

На правах рукописи



ПЕТРАКОВА МАРИНА ЕВГЕНЬЕВНА

**ВОЗРАСТ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ХОХОЛЬСКО-
РЕПЬЁВСКОГО БАТОЛИТА ДОНСКОГО ТЕРРЕЙНА ВОЛГО-ДОНСКОГО
ОРОГЕНА**

Специальность: 1.6.3 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в лаборатории петро- и рудогенеза Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН), г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель:

Савко Константин Аркадьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой «Полезных ископаемых и недропользования» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», г. Воронеж.

Научный консультант:

Балтыбаев Шаукет Каимович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петро- и рудогенеза ИГГД РАН, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Щипанский Андрей Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Геологического института Российской академии наук (ГИН РАН, г. Москва).

Шелепаев Роман Аркадиевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН, г. Москва).

Защита состоится «26» октября 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovery>

Автореферат разослан «20» сентября 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 003.067.03, д.г.-м.н

О.М. Туркина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Породы Хохольско-Репьёвского батолита Донского террейна образуют один из крупнейших плутонов в западной части протерозойского Волго-Донского орогена. Геологическое строение и развитие Хохольско-Репьёвского батолита в палеопротерозойское время фактически не освещено в литературе. Породы батолита относили к палеопротерозойскому гранитоидному павловскому комплексу (Государственная..., 2011), петротипичным представителем которого является Павловский батолит в южной части Донского террейна, но никаких прецизионных изотопно-геохронологических и геохимических данных, подтверждающих это, нет. Положение усугубляется тем, что в 80-90х годах прошлого века во внутренней части батолита были выявлены массивы меланократовых пород, которые по многим параметрам значительно отличаются от вмещающих их пород павловского комплекса. Одни исследователи включали эти массивы в состав павловского комплекса, а другие относили их к метаморфизованному архейскому белогорьевскому комплексу (Чернышов и др., 1998; Государственная..., 2011). Эти специфические меланократовые породы были ранее предварительно выделены нами как особый потуданский тип (Петракова, Терентьев, 2018), требующий дополнительного изучения и уточнения тектонической обстановки и происхождения.

Актуальность данной работы определяется необходимостью выяснить разнообразие и возрастное соотношение пород в составе изучаемого батолита, оценить физико-химические параметры кристаллизации, уточнить геодинамическую обстановку формирования пород. Знание возраста магматических пород Хохольско-Репьёвского батолита дало бы возможность решить вопрос отнесения их к архейскому белогорьевскому или протерозойскому павловскому комплексу. Кроме того, обоснование возраста, условий образования пород батолита расширило бы представления о роли и значении мантийных и коровых источников в формировании вещественных комплексов Донского террейна Волго-Донского орогена.

Целью работы является установление строения, возраста, условий образования и происхождения пород Хохольско-Репьёвского батолита. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Реконструировать строение Хохольско-Репьёвского батолита и провести типизацию пород на основе изучения минералогических, петрографических и геохимических особенностей;
2. Оценить время кристаллизации пород батолита на основе U-Pb изотопного датирования циркона;
3. Провести сравнительный анализ пород Хохольско-Репьёвского батолита с породами смежных магматических комплексов;
4. Оценить условия внедрения и кристаллизации магм Хохольско-Репьёвского батолита;
5. Оценить роль фракционной кристаллизации (FC) и возможной ассимиляции и контаминации (AFC) в эволюции составов пород батолита;
6. Уточнить роль коровых и мантийных источников в образовании изучаемых пород при помощи Sm-Nd и Lu-Hf изотопно-геохимических исследований.

Фактический материал и методы исследования.

Фактическую основу работы составляют оригинальные авторские данные, собранные за время исследования (2017–2021 гг.) и материалы, полученные из фондовых и опубликованных в открытой печати источников. Картографический материал (геофизические данные по Хохольско-Репьёвскому батолиту и плутону Потудань) был собран из фондов ООО "Воронежгеология" (г. Воронеж).

В ходе исследований был изучен керн из 28 скважин, 65 прозрачно-полированных шлифов. Вещественный состав пород и минералов изучался комплексом методов оптической

и электронно-зондовой микроскопии и включает количественно-минералогический анализ 13 образцов в шлифах, 246 микрозондовых определений петрогенных компонентов в породообразующих минералах. Выполнено и использовано в работе 53 химических анализа пород (XRF), 29 анализов содержаний редких и рассеянных элементов, для 3-х проб определен возраст U-Pb изотопным методом по циркону, для 6 проб проведены исследования изотопного состава Nd и для одной пробы было выполнено изучение Lu-Hf изотопного состава циркона.

Помимо перечисленного, в работе использовались дополнительные фактические и аналитические материалы, предоставленные К. А. Савко и Р. А. Терентьевым (НИИ Геологии ВГУ, г. Воронеж).

Анализы химического состава производились на рентгенофлуоресцентном спектрометре «S8 Tiger» (Bruker AXS GmbH, Германия), анализы составов породообразующих минералов выполнены на растровом электронном микроскопе, результаты исследований получены на оборудовании ЦКПНО ВГУ. Содержания редких элементов определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Определение возраста циркона изотопным U-Pb локальным методом и Sm-Nd изотопные анализы пород выполнены в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Lu-Hf изотопные исследования циркона проведены в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (г. Екатеринбург). Моделирование магматического минералообразования было выполнено на основе пакета «MELTS». Термо- и барометрия пород, оценка водонасыщенности магм производились с применением комплекса «классических» минеральных термометров, барометров и фугометров.

Обработка полученной геологической, минералогической, геохимической и изотопно-геохимической информации осуществлялась с использованием программ Microsoft Office, CorelDraw, Photo-Shop CS6, TriQuick, GCDKit, Grapher, Isoplot.

Положения, выносимые на защиту:

1. Хохольско-Репьёвский батолит сформировался 2050-2080 млн лет назад и сложен двумя магматическими ассоциациями пород: потуданской монцогаббро-гранодиоритовой и павловской монцодиорит-лейкогранитовой, которые относятся к железистой и магнезиальной сериям соответственно.

2. Кристаллизация расплавов магматических пород потуданского типа происходила при начальной температуре 1150–1000°C, а павловского – при 980–900°C на глубине около 9 км. Преобладание в потуданском типе ильменитсодержащих пород, а в павловском – магнетитсодержащих, является следствием разной водонасыщенности магм, а также разной фугитивности кислорода в них.

3. Геохимические и изотопно-геохимические особенности пород потуданского типа свидетельствуют о происхождении магм из обогащенного мантийного источника и павловского типа – из смешанного мантийно-корового.

Научная новизна.

Получены новые данные о строении и возрасте Хохольско-Репьёвского батолита и впервые выделены в его составе две серии пород с различными петро- и геохимическими параметрами. Впервые установлены режимы кристаллизации магматических пород по комплексу методов геотермо- и барометрии и получены оценки водонасыщенности и фугитивности кислорода в магмах изученного батолита. Установлено, что породы батолита кристаллизовались в верхнекоровых условиях и, что в их образовании принимали участие расплавы из обогащенного мантийного источника.

Практическая значимость.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке и составлении геологических карт докембрийского фундамента различного масштаба, а также для составления моделей магматизма для раннего докембрия Восточно-Европейской платформы.

Соответствие результатов работы научным специальностям.

Результаты работы соответствуют пункту 1 (магматическая геология) и 2 (магматическая петрология) паспорта специальности 1.6.3.

Апробация работы и публикации.

Результаты исследований по теме диссертации изложены в 9 работах, из них 3 статьи в журналах из списка ВАК. Основные результаты представлены на научных конференциях и совещаниях: XXXI Молодежной научной школе-конференции, посвященной памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (г. Санкт-Петербург, 2020); X Российской молодежной научно-практической Школе «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 2020); Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию ИГЕМ РАН «Породо-, минерало- и рудообразование: Достижения и перспективы исследований» (г. Москва 2020); XIII Всероссийском Петрографическом совещании (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов» (г. Иркутск, 2021); Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты, 2021). Отдельные части работы докладывались на ежегодных научных конференциях и семинарах геологического факультета и НИИ Геологии ВГУ в 2017–2018 гг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложена на 142 страницах, содержит 53 рисунка и 22 таблицы. Список литературы включает 158 наименований.

Благодарности.

Искреннюю благодарность за научное руководство автор выражает своим научным руководителям: доктору геолого-минералогических наук, профессору Константину Аркадьевичу Савко и доктору геолого-минералогических наук, профессору Шаукету Каимовичу Балтыбаеву. В выполнении своей работы автор благодарит научных сотрудников НИИ Геологии ВГУ, преподавателей и сотрудников кафедры полезных ископаемых и недропользования за неоценимую поддержку и постоянную консультацию (к.г.-м.н. Холину Н.В., к.г.-м.н. Стрика Ю.Н., к.г.-м.н. Лебедева И.П., к.г.-м.н. Базикова Н.С., Кориш Е.Х.), а также сотрудников ИГГД РАН (д.г.-м.н. А.Б. Кузнецова, д.г.-м.н. А.Б. Котова, д.г.-м.н. А.М. Ларина, к.г.-м.н. Е.Б. Сальникову, к.г.-м.н. В.П. Ковача, к.г.-м.н. В.М. Саватенкова, к.г.-м.н. Е.Ю. Рыцка, к.г.-м.н. П.Я. Азимова, к.г.-м.н. О.Л. Галанкину, к.г.-м.н. Д.В. Доливо-Добровольского, А.В. Юрченко, Р.Л. Анисимова). Отдельно автор хочет отметить большую помощь, оказанную д.г.-м.н. О.М.Туркиной (ИГМ СО РАН), д.г.-м.н., чл.-корр. РАН А.В.Самсоновым (ИГЕМ РАН) при подготовке диссертации. Особую благодарность автор выражает кандидату геолого-минералогических наук, ведущему научному сотруднику НИИ Геологии ВГУ Р.А. Терентьеву за внимание, требовательность и ценные советы, которые способствовали выполнению исследований на всех этапах работы.

Также хочу выразить свою признательность моим родным за поддержку, мотивацию и веру, что эта работа будет сделана.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, ее научная и практическая значимость, сформулирована цель исследования и задачи, приведены используемые аналитические методы и фактический материал, положенный в основу работы. Даются сведения об апробации результатов, раскрывается структура изложения работы.

Первая глава включает в себя постановку проблемы и раскрывает актуальность изучения гранитоидов исследуемого Донского террейна Волго-Донского орогена.

Во **второй главе** дается краткая геологическая характеристика магматических комплексов западной части Волго-Донского орогена, особое внимание уделяется характеристике исследуемых пород в пределах Донского террейна.

В **третьей главе** приводится подробное описание методики исследования.

В *четвертой главе* рассмотрены петрографо-минералогические и геохимические особенности изученных магматических пород, являющихся составной частью Хохольско-Репьёвского батолита. Кроме общей характеристики изученных пород, породы павловского типа из Хохольско-Репьёвского батолита сравниваются с аналогичными гранитоидами другого крупного (Павловского) батолита с целью проверки их принадлежности к единому магматическому комплексу. Породы потуданского типа предложено выделить из состава павловского комплекса и рассматривать как отдельный тип пород (или отдельный магматический комплекс). Материалы главы частично легли в основу 1-го и 2-го защищаемых положений.

