

Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро-монцодиорит-гранодиоритов плутона Потудань (Волго-Донской ороген)*

М. Е. Петракова^{1,2}, Р. А. Терентьев²,
А. В. Юрченко¹, К. А. Савко²

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, В. О., наб. Макарова, 2

² Воронежский государственный университет,
Российская Федерация, 394006, Воронеж, Университетская пл., 1

Для цитирования: Петракова, М. Е., Терентьев, Р. А., Юрченко, А. В., Савко, К. А. (2022). Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро-монцодиорит-гранодиоритов плутона Потудань (Волго-Донской ороген). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (1), 74–96. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.105>

В статье представлены новые и обобщены ранее опубликованные геохимические и геохронологические данные по породам плутона Потудань и вмещающим гранитоидам Хохольско-Репьевского батолита в центральной части Донского террейна (ДТ) Волго-Донского орогена. Вмещающие гранитоиды Хохольско-Репьевского батолита отнесены к павловскому гранитоидному комплексу, распространенному в южной части ДТ. Породы массива Потудань дифференцированы от кварцевых монцогаббро до гранодиоритов. По геохимическим характеристикам они являются железистыми, метаглиноземистыми, по содержанию K_2O отнесены к шошонитовой серии пород. Для интрузивных комплексов Донского террейна предполагается участие обогащенного гетерогенного источника с высокими содержаниями щелочей, крупноинных литофильных элементов и легких редкоземельных элементов, мантийная компонента подтверждается повышенными содержаниями MgO , Cr , Ni , Ti , а также высокими отношениями Sr/Y , $(La/Yb)_N$, $(Dy/Yb)_N$, указывающими на глубинное происхождение магм. Гетерогенность источника могли обеспечить субдукционные события около 2.1 млрд лет назад. Возраст кристаллизации пород плутона Потудань методом $U-Pb$ датирования по циркону (на приборе SHRIMP II) составляет 2061 ± 5.4 млн лет и соответствует постколлизийному событию в зоне сочленения Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона. Их пространственно-временная связь с гранитоидами павловского комплекса, а также морфологические особенности циркона из разных типов породных ассоциаций подтверждают проявление процесса гибридизма при кристаллизации композитного батолита. Полученные новые данные позволяют расширить представления об эволюции коры Донского террейна и геодинамических режимах его формирования.

Ключевые слова: Волго-Донской ороген, палеопротерозой, шошонитовый магматизм, обогащенный источник, постколлизийная обстановка.

* Работа выполнена при поддержке темы НИР ИГГД РАН № FMUW-2022-0002 Минобрнауки России.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

1. Введение

Донской террейн (ДТ) Воронежского кристаллического массива (ВКМ) является частью зоны сочленения Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона (Bogdanova et al., 1993) (рис. 1, а). В пределах ДТ широко развит павловский гранитоидный комплекс, представленный крупными батолитами (в северной части Хохольско-Репьевским, в южной — петротипическим Павловским), серией разобщенных массивов в Лискинском районе (Терентьев, 2018). Олымская и Россошанская группы гранитных массивов, относимых к павловскому комплексу, распространены западнее ДТ в пределах архейского обоянского плутоно-метаморфического комплекса (рис. 1, б). Время становления Павловского батолита 2076.8 ± 3.1 млн лет (Бибикина и др., 2009), Хохольско-Репьевского — 2068.0 ± 5.7 млн лет (Terentiev et al., 2020), Россошанской группы — 2077 ± 11 млн лет, Лискинской — 2066 ± 15 млн лет и Олымской — 2059 ± 8 млн лет (Terentiev et al., 2020). Гранитоидный магматизм ДТ связан с событиями постколлизийного периода 2050–2090 млн лет (Бибикина и др., 2009; Terentiev et al., 2016a, b; Терентьев et al., 2018).

Плутон Потудань представляет собой массив меланократовых пород (врезка на рис. 2), который был вскрыт скважинами при проверке природы аномалий гравитационного поля в южной части Хохольско-Репьевского батолита. В северной части батолита также обнаружены сходные с породами плутона Потудань массивы, что позволяет их отнести к одной серии пород. Ранее в работе (Петракова и Терентьев, 2018) были рассмотрены детальные минералого-петрографические и геохимические данные по породам плутона, проведено сравнение со смежными магматическими комплексами региона (павловским и белогорьевским), оценены условия кристаллизации. Согласно полученным данным, породы плутона имеют широкий диапазон составов по содержанию SiO_2 от 49.1 до 63.9 мас. %, дифференцированы от кварцевого монцогаббро до гранодиорита, являются железистыми, метаглиноземистыми, высококалийевыми породами. Тем самым демонстрируют контрастные отличия от высокомагнезиальных горнблендитов и габбро белогорьевского комплекса, в состав которого плутон был включен на карте докембрия ВКМ масштаба 1:500 000 (Чернышев и др., 1998).

