

На правах рукописи



ХОЛИНА Наталья Викторовна

**НЕОАРХЕЙСКИЙ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫЙ МАГМАТИЗМ
КУРСКОГО БЛОКА ВОСТОЧНОЙ САРМАТИИ: ГЕОХИМИЯ,
ГЕОХРОНОЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ**

Специальность: 25.00.04 – петрология, вулканология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре полезных ископаемых и недропользования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Воронежский государственный университет" (ФГБОУ ВО ВГУ)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук **Савко Константин Аркадьевич**, Воронежский государственный университет, профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук **Щипанский Андрей Анатольевич**, ФГБУН Геологический институт Российской академии наук (ГИН РАН), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией тектоники раннего докембрия

кандидат геолого-минералогических наук **Щекина Татьяна Игоревна**, Московский государственный университет имени В.М. Ломоносова, кафедра петрологии и вулканологии, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН)

Защита состоится «15» октября 2020 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.122.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 35, ИГЕМ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГЕМ РАН и на сайте www.igem.ru.

Сведения о защите, электронные версии диссертации и автореферата доступны на официальных сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ (www.vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан «___» августа 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета к.г.-м.н.


_____ Андреева О.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Смена в конце архея ТТГ ассоциаций высококалийевыми гранитоидами установлена в пределах многих древних кратонов, включая Амазонский, Дхарвар, Каапвааль, Пилбара, Северо-Китайский, Сан-Франциско и другие [Almeida et al., 2013; Romano et al., 2013; Laurent et al., 2014; Farina et al., 2015]. Кислый калиевый магматизм отмечался в широком временном диапазоне – от $\approx 2,95$ млрд лет в кратоне Пилбара до $\approx 2,55$ млрд лет в Дхарвар и Северо-Китайском кратонах [Laurent et al., 2014].

Самые ранние калиевые граниты и риолиты неoarхея, сменившие ТТГ ассоциации мезoarхея, отражают кардинальные изменения природы геодинамических процессов, которые характерны для всех древних кратонов. Закономерная смена характера кислого магматизма от мезо- к неoarхею отмечается и для Курского блока Сарматии, где после формирования палео- и мезoarхейской коры был проявлен неoarхейский высококремнистый калиевый гранитный магматизм. Высококремнистые граниты и риолиты представляют собой редкий случай совместного проявления в пределах одного магматического центра [Frost et al., 2016].

Оценка возрастных и пространственных взаимоотношений неoarхейских вулканитов и гранитов, определение их тектонической природы позволили выяснить условия возникновения и источники расплавов пород, дали важные свидетельства геодинамической эволюции коры Восточной Сарматии на границе неoarхея и палеопротерозоя. Кроме того, возраст излияний риолитов фиксирует время начала накопления мощных толщ терригенных пород и железисто-кремнистых формаций курской серии на границе неoarхея и палеопротерозоя, которые лежат в основе палеотектонических реконструкций, позволивших обосновать принадлежность мегаблока Сарматии к суперконтиненту Ваалбаре в период 2,6-2,2 млрд лет [Савко и др., 2017]. Это и определяет актуальность диссертационной работы.

Результаты предшествовавших исследований. Риолиты (кварцевые порфиры) с голубым кварцем давно известны в составе лебединской свиты неoarхея в Курском блоке [Плаксенко и др., 1980; Плаксенко и др., 1981; Двойнин и др., 1990; Полищук и др., 1972; Быкова, Крестин, 1972], однако до сих пор остаются невыясненными источники и условия образования их расплавов, которые могут дать важные свидетельства эволюции процессов континентального корообразования Восточной Сарматии на границе неoarхея и палеопротерозоя. Важно уточнить возраст излияний риолитов, так как они фиксируют время начала накопления мощных толщ терригенных пород и железисто-кремнистых формаций курской серии на границе неoarхея и палеопротерозоя, которые используются для палеотектонических реконструкций.

В районе излияний риолитов давно были известны интрузивы гранитов атаманского комплекса, который был выделен в 1972 г. [Быкова, Крестин, 1972]

и объединял все раннедокембрийские существенно калиевые субщелочные гранитоиды Воронежского кристаллического массива. Впоследствии оказалось, что многочисленные проявления калиевых гранитов в Волго-Донском орогене, относимые к атаманскому комплексу, имеют палеопротерозойский возраст 2050-2070 млн лет [Савко и др., 2014; Terentiev et al., 2016; Терентьев, 2016] и образовались после коллизии Сарматии и Волгоуралии на рубеже около 2,1 млрд лет [Bogdanova et al., 2006]. Таким образом, проявлений архейских гранитоидов, достоверно относимых к атаманскому комплексу, за пределами палеопротерозойских структур осталось не так уж много. Их возраст оценивался как 2615 ± 70 млн лет [Найденков и др., 1996]. Они сосредоточены преимущественно на перемычке между Тим-Ястребовской и Волотовской палеопротерозойскими синформами.

Цель и задачи исследования. Целью работы является установление петрогенезиса и тектонической обстановки формирования неоархейских высококремнистых риолитов лебединской свиты михайловской серии и гранитов атаманского комплекса. В соответствии с этой целью при проведении исследований были определены следующие задачи:

1. Установление закономерностей геологического положения неоархейских кислых вулканитов и гранитов в пределах Курского блока;
2. Минералого-петрографическая и геохимическая характеристика кислых пород;
4. Оценки изотопного возраста риолитов и гранитов по циркону;
5. Изотопная (Nd, Hf) систематика пород по циркону и валовым пробам;
6. Определение P-T параметров кристаллизации кислых расплавов;
7. Идентификация источников расплавов и расшифровка коровой предыстории протолитов.

Научная новизна. Для Курского блока впервые даны детальные минералогическая, петрографическая и геохимическая характеристики неоархейских высококремнистых риолитов и гранитов, выполнена их геохимическая типизация и определены P-T параметры кристаллизации пород. На основе результатов геохронологических и изотопно-геохимических исследований установлены источники расплавов, механизм формирования материнских магм и геодинамическая обстановка высококремнистого магматизма в неоархее Восточной Сарматии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Данные о тектонической обстановке формирования неоархейских высококремнистых гранитов и вулканитов Курского блока в совокупности с результатами геохронологических и изотопно-геохимических исследований могут быть использованы при разработке и составлении региональных геологических карт докембрийского фундамента различного масштаба, составления схем корреляции и магматизма для раннего докембрия Восточно-Европейской платформы, палеотектонических карт.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы

легли авторские материалы, собранные за время работы (2006-2019 гг.) в составе научной группы кафедры полезных ископаемых и недропользования и выполнения научно-исследовательских работ в НИИ Геологии ВГУ, а также во время обучения в аспирантуре. Автором задокументирован и изучен керн более 50 скважин, методами оптической микроскопии изучено более 300 прозрачно-полированных шлифов, обработано свыше 250 «мокрых» силикатных анализов риолитов и гранитов. Часть образцов была отобрана в гидрогеологической шахте под Лебединским железорудным карьером.

Основными методами исследования являлись: электронно-микроскопический и микрозондовый анализ, методы изотопной геохронологии, изотопной и элементной геохимии.

Анализы химического состава проб выполнялись в лабораториях ВГУ и ИГЕМ РАН (г. Москва). Содержания редких элементов определялись в АСИЦ ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Анализы составов породообразующих минералов производились на растровом электронном микроскопе в ВГУ. Определение изотопного возраста цирконов U-Pb методом и Sm-Nd изотопные анализы выполнены в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Lu-Hf изотопные исследования цирконов проведены в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (г. Екатеринбург). Содержания Ti и других элементов примесей в кварце и цирконах определялись в Ярославском Филиале Физико-Технологического Института РАН (ЯФ ФТИАН РАН).

Обработка информации осуществлялась при помощи методов математической статистики на ЭВМ с использованием программного пакета «Microsoft Office» и ряда специализированных программ («PetroExplorer», «MAKE MINER»), графика и фотоматериалы обработаны с помощью программ «CorelDraw», «Photo-Shop CS6», «ArcView GIS», «ArcMap».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Высококремнистые риолиты и граниты А-типа Курского блока Восточной Сарматии образовались одновременно в конце неогархея 2,61 млрд. лет, имеют близкие петрогеохимические и изотопные характеристики и представляют единую вулканоплутоническую ассоциацию.

2. Зарождение неогархейских высококремнистых магм происходило при дегидратационном плавлении пород Курского блока при высокой температуре (около 900 °С), низком давлении (около 2,5 кбар), в условиях верхней коры в равновесии с ортопироксен-плагиоклазовым реститом.

3. Основные источники неогархейских высококремнистых магм имели длительную коровую предысторию ($\epsilon_{\text{Nd}2.61}$ = от -5,4 до -6,7; $\epsilon_{\text{Hf}2.61}$ = от -0,6 до -8,9) и представлены мезогархейскими ТТГ ассоциациями и палеогархейскими метапелитами Курского блока, слагающими архейское ядро Восточной Сарматии.

4. Проявления неогархейского высококремнистого магматизма в

Курском блоке имеют внутриплитную природу и связаны с плавлением вещества верхней коры за счет подъема базальтовых магм, производные которых подстилают высококремнистые риолиты и вмещают граниты.