В *пятой главе* представлены изотопно-геохронологические (U-Pb) и изотопно-геохимические (Nd, Hf) данные. На основании полученного возраста циркона пород предлагается отнести изученный этап магматической активности к постколлизийному. Геохимические и изотопно-геохимические результаты дают основание предполагать обогащенную природу источника для магматических комплексов Хохольско-Репьёвского батолита. Материалы главы легли в основу 1-го и 3-го защищаемых положений.

Шестая глава - заключительная, посвящена геохимической типизации исследуемых магматических пород Хохольско-Репьёвского батолита и их петрогенезису. Здесь приведены результаты исследований по термо- и барометрии, которые позволяют определить условия кристаллизации исследуемых массивов. Представлено петрохимическое моделирование фракционной кристаллизации и эволюции составов двух типов магм (потуданской и павловской), а также их кристаллизация с учетом возможной ассимиляции вмещающих пород. На основе геохимических и изотопно-геохимических характеристик определены условия генерации магм и геодинамическая обстановка формирования пород Хохольско-Репьёвского батолита в составе Донского террейна.

Наиболее актуальной и обоснованной на сегодня представляется модель геодинамического развития Восточно-Европейского кратона, согласно которой в его строении принимают участие три различных раннедокембрийских мегаблока: Фенноскандия, Сарматия и Волго-Уралия (рис. 1а), спаянные орогенами в конце палеопротерозоя (Shchipansky, Bogdanova, 1996; Claesson et al., 2001; Bogdanova et al., 2006, 2008). По мнению исследователей (Щипанский и др., 2007; Савко и др., 2015) коллизия Волго-Уралии и Сарматии около 2.1 млрд лет назад приводит к складкообразованию и метаморфизму палеопротерозойских пород Курского блока, Лосевского, Донского и Воронцовского террейнов, и последующему масштабному проявлению магматизма разнообразного состава (рис. 1б).

Обширные объемы гранитоидов в Донском террейне Волго-Донского орогена образовались ~2.04–2.08 млрд лет назад. Так здесь широко развит павловский гранитоидный комплекс, представленный крупными батолитами (1500–2000 км² каждый): в северной части террейна – Хохольско-Репьёвским, в южной – петротипическим Павловским. Серия разобщенных массивов павловского комплекса находится в центральной части Донского террейна – Лискинская группа массивов (~2.07 млрд лет) (Terentiev, 2016; Terentiev et al., 2020), западнее Донского террейна в пределах архейского обоянского плутоно-метаморфического комплекса Курского блока – Олымская (~2.06 млрд лет) (Terentiev et al., 2020) и Россошанская группы (~2.08 млрд лет) (Terentiev et al., 2020) (рис. 1б).

Другим ярким представителем магматической активности является выделенный нами потуданский известково-щелочной – субщелочной комплекс пород.

Известны также в Донском террейне интрузивные тела белогорьевского комплекса с предполагаемым предшественниками архейским возрастом. Комплекс метаморфизован и представлен горнблэндитами, габбро-амфиболитами и пироксенитами (рис. 2), которые слагают линзовидные, изометричные тела площадью 0.5–2 км² неустановленной мощности (Одокий, 1962).

Все перечисленные магматические породы перекрываются чехлом несогласно залегающих фанерозойских осадков мощностью от 0.5 до 300 м.

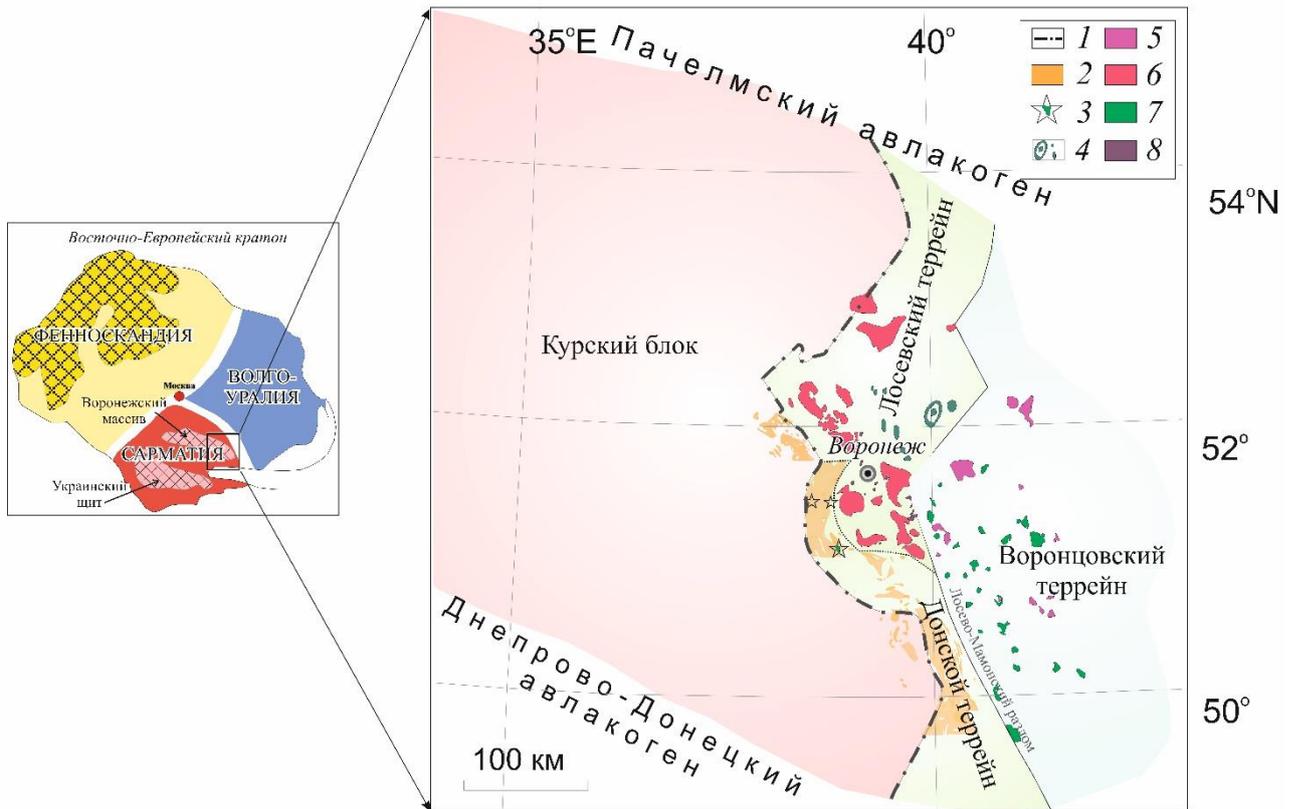


Рисунок 1. Схема расположения структур Волго-Донского орогена в восточной части Сарматии (а) – строение Восточно-Европейского кратона по (Gorbatschev, Bogdanova, 1993) и (б) – структурно-формационное районирование Воронежского кристаллического массива и расположение палеопротерозойских магматических комплексов (внемасштабно) (Савко и др., 2017). Обозначения на карте: 1 – западная граница Волго-Донского орогена; магматические комплексы: 2 – павловский гранитоидный; 3 – потуданский монцогаббро–гранодиоритовый; 4 – ольховский кольцевой плутон и группа макарьевских интрузивов; 5 – граниты А- и S-типа бобровского комплекса; 6 – усманский тоналит–трондьемит–гранодиоритовый; 7 – мамонский и еланский базит-гипербазитовые; 8 – метаморфизованные габброиды рождественского комплекса.

Обоснование защищаемых положений

1. Хохольско-Репьёвский батолит сформировался 2050-2080 млн лет назад и сложен двумя магматическими ассоциациями пород: потуданской монцогаббро-гранодиоритовой и павловской монцодиорит-лейкогранитовой, которые относятся к железистой и магнезиальной сериям соответственно.

До последнего времени информация о геологическом строении, взаимоотношениях гранитоидов Хохольско-Репьёвского батолита с вмещающими породами, а также какая-либо петрографо-минералогическая, геохимическая характеристика пород была скудна, а изотопно-геохимические и геохронологические данные вовсе отсутствовали. Начало изучения Хохольско-Репьёвского батолита было связано с проведением крупномасштабных геолого-съёмочных и поисковых работ на территории юго-востока Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Результаты геолого-геофизического картирования в 1972–1981 годах позволили выявить магнитные и гравитационные аномалии, а также определить форму и размеры залегающих тел. По имеющимся редким материалам геолого-минерагенического картирования, выполненного Белгородской экспедицией в 1988–1995

годах на поиски полиметаллических руд (Горяшин, Соколов, 1995ф), сохранились описания некоторых скважин (№№ 7576, 7577, 7578, 7579, 7581, 7586) в центральной части батолита, которые представляют интерес для нашего исследования.

По структурной позиции и составу среди магматических пород, являющихся составной частью Хохольско-Репьевского батолита выделяются:

(1) потуданский тип – преимущественно кварцевые монцогаббро–монцодиориты, гранодиориты, содержащие клинопироксен;

(2) павловский тип – порфировидные кварцевые (монцогаббро)–монцодиориты, кварцевые монцониты, гранодиориты, граниты, преимущественно беспироксеновые.

Потуданский тип пород представлен образцами непосредственно из скважин плутона Потудань (скв. №№ 8003, 6418, 6416, 6425, 6427, 6435) (рис. 2, 3) и некоторыми образцами из северных массивов, находящихся на удалении от плутона (скв. №№ 7577, 7578, 7581, 7586). Макроскопически эти меланократовые породы представляют собой темно-серые, серые до розовато-серых массивные, мелко- и среднезернистые разновидности. Для них характерно наличие хорошо сохранившегося клинопироксена или его реликтов, замещенных амфиболом и/или биотитом (чаще наблюдаются сростания амфибола и биотита).

По модальному составу и среднему содержанию анортита в плагиоклазе из представительных образцов, породы этой группы классифицируются как кварцевые монцогаббро, кварцевые монцогаббродиориты, кварцевые монцодиориты и гранодиориты. Главные минералы представлены плагиоклазом (32–54%; здесь и далее - объемные %), калиевым полевым шпатом (6–22%), биотитом (9–22%), роговой обманкой (0.5–12%), кварцем (5–12%), клинопироксеном (5–10%). Акцессорные минералы представлены преимущественно магнетитом (до 6%), ильменитом, апатитом, титанитом, титаномагнетитом, цирконом, в редких случаях, пирротинном, пиритом, халькопиритом.