Породы плутона сравнивались с вмещающими гранитоидами павловского комплекса, породы которого дифференцированы от габбродиоритов до лейкогранитов (SiO_2 от 56 до 76 мас. %) с преобладанием монцодиоритов, монцогранитов и гранодиоритов, и были отнесены к магнезиальной и известково-щелочной серии пород (Терентьев и Савко, 2017).

Породы потуданского и павловского комплексов характеризуются схожим порядком кристаллизации и составом минералов (Петракова и Терентьев, 2018). Обилие Fe-Ti оксидов в потуданских породах выражается в высоком содержании $\text{FeO}_{\text{общ}}$ (6.1–13.9%), TiO_2 (0.5–2.3%) и низком содержании MgO (1.5–6.1%) и характеризует их как железистые в отличие от павловских, более магнезиальных, с $\text{FeO}_{\text{общ}}$ (1.8–8.7%), MgO (0.5–3.5%) и TiO_2 (0.3–1.4%). Содержание щелочей во всех типах пород высокое ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = -5-11\%$). По индексу MAI они являются известково-щелочными и щелочными. По содержаниям калия основные породы потуданского комплекса относятся к шошонитовой серии K_2O (1.29–3.65%),

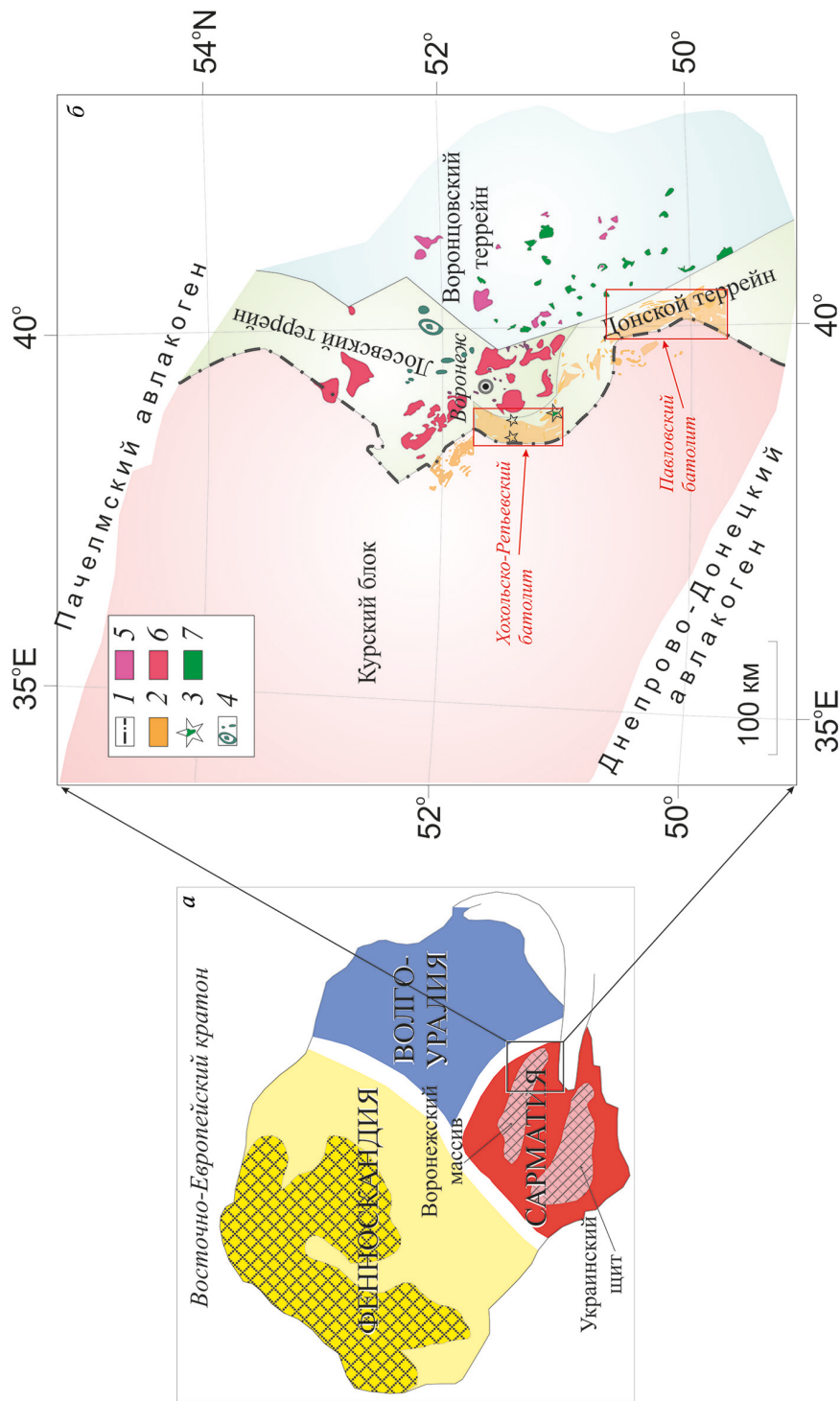


Рис. 1. Схема расположения Воронежского кристаллического массива (ВКМ) в пределах Восточно-Европейского кратона по (Gorbatschew, Vogradova, 1993) (а). Схема структурного районирования докембрийского фундамента ВКМ по (Савко и др., 2017) (б). Цифрами на карте обозначены: 1 — западная граница Волго-Донского орогена; 2 — павловский гранитоидный комплекс; 3 — потуданский монцоабро-монцоидиорит-гранодиоритовый; 4 — ольховский кольцевой плутон и группа макарьевских интрузивов; 5 — граниты А- и S-типа бобровского комплекса; 6 — усманский тоналит-диорит-плагиогранитный; 7 — мамонский и еланский ультрамафит-мафитовые комплексы

