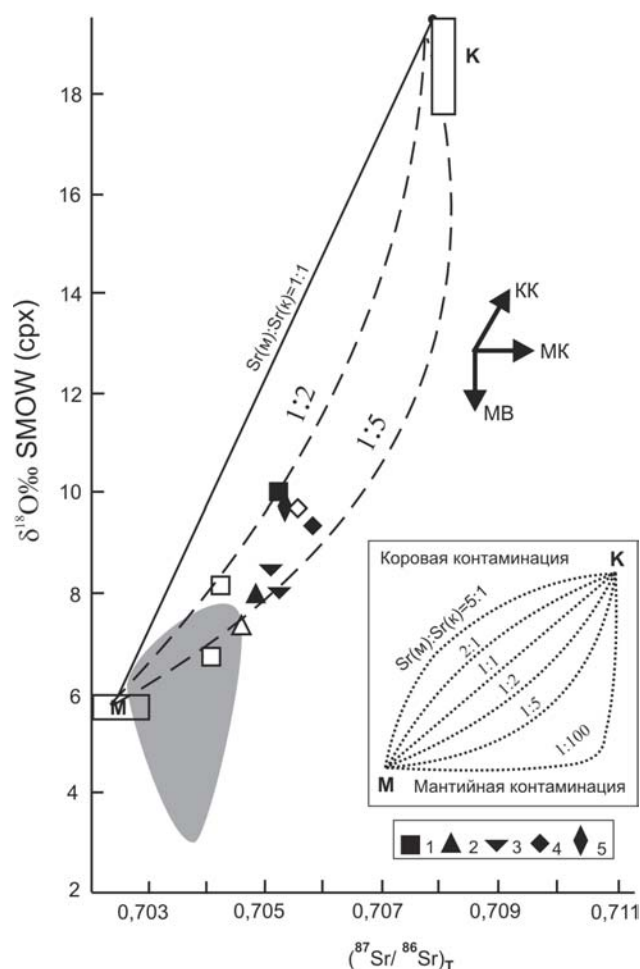


Рис. 6. Эволюция изотопного состава стронция и кислорода в породах и минералах Кия-Шалтырского массива

1 – трахитоидное лейкогаббро; пойкилитовое: 2 – меланогаббро; 3 – мезогаббро; 4 – уртиты; 5 – ийолит-уртит. Незалитыми символами обозначены составы породообразующих клинопироксенов, залитыми символами – валовые составы пород. Серым фоном выделено композиционное поле щелочно-ультраосновных и основных плутонических пород и вулканитов Маймеча-Котуйской провинции (Покровский, 2000; Сазонов и др., 2001). Прямоугольник «М» - предполагаемый состав мантии, Прямоугольник «К» - предполагаемый состав корового контаминанта, соответствующий фанерозойским осадочным карбонатным породам ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) \sim 0,7078$ ,  $\text{Sr} \sim 470$  г/т,  $\delta^{18}\text{O} \sim 20$  ‰, SMOW). Стрелками показано направление изменчивости изотопных составов при процессах мантийной (МК) и коровой (КК) контаминации, поздне- и постмагматических преобразований с участием метеорных вод во флюиде (МВ). На врезке диаграммы в правом нижнем углу

отражены принципиальные отличия мантийной и коровой контаминации при разных отношениях (цифры на линиях смешения) концентраций стронция в мантии/магме  $\text{Sr}(m)$  к его содержаниям в контаминанте  $\text{Sr}(k)$ . Прерывистыми линиями показана предполагаемая область смешения. Концентрации кислорода в мантии/магме и контаминанте принимаются равными (Taylor, 1980; James, 1981; Покровский, 2000).

бах габброидов до 0,705261-0,706338 в фойдолитах (рис. 6).

Повышенные концентрации стронция в валовых составах пород указывают на вероятность поступления в магму его дополнительных количеств. В качестве доказательства можно отметить существование корреляционной зависимости между изотопными составами кислорода и стронция в минералах и породах Кия-Шалтырского массива (рис. 6). Ее проявление определенно указывает на происшедшее в ходе щелочного петрогенезиса смешение мантийного и корового веществ. Согласно существующим представлениям (Taylor, Sheppard, 1986; Покровский и др., 1991, 2000), наблюдаемое отклонение от прямолинейного тренда зависимости между областями предполагаемого мантийного источника магмы и корового контаминанта следует интерпретировать как результат обогащения исходного мантийного источника радиогенным стронцием осадочных образований.

Результаты анализа изотопного состава Sr и Nd изученных пород, а также других представителей щелочных массивов Кузнецкого Алатау показывают, что исходное вещество родоначальных магматических расплавов имело мантийную природу (рис. 7). Вместе с тем, в отличие от платформенных условий, проявление щелочного магматизма в складчатых областях характеризуется более масштабным смешением мантийного и корового материала. В наименьшей степени влияние этого процесса отразилось на изотопном составе неодима, который по своим параметрам соответствует умеренно деплетированному мантийному источнику типа PREMA.