Гранитоиды павловского типа вмещают породы потуданского типа и подразделены на две фазы по (Египко, 1971; Терентьев, Савко, 2017). Породы первой фазы наблюдаются в составе крупных неоднородных массивов и формируют основной объем батолитов. Представлены розовыми до серых мелко- или среднезернистыми, и розовыми до красных порфировидными, часто крупнозернистыми гранитоидами. Вторая фаза прорывает гранитоиды ранней фазы и супракрystalльные породы в виде малых тел и жил лейкогранитов, аплитов и пегматитов. Дальнейший сравнительный анализ производится автором для меланократовых пород потуданского типа и гранитоидов павловского типа первой фазы, как наиболее распространенных представителей павловского комплекса.

По модальному составу породы павловского типа относятся к кварцевым монцодиоритам, кварцевым монцонитам, монцогранитам и гранодиоритам, реже к монцодиоритам, монцонитам, кварцевым сиенитам и сиеногранитам. Главные минералы представлены плагиоклазом (41–50 %), калиевым полевым шпатом (22–35 %), амфиболом (3–10 %), кварцем (18–26 %), биотитом (3–10%). Акцессорные минералы (3–5 %): магнетит, титанит, апатит, циркон, ильменит, эпидот.

Геохимия. По петрохимическим характеристикам *породы потуданского типа* представляют дифференцированную серию пород от основного до кислого состава. По составу и соотношению главных элементов кварцевые монцогаббро-гранодиориты потуданского типа являются железистыми, щелочно-известковыми до щелочных (рис. 4), метаглиноземистыми [$A/CNK (Al_2O_3/CaO + Na_2O + K_2O) < 1$] породами. Следует отметить, что образцы с более высоким содержанием кремнезема попадают в поле магнезиальных пород, являются высококалиевыми и известково-щелочными. Отмечаются высокие содержания щелочей Na_2O (2.7–4.7 % (здесь и далее в вес. %) и K_2O (2.5–4.4 %) в породах основного состава.

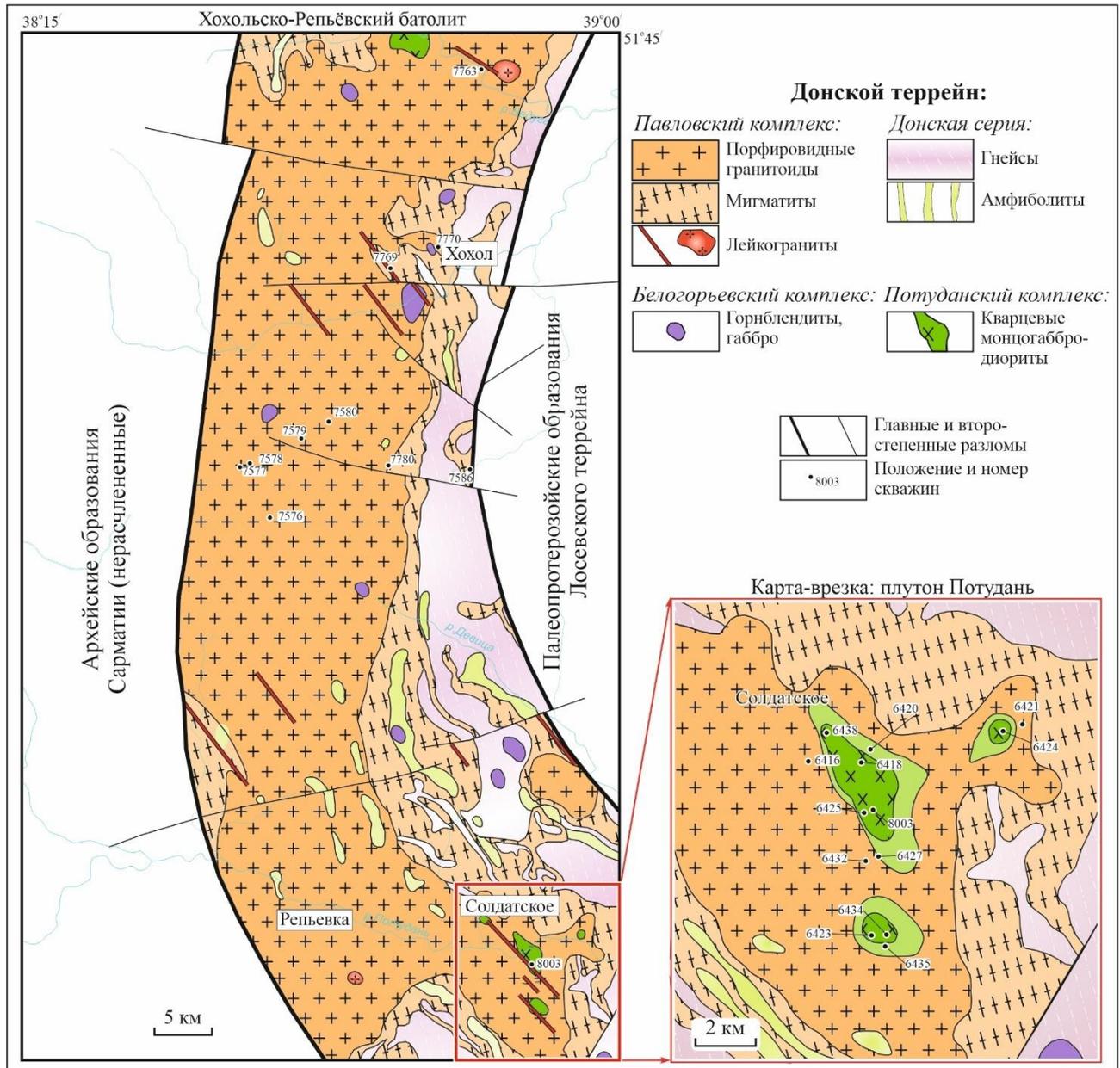


Рисунок 2. Схематическая геологическая карта Хохольско-Репьёвского батолита и плутона Потудань.

Все образцы пород потуданского типа выделяются высокими содержаниями Sr (380–2020 г/т), Ba (505–3060 г/т) и элементов группы железа V (67–219 г/т), Ni (6–61 г/т) и Cr (23–196 г/т). Для них характерно резко фракционированное распределение редкоземельных элементов (REE) ($(La/Yb)_N = 19.1–29.2$ и $(Gd/Yb)_N = 3.2–4.2$). Наблюдается слабая отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* = 0.64–0.76$) (рис. 5). Кроме того, они обогащены крупноионными литофильными элементами (LILE) Rb, La, Ba, U, Ce, проявляют умеренные концентрации Th, U, Ti и обеднены Nb, Zr (рис. 5).

Породы павловского типа Хохольско-Репьёвского батолита характеризуются содержанием SiO_2 61–73 %. По составу и соотношениям главных элементов павловские гранитоиды являются магнезиальными, высококалийными, известково-щелочными до щелочных (рис. 4), метаглиноземистыми [$A/CNK (Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O) < 1$] породами. По соотношению $Fe_{index} (FeO_{общ}/[FeO_{общ}+MgO])$ и SiO_2 (по Frost et al., 2001) выделяются две серии – умеренно- и высокомагнезиальная.

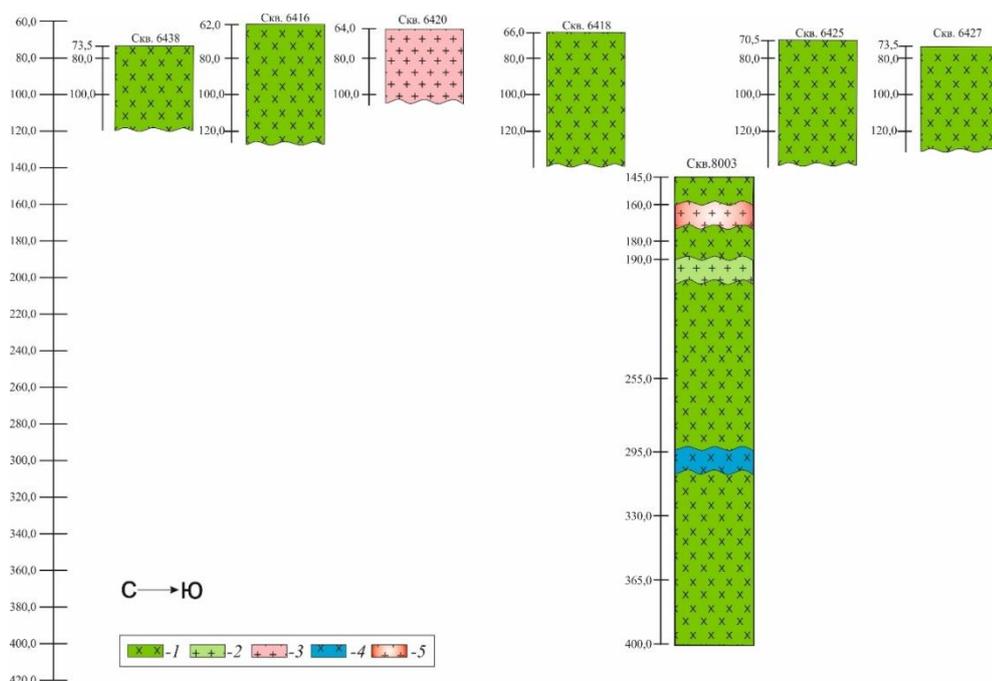


Рисунок 3. Разрезы скважин, вскрывшие образования субщелочных кварцевых монцогаббро-диоритов в районе плутона Потудань. Условные обозначения: 1 – кварцевые монцогаббро – монцодиориты потуданского типа; 2 – гранодиорит потуданского типа; 3 – породы павловского типа; 4 – гибридные породы; 5 – лейкогранитные дайки.

По химическому составу более дифференцированные дериваты павловского типа попадают в поле железистых гранитов с высоким содержанием калия. Эти граниты демонстрируют ограниченную вариацию составов по SiO_2 , относятся к щелочно-известковой серии. Обобщенно тренды составов павловских гранитоидов демонстрируют уменьшение Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{FeO}_{\text{общ}}$, MgO , CaO , P_2O_5 и увеличение K_2O с увеличением SiO_2 . Однако, высокомагнезиальные образцы часто не обнаруживают ясной корреляции главных элементов с кремнеземом. По сравнению с породами потуданского типа они являются магнезиальными и демонстрируют меньшие значения CaO , TiO_2 и повышенное содержание щелочей Na_2O , K_2O в более кислых дифференциатах.

Хондрит-нормализованные спектры редкоземельных элементов гранитоидов павловского типа Хохольско-Репьёвского батолита близки к кварцевым монцодиоритам потуданского типа и к кварцевым монцодиоритам, гранодиоритам Павловского батолита (Терентьев, Савко, 2017): LREE более фракционированы, чем HREE – $(\text{La}/\text{Yb})_N = 12.0\text{--}73.2$ и $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 3.1\text{--}4.1$, также отмечается отсутствие или слабое проявление европиевой аномалии Eu/Eu^* (0.6–0.8) (рис. 5). В одном образце гранита ($\text{SiO}_2 = 72\%$) наблюдается положительная аномалия Eu/Eu^* (2.26), а также Sr, что может быть связано с аккумуляцией полевых шпатов. Обогащение Rb, Ba, U и обеднение Ti, Nb, Sr, Zr относительно примитивной мантии выражено более контрастно, чем в породах потуданского типа (рис. 5).