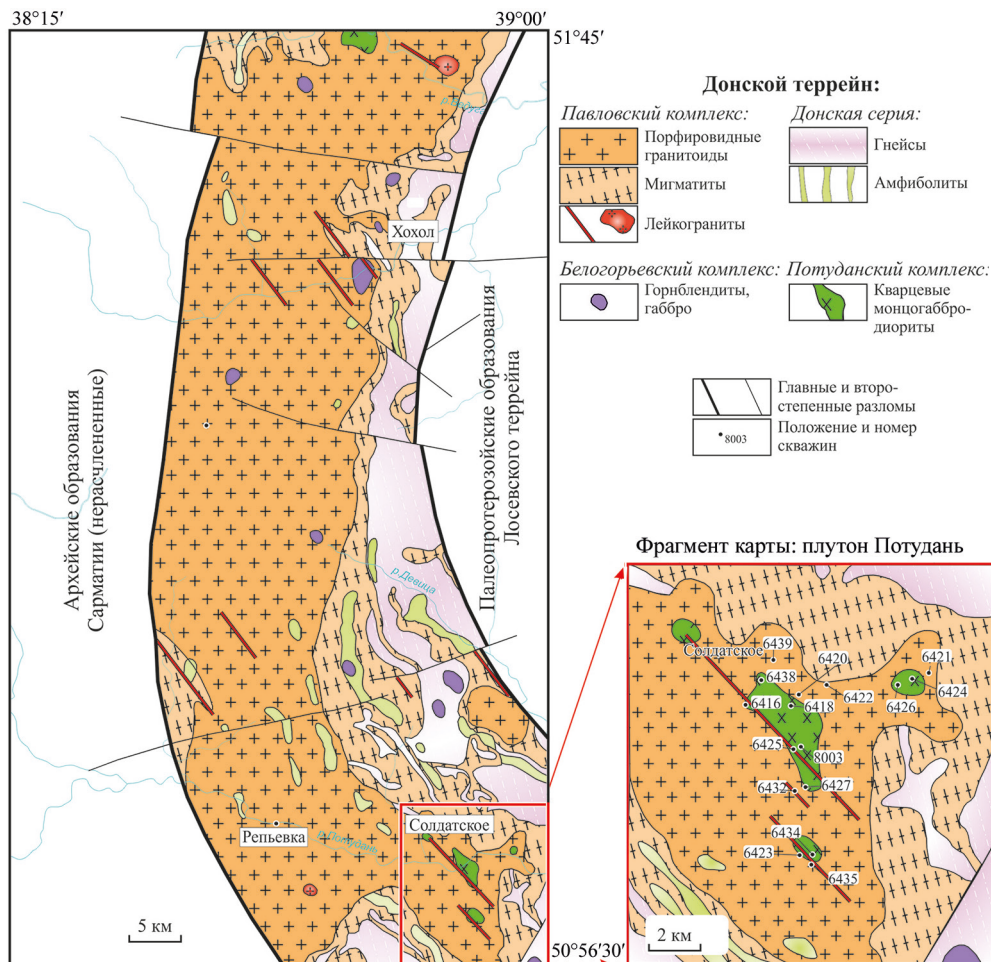


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Хохольско-Репьевского батолита, фрагмент карты — плутон Потудань. Модифицировано после (Terentiev et al., 2016a, b; Терентьев и Савко, 2016; 2018; Петракова и Терентьев, 2018)

а павловского — от известково-щелочной до шошонитовой с K_2O (2.3–5.7 %). Все породы являются метаглиноземистыми (A/CNK ($Al/Ca + Na + K$) < 1).

Несмотря на некоторое различие в петрохимической характеристике, были выявлены схожие минералого-петрографические особенности (присутствие кварца, калиевого полевого шпата, идентичная магнезиальность амфиболов и клинопироксенов в обоих типах пород) (Петракова и Терентьев, 2018).

Полученные параметры кристаллизации плутона Потудань (давление 2.7–3.2 кбар, температуры ликвидуса 1114–1154 °С и субликвидуса 700–800 °С) сопоставимы с таковыми для гранитоидов павловского комплекса (Петракова и Терентьев, 2018).

Одной из важных характеристик пород плутона является присутствие гибридных разновидностей, встречающихся спорадически. Они несут в себе минералого-петрографические признаки смешения гранитоидных павловских и габброидных

потуданских магм, которые выражаются в прямой и реверсивной зональности плагиоклаза, наличии ойкокристаллов кварца и/или калиевого полевого шпата, шлировых и кучных скоплений темноцветных минералов. На основании сходства составов пород и минералов, условий кристаллизации и пространственной сопряженности комплексов была выдвинута гипотеза об их генетической связи.

Целью данной статьи является оценка возраста, петрогенезиса и тектонической позиции средних и кислых пород плутона Потудань в ассоциации с гранитоидами павловского комплекса. Полученные нами новые данные несут в себе информацию о составе и возрасте коры Донского террейна и геодинамических режимах его формирования.