Степень достоверности результатов исследования определяется значительными объемами изученного кернового материала и выполненными аналитическими работами.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VI Российской конференции по изотопной геохронологии «Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы» (г. Санкт-Петербург, 2015); III Международной научной конференции «Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра» (г. Санкт-Петербург, 2017); XI Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире» (г. Москва, 2017); VII Российской конференции по изотопной геохронологии «Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород» (г. Москва, ИГЕМ РАН, 2018); 14-th European Workshop on Laser Ablatio (Pau, France, June 26-29, 2018); VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (г. Санкт-Петербург, ИГГД РАН, 2019). Отдельные части работы докладывались на ежегодных научных конференциях геологического факультета и НИИ Геологии ВГУ в 2015–2019 гг. Материалы диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах научной работы – от отбора и подготовки образцов для различных видов исследований до интерпретации результатов. Автором проведен сбор и систематизация геологической информации, а также результатов аналитических лабораторных исследований по неогархейским кислым магматическим породам Курского блока. Выполнен анализ и интерпретация полученных в процессе исследований геологических, минералогических, геохимических и геохронологических данных.

Объем и структура работы. Диссертация общим объемом 133 страницы, состоит из введения, 6 глав и заключения, включает 19 таблиц, 47 рисунков и список литературы из 200 наименований.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы и постановка задачи исследования.

Во второй главе описано геологическое строение пород Курского блока Восточной Сарматии. Особое внимание уделяется особенностям геологии архейского фундамента Курского блока и неогархейского высококремнистого магматизма.

В третьей главе приводится описание методики исследований.

В четвертой главе на основании химических анализов пород и минералов дана петрографическая и минералого-геохимическая характеристика

неоархейских кислых вулканитов и гранитов Курского блока. Проведена их геохимическая типизация. Материалы этой главы частично легли в основу 1-го защищаемого положения.

В пятой главе приводятся данные, уточняющие возрастное положение неоархейских риолитов и гранитов в пределах Курского блока. На основе изотопной (Nd, Hf) геохимии устанавливается гетерогенность корового источника для неоархейских гранитоидов. Материалы главы легли в основу 1-го и 3-го защищаемых положений.

Шестая глава посвящена петрогенезису неоархейского высококремнистого магматизма Курского блока. Представлены результаты исследований по термобарометрии, которые позволили определить температуру и давление при кристаллизации риолитового расплава. Определены источники расплавов и условия генерации кислых магм. Приводятся расчетные данные выплавления неоархейских гранитов А-типа из смешанного источника. Обосновывается геодинамическая обстановка проявления неоархейского высококремнистого магматизма. Материалы главы легли в основу 2-го и 4-го защищаемых положений.

Благодарности. Неоценимую помощь в подготовке и написании диссертации внесли доценты кафедры полезных ископаемых и недропользования кандидаты геол.-мин. наук Ю.Н. Стрик, В.М. Холин, И.П. Лебедев, Т.Н. Полякова; ведущий научный сотрудник НИИ Геологии ВГУ кандидат геол.-мин. наук Р.А. Терентьев; главный научный сотрудник ИГЕМ РАН чл.-корр. РАН доктор геол.-мин. наук А.В. Самсонов. Большую помощь в выполнении аналитических работ оказали А.Н. Ларионов (ЦИИ ВСЕГЕИ), В.К. Карандашев (ИПТМ РАН), М.В. Червяковская (ИГГ УРО РАН), С.Г. Симакин (ЯФ ТИАН РАН), Н.С. Базиков и Е.Х. Кориш (ВГУ). Им всем автор выражает свою искреннюю признательность. Отдельно своим долгом автор считает поблагодарить руководителя диссертационной работы, заведующего кафедрой полезных ископаемых и недропользования ВГУ, доктора геол.-мин. наук, профессора К.А. Савко.

Курский блок, представляющий собой погребенное блоковое поднятие в фундаменте Восточно-Европейской платформы, относится к северо-восточной части мегаблока Сарматия и является архейской гранит-зеленокаменной областью. Состоит из доминирующих по площади гранито-гнейсовых ареалов и осадочно-вулканогенных зеленокаменных поясов петельчатой формы (Рис. 1). В обрамлении зеленокаменных поясов, а также среди гнейсов и мигматитов располагаются массивы ТТГ гранитоидов салтыковского комплекса. Эти мезоархейские и палеоархейские комплексы представляют наиболее ранний из распознаваемых этап формирования континентальной коры, завершение которого маркируется НТ-LP метаморфизмом на уровне 2,8 млрд лет [Савко и др., 2010; Savko et al., 2018]. На мезоархейском основании впоследствии происходило развитие континентальных рифтовых структур,

сопровождаясь базитовым вулканизмом и терригенным осадконакоплением. Эти породы отделены от мезоархейских комплексов структурным и стратиграфическим несогласием, значениями возраста и фиксируют самостоятельный этап геологической эволюции Курского блока в конце архея. На рубеже около 2,6 млрд лет рифтогенез завершился излияниями риолитов лебединской свиты [Артеменко, 1995; Савко и др., 2015; Холина и др., 2016]. На риолитах отмечается мощная кора выветривания, которая маркирует длительную пенеппенизацию Курского архейского блока, предшествовавшую накоплению железо-кремнистых формаций палеопротерозоя [Савко и др., 2015].

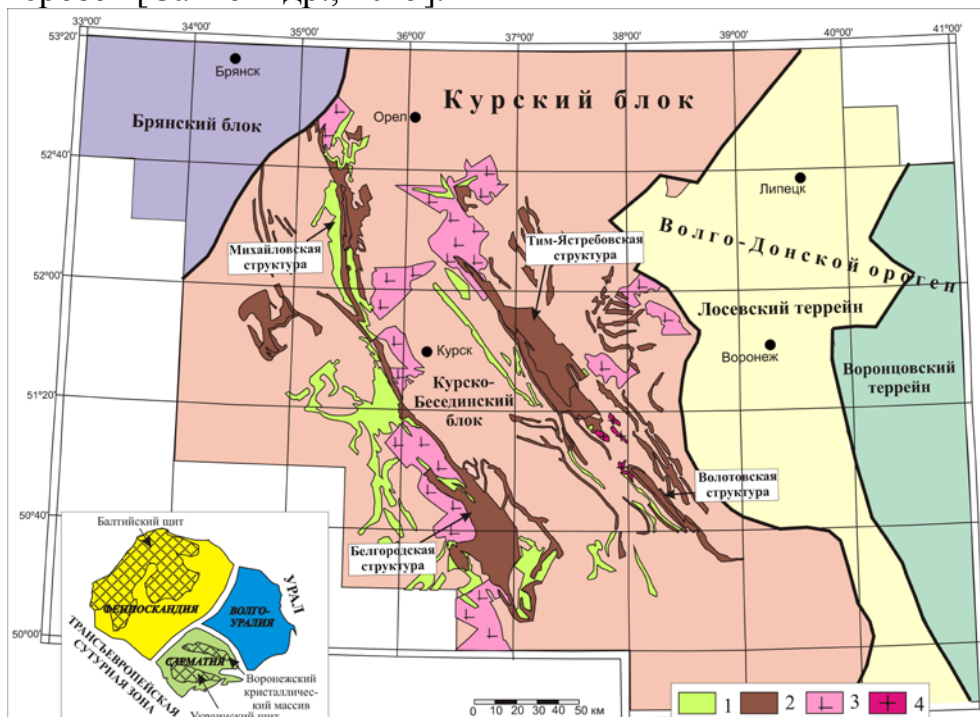


Рис. 1. Схематическая структурная карта архейских образований Курского блока Восточной Сарматии: 1 - михайловская серия (AR_2); 2 - курская и оскольская серии (PR_1); 3 - салтыковский комплекс (AR_{2sl}); 4 - атаманский комплекс (AR_{2at}). Карта Восточно-Европейского кратона и его деление на сегменты по [Gorbatshev and Bogdanova, 1993].

Также в пределах Курского блока известны проявления неоархейских гранитоидов атаманского комплекса. Вмещающими породами являются мезоархейские образования ТТГ ассоциации и неоархейские метабазиты, массивы также прорывают ТТГ гранитоиды. Их возраст оценивается как 2615 ± 70 млн лет [Найденков и др., 1996].

Объектом исследования является неоархейский высококремнистый магматизм Курского блока, представленный риолитами лебединской свиты и гранитами атаманского комплекса.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. Высококремнистые риолиты и граниты А-типа Курского блока Восточной Сарматии образовались

одновременно в конце неогархея 2,61 млрд лет, имеют близкие петрогеохимические и изотопные характеристики и представляют единую вулканно-плутоническую ассоциацию.

Проявления неогархейских метариолитов и гранитов располагаются локально в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры Орловско-Тимского зеленокаменного пояса и на перемычке между Тим-Ястребовской и Вологовской палеопротерозойскими синформами (Рис. 2).