В отличие от потуданских монцогаббро-диоритов павловские гранитоиды Хохольско-Репьёвского батолита демонстрируют меньшее содержание Sr (210–940 г/т) и Ba (399–2840 г/т), характеризуются умеренным содержанием V (22–191 г/т) и Ni (5–31 г/т), Cr (16–93 г/т).

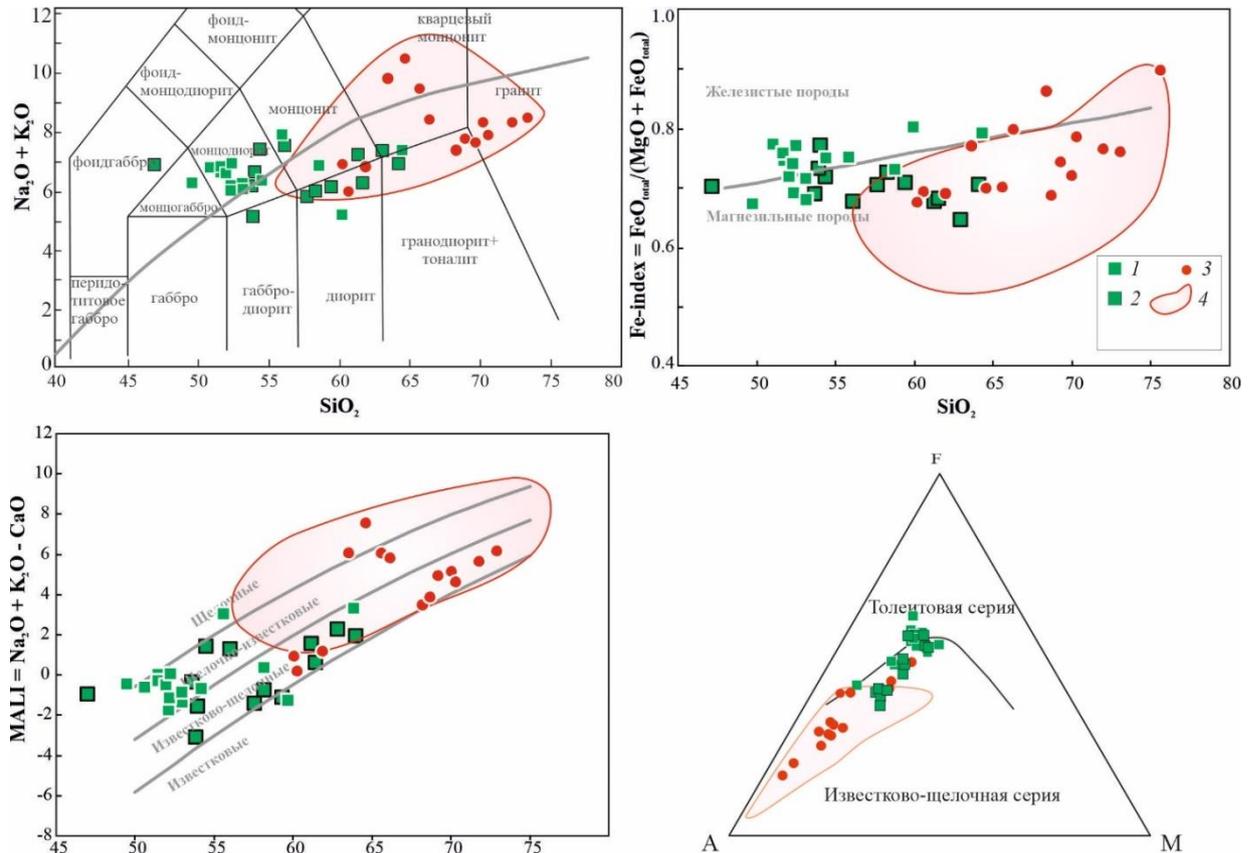


Рисунок 4. Содержание петрогенных окислов в породах плутона Потудань (1) и северных сателлитов (2), вмещающих гранитоидов павловского комплекса Хохольско-Репьёвского батолита (3), и гранитоидов Павловского батолита по (Терентьев, Савко, 2017) (4) на классификационных диаграммах TAS по (Middlemost, 1994); $SiO_2 - Fe_{общ}/(Fe_{общ} + MgO)$ и $SiO_2 -$ индекс MALI по (Frost et al., 2001); AFM по (Irvine, Baragar, 1971).

Геохимическая типизация гранитоидов павловского и потуданского типов в рамках «алфавитной» классификации представлена на дискриминационных диаграммах (Whalen et al., 1987), где точки составов легли в поле нефракционированных гранитов I-, S- и M-типов, а также в поле A-типа (рис. 6). Граниты S-типа являются перглиноземистыми ($A/CNK > 1.1$), содержат глиноземистые минералы, такие как мусковит, кордиерит или гранат, в цирконах присутствуют унаследованные ядра, для M-типа характерна толеитовая геохимия с обедненными спектрами распределения РЗЭ и положительные значения $\epsilon_{Nd}(t)$, что не характерно для изученных магматических пород и опровергает их принадлежность к S- и M-типу.

Павловские и потуданские породы являются метаглиноземистыми, известково-щелочными и субщелочными, для них характерно обогащение высокозарядными катионами и литофильными элементами (Rb, Ba, La, Th, U, Nb, Ta,), содержат высокотемпературные безводные фазы (Cr_x), что сближает их с гранитами I- и A-типов.

Судя по отношениям $Sr/Y > 20$, $Nb/Y > 0.4$, $Ta/Yb > 0.3$, $La/Yb > 10$, $Gd/Yb > 2$, $Sm/Yb > 2.5$ (Whalen, Hildebrandt, 2019), породы павловского и потуданского типов могут быть производными магматической активности, спровоцированной отрывом слэба (рис. 7). Эти критерии позволяют различить породы геохимически сходные с доколлизийными обстановками магматизма вулканических дуг и постколлизийным отрывом слэба. Кроме того, значения $Nb+Y > 60$ и $Ta+Yb > 6$, позволяют отличить A-граниты от других постколлизийных пород. Во всяком случае, из указанных дискриминационных диаграмм следует, что рассматриваемые нами породы скорее всего не связаны с плюмовым источником.

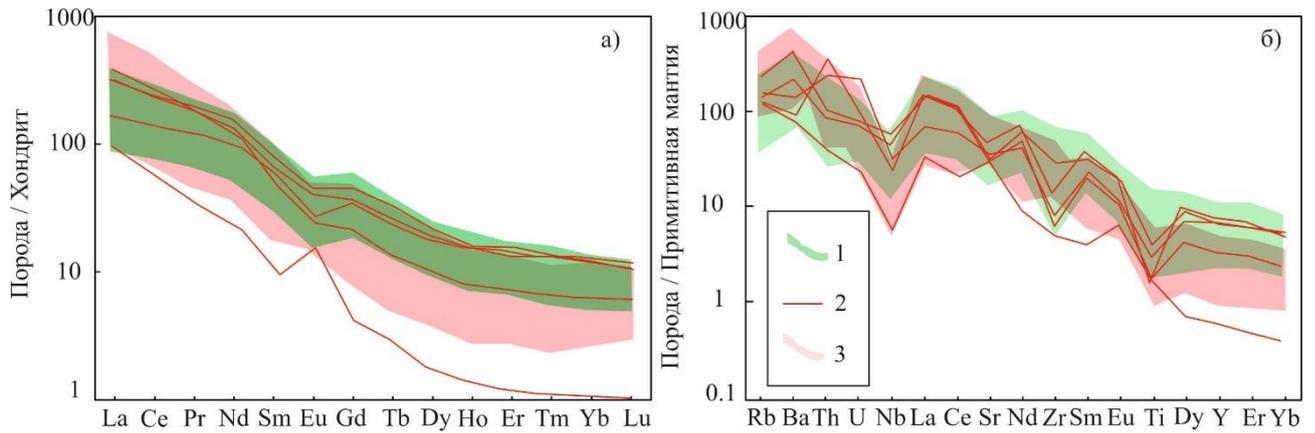


Рисунок 5. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов в породах потуданского типа, нормированные к (а) хондриту (William, 1984) и (б) примитивной мантии по (Sun, McDonough, 1989); цифрами на рисунке показаны: 1 – потуданский тип; павловский тип: 2 – гранитоиды Хохольско-Репьёвского батолита; 3 – гранитоиды Павловского батолита по (Терентьев, Савко, 2017).

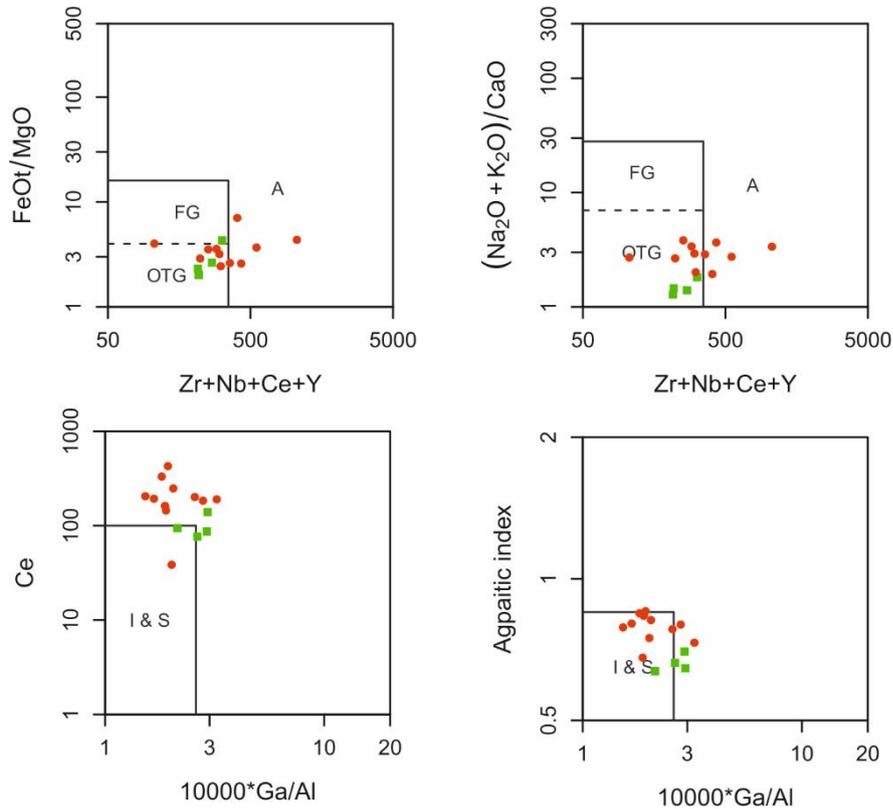


Рисунок 6. Дискриминантные диаграммы по (Whalen et al., 1987) с фигуративными точками составов гранитоидов Хохольско-Репьёвского батолита: зеленым цветом - потуданские, красным – павловские, вынесены составы с $\text{SiO}_2 = 62\text{--}72\%$.