2. Геологическая позиция и строение плутона Потудань

Плутон Потудань расположен в Донском террейне, который вместе с Воронцовским и Лосевским террейнами слагают западную часть Волго-Донского орогена аккреционного типа (см. рис. 1, б), сформировавшегося при коллизии архейских ядер Сарматии и Волго-Уралии около 2.1 млрд лет назад (Щипанский и др., 2007; Бибикова и др., 2009). Этот ороген состоит из ювенильных вулканогенно-осадочных и интрузивных комплексов среднего палеопротерозоя, маркирующих остро-водужный (2.20–2.10 млрд лет), коллизионный (около 2.1 млрд лет) и постколлизионный (2.07–2.05 млрд лет) этапы формирования этой крупной тектонической структуры (Щипанский и др., 2007; Бибикова и др., 2009; Савко и др., 2014; Terentiev et al., 2016a, b).

Интрузивные комплексы в Воронцовском террейне представлены габбро-норит-диоритовыми интрузиями мамонского и еланского комплексов ~2.09–2.07 млрд лет (Терентьев и Савко, 2016; Terentiev et al., 2016b), которые сменяются интрузиями диоритов новомеловатского типа ~2.05 млрд лет (Terentiev et al., 2016b), завершают магматизм в этом террейне граниты А и S типа бобровского комплекса ~2.07–2.05 млрд лет (Савко и др., 2014). В Лосевском террейне — это макарьевский магматический комплекс ~2.10–2.09 млрд лет (Терентьев, 2014) и ольховский ~2.07–2.04 млрд лет (Terentiev et al., 2018).

В Донском террейне преобладают роговообманково-битотитовые гранитоиды павловского комплекса (Терентьев и Савко, 2017). На юге этот комплекс представлен Павловским, на севере Хохольско-Репьевским батолитами (Петракова и Терентьев, 2018; Terentiev et al., 2020).