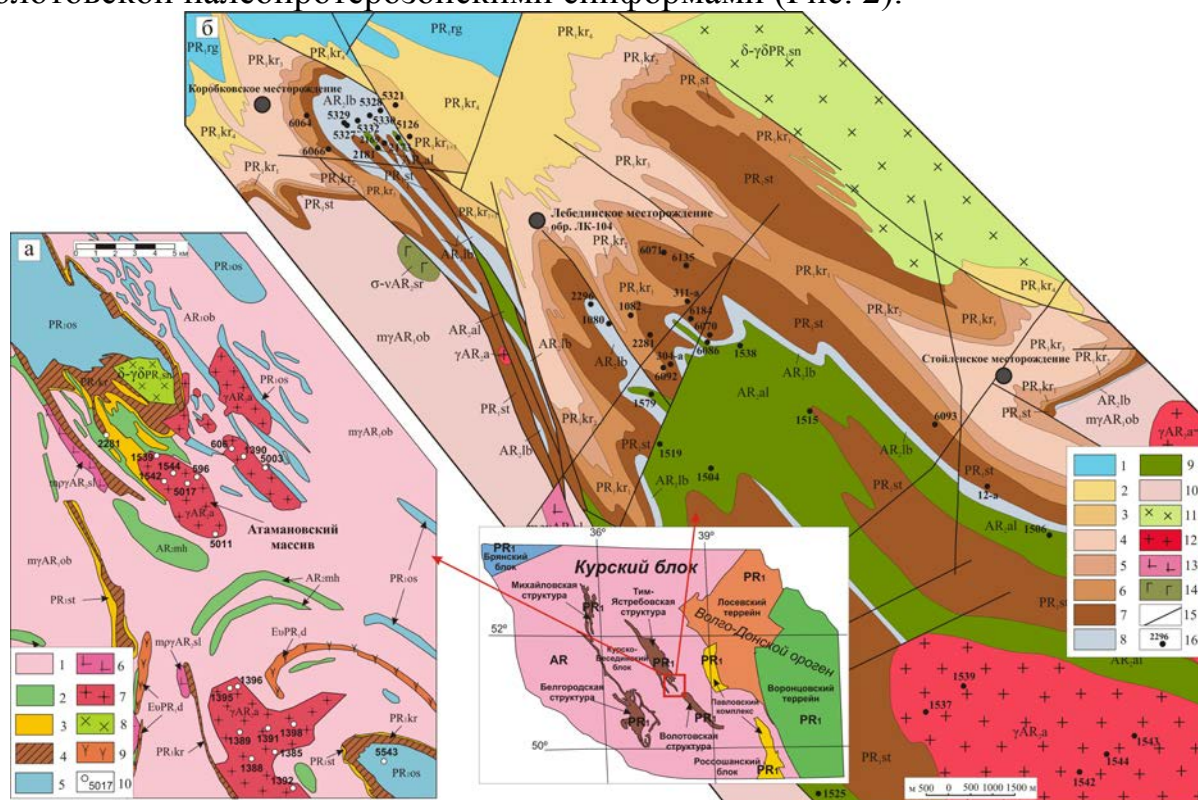


Рис. 2. Схематическая геологическая карта участка Курского блока: а) схема расположения гранитных массивов атаманского комплекса (перемычка между Тим-Ястребовской и Вологовской палеопротерозойскими синформами): 1 - обоянская серия; 2 - михайловская серия; 3 - стойленская свита; 4 - коробковская свита; 5 - роговская свита; 6 - салтыковский комплекс; 7 - атаманский комплекс; 8 - стойло-николаевский комплекс; 9 - дубравинский комплекс; 10 - буровые скважины и их номера; б) участок Старооскольского района с расположением скважин, вскрывших лебединскую свиту михайловской серии: 1 - роговская свита; 2-6 - коробковская свита; 7 - стойленская свита; 8 - лебединская свита; 9 - александровская свита; 10 - обоянский комплекс; 11 - стойло-николаевский комплекс; 12 - атаманский комплекс; 13 - салтыковский комплекс; 14 - сергеевский комплекс; 15 - региональные разломы; 16 - буровые скважины и их номера. Схематическая структурная карта Воронежского кристаллического массива по [Савко и др., 2017].

Кислые метавулканыты лебединской свиты представлены метариолитами и метатупами риолитового состава и относятся к покровной фации наземного вулканизма. Мощность пород свиты достигает 400 м. Породы подверглись структурно-метаморфическим преобразованиям, в разной степени расланцованы. Степень метаморфизма соответствует эпидот-амфиболитовой фации. Породы светло-серой окраски с розовым оттенком, массивные,

характеризуются порфиroidной структурой. Микроскопически метавулканы характеризуются порфиroidной, порфиroidбластовой структурой с гранобластовой, лепидогранобластовой структурами основной массы. Фенокристы составляют до 20 % объема породы и представлены кварцем, микроклином и микроклин-пертитом. Основная масса породы представлена равномернозернистым агрегатом зерен кварца (55–60 % объема породы), зерен полевого шпата – альбита и микроклина (около 15 %), чешуек мусковита (до 15 %) и биотита (до 5 %). Акцессорные минералы представлены редкоземельными фосфатами (монацит, ксенотим), силикатами (циркон, эпидот, алланит, клиноцоизит), единичными зернами апатита, рутила и сфена. Рудные минералы представлены пиритом (до 2 %), халькопиритом (до 1 %), ильменитом (около 1 %). В качестве вторичных минералов присутствуют бастнезит, хлорит, кальцит.

Типичными породами атаманского комплекса являются биотитовые, роговообманково-биотитовые граниты и порфиroidные биотитовые граниты. Розовые, розовато-серые, средне- и крупнозернистые, с порфиroidбластической, гнейсовидной текстурой. Структура гранитная, гипидиоморфнозернистая. Сложены решетчатым микроклин-микропертитом (40-50 %), кварцем (30-40 %), плагиоклазом (альбит до 25 %), биотитом (до 7 %) и зеленой роговой обманкой (до 2 %). Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, рутилом. Редко присутствуют монацит, сфен. Среди вторичных минералов присутствуют бастнезит, хлорит, преобладает мусковит. Рудные представлены магнетитом, титаномагнетитом.

Характерной особенностью гранитов является очень высокая железистость железо-магнезиальных силикатов в гранитах. Биотит имеет зеленовато-бурую окраску, высокую железистость ($X_{Fe} = 0,83-1,00$) и представлен преимущественно аннитом. В некоторых зернах видны тонкие линзовидные прослои магнетита вдоль трещин чешуек биотита. Зеленая роговая обманка с характерным голубоватым оттенком отвечает по составу гастингситу с очень высокой железистостью ($X_{Fe} = 0,92-0,96$) и содержанием K_2O , превышающим содержание Na_2O .

Геохимия. *Метариолиты и метатифы риолитового состава* являются высококремнистыми (SiO_2 72-77 мас. %), высококалиевыми (K_2O до 7–8 мас. %) породами, характеризуются низкими содержаниями CaO (0,05–1,6 мас. %), варьирующими MgO (0,18–4,4 мас. %) и железистостью ($X_{Fe} = 0,51–0,94$) и насыщенностью глиноземом ($A/CNK = 1,2–2,8$), аномально низкими содержаниями Na_2O (0,13–3,74 мас. %), обогащены TiO_2 (0,16–0,53 мас. %) и имеют невысокие отношения Fe_2O_3/TiO_2 (2,5-14,4). В них отмечаются широкие вариации в целом повышенных содержаний щелочей ($K_2O+Na_2O = 3,5–9,5$) с преобладанием калия, часто очень резким ($K_2O/Na_2O = 1,4–73,5$). Относятся к известково-щелочной серии пород. На петрохимических диаграммах Харкера четкой зависимости изменений содержаний петрогенных оксидов и редких элементов от концентрации SiO_2 не

установлено.

По геохимическим характеристикам кислые метавулканиды выделяются низкими концентрациями Sr (20-60 ppm) и элементов группы железа Cr, Ni и V, высокими концентрациями Rb (116-208 ppm), Ba (до 1365 ppm), Be (до 5,1 ppm, ср. 2,8 ppm) и всех высокозарядных элементов, включая Zr (243-601 ppm), Nb (22-75 ppm), Th (16-29 ppm) (Рис. 3). Редкоземельные элементы (REE) также имеют высокие уровни содержаний ($\sum\text{REE} = 413\text{-}683$ ppm), сильно обогащенные спектры LREE ($\text{La}_N/\text{Sm}_N = 4,1\text{-}5,0$), умеренно фракционированные спектры HREE ($\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 1,5\text{-}2,2$) и глубокие отрицательные Eu аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,10\text{-}0,39$).

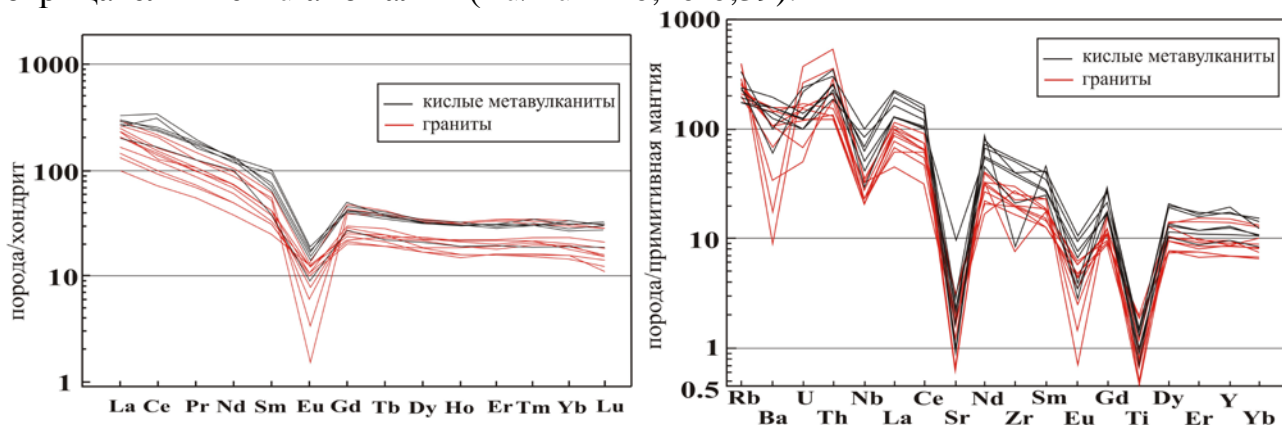


Рис. 3. Нормированные к хондриту [Boynon, 1984] и примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989] содержания редкоземельных элементов в неархейских кислых метавулканидах лебединской свиты и гранитах атаманского комплекса Курского блока.