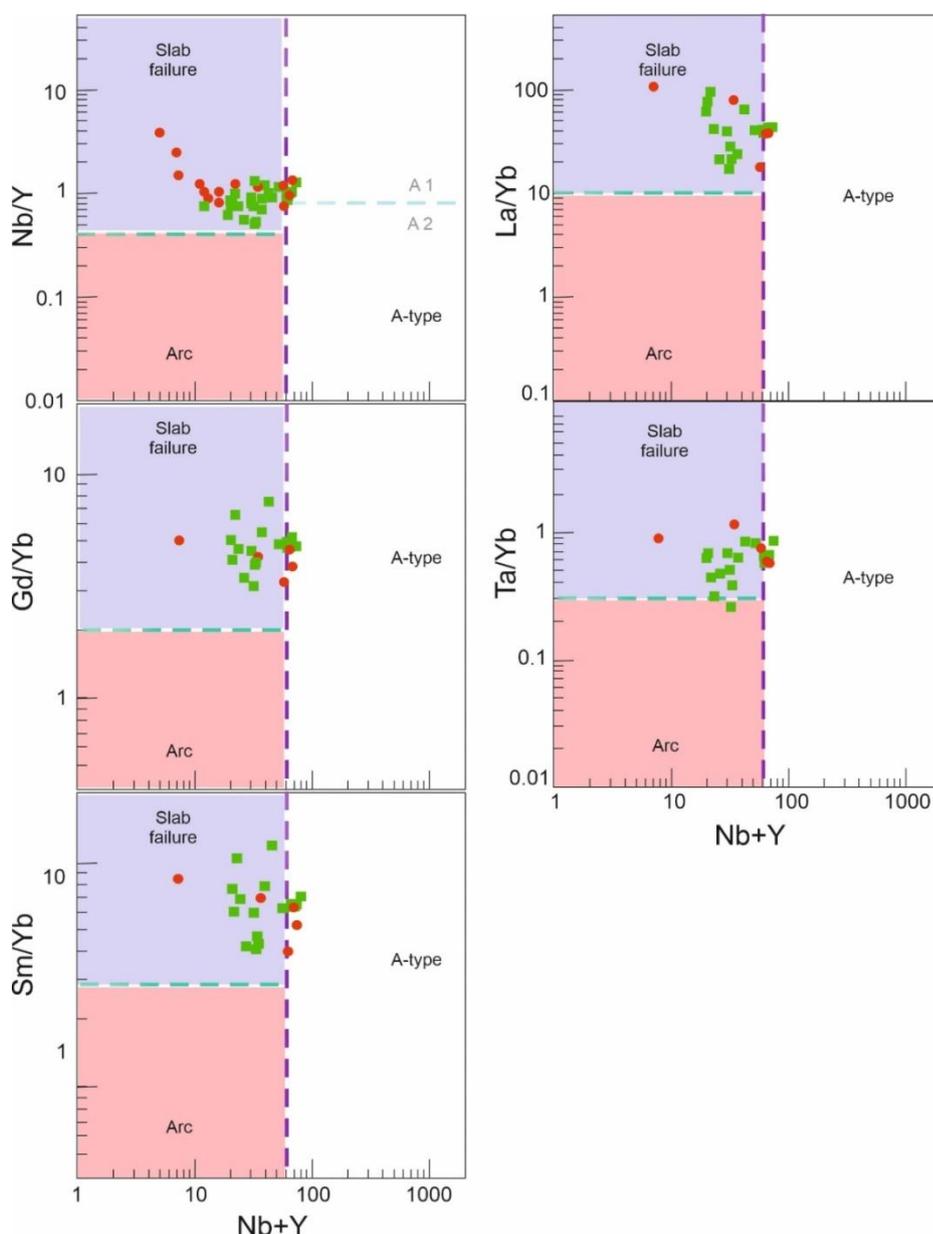


Рисунок 7. Дискриминационные диаграммы, отделяющие магматизм обстановок доколлизиионных дуг от магматизма постколлизиионного отрыва слэба и внутриплитных А-гранитов по (Whalen, Hildebrant, 2019) с фигуративными точками составов гранитоидов Хохольско-Репьёвского батолита: зеленым цветом - потуданские, красным – павловские.

Геохронология. Для геохронологических исследований (методом SIMS по циркону на приборе SHRIMP-II) были выделены цирконы из проб равномернозернистого кварцевого монцогаббро и кварцевого монцодиорита потуданского типа (обр. 6418/66 и обр. 7577/170), Хохольско-Репьёвского батолита.

Циркон из кварцевого монцогаббро (обр. 6418/66) потуданского типа представлен удлиненно-призматическими кристаллами и обломками кристаллов длиной от 200 мкм до 600 мкм и шириной от 150 мкм до 240 мкм, в некоторых зернах хорошо проявлена грубая осцилляционная зональность, что характерно для циркона из габброидов и предполагает их исходную магматическую природу. Конкордантный U-Pb возраст составляет 2056 ± 7 млн лет (СКВО = 5.7; вероятность конкордантности = 0.017; рис. 8). В пределах ошибки он совпадает со средневзвешенным $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастом 2061 ± 5 млн лет (СКВО = 1.19). Отношение Th/U варьирует от 0.4 до 2.79, что также характерно для циркона магматического происхождения.

Циркон из кварцевого монцодиорита (обр. 7577/170) потуданского типа образует, главным образом, призматические и удлиненно-призматические прозрачные кристаллы

светло-желтого цвета, размер которых изменяется от 20×90 до 190×330 мкм, идиоморфные с грубой зональностью в центре, а в неоднородных кристаллах проявлена тонкая зональность в краевых частях и грубая – в центральных. В режиме катодолуминесценции циркон неоднороден по оттенкам серого цвета, тем не менее в нем наблюдается тонкая осцилляционная зональность. Верхнее пересечение дискордии (рис. 8) соответствует возрасту 2067 ± 8 млн лет (СКВО = 0.62), который совпадает со средневзвешенным $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастом 2067 ± 8 млн лет (СКВО = 2.5). Отношение Th/U варьирует от 0.2 до 2.1, что также характерно для циркона магматического происхождения.

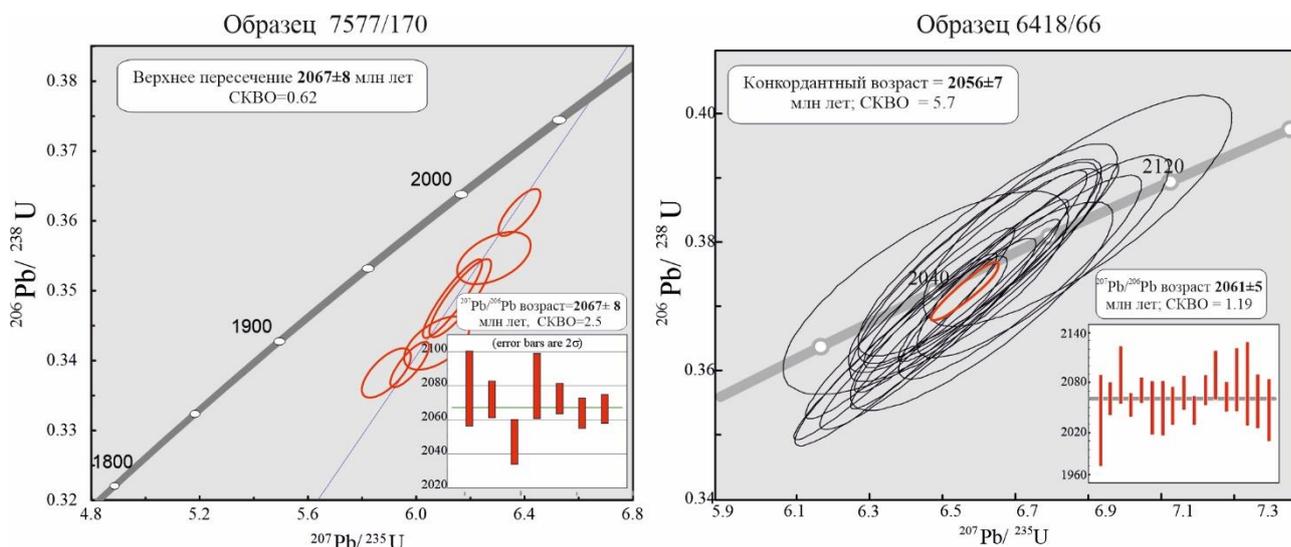


Рисунок 8. Результаты изотопного датирования циркона из образцов монцодиорита 7577/170 и кварцевого монцогаббро 6418/66.0 потуданского типа.

Возраст пород павловского комплекса: для Павловского батолита данные U-Pb изотопного датирования акцессорных цирконов составили 2077 ± 3 млн лет (Бибикова и др., 2009), возраст пород Лискинской группы массивов 2066 ± 15 млн лет (Terentiev et al., 2020), Олымской 2063 ± 9 млн лет (Terentiev et al., 2020) и Россошанской групп 2077 ± 11 млн лет (Terentiev et al., 2020). Наряду с полученными автором оригинальными геохронологическими данными по гранитоидам Хохольско-Репьёвского батолита в составе павловского комплекса формирование пород павловского и потуданского типов происходило в интервале 2050–2080 млн лет и в тесной пространственной сопряженности, что доказывает субсинхронность их формирования. Выявленный временной интервал базитового и гранитоидного магматизма, согласно современным представлениям исследователей (Shchipansky, Bogdanova, 1996; Claesson et al., 2001; Bogdanova et al., 2006, 2008; Савко и др., 2014; Терентьев, Савко, 2017 и др.) тесно связан с НТ-LP метаморфизмом (2.07 млрд лет, (Savko et al., 2015)) и отвечает этапу постколлизийного магматизма, широко проявленного в соседних Лосевском и Воронцовском террейнах.

2. Кристаллизация расплавов магматических пород потуданского типа происходила при начальной температуре $1150\text{--}1000^\circ\text{C}$, а павловского – при $980\text{--}900^\circ\text{C}$ на глубине около 9 км. Преобладание в потуданском типе ильменитсодержащих пород, а в павловском – магнетитсодержащих, является следствием разной водонасыщенности магм, а также разной фугитивности кислорода в них.

Величины литостатического давления были получены по «Al-в-амфиболе» геобарометрам (Anderson, Smith, 1995; Mutch et al., 2016) с оценкой температуры по амфибол-плаггиоклазовому геотермометру (Holland, Blundy, 1994). Для расчетов были

выбраны кристаллы амфибола близкие к идиоморфным, с минимальным количеством или отсутствием включений и граничащие с плагиоклазом.

Параметры литостатического давления для обоих типов пород Хохольско-Репьёвского батолита составили 2.7–3.2 кбар, что соответствует глубине становления интрузивов около 9 км.