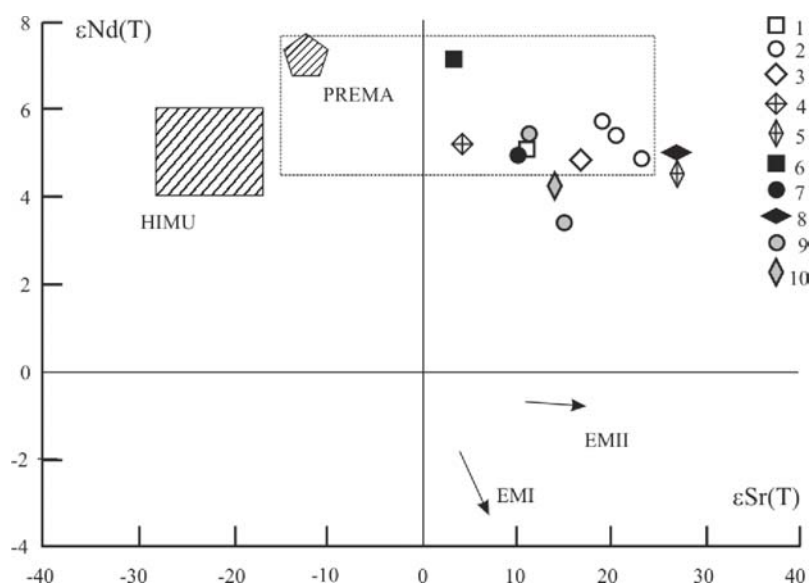


Рис. 7. Изотопный состав Nd и Sr в породах щелочных массивов Кузнецкого Алатау

1 – 3 породы Кия–Шалтырского массива: 1 – меланогаббро; 2 – фойдолиты, 3 – лейкогаббро; 4 – 5 породы Дедовогорского массива: 4 – лейкогаббро (пироксен); 5 – нефелиновый сиенит; 6 – 8 породы Верхнепетропавловского массива: 6 – субщелочное габбро; 7 – полевошпатовый ийолит; 8 – карбонатит; 9 – 10 породы Горячегогорского массива: 9 – полевошпатовый уртит и лейкотералит; 10 – нефелиновый сиенит.

Положение резервуаров PREMA, HIMU, EMI, EMII приведено в соответствии с их современными изотопными параметрами по Zindler, Hart, 1986. Пунктиром оконтурено поле преобладающих составов пород ранне- и среднепалеозойских базитовых магматических ассоциаций Алтае–Саянской области по (Ярмлюк В.В., Коваленко В.И., 2003).

По породам всех интрузивных фаз массива фиксируется примерно одинаковая степень истощенности магмогенерирующего субстрата, что выражается в незначительных колебаниях  $\epsilon\text{Nd}_{(T)}$  от  $+5,23 \div +4,84$  в субщелочных габбро до  $+4,83$  в уртитах (рис. 7). Более широкие вариации отмечаются для значений  $\epsilon\text{Sr}_{(T)}$  ( $+10,93 \div +32,81$ ) с увеличением первичных изотопных отношений от меланогаббро к трахитоидному лейкогаббро и уртитам. Смещение составов в область положительных значений  $\epsilon\text{Sr}$  (первый квадрант) интерпретируется нами как следствие коровой контаминации, благодаря которой в расплавы поступал дополнительный радиогенный стронций из метаморфизованных осадочных толщ (Покровский и др., 1991, 2000; Врублевский и др., 2005). Под ее влиянием трансформированными оказались также изотопно-кислородные системы минералов и пород щелочных массивов.

Выявленные особенности распределения рассеянных элементов, изотопов кислорода, стронция и неодима в породах Кия-Шалтырского плутона указывают на их формирование из магматических расплавов, генерируемых при плавлении умеренно деплетированного мантийного резервуара типа PREMA с локальным участием метасоматизированной нижней литосферной мантии. При подъеме исходных магм в верхние горизонты литосферы, скорее всего, имело место селективная контаминация обогащенных стронцием рассолов, законсервированных в кембрийских осадочных толщах и мобилизованных при тепловом воздействии интрузий (Покровский и др., 1991, 1998; Vrublevsky et al., 2002). Такое предположение согласуется с существующими представлениями о развитии ранне-среднепалеозойского базитового магматизма на территории Северной Азии под воздействием на литосферу мантийного суперплюма, в составе которого доминировал материал типа PREMA (Ярмолюк, Коваленко, 2003).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных комплексных структурно-петрологических исследований Кия-Шалтырского массива позволяют сформулировать следующие основные выводы.

1. В центральной ядерной части антиклинали надвиговой структуры в результате проявившихся левосторонних сдвиговых деформаций по нелинейным тектоническим зонам раннего заложения возникли локальные области зияния типа «pull-apart» и структуры отрыва типа «gash», которые послужили камерами для интрузивных фаз изученного массива.