Граниты принадлежат породам известково-щелочной и щелочно-известковой серий. По химическому составу они близки к кислым метавулканидам, но отличаются от них в деталях. Это также высококремнистые (SiO_2 74-79 мас. %) породы, с более высокими содержаниями CaO, являются умеренно глиноземистыми ($\text{A}/\text{CNK} = 0,8\text{-}1,02$), имеют меньшие вариации содержаний щелочей ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7,4\text{-}9,0$) и более выдержанные отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1,4\text{-}3,4$. Отличительной особенностью является их высокая железистость ($X_{\text{Fe}} = 0,72\text{-}0,96$) и устойчиво более низкие, чем в риолитах, отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ от 10,3 до 27,7. На петрохимических диаграммах Харкера [Harker, 1904] четкой зависимости изменений содержаний петрогенных оксидов и редких элементов от концентрации SiO_2 также не установлено.

По своим геохимическим особенностям граниты контрастно отличаются от кислых метавулканидов более высокими содержаниями элементов группы железа (Cr, Ni и V), более низкими концентрациями всех высокозарядных и редкоземельных элементов (REE) ($\sum\text{REE} = 86\text{-}400$ ppm) (Рис. 3). Спектры REE при общем сходстве отличаются более фракционированными LREE ($\text{La}_N/\text{Sm}_N = 2,7\text{-}5,6$) и HREE ($\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 0,7\text{-}1,8$) и большей Eu аномалией ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,04\text{-}0,61$). Величины Eu/Eu^* имеют прямую корреляцию с

концентрациями Sr, указывая на возможный вклад плагиоклаза в неоднородность геохимических характеристик гранитов.

Таким образом, в результате геохимических исследований неоархейских кислых метавулканитов и гранитов в пределах Курского блока выявлены общие для них особенности, а именно высокие содержания кремнезема (от 72 до 79 мас. %) и калия (от 6 до 9,5 мас. %), низкие CaO и Sr, обогащение железом, галием, высокозарядными катионами (Nb, Ta, Y, Th), редкоземельными элементами с сильным фракционированием лантаноидов и резкими отрицательными аномалиями Eu. Такие геохимические особенности сближают данные породы с гранитами А-типа. Это подтверждается положением точек их составов на дискриминантных диаграммах по [Whalen et al., 1987] (Рис. 4).

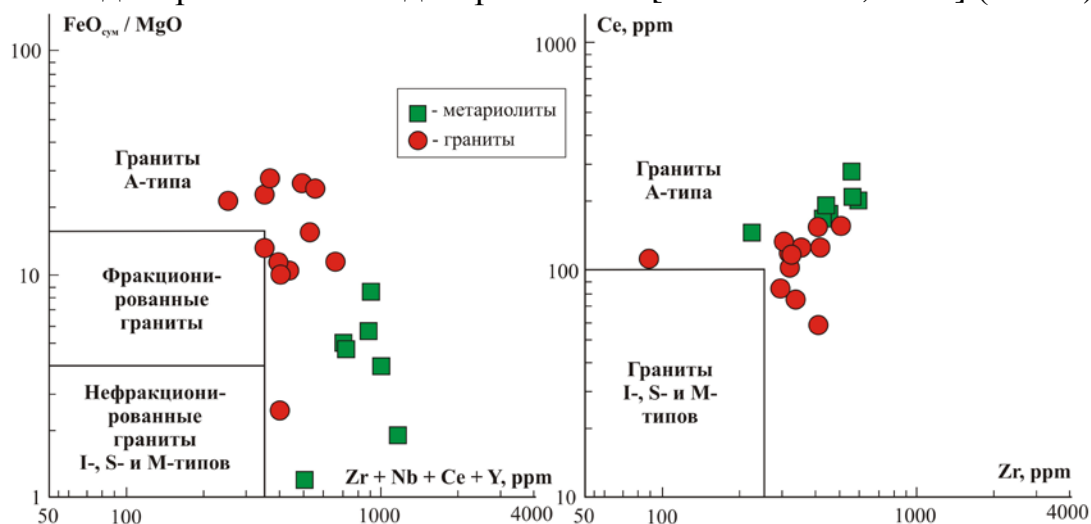


Рис. 4. Составы неоархейских метариолитов и гранитов Курского блока на дискриминантных диаграммах по [Whalen et al., 1987].

Геохронология. Для геохронологических исследований (ID-SIMS, циркон, U-Pb-Th) был выделен акцессорный циркон из пробы риолитов, отобранной в гидрогеологической шахте под карьером Лебединского железорудного месторождения (обр. ЛК-104) и из проб гранитов из центральной и краевой частей Атамановского массива (скв. 1544/209 м и 5011/154,5 м) [Савко и др., 2015, 2018; Zaitceva et al., 2018; Savko et al., 2019].

Риолиты. Для U-Pb изотопного датирования был отобран циркон преимущественно призматического облика размером 100-150 мкм по удлинению. Кристаллы без выраженных ядер и с единичными включениями других минералов. Во всех кристаллах отмечается тонкая ритмичная концентрическая (осцилляционная) зональность роста. Средневзвешенное значение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста для конкордантных измерений по 14 точкам составило 2612 ± 10 млн лет (СКВО = 0,48, вероятность = 0,94) (Рис. 5,а). Полученное значение интерпретируется как возраст кристаллизации риолитов.

Граниты. Циркон в пробе 1544/209, выделенный из образца керна скважины в центральной части Атамановского массива, представлен прозрачными идиоморфными и субидиоморфными призматическими зернами размером 200–300 мкм по длинной оси и шириной 50–150 мкм. Присутствуют

твердофазные включения. Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу циркона и практическое отсутствие значительных высокотемпературных наложенных событий. Было выполнено 20 измерений в 15 зернах, анализировались и центральные, и краевые (незональные) их части. Все результаты на графике с конкордией аппроксимируются единой линией регрессии. Невысокая девиация точек от линии регрессии (СКВО = 1.7) предполагает минимальное воздействие высокотемпературных процессов на циркон. Средневзвешенный возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ составляет 2611 ± 6 млн лет ($N = 10$, СКВО = 2,5) (Рис. 5,б). Только в одном зерне циркона из гранитов сохранилось унаследованное ядро, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст которого 3181 ± 7 млн лет.

Также были проанализированы зерна циркона из пробы 5011/154,5, взятой из образца керна скважины в краевой части Атамановского массива. Циркон представлен полупрозрачными, призматическими и субидиоморфными зернами размером 150-200 мкм по длинной оси. Все кристаллы циркона в режиме катодолюминисценции имеют тонкую осцилляционную концентрическую ростовую зональность. Присутствуют расплавные и флюидные включения. Было выполнено 20 измерений зональных оболочек и 10 измерений внутренних темных незональных «ядер». Все результаты на графике с конкордией аппроксимируются единой линией регрессии. Средневзвешенный возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ составляет 2600 ± 6 ($N = 16$, СКВО = 1,16) и 2603 ± 3 ($N = 7$, СКВО = 0,59) млн лет соответственно. Для центральных частей, обогащенных U, значение возраста несколько более точные.

Значение конкордантного возраста как для зональных, так и для незональных центральных частей составляет 2606 ± 7 млн лет (СКВО = 3,7), что обусловлено слабой отрицательной дискордантностью. Средневзвешенный возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ всех результатов составляет 2602 ± 3 млн лет ($N = 23$, СКВО = 0,99) (Рис. 5,в). Учитывая длительную магматическую эволюцию породы, конкордантный возраст 2606 ± 7 млн лет следует рассматривать как возраст кристаллизации.

Таким образом, полученные значения возраста для атаманских гранитов 2612 ± 6 млн лет и 2606 ± 7 млн лет совпадают с возрастом калиевых риолитов лебединской свиты - 2612 ± 10 млн лет. Полученные геохимические и геохронологические данные свидетельствуют, что неогарейские высококремнистые метавулканы и граниты представляют собой единую вулcano-плутоническую ассоциацию. Доказательством этого служат: (1) синхронность формирования – 2,61 млрд лет; (2) тесная пространственная связь их проявлений – в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры; (3) близкие геохимические характеристики.