Температуры ликвидуса для магм потуданского типа оценены по геотермометру клинопироксен–расплав (Putirka, 2008). Центры кристаллов клинопироксена формировались при температурах 1047–1154°C, а краевые части при 1076–1114°C. Температуры кристаллизации, рассчитанные по геотермометру насыщения расплава фосфором (Harrison, Watson, 1983), составили 1000–1100°C. Идиоморфный габитус апатита, включения апатита в пороодообразующих минералах, уменьшение P_2O_5 с увеличением кремнезема, говорит о том, что апатит был ликвидусной фазой, а полученные температуры соответствуют начальной стадии кристаллизации плутона.

Геотермометр по циркониевому насыщению расплава (Watson, Harrison, 1983) показывает температуры значительно ниже отмеченных выше, что свидетельствует о формировании циркона позднее апатита, т.е. в субсолидусных условиях - от 800°C и ниже. Оценки температур по амфибол-плагиоклазовому (Holland, Blundy, 1994) и титаномагнетитовому (Andersen, Lindsley, 1985) геотермометрам подтверждают, что субсолидусные температуры пород потуданского типа находятся в пределах 700–800°C. Наблюдается понижение температуры от центра к краю кристаллов амфибола (от 851°C до 713°C) при постоянном давлении ~ 3 кбар.

Наряду с опубликованными данными по Павловскому батолиту (Терентьев, Савко, 2017) и полученными параметрами для гранитоидов Хохольско-Репьёвского батолита, температуры начала кристаллизации пород павловского типа по данным геотермометра насыщения фосфором можно ограничить диапазоном 838–980°C, по насыщению расплава цирконием: 701–857°C.

Субсолидусные температуры, рассчитанные по амфибол-плагиоклазовому геотермометру, составили 704–731°C, что ниже, чем в потуданских.

Литостатическое давление при формировании гранитоидов павловского типа, слагающих Хохольско-Репьёвский батолит, колеблется около среднего значения 3 кбар, что также соответствует величине давления в породах собственно Павловского батолита.

Особенности распределения примесей магнетита, ильменита, титаномагнетита в породах потуданского и павловского типов (рис. 9) свидетельствуют о различии в окислительно-восстановительных условиях. Расчетные уравнения по составам амфиболов (Ridolfi, 2021) показали, что фугитивность кислорода в магме павловского типа повышается от $-13 \log$ до $-11 \log$ с понижением температуры от 830°C до 760°C (рис. 10 а – красные кружки). Близкие параметры рассчитаны для магм Павловского батолита (неопубликованные данные Р. А. Терентьева) и находятся вблизи буфера NNO ($NNO - NNO+1$). Оценки фугитивности кислорода в магме потуданского типа измерялись аналогичным методом (Ridolfi, 2021), и изменялись от $-12 \log$ до $-14 \log$ при снижении температуры от 840°C до 780°C (рис. 10 а - зеленые кружки).

Оценка содержания воды в магме при кристаллизации амфибола, по уравнениям предложенным (Ridolfi, 2021), показала ясное отличие между павловскими и потуданскими магмами по этому параметру: практически все составы амфиболов пород павловского типа указывают на большую водонасыщенность магмы (5 вес.% – 8 вес.%), по сравнению с потуданской (5 вес.% – 6 вес.%) (рис. 10 б).

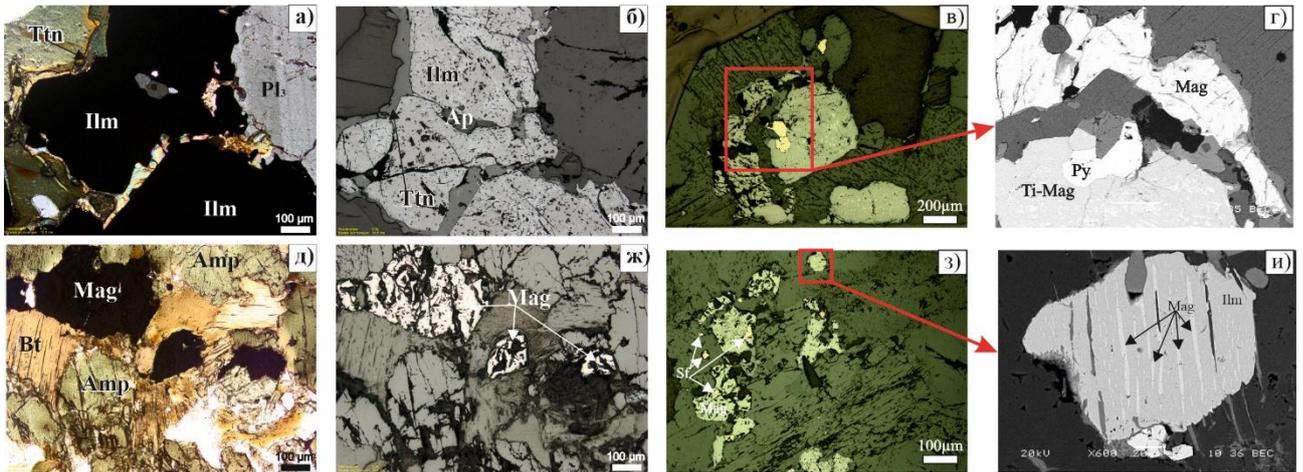


Рисунок 9. а), б), д), ж) – микрофотографии прозрачно-полированных шлифов пород павловского типа; в), г), з), и) – потуданских кварцевых монцогаббро–гранодиоритов: в), г) – титаномagnetит с включениями пирита, магнетит; з) – магнетиты с включениями сульфидов, и) – в режиме отраженных электронов – магнетит-ильменитовая структура распада, магнетитовые ламели в ильменитовом матрице.

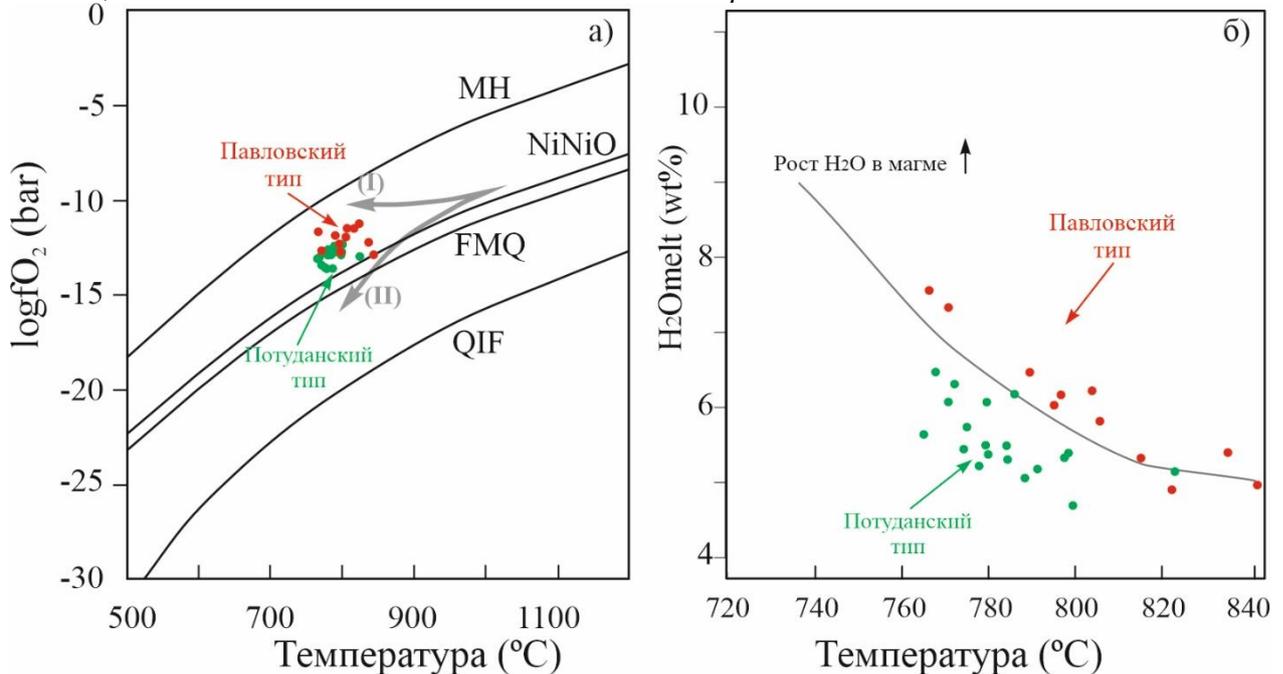


Рисунок 10. Положение расчетных параметров: а) на диаграмме фугитивность кислорода – температура по (de Albuquerque, 1973). Буферы: MH – магнетит-гематит; NiNiO – никель-оксид никеля; FMQ – фаялит-магнетит-кварц; QIF – кварц-железо-фаялит. Стрелками показаны направления дифференциации магм в окислительных (I) и восстановительных (II) условиях по (Wones, Eugster, 1965); б) содержание воды в системе, основанное на составах амфиболов по (Ridolfi, 2021). Зеленые кружки – амфиболы потуданского типа, красные – амфиболы гранитоидов павловского типа.

Таким образом, можно заключить, что составы амфиболов в двух сравниваемых типах пород свидетельствуют о разной водонасыщенности магматических систем и статистически заметной разнице в величине фугитивности кислорода. Так, павловские магмы были более водонасыщенными и с несколько большей величиной фугитивности кислорода по сравнению с потуданскими. Последнее согласуется с преимущественным развитием в павловских гранитоидах магнетита вместо ильменита, более характерного для потуданских пород.

3. Геохимические и изотопно-геохимические особенности пород потуданского типа свидетельствуют о происхождении магм из обогащенного мантийного источника и павловского типа – из смешанного мантийно-корового.

Для пород потуданского и павловского типов установлен сходный порядок кристаллизации минералов. Ниже приведена последовательность для пород потуданского типа.

Согласно петрографическим наблюдениям, на ранней стадии (1) кристаллизуются Crx , Mag , Ap , Ttn_1 и сульфиды. Это подтверждается и геохимическими характеристиками пород. Прослеживается возрастание CaO при слабом увеличении концентрации Al_2O_3 по мере снижения содержания MgO , а также отрицательная корреляция Ni и Cr с SiO_2 , что обусловлено фракционированием клинопироксена на ранней стадии кристаллизационной дифференциации родоначального расплава. Четкая отрицательная корреляция между TiO_2 , Fe_2O_3 с SiO_2 и уменьшение содержания TiO_2 со снижением концентраций MgO предполагает фракционирование Fe-Ti оксидов на этой стадии.

Кристаллизация Zrn , Amp , Vt , Pl_1 и Ttn_2 на следующей стадии (2) подтверждается полученными оценками температур насыщения расплава цирконием (800–612°C). В магмах циркон является субсолидусной фазой и кристаллизуется после высокотемпературного апатита. Близкие постоянные значения K_2O и Na_2O в потуданских породах может отражать фракционирование амфиболов на этой стадии. Это подтверждают и полученные субсолидусные температуры по амфибол-плаггиоклазовому геотермометру (851–713°C). Кристаллизация плаггиоклаза обусловила слабую отрицательную европиевую аномалию, особенно в средних и кислых дифференциатах. Плаггиоклаз является основным минералом, накапливающим Eu^{2+} (рис. 5).