Плутон Потудань расположен среди гранитоидов Хохольско-Репьевского батолита павловского комплекса, которые, в свою очередь, прорывают гнейсы, амфиболиты и кальцифиры с прослоями мраморов донской серии (Епифанов, 1959; Савко и Скрябин, 1999; Терентьев, 2018). Также в пределах Донского террейна развит белогорьевский комплекс, представленный немногочисленными изометричными интрузиями горнблендит-габбрового состава (Одокий, 1962). Все типы пород донской серии, Хохольско-Репьевский батолит и Потуданский плутон прорывают дайки лейкогранитов (см. рис. 2).

Плутон Потудань занимает площадь около 15 км² и представляет собой серию разобщенных штоков, разбуренных 8 скважинами с максимальной глубиной 405 м.

Встреченные в пределах плутона породы были подразделены на три типа (Петракова и Терентьев, 2018): 1) собственно потуданский тип — преимущественно кварцевые монцогаббро-монцодиориты, монцониты, гранодиориты, содержащие клинопироксен; 2) павловский тип — порфириовидные кварцевые монцогаббро-монцодиориты, кварцевые монцониты, гранодиориты, монцограниты, преимущественно беспироксеновые; 3) гибридный тип — встречается редко, породы характеризуются директивной текстурой, разнозернистостью основной массы и имеют признаки смешения магм.

3. Минералого-петрографическое описание пород Потуданского комплекса

Исследованные образцы представляют собой керн скважин (скважины 8003, 6418, 6420, 6432), из которого была отобрана серия проб дифференцированных пород от кварцевых монцогаббро и монцодиоритов до гранодиоритов для определения содержания редких элементов методом ICP-MS.

Все образцы характеризуются массивной текстурой, состоят из клинопироксена (5–10, здесь и далее объемных %) с каймами из роговой обманки (0.5–12%), биотита (9–22%), плагиоклаза (32–54%), калиевого полевого шпата (6–22%), кварца (5–12%). Акцессорные минералы представлены магнетитом, ильменитом, титаномагнетитом, апатитом, титанитом, цирконом, в редких случаях сульфидами (рис. 3, а–в). Для сравнения опробованы гранитоиды павловского типа и породы, которые отнесены нами к гибриднему типу. Павловские порфириовидные гранодиориты состоят из амфибола (3–10%), плагиоклаза (41–50%), калиевого полевого шпата (22–35%), кварца (18–26%), фенокристаллы выполнены преимущественно калиевым полевым шпатом. Акцессорные минералы (3–5%): магнетит, титанит, апатит, циркон, ильменит, эпидот (рис. 3, г). Кварцевый монцодиорит гибридного типа сложен клинопироксеном (1–3%), роговой обманкой (7–14%), биотитом (13–22%), плагиоклазом (46–59%), калиевым полевым шпатом (0.5–1%) и кварцем (6–9%), акцессорные минералы составляют 1–3%. Особенности гибридных пород являются разнозернистость и директивность основной массы, присутствие, наряду с калиевым полевым шпатом, ситовидных фенокристаллов плагиоклаза, игольчатая форма некоторых акцессорных минералов (рис. 3, д–е).

Для изотопного определения возраста был отобран образец кварцевого монцогаббро из скважины 6418 (глубина 66.0 м) (рис. 3, а), который характеризуется массивной текстурой и средне-мелкозернистой структурой. В минеральном составе доминируют плагиоклаз (40–50%) в виде зональных и слабо зональных гипидиоморфных кристаллов, калиевый полевой шпат (3–16%) и ксеноморфный кварц (7–11%). Клинопироксен представлен хорошо сохранившимися гипидиоморфными кристаллами (3–9%), частично замещенными вторичными амфиболом и биотитом. Роговая обманка (6–11%) слагает гипидиоморфные и ксеноморфные кристаллы и иногда каймы вокруг клинопироксена. Биотит (8–12%) образует лейсты, иногда встречается в сростании с амфиболом. Акцессорные и рудные минералы (3–6%) представлены апатитом, ильменитом, магнетитом, титаномагнетитом, пирротинном, титанитом (в виде кайм вокруг магнетита и титаномагнетита и идиоморфных кристаллов), цирконом.