Различия составов кислых метавулканитов и гранитов могли быть сформированы в результате следующих процессов. Установленные для нескольких образцов метариолитов сильное обеднение Na_2O с ультракалиевым составом щелочей ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 31-44$) и сильное пересыщение глиноземом

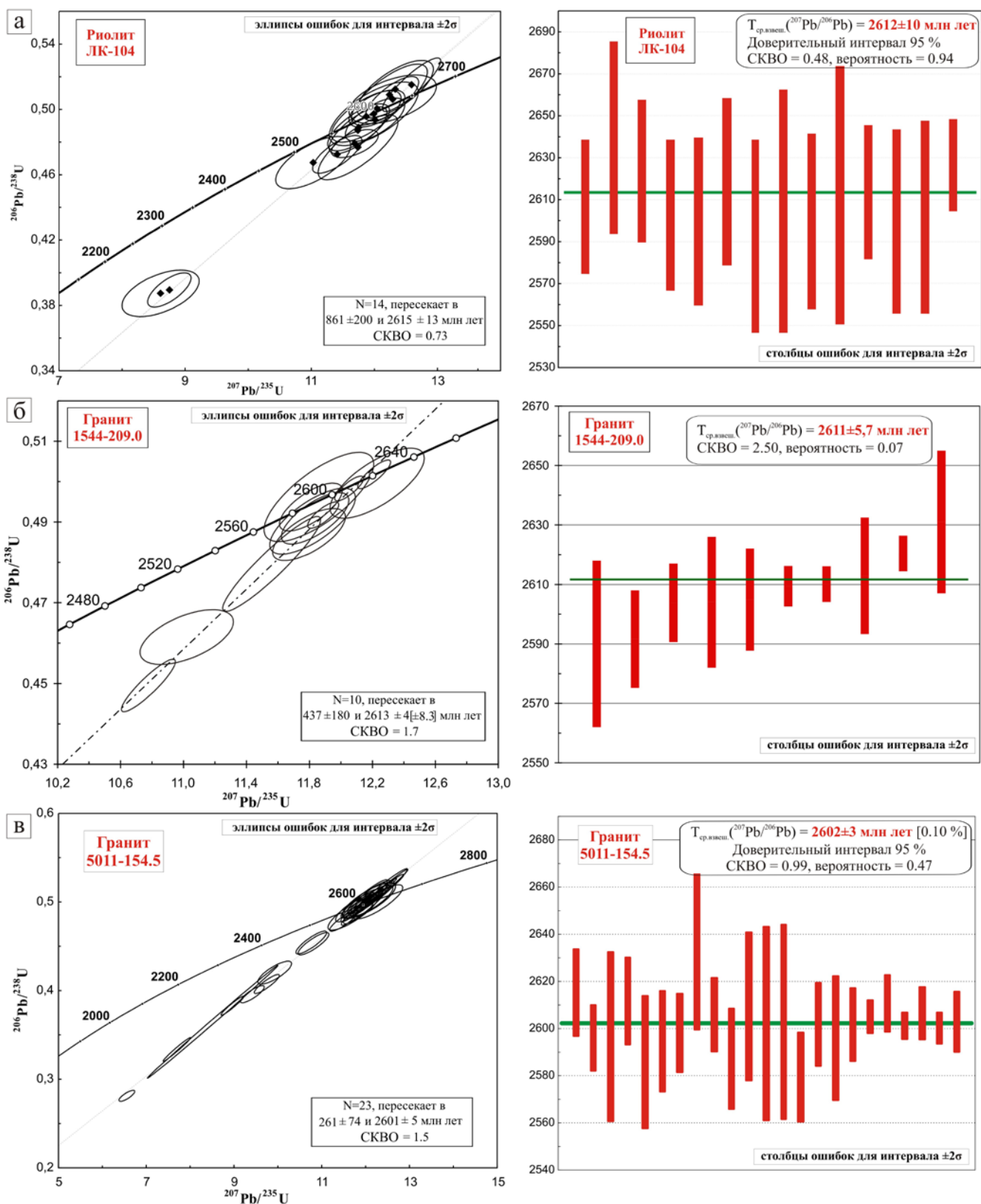


Рис. 5. Результаты изотопного датирования циркона из неогарнейского метариолита и гранита Курского блока.

(A/CNK = 2,0–2,1), могли быть связаны с метасоматической переработкой риолитов в кварц-мусковитовые сланцы при метаморфизме, которая устанавливается по петрографическим данным. Кислые метавулканыты,

обедненные кальцием, элементами группы железа, но обогащенные титаном, высокозарядными и редкоземельными элементами, могли представлять комплементарные гранитному кумулусу остаточные расплавы. Это позволяет рассматривать граниты атаманского комплекса как промежуточные камеры [Lee, Morton, 2015]. Оставшаяся более легкоплавкая и более кислая часть расплава, обогащенная кремнеземом, ушла по трещинам в результате тектонических подвижек и обособилась от ранних продуктов кристаллизации, образуя остаточные риолитовые расплавы.

Таким образом, проявления неоархейского высококремнистого магматизма Курского блока Восточной Сарматии, располагающиеся локально в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры, образовались одновременно в конце неоархея 2,61 млрд лет и представлены единой вулканоплутонической ассоциацией риолитов и гранитов А-типа.

Второе защищаемое положение. Зарождение неоархейских высококремнистых магм происходило при дегидратационном плавлении пород Курского блока при высокой температуре (около 900°C), низком давлении (около 2,5 кбар), в условиях верхней коры в равновесии с ортопироксен-плагноклазовым реститом.

Для определения температуры кристаллизации риолитового расплава использовалось два геотермометра: титан-кварцевый и титан-цирконовый.

"Ti-in-quartz" геотермометр. Содержания титана в кварце были определены в 25 точках во вкрапленниках из двух образцов. В образце 5329/280,0 вкрапленник кварца обнаруживает довольно высокие содержания титана (до 500 ppm) и его зональное распределение. Температуры кристаллизации составляют 850-950°C.

Менее высокие содержания титана (90-247 ppm) и, соответственно, температуры кристаллизации зафиксированы во вкрапленнике из образца 5327/149,5. Такой четкой зональности по концентрации титана в этом образце не наблюдается. Температуры кристаллизации составляют 735-870°C.

"Ti-in-zircon" геотермометр. Для определения температур кристаллизации риолитового расплава были измерены содержания Ti в 12 зернах циркона из образца ЛК-104, для которых были определены значения U-Pb возраста. Были проанализированы центральные и краевые части зерен. Концентрации Ti характеризуются значительным разбросом от 15 до 38 ppm. Температуры кристаллизации циркона находятся в интервале 819-935 °C, в среднем составляют 850°C (погрешность термометра составляет ± 35°C). Содержания малых элементов в изученных кристаллах типичны для магматического циркона из кислых пород [Hoskin, Schaltegger, 2003].

"Ti-in-quartz" геобарометр. Для оценки давления использовался "Ti-in-quartz" геобарометр [Huang, Audetat, 2012]. Для расчетов были приняты температуры, независимо полученные с помощью "Ti-in-quartz" геотермометра [Wark, Watson, 2006]. Все рассчитанные значения давлений попадают в узкий интервал 2,5-2,6 кбар. Риолитовый расплав с температурой, превышавшей

1000 °С, до извержения находился на глубине около 7 км.

Малоглубинные условия кристаллизации, оцененные с привлечением "Ti-in-quartz" геобарометра [Huang, Audetat, 2012] в интервале 2,5-2,6 кбар, дополняются данными по геохимии минералов и пород.

Содержания редких и редкоземельных элементов в изученных кристаллах циркона типичны для магматического циркона из кислых пород [Hoskin, Schaltegger, 2003]. Умеренные концентрации Hf, Th и U в цирконе свидетельствуют о его кристаллизации в составе ликвидусной ассоциации на самой ранней стадии эволюции материнского риолитового расплава.

Этот вывод подтверждается высокими температурами кристаллизации циркона, рассчитанными по "Ti-in-zircon" термометру ($T = 810-850^{\circ}\text{C}$). Очень резкие отрицательные Eu аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,05-0,09$) в цирконе (Рис. 6) дают основание говорить, что его кристаллизация происходила одновременно с массовой кристаллизацией плагиоклаза, который является главным концентратом Eu в кислых магмах.

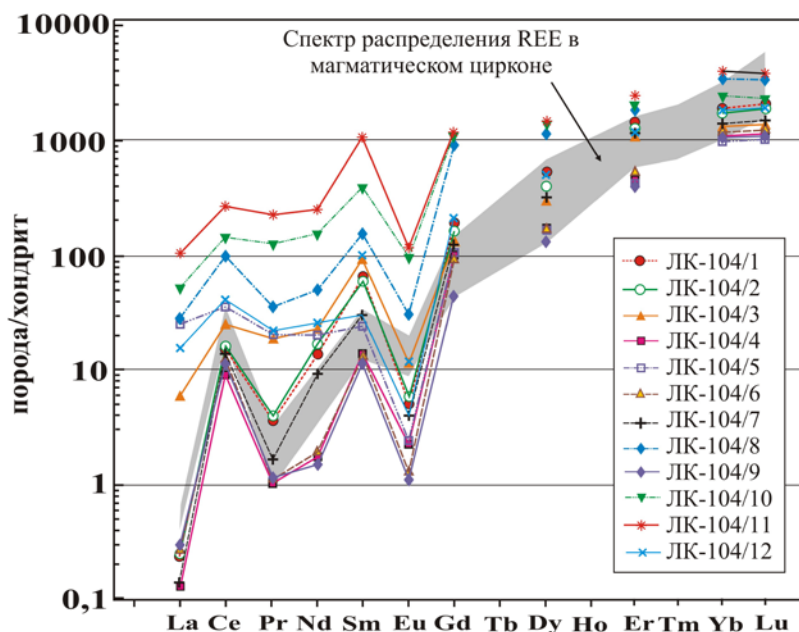


Рис. 6. Нормированные к хондриту содержания REE в цирконе из неорархейского метариолита Курского блока (обр. ЛК-104).

Присутствие на ликвидусе плагиоклаза указывает, что риолитовый расплав имел низкие содержания воды и начал кристаллизоваться в низкобарических условиях. Рассмотренные выше геохимические данные по циркону указывают на его конкурентную кристаллизацию одновременно с плагиоклазом, но не с гранатом, что является указанием на давление менее 5 кбар.

Геохимические характеристики, такие как слабо фракционированные спектры тяжелых HREE (Рис. 3) в валовых пробах риолитов и гранитов, сильно фракционированные спектры тяжелых HREE в цирконе из метариолита (Yb_N/Gd_N от 3,5 до 20) и низкие величины Hf/Y отношений ($\text{Hf}/\text{Y} = 1,6-9,3$), высокие отношения Ga/Al в валовых пробах риолитов и гранитов с резкой отрицательной Eu аномалией исключают участие граната в кумулюсной ассоциации, равновесной с риолитовым расплавом, что дает дополнительные

свидетельства о малоглубинных условиях его кристаллизации.