2. Петроструктурные и минералогические особенности внутреннего строения уртитового тела указывают на то, что процесс внутрикамерной кристаллизационной дифференциации фойдитовой магмы был обусловлен направленными конвекционно-гравитационными тепловыми потоками и фиксируется в виде скрытой объемноячейистой макроритмичности.

3. Петрохимические, геохимические и изотопные особенности изученной габбро-уртитовой ассоциации обусловлены эволюцией умерено деплетированного мантийного источника типа PREMA с признаками смешения вещества плюмового и надсубдукционного компонентов при участии процессов коровой контаминации. Формирование массива происходило в сложной окраинно-континентальной обстановке на рубеже 406 млн. лет.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Войтенко Д.Н.**, Гертнер И.Ф., Врублевский В.В., Сазонов А.М. Структурные аспекты локализации уртитового тела Кия-Шалтырского плутона // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 2. Матер. научн. конф. – Томск: ЦНТИ, 2001. С. 197-201.

2. Гертнер И.Ф., Врублевский В.В., **Войтенко Д.Н.**, Сазонов А.М., Краснова Т.С., Тишин П.А. Геохимия щелочно-мафитовых плутонов Кузнецкого Алатау: свидетельства конвергентности окраинно-континентального и внутриплитного магматизма // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 3. Матер. научной конф. Т. I. – Томск: изд-во Томского ун-та, 2002. С. 55-67.

3. Vrublevsky V.V., Gertner I.F., **Voitenko D.N.** Oxygen isotope ratios in alkaline basites from Kuznetsky Alatau ridge (South Siberia) // Geochim. Cosmochim. Acta: Twelfth Goldschmidt Conference Abstracts. V. 66. N 15a (S1). 2002. P. A813.

4. **Войтенко Д.Н.**, Гертнер И.Ф. Особенности микроструктурного строения уртитов Кия-Шалтырского плутона (Кузнецкий Алатау) // Проблемы геологии и географии Сибири: Матер. научн. конф. / Вестник ТГУ, серия «Науки о Земле». Вып. 3. Т. 3. – Томск: изд-во Том. гос. ун-та, 2003. С. 156-158.

5. **Войтенко Д.Н.** Микроструктура уртитов Кия-Шалтырского плутона (Кузнецкий Алатау) // Геологи XXI века: Тез. Всеросс. научн. конф. – Саратов: Изд-во СО ЕАГО, 2003. С. 28-31.

6. Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Руднев С.Н., Борисов С.М., **Войтенко Д.Н.** U-Pb-изохронный возраст финальной стадии проявления щелочно-базитового магматизма в Кузнецком Алатау // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Мат. II Росс. конф. – Санкт-Петербург, 2003. С. 121 -124.
7. **Войтенко Д.Н.**, Селятицкий А.М., Гертнер И.Ф., Врублевский В.В. Уртиты Кия-Шалтырского массива: изменчивость химического состава породообразующих минералов как отражение структурно-петрологических условий их формирования. // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 4. Матер. Всерос. конф. – Томск, 2004. С. 75-85.
8. **Войтенко Д.Н.**, Селятицкий А. М. Минералогические свидетельства латеральной неоднородности уртитов Кия-Шалтырского плутона (Кузнецкий Алатау) // Тез. докл. Второй Сибирской межд. конф. молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск, 2004. С. 36-37.
9. Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Владимиров А.Г., Руднев С.Г., Борисов С.М., Левченков О.А., **Войтенко Д.Н.** Геохронологические рубежи и геодинамическая интерпретация щелочно-базитового магматизма Кузнецкого Алатау // Докл. РАН, 2004. Т. 398. № 3 – С. 374-378.
10. Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Vladimirov A.G., Rudnev S.N., Borisov S.M., Levchenkov O.A., **Voitenko D.N.** " Geochronological boundaries and geodynamic interpretation of the alkaline mafic magmatism in Kuznetsk Alatau" // Doklady Earth Sciences,. 2004. Т. 398А. № 7. – P. 990-994.
11. Парначев В.П., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С., Врублевский В.В., **Войтенко Д.Н.**, Тишин П.А. Структурная эволюция ультрамафит-мафитовых ассоциаций как отражение тектонических процессов в складчатых областях // Доклады АН ВШ РФ. 2005. № 1 (4). – С. 103-112.
12. Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., **Войтенко Д.Н.** Хронология и источники щелочно-базитового магматизма Кузнецкого Алатау // Петрография XXI век: Мат. Петрографического совещ. Т.2. – Апатиты: Кольский научный центр РАН . 2005. С. 58-60.
13. Гертнер И.Ф., **Войтенко Д.Н.**, Врублевский В.В., Сазонов А.М. Структурно-тектонические факторы формирования нефелиновых руд Кия-Шалтырского месторождения (Кузнецкий Алатау) // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: Мат. XXXVIII Тектонического совещ. Т1. – М.: ГЕОС, 2005. С. 136-139.