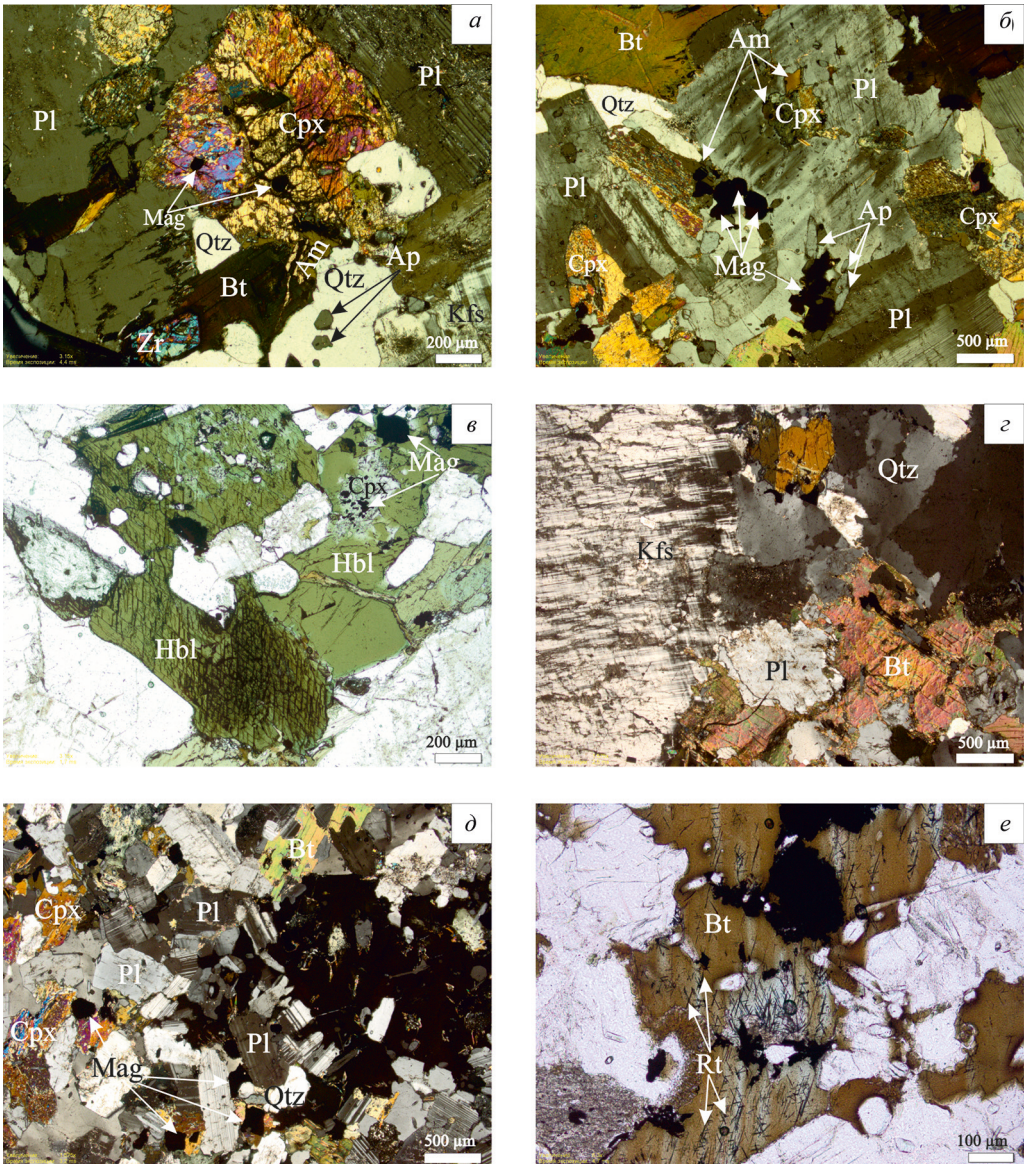


Рис. 3. Микрофотографии пород: кварцевые монцогаббро-монциодорит-гранодиориты плутона Потудань (а-в): а — клинопироксен с включениями магнетита и ксеноморфной каймой амфибола; б — зональный плагиоклаз, скопление интерстициональных магнетита и апатита; в — клинопироксен, замещенный роговой обманкой, магнетит: гипидиоморфный и как включения в клинопироксене; гранитоиды павловского комплекса: г — фенокристалл калиевого полевого шпата, биотит, плагиоклаз, кварц; гибридные породы (д-е): д — разнотельная структура; е — игльчатый рутил в структуре биотита

4. Методы исследования

4.1. Химический состав пород

Концентрации петрогенных элементов в пробах образцов производились на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия) в ЦКПНО ВГУ (г. Воронеж). При калибровке спектрометра и для контроля качества измерений были использованы государственные стандартные образцы химического состава горных пород — ГСО № 8670–2005, ГСО № 3333-85, ГСО № 6103-91. Точность анализа составляла 1–2 отн. % для элементов с концентрациями выше 1–5 мас. % и до 5 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0.5 мас. %.