Высокие Fe/Mg отношения пород могут служить указанием на доминанту ортопироксена в реститовой ассоциации, что предполагает небольшие давления и относительно сухие условия генерации кислого расплава.

Результаты геотермометрии, основанные на содержаниях Ti в кварце и цирконе, дают убедительные доказательства высокой (до 1000°C) температуры магматического очага в источнике генерации кислых магм, который формировался при низком давлении, в сухих маловодных условиях в пределах верхней коры.

Рассмотренные выше граничные условия образования кислых расплавов хорошо согласуются с экспериментальными данными по дегидратационному плавлению высокоглиноземистого тоналита и гранодиорита при давлении $P \leq 4$ кбар, $T > 900^\circ\text{C}$ и содержании $\text{H}_2\text{O} \leq 4\%$ [Patino Douce et al., 1997].

Для оценки применимости рассматриваемой модели выплавления кислых магм было проведено моделирование содержаний REE [Savko et al., 2019]. В качестве источника была выбрана смесь 30 мас. % метапелит + 70 мас. % ТТГ, что можно предполагать на основании вариаций Lu-Hf модельных возрастов циркона из риолита. Степень плавления F (20 %) и состав рестита (50 Pl+35 Орх+10 Vt+5 Ilm) были приняты в соответствии с экспериментальными данными по плавлению тоналита при давлении 4 кбар [Patino Douce et al., 1997]. REE в модельном кислом расплаве и в природных риолитах и гранитах по характеру распределения идентичны [Savko et al., 2019] (Рис. 7).

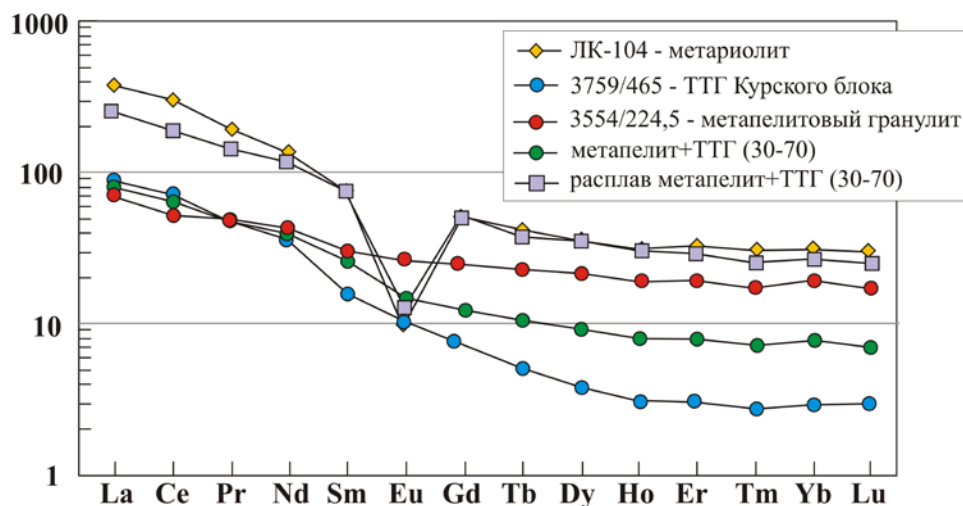


Рис. 7. Нормированные к хондриту содержания редкоземельных элементов в модельном кислом расплаве и в природных риолитах и гранитах по [Savko et al., 2019].

Таким образом, кислые расплавы, материнские для изученных риолитов и гранитов с возрастом 2,61 млрд лет, могли образоваться при дегидратационном плавлении мезоархейских ТТГ-гранитоидов в смеси с метапелитом, в равновесии с Ilm-Vt-Орх-Pl реститом [Patino Douce et al., 1997] при давлении не более 5 кбар на небольшой глубине не более 12 км.

Граниты атаманского комплекса кристаллизовались на более глубоких

уровнях и содержали в себе примесь Орх-Р1 реститовой или кумулюсной компоненты, что определило их геохимические отличия от кислых вулканитов, освобожденных от этих фаз в ходе перемещения расплавов на более высокие уровни коры.

Таким образом, расплавы исследованной вулcano-плутонической ассоциации формировались при высоких температурах 850-930°C и низких давлениях 2,5-2,6 кбар, в сухих маловодных условиях в пределах верхней коры. Температура расплавов в магматическом очаге могла достигать 1000°C. По результатам проведенного моделирования редкоземельных элементов кислые расплавы могли образоваться при дегидратационном плавлении мезоархейских ТТГ-гранитоидов в смеси с метапелитом, в равновесии с ортопироксен-плагиоклазовым реститом.

Третье защищаемое положение. Основные источники неархейских высококремнистых магм имели длительную коровую предысторию ($\epsilon_{Nd}^{2.61} =$ от -5,4 до -6,7; $\epsilon_{Hf}^{2.61} =$ от -0,6 до -8,9) и представлены мезоархейскими ТТГ ассоциациями и палеоархейскими метапелитами Курского блока, слагающими архейское ядро Восточной Сарматии.

Sm-Nd изотопная система. На диаграмме в координатах возраст - $\epsilon_{Nd}(T)$ точки метариолитов и гранитов попадают в поле палеоархейской континентальной коры (Рис. 8). Значения $\epsilon_{Nd}(T)$ отрицательные и варьируют от -5,4 до -6,7, что свидетельствует о древнем коровом источнике риолитов и гранитов (Табл.).

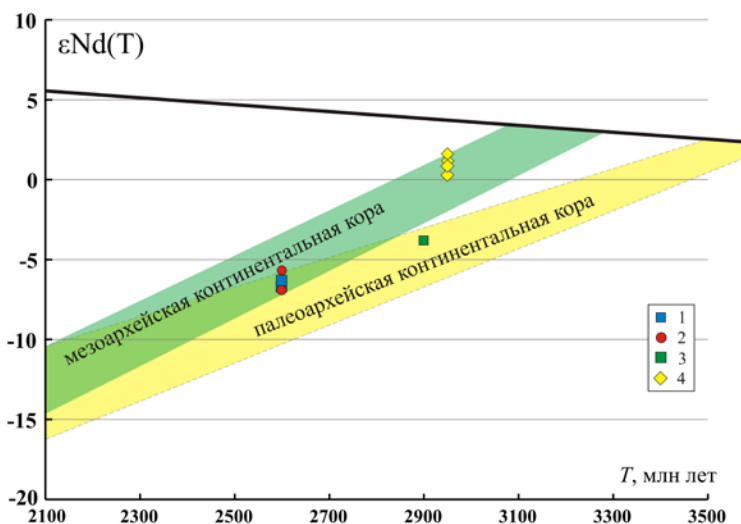


Рис. 8. Диаграмма в координатах возраст - $\epsilon_{Nd}(T)$ для неархейских метариолитов и гранитов Курского блока: 1 - метариолиты лебединской свиты; 2 - граниты атаманского комплекса; 3 - метапелитовый гранулит Курского блока; 4 - ТТГ обоянского комплекса.

Величины $\epsilon_{Nd}(2612)$ для метариолитов попадают в тот же интервал (от -6,4 до -6,1), что и для атаманских гранитов от -6,7 до -5,4. Их Sm-Nd модельные возрасты $T_{Nd(DM)} = 3,4-3,6$ млрд лет на 1 млрд лет более древние, чем U-Pb возрасты циркона из этих пород, что свидетельствует о длительной коровой предыстории источника расплавов.

Табл. Sm-Nd изотопные данные для неархейских метариолитов и гранитов Курского блока

образец	Порода	Sm мкг/г	Nd мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}^*$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T**	$\epsilon\text{Nd}(T)$	T-DM***
ЛК104	метариолит	4,83	25,54	0,1142	0,510892	2612	-6,4	3436
2296/211,5	метариолит	13,78	77,59	0,1073	0,510789	2612	-6,1	3361
1544/209,0	гранит	9,12	42,46	0,1298	0,511146	2612	-6,7	3615
2281/385,7	гранит	8,00	37,23	0,1299	0,511215	2612	-5,4	3496

Примечание. * Предполагаемая ошибка $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ не превышает 0,2 %; ** T - возраст U-Pb датирования, принятый для расчета ϵNd ; *** Модельный возраст согласно [Goldstein and Jacobsen, 1988].

Lu-Hf изотопная система. Измерения изотопного состава Hf в цирконах проводились в тех же точках, где определялся U-Pb изотопный возраст циркона из метариолита. В отличие от U-Pb изотопной системы, которая во всех зернах циркона дает неразлично близкие возраста 2612 млн лет, Lu-Hf изотопная система в тех же зернах демонстрирует широкие вариации первичного изотопного состава гафния ($\epsilon\text{Hf}(2612)$) от +0,4 до -8,9) (Рис. 9).