Заключительная стадия (3) характеризует кристаллизацию Qtz , Kfs и Pl_{2-3} , что подтверждается обогащением LILE элементами, такими как Ba , Sr , Rb в породах потуданского и павловского типов.

Выявленный порядок кристаллизации подтверждается проведенным моделированием магматического минералообразования по петрогенным элементам в модуле «Magma Chamber Simulator» на основе ядра «Melts» (Ghiorso, Sack, 1995; Asimov, Ghiorso, 1998). Кристаллизация (FC) потуданской и павловской магм происходит по разным эволюционным трендам (субщелочной и известково-щелочной) в водных условиях – при наличии H_2O в магме от 2 вес. % и выше (рис. 11 а). При моделировании AFC процесса, предполагающего контаминацию вмещающими породами ТТГ-гнейсов, существенного изменения в траектории кривой тренда на ранних этапах эволюции составов магмы потуданского типа не выявлено (рис. 11 б). С учетом экспериментальных данных по дегидратационному плавлению высокоглиноземистого тоналита и гранодиорита при давлении $P \leq 4$ кбар, $T > 900^\circ\text{C}$ и содержании $\text{H}_2\text{O} \leq 4$ вес.% (Patino Douce et al., 1997), контаминация горячих водонасыщенных магм потуданского типа в верхнекорových условиях (3 кбар) будет происходить уже в условиях сильно дифференцированного состава ($\text{SiO}_2=60-63$ вес.%), и никак не изменит переход эволюции составов из субщелочного тренда в известково-щелочной на ранних этапах. Условия контаминации предполагают прогрев вмещающей породы до определенной температуры с образованием анатектических выплавов и привноса их в магму. Для заданных нами условий выплавления - 10% ТТГ-гнейсов на уровне 3 кбар понадобилось для начала плавления прогреть вмещающую породу до 710°C , но при этом температура самой магмы потуданского типа приблизилась к солидусной (750°C), что практически воспрепятствовало процессу смешения магм (рис. 11 б).

Таким образом, контаминация расплава архейскими ТТГ-гнейсами (например, смежного Курского блока) в верхнекорových условиях весьма ограничена из-за незначительного вовлечения материала гнейсов в расплав. Результаты моделирования показали также, что появление павловских гранитов за счет эволюции состава магмы потуданского типа – маловероятный процесс.

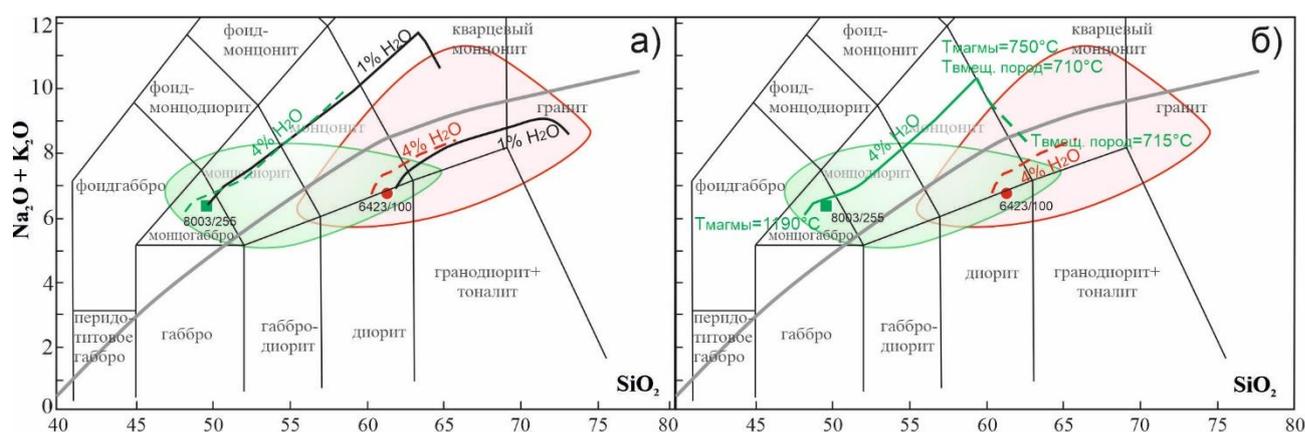


Рисунок 11. Модельные тренды эволюции павловской (красные линии) и потуданской магм (зеленые линии) в условиях а) – FC (фракционной кристаллизации) при содержании $H_2O=1$ вес.% (черная линия) и 4 вес.% (пунктирные линии), б) – и в условиях AFC (ассимиляция и фракционная кристаллизация).

Рассматривая возможную контаминацию в вариациях содержаний редких элементов, каких-либо отчетливых корреляций между этими элементами и $mg\#$ изученных пород не выявлено. В сравнении с мантийными базитовыми породами, компоненты земной коры обычно характеризуются низкими отношениями Nb/Ta , Nb/La , Sm/Nd и высокими La/Sm , Th/La , Th/Nb (например, Fowler, 1988; Foland et al., 1993; Wang et al., 2014). Стоит отметить высокие отношения La/Sm (4–12), Th/Ta (2–20) в обоих типах изученных нами пород. Учитывая, что $Th/Ta = 2.1$ в примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989), можно было бы предполагать контаминацию коровым веществом и как следствие увеличение Th/Ta отношения. Умеренные и постоянные содержания Th и Pb , низкое значение Th/Yb отношения (2.56–3.92), отсутствие значимой положительной Zr аномалии на спайдер-диаграммах для габброидов плутона Потудань и основных и средних пород павловского типа (рис. 5) выступают против значительной контаминации коровым веществом, что нельзя сказать о кислых дифференциатах павловских магм, у которых эти показатели выше ($Th/Yb = 7–128$, Терентьев, Савко, 2017).

Отдельное внимание заслуживает достаточно высокие значения отношения Nb/Ta для потуданских пород ($Nb/Ta = 13–21$, что близко к хондритовым значениям), и более широкие его вариации для павловских ($Nb/Ta = 9–27$), при том что в коровых породах это отношение составляет 12–13, в астеносфере – 14–16 (Pfänder et al., 2007). Следует отметить присутствие отрицательных аномалий $Nb-Ta-Ti$, появление которых характерно для пород, сформировавшихся в субдукционных обстановках (Kelemen et al., 2003) или из литосферной метасоматизированной мантии, сформированной под воздействием субдукционных процессов предшествующих этапов.

Связь источника магм с предшествующей субдукцией подтверждается высокими отношениями $Th/Yb - Ta/Yb$ (рис. 12), что характерно для всех магматических комплексов соседних террейнов во временном интервале 2080–2050 млн лет. На дискриминационных диаграммах Дж. Пирса (Pearce, 1984) составы пород павловского и потуданского типов попадают в область постколлизийных гранитоидов и поле вулканических дуг, что характерно для пород, образующихся в обстановках растяжения и тесно ассоциирующих в пространстве или во времени с конвергентными окраинами, в зависимости от природы источника.

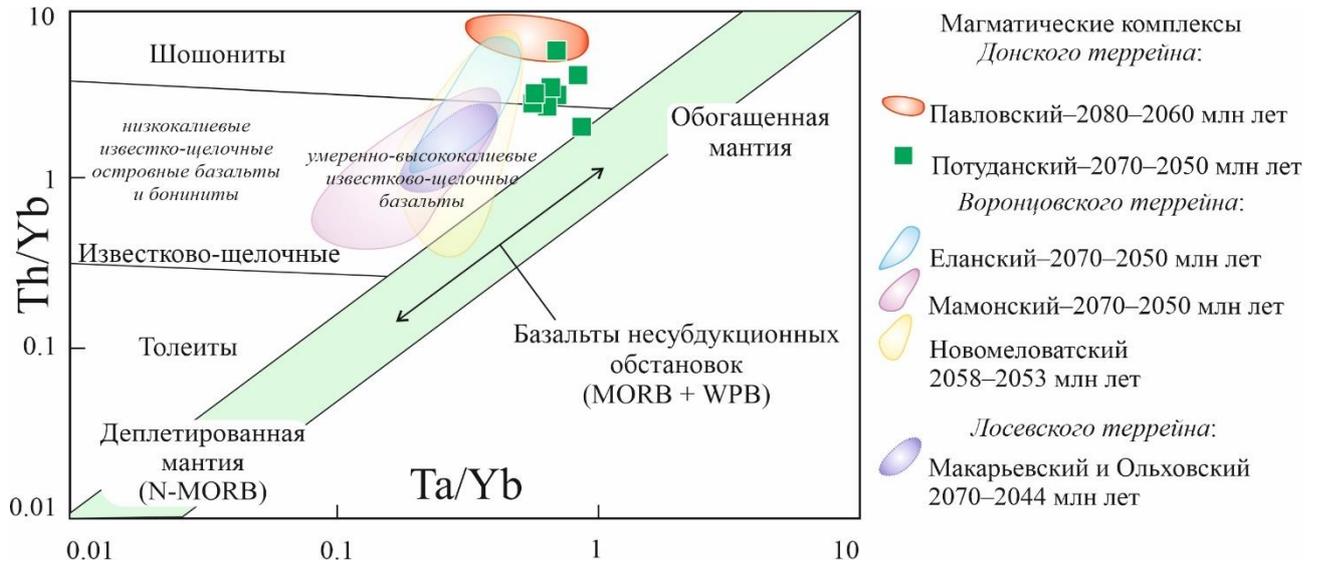


Рисунок 12. Дискриминантная диаграмма $Th/Yb-Ta/Yb$ по (Pearce, 1983), разделяющая мантийные источники, связанные и не связанные с субдукцией. На диаграмму вынесены значения для пород с SiO_2 менее 60 %.

Возможность участия глубинного источника в образовании пород потуданского и павловского типов подтверждают высокие отношения Sr/Y , $(La/Yb)_n$, $(Dy/Yb)_n$, что указывает на образование исходного расплава из источника с гранатом в рестите. Отсутствие или слабые Eu аномалии можно рассматривать как индикатор генерации первичной магмы ниже поля стабильности плагиоклаза.

В пользу образования материнских мафических магм/субстратов потуданских пород из обогащенного мантийного источника свидетельствуют высокие концентрации некогерентных элементов, особенно Va (до 3060 г/т) и низкие значения изотопного состава пород ϵ_{Nd} (-3.7) и цирконов ϵ_{Hf} (от -4.3 до -10.3) (рис. 13).

На прямую связь с образованием непосредственно из мантийного источника указывают высокие температуры ликвидуса минералов ($>1000^\circ C$), присутствие фаз с низкой кремнекислотностью (50–55%) и высокими содержаниями фемических компонентов ($FeO_{общ}+MgO = 20-7\%$) с обогащением TiO_2 и P_2O_5 .