Концентрации редких и рассеянных элементов определены методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Разложение образцов осуществляли по методике кислотного вскрытия как в открытой, так и в закрытой системах. В качестве стандартного образца использовался внутрилабораторный аттестованный образец горной породы, разложенный по той же методике, что и реальные образцы. Пределы обнаружения элементов составили от 0.005–0.01 ppm для тяжелых и средних по массе элементов (U, Th, REE и др.) до 0.01–3 ppm для легких элементов (Ba, Rb и др.).

4.2. Определение U-Pb возраста по циркону

Проба весом 0.7 кг отбиралась из керна наименее измененного кварцевого монцогаббро (скважина 6418, глубина 66.0 м), затем дробилась до крупности 0.5 мм, промывалась до серого шлиха и разделялась в бромформе. Кристаллы циркона отбирались под биноклем вручную. Выделенные из кварцевого монцогаббро зерна циркона были помещены в эпоксидную смолу, отшлифованы приблизительно на половину своей толщины и приполированы. Катодолюминесцентные изображения (КЛ) зерен циркона были получены на сканирующем электронном микроскопе SamScan MX2500 (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург). Определение U-Pb возраста по циркону было произведено с помощью мультиколлекторного вторично-ионного масс-спектрометра высокого разрешения SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) по стандартной методике, следуя процедуре, описанной в работе (Larionov et al., 2004). Полученные результаты обрабатывались с помощью программы Isoplot Ex ver. 3.6 (Ludwig, 2008).

5. Результаты исследования

5.1. Геохимическая характеристика пород

Химические составы потуданского, павловского и гибридного типов пород приведены в прил. 2.1¹. Содержание и соотношения петрогенных оксидов показаны на рис. 4 и 5.

¹ Здесь и далее прил. 2.1–2.2 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/7854>. Приложения даны в авторской редакции.