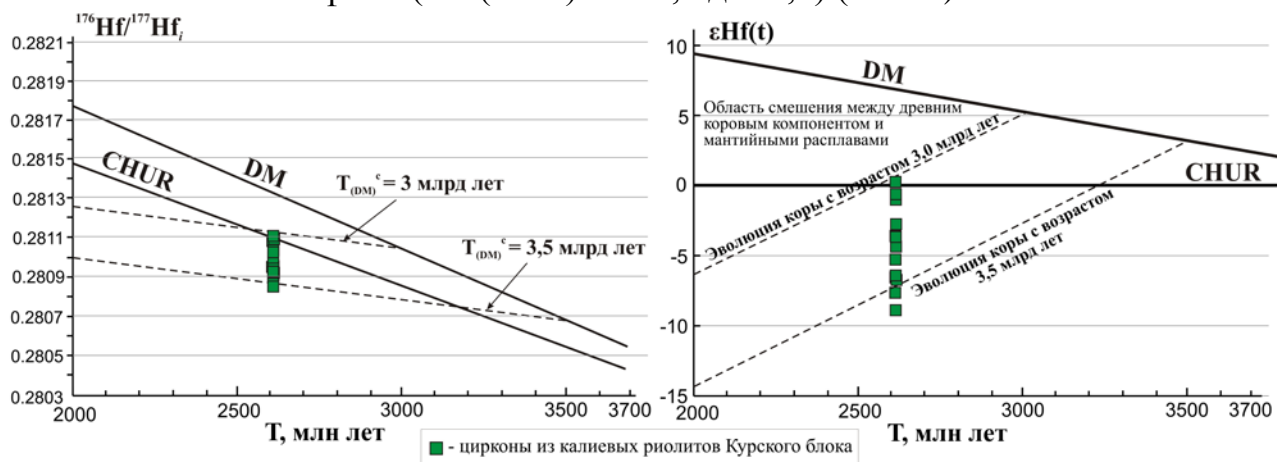


Рис. 9. Диаграммы в координатах возраст T по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $\epsilon\text{Hf}(t)$ и T - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ для неархейского метариолита Курского блока.

Значения модельного возраста $T_{\text{Hf}}(\text{DM})$, рассчитанные по двухстадийной модели, варьируют от 2895 до 3247 млн лет и показывают минимальный возраст исходного материала магмы, из которой кристаллизовался циркон. Возраст коровой экстракции T_{Hf}^c 3,0–3,6 млрд лет отражает время пребывания в коре источника метариолита. Область составов циркона из метариолита ограничена параллельными линиями эволюции коры с модельными возрастами в ~3,0 и 3,5 млрд лет, что свидетельствует о контаминации расплавов веществом палео- и мезоархейской коры (Рис. 9). Lu-Hf изотопные анализы выявили широкие вариации изотопного состава гафния в отдельных зернах магматического циркона из метариолита.

На гистограмме времени коровой экстракции T_{Hf}^c наблюдается наличие трех кластеров значений возраста (Рис. 10): более выраженного пика с возрастом 3,5-3,6 млрд лет и менее выраженных 3,05-3,2 млрд лет и 3,3-3,4 млрд лет. Это отражает некоторую Lu-Hf гетерогенность среды

кристаллизации циркона, унаследованную от разных по составу и возрасту пород в коровом источнике расплавов.

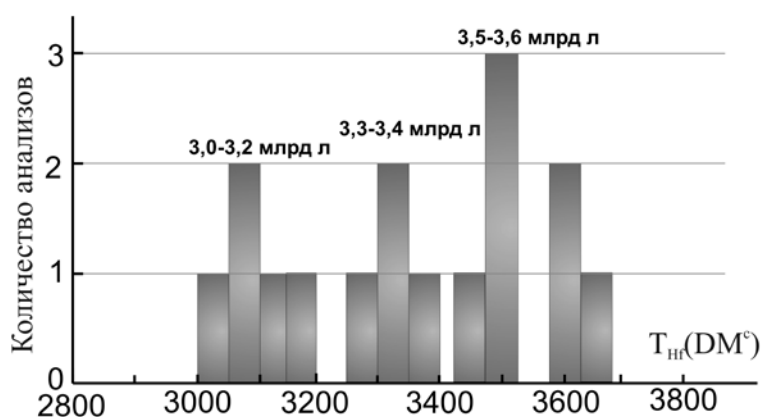


Рис. 10. Гистограмма распределения значений времени коровой экстракции T_{Hf}^c для циркона из неоархейского метариолита Курского блока.

Проведенные геохронологические и изотопные исследования позволяют сделать следующие выводы относительно источников расплавов кислых магм.

Sm-Nd изотопно-геохимические данные ($\epsilon Nd(2612)$ от -5,4 до -6,7) в валовых пробах указывают на то, что кислые магмы формировались или в результате плавления палеоархейских пород или в результате плавления мезоархейских пород с палеоархейскими Nd-метками. В частности, такими породами могли служить мезоархейские метапелитовые гранулиты обоянского комплекса [Савко, 2000], которые известны в виде крупных останцов среди мезоархейских ТТГ, имеют палеоархейские модельные возрасты $T_{Nd}(DM) = 3,49-3,64$ млрд лет [Shchipansky et al., 2007, Савко, 2010] и содержат детритовый циркон с U-Pb возрастaми 3,35-3,55 млрд лет.

U-Pb изотопная система в цирконе из метариолита и гранитов надежно зафиксировала неоархейский возраст кристаллизации кислых расплавов, но высокие температуры этих магм практически полностью стерли коровую предысторию. Из трех проб (более 100 зерен циркона) гранитов и метариолитов сохранилось только одно унаследованное более древнее ядро ксеногенного циркона с возрастом >3 млрд лет.

Lu-Hf изотопно-геохимические исследования выявили широкие вариации модельных возрастов ($T_{Hf}(DM)=3,03-3,65$ млрд лет) в отдельных зернах магматического циркона из метариолита. Они отражают участие разновозрастных архейских источников кислых магм, что согласуется с возрастной неоднородностью архейской коры Курского блока. В её составе присутствуют метаосадки с палеоархейскими детритовыми цирконами, мезоархейские кислые вулканиты зеленокаменных поясов с возрастом около 3,13 млрд лет и ТТГ-гранитоиды с возрастом около 3 млрд лет [Савко и др., 2018].

Таким образом, можно сделать вывод о гетерогенности корового источника для неоархейских гранитоидов Курского блока, основными компонентами которого были мезоархейские ТТГ-гранитоиды и метапелиты с палеоархейскими изотопными метками.

Анализ *Sm-Nd* и *Lu-Hf* изотопных систем показал гетерогенность корового источника для неоархейских гранитоидов и длительную коровую предысторию их протолитов. Основными источниками неоархейских высококремнистых магм были мезоархейские ТТГ ассоциации и метапелиты Курского блока, слагающие архейское ядро Восточной Сарматии.

Четвертое защищаемое положение. Проявления неоархейского высококремнистого магматизма в Курском блоке имеют внутриплитную природу и связаны с плавлением вещества верхней коры за счет подъема базальтовых магм, производные которых подстилают высококремнистые риолиты и вмещают граниты.

Для идентификации тектонической обстановки формирования магматических пород использовались дискриминационные диаграммы, на которых составы метариолитов и гранитов попадают в область перекрытий полей внутриплитных и постколлизийных гранитов [Pearce et al., 1984] (Рис. 11,а).

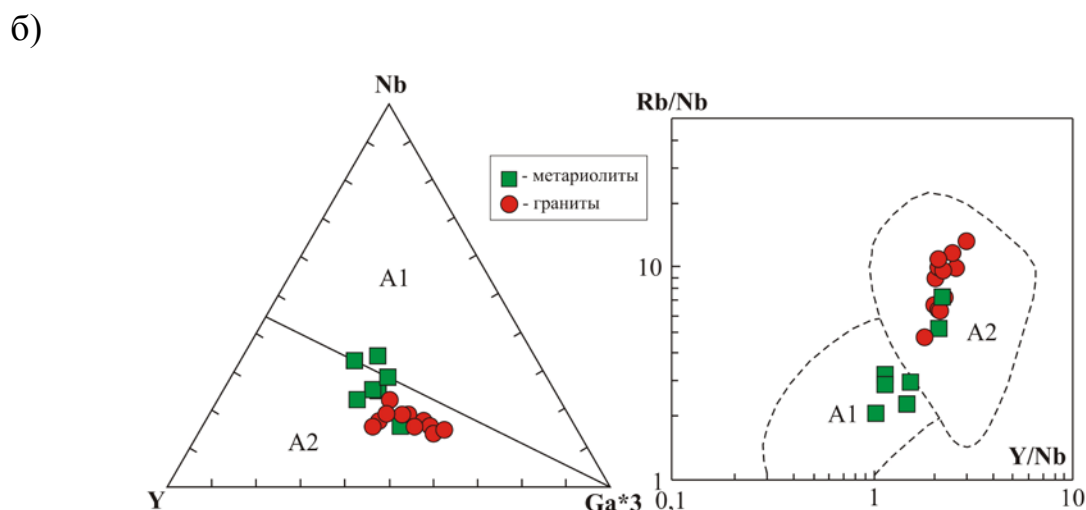
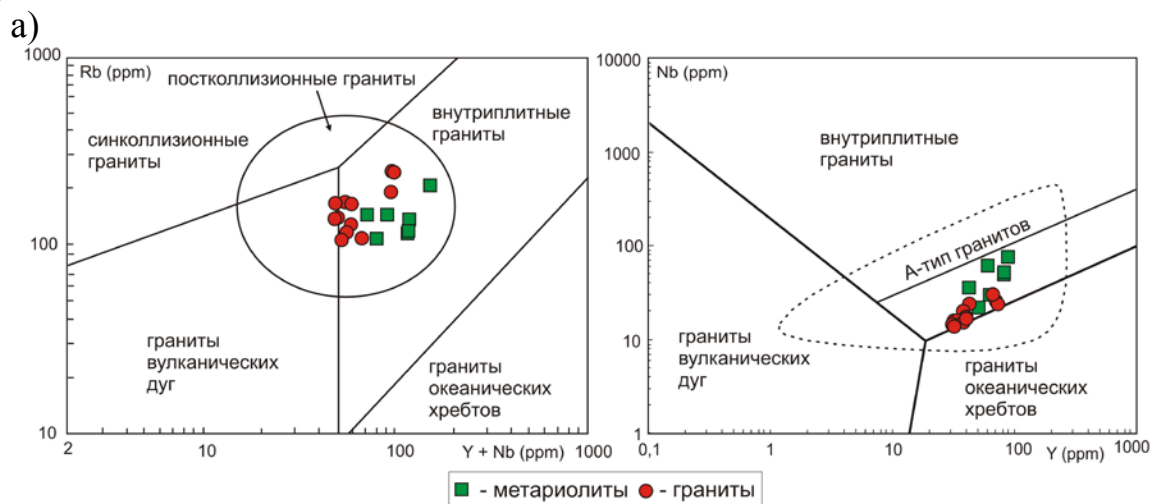


Рис. 11. Дискриминантные диаграммы с фигуративными точками составов неоархейских метариолитов и гранитов Курского блока: а) по [Pearce et al., 1984]; б) по [Eby, 1992].