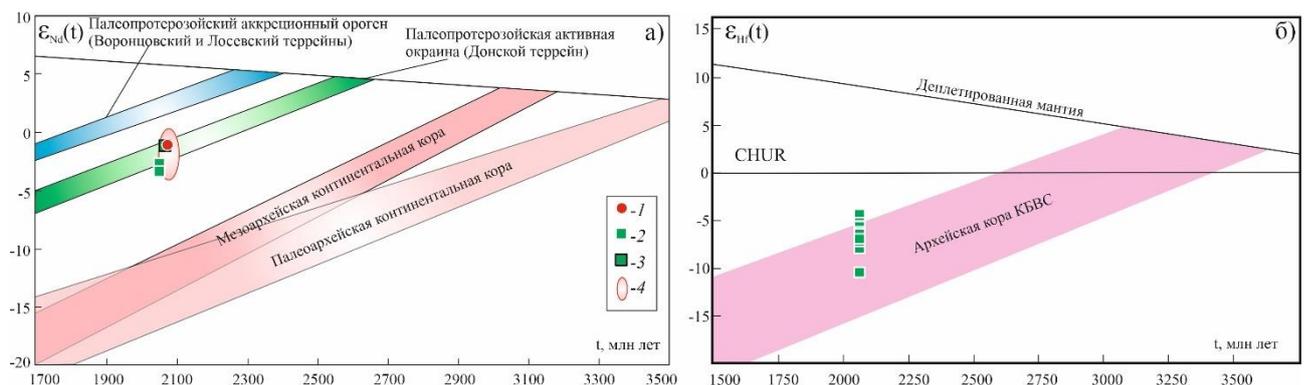


Рисунок 13. а) Диаграмма $\epsilon_{Nd} - t$ (млн лет) для пород Хохольско-Рельёвского батолита: 1– породы павловского типа ХРБ; 2–3– породы потуданского типа: 2– из плутона Потудань, 3– из северных массивов; 4– поле изотопного состава Nd в породах Павловского батолита по (Terentiev et al., 2020). Поля эволюции изотопного состава Nd по (Terentiev et al., 2017; Савко и др., 2018). б) Диаграмма $\epsilon_{Hf} - t$ (млн лет) для циркона кварцевого монцогаббро потуданского типа. КБВС – Курский блок Восточной Сарматии по (Savko et al., 2019).

Подобную связь с обогащенной литосферной мантией обнаруживают палеопротерозойские породы на юго-западе Сибирского кратона. На основании анализа экспериментальных данных по плавлению различных субстратов и расчетного моделирования предполагается, что монцодиориты-гранодиориты Тойсукского и гранодиориты Нижнекитойского массивов Шарыжалгайского выступа образовались путем дифференциации/плавления мафического источника, по содержанию Ba и Sr сходного с внутриплитными континентальными базальтами. Изотопный состав циркона и меланократовых гранитоидов Тойсукского (ϵ_{Hf} от -6.0 до -10.7 и ϵ_{Nd} от -5.3 до -10.2) и Нижнекитойского (ϵ_{Hf} от -5.0 до -8.1 и ϵ_{Nd} -4.0 и -5.1) массивов свидетельствует в пользу генерации их мафических источников из обогащенной литосферной мантии, образованной в результате неархейских субдукционных процессов на рубеже 2.7 млрд лет назад (Туркина, Капитонов, 2019).

Проявление неархейского внутриплитного магматизма в Курском блоке представлено вулкано-плутонической ассоциацией высококалийных А-типа гранитов-риолитов и подстилающих их базитов возрастом 2.7–2.6 млрд лет (Savko et al., 2019). Цирконы из этих гранитов и риолитов характеризуются низкими значениями ϵ_{Hf} от $+0.4$ до -8.9 и модельным палеоархейским возрастом $t_{\text{Hf}}^{(C)}=3.0\text{--}3.6$ млрд лет, данные по базитам неизвестны. Внутриплитному магматизму предшествовало объединение палеоархейского и мезоархейского сегментов с образованием неархейского террейна (Курского блока) на рубеже 2.8 млрд лет (Savko et al., 2021). Этот этап также знаменуется пиком гранулитового метаморфизма (Савко и др., 2010), широко проявленного во всех породах Курского блока.

Находки цирконов с древними ядрами ~ 2.8 млрд лет (Лобач-Жученко и др., 2017; Terentiev et al., 2020) только в некоторых массивах павловского комплекса говорит о возможной контаминации архейской корой, неравномерно распространённой в Донском террейне (Минц и др., 2017). Изотопный состав Nd гранитоидов павловского комплекса, по сравнению с вмещающими архейскими породами обоянского комплекса (ϵ_{Nd} до -8 , Щипанский и др., 2007; Savko et al., 2020), более радиогенный, что еще раз указывает на невозможность образования этих гранитоидов только в результате плавления пород древнее на 1 млрд лет. Значения $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ от $+0.2$ до -4.2 гранитов ранней фазы павловского комплекса указывают на возможное участие в качестве источников вещества ювенильной палеопротерозойской континентальной коры ВДО. Магматические и осадочные породы смежных террейнов западной части ВДО образовались из истощенного и метасоматизированного мантийного и ювенильного корового источников с $\epsilon_{\text{Nd}}(t=2.18\text{--}2.05$ млрд лет) в диапазоне от $+1.8$ до $+6.0$ (Щипанский и др., 2007; Савко и др., 2014; Terentiev et al., 2017), которые контрастно отличаются от данных по павловским гранитоидам и ассоциирующим породам потуданского типа.

Таким образом, связь палеопротерозойского этапа образования магматических комплексов Донского террейна Волго-Донского орогена с коллизией архейских блоков земной коры определила их изотопный и редкоэлементный состав. Имеющиеся данные показывают, что большинство пород потуданского и павловского типов характеризуются высокими содержаниями Ba, Sr, низкими значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, модельным возрастом гранитоидов $t_{\text{Nd(DM)}} \geq 2.5$ млрд лет, что, вероятно, отражает вклад обогащенной субконтинентальной литосферной мантии. В пользу выплавления/дифференциации из мантийного источника говорят повышенные содержания фемических компонентов наравне с низкими содержаниями SiO_2 пород и высокие ликвидусные температуры кристаллизации минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В пределах Донского террейна Волго-Донского орогена в период 2050–2080 млн лет назад проявлен постколлизийный магматизм, представленный субщелочными железистыми породами потуданского типа, распространенными локально среди обширных масс

известково-щелочных, субщелочных магнезиальных гранитоидов павловского типа. Время кристаллизации для кварцевых монцогаббродиоритов потуданского типа определено как 2056–2067 млн лет, для гранитоидов павловского типа Хохольско-Репьёвского батолита – 2067–2068 млн лет.

2. Ранее относимые к павловскому комплексу породы потуданского типа резко отличаются от павловского геохимического типа (собственно Павловского батолита) по ассоциации пород и их количественным соотношениям. Эти отличия также фиксируются при анализе геохимических особенностей пород. Указанное делает целесообразным не только выделять потуданские породы как отдельный тип, а рассматривать как самостоятельный магматический комплекс. При этом гранитоиды павловского типа в пределах Хохольско-Репьёвского батолита, соответствуют по всем критериям аналогичным породам Павловского батолита и тем самым подтверждают их отнесение к павловскому комплексу.

3. По данным минеральной термобарометрии начальные температуры кристаллизации магм потуданского типа 1150–1000°C, а породы павловского типа кристаллизовались при 980–900°C на одинаковой глубине около 9 км (2.5–3.2 кбар). Содержание воды в магмах колеблется от 5 до 6 вес.% для потуданских и от 5 до 8 вес.% для павловских.

4. Окислительно-восстановительный потенциал в магмах потуданского типа оценивается на уровне буферов NNO–QFM, что отвечает более восстановительным условиям, по сравнению с магмой павловского типа. Смена окислительно-восстановительных условий (за счет повышения фугитивности кислорода и содержания воды) в процессе формирования павловских пород привела к смене ильменита магнетитом и его преобладанию, в отличие от потуданских пород, в которых преобладают ильменит и титаномагнетит.

5. Павловские и потуданские породы являются метаглиноземистыми, с повышенной щелочностью и обогащены LREE, содержат высокотемпературные безводные фазы (клинопироксен), а также амфибол и биотит, что сближает их с гранитами I- и A-типов. Геохимические и изотопно-геохимические особенности потуданских кварцевых монцогаббро–гранодиоритов и павловских гранитоидов свидетельствует о вовлечении в их петрогенезис обогащенной литосферной мантии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК, а также в базы WOS и Scopus:

1. **Петракова, М.Е., Терентьев Р.А.** Петрографические и минералогические признаки взаимодействия гранитоидных и габброидных магм плутона Потудань, Воронежский кристаллический массив // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2018. – №1. – С. 32-45. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1422>
2. **Terentiev R.A., Savko K.A., Petrakova M.E., Santosh M., Korish E.H.** Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // Precambrian Research. – 2020. – V. 346. – P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
3. **Петракова М.Е., Терентьев Р.А., Юрченко А.В., Савко К.А.** Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро–монцодиорит–гранодиоритов плутона Потудань, Волго-Донской ороген // Вестник СПбГУ: Науки о Земле. – 2022. – Т. 67(1). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.105>

Статьи в других рецензируемых изданиях:

4. **Петракова М.Е., Анисимов Р.Л., Балтыбаев Ш.К.** Об источниках магм для пород потуданского и павловского комплексов в Волго-Донском орогене (Воронежский

кристаллический массив) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. – №18. – С. 332–337. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.062>

Материалы конференций и совещаний

5. **Петракова М.Е., Юрченко А.В., Балтыбаев Ш.К.** Минералого-геохимические критерии фракционирования и смешения магм при образовании различных типов пород плутона Потудань (Волго-Донской ороген). В сб.: XXXI Молодежная научная школа-конференция, посвященная памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии»; 5–9 октября 2020. ИГГД РАН СПб.; 2020. С. 218–222. Доступно по: <http://www.ipgg.ru/ru/events/kratz-conference-2020>
6. **Петракова М.Е., Юрченко А.В., Балтыбаев Ш.К., Савко К.А.** Геохимические и изотопно-геохимические особенности постколлизийных магматических пород потуданского типа в Восточной Сарматии. В сб.: Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 90-летию ИГЕМ РАН «Породо-, минерало- и рудообразование: Достижения и перспективы исследований»; 23–27 ноября 2020. ИГЕМ РАН Москва, 2020.
7. **Петракова М.Е., Балтыбаев Ш.К.** Применение Sm-Nd, Lu-Hf и U-Pb изотопных систем для решения вопроса о возможных источниках пород потуданского гранитоидного комплекса (Волго-Донской ороген). В сб.: X Российская молодежная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования»; 23–27 ноября 2020. ИГЕМ РАН Москва, 2020.
8. **Петракова М.Е., Савко К.А., Балтыбаев Ш.К.** Постколлизийные гранитоиды потуданского и павловского комплексов Донского террейна Волго-Донского орогена (Восточная окраина Сарматии). В сб.: XIII Всероссийское Петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов»; 6–13 сентября 2021. Иркутск С. 213–216. <http://petro2020.igc.irk.ru/>