На диаграммах для разделения гранитов А-типа [Eby, 1992] большая часть

точек составов метариолитов попадает в поле анорогенных внутриплитных (A1) гранитов (Рис. 11,б), а гранитов атаманского комплекса в поле постколлизионных (A2) гранитов.

Высококремнистый магматизм скорее сопряжен с внутриплитной обстановкой, так как: (1) в Восточной Сарматии не известны коллизионные события, предшествовавшие формированию риолитов и гранитов с возрастом 2600 млн лет [Savko et al., 2017; Savko et al., 2018a]; (2) проявления кислого магматизма с возрастом 2600 млн лет локальны и известны только в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры.

В пределах Курского блока для широко проявленного базитового магматизма отсутствуют датировки с возрастом около 2,6 млрд лет, хотя в разрезах скважин 2281 и 2169 метабазиты подстилают метариолиты и прорываются внутриплитными гранитами. На Украинском щите под палеопротерозойскими железисто-кремнистыми породами залегает мощная толща (до 850 м) метабазитов новокриворожской свиты с плюмовыми геохимическими характеристиками [Артеменко и др., 2015]. Под воздействием этого глубинного плюма во внутриплитной обстановке образовались незакономерно распространенные, разобценные малоглубинные очаги плавления самых верхних частей литосферы. Под действием поступающего тепла отделялись остаточные комплементарные гранитному кумулусу риолитовые расплавы. Эти события проявились в образовании вулканоплутонической ассоциации внутриплитных гранитоидов.

Таким образом, проявления неоархейского высококремнистого магматизма в Курском блоке сопряжены с внутриплитной обстановкой и связаны с плавлением вещества верхней коры за счет подъема базальтовых магм, производные которых подстилают высококремнистые риолиты и вмещают граниты.

ВЫВОДЫ

1. В пределах Курского блока Восточной Сарматии локально проявлен неоархейский высококремнистый гранитоидный магматизм возрастом 2,61 млрд лет, представленный единой вулканоплутонической ассоциацией риолитов и гранитов. Возраст кристаллизации оценивается для риолитов как 2612 ± 10 млн лет, для калиевых гранитов как 2613 ± 4 млн лет.

2. Проявления неоархейских метавулканитов и гранитов находятся в пределах южного борта Тим-Ястребовской структуры Курского блока и характеризуются общими геохимическими особенностями: высокими содержаниями кремнезема (SiO_2 до 75 % и выше) и калия (K_2O до 8 %), низкими концентрациями CaO (< 0,9 %) и MgO (< 1 %), аномально низкими содержаниями Na_2O (0,13–3,74 мас. %), высокой железистостью (X_{Fe} до 0,96), низким содержанием Sr (20-60 ppm), обогащением Ba, REE и высокозарядными элементами с глубокими отрицательными Eu аномалиями, характерными для гранитоидов А-типа.

3. По данным минеральной геотермобарометрии ("Ti-in-quartz" и "Ti-in-

zircon") температура кристаллизации магматического расплава составила 850-930°C, и давление, равное 2,5-2,6 кбар. Температуры плавления в магматическом очаге достигали 1000°C.

4. Значительные отрицательные Eu аномалии ($Eu/Eu^* = 0,05-0,09$) в цирконе свидетельствуют, что его кристаллизация происходила одновременно с кристаллизацией плагиоклаза, присутствие которого на ликвидусе указывает, что риолитовый расплав имел низкие содержания воды. Сильно фракционированные спектры тяжелых HREE в цирконе (Yb_N/Gd_N от 9,2 до 20) и низкие величины Hf/Y отношений исключают участие граната в кумулюсной ассоциации. Таким образом, данные по элементам-примесям в цирконе дают независимую информацию о риолитовом расплаве, который был сухим, высокотемпературным и малоглубинным.

5. Кислые расплавы, материнские для изученных риолитов и гранитов с возрастом 2,61 млрд лет, могли образоваться при дегидратационном плавлении мезоархейских ТТГ-гранитоидов в смеси с метапелитом, в равновесии с Пм-Vt-Орх-Pl реститом при давлении не более 5 кбар.

6. В результате сухого малоглубинного плавления смешанного гетерогенного корового источника образовывались исходные гранитные расплавы в виде промежуточных камер с дальнейшим отделением остаточных комплементарных гранитному кумулусу риолитовых расплавов.

7. Lu-Hf изотопные исследования цирконов и Sm-Nd валовых проб свидетельствуют о гетерогенности корового источника для неархейских гранитоидов Курского блока, компонентами которого были мезоархейские ТТГ ассоциации и палеоархейские метапелиты Курского блока, слагающие архейское ядро Восточной Сарматии. Модельный возраст протолита фиксируется в интервале 3,0-3,6 млрд лет.

8. Неархейские высококремнистые породы образовались в анарогенных внутриплитных условиях. Причинами малоглубинного плавления коры могли быть мантийные магмы, связанные с подъемом астеносферного плюма.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Холина, Н.В., Савко, К.А., Холин, В.М. Высокие температуры кристаллизации неархейских риолитов Курского блока Воронежского кристаллического массива: результаты минеральной термометрии / Н.В. Холина, К.А. Савко, В.М. Холин // Вестник ВГУ. Серия Геология. — 2016. — № 3. — С. 53-60.

2. Холина, Н.В. Геохимические особенности и источники расплавов неархейских ультракалийевых риолитов Курского блока Воронежского кристаллического массива / Н.В. Холина // Вестник Воронеж. гос. ун-та, Серия Геология, 2018. — № 1. — С. 46-57.

3. Savko, K.A., Samsonov, A.V., Kholina, N.V., Larionov, A.N., Zaitseva, M.V., Korish, E.H., Bazikov, N.S., Terentiev, R.A. 2.6 Ga High-Si Rhyolites and

Granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and Application for the Archaean Palaeocontinental Correlations / K.A. Savko, A.V. Samsonov, **N.V. Kholina**, A.N. Larionov, M.V. Zaitseva, E.H. Korish, N.S. Bazikov, R.A. Terentiev // *Precambrian Research*, 2019. — V. 322. — С. 170-192.

В других изданиях:

4. Савко, К.А., **Холина, Н.В.**, Холин, В.М., Ларионов, А.Н. Возраст неоархейских ультракалиевых риолитов — важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива / К.А. Савко, **Н.В. Холина**, В.М. Холин, А.Н. Ларионов // *Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии.* — СПб. : Springer, 2015. — С. 247–249.

5. **Холина, Н.В.** Геохимические и петрологические особенности неоархейских высококалиевых риолитов лебединской свиты Курского блока Восточной Сарматии / Н.В. Холина // *Науки о земле: вчера, сегодня, завтра: материалы III Междунар. науч. конф.* — Санкт-Петербург, 2017. — С. 22-25.

6. **Холина, Н.В.** Неоархейские кислые метавулканиды Курского блока Воронежского кристаллического массива: минералогия, геохимия, возраст / Н.В. Холина // *Российская наука в современном мире: Сборник статей XI международной научно-практической конференции.* — Москва, 2017. — С. 97-98.

7. Савко, К.А., Самсонов, А.В., **Холина, Н.В.**, Зайцева, М.В., Ларионов, А.Н. Изотопная геохронология (U-Pb) и геохимия (Nd, Hf) неоархейских риолитов и гранитов Курского блока, Восточная Сарматия: петрологические реконструкции для интратипитных кислых магм / К.А. Савко, А.В. Самсонов, **Н.В. Холина**, М.В. Зайцева, А.Н. Ларионов // *Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. VII Российская конф. по изотопной геохронологии.* — М. : ИГЕМ РАН, 2018. — С. 304-306.

8. Zaitseva, M.V. Isotopic geochronology (U-Pb) and geochemistry (Nd, Hf) of Neoarchean rhyolites and granites of the Kursk block, Eastern Sarmatia: petrological reconstructions for intraplate acid magmas / M.V. Zaitseva, K.A. Savko, A.V. Samsonov, **N.V. Kholina**, A.N. Larionov // *14-th European Workshop on Laser Ablation. June 26-29. Pau, France.* – 2018. – P. 88.

9. Савко К.А., **Холина Н.В.**, Самсонов А.В., Кориш Е.Х., Ларионов А.Н. Внутритипитные граниты атаманского комплекса Воронежского кристаллического массива: геохимия, возраст, источники расплавов / К.А. Савко, Н.В. Холина, А.В. Самсонов, Е.Х. Кориш, А.Н. Ларионов // *Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика. Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия.* — СПб. : ИГГД РАН, 2019. — С. 196–197.