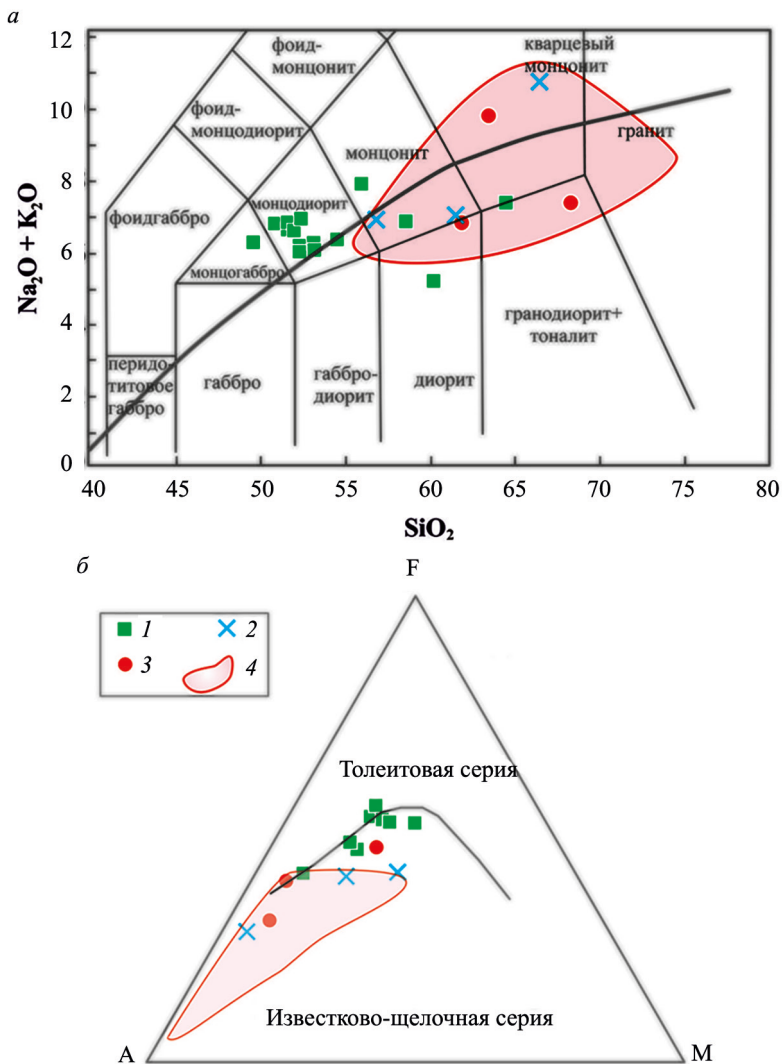


Рис. 4. Содержание петрогенных окислов в породах плутона Потудань (1), гибридные породы (2), вмещающие гранитоиды павловского комплекса (3) и гранитоиды Павловского батолита (4) на классификационных диаграммах (а) SiO_2 — $(Na_2O + K_2O)$ по (Middlemost, 1994); нижняя пунктирная линия, отделяющая щелочную и субщелочную серию по (Kuno, 1966), AFM (б) по (Irvine, Baragar, 1971)

Потуданский тип. Для кварцевых монцогаббро-монцодиоритов характерно резко фракционированное распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) ($(La/Yb)_N = 25.9-29.2$ и $(Gd/Yb)_N = 3.8-4.2$). Наблюдается отчетливая отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* = 0.67-0.76$) (рис. 6). Кроме того, они обогащены крупноионными литофильными элементами (LILE) Rb и Ba, имеют умеренные концентрации Th, U, Ti и обеднены Nb и Sr (рис. 6, б).

Для гранодиорита характерно фракционированное распределение легких и тяжелых РЗЭ ($(La/Yb)_N = 19.1$ и $(Gd/Yb)_N = 3.2$) с отчетливым европиевым минимумом

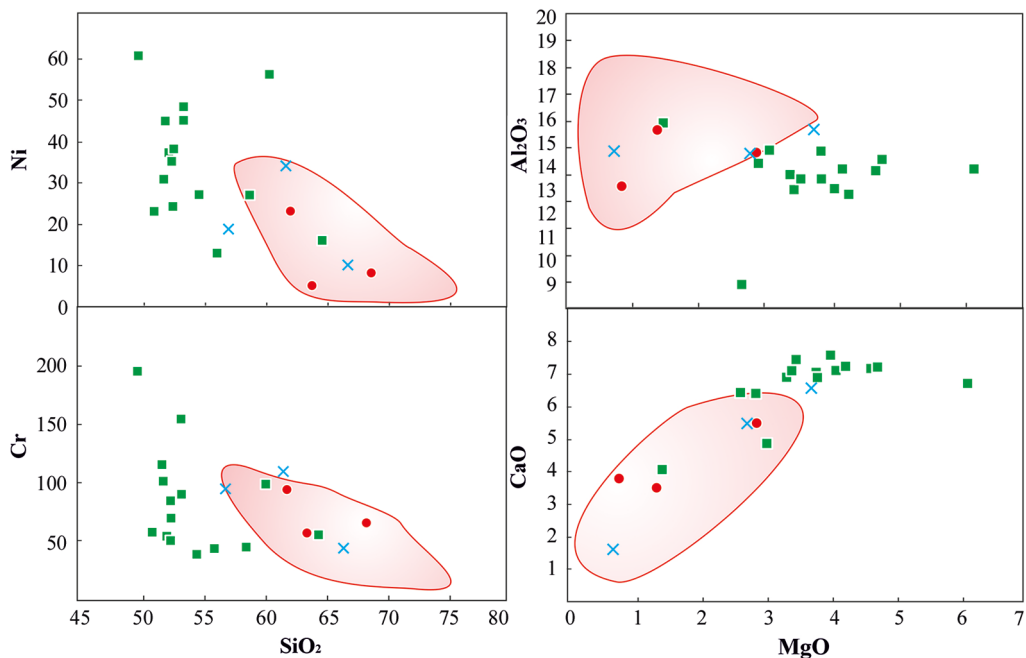


Рис. 5. Диаграммы соотношений петрогенных оксидов и элементов от SiO_2 и MgO по (Pearce, 1983; Rickwood, 1989), представлены опубликованные (Петракова и Терентьев, 2018) и новые данные (значения приведенных обозначений см. на рис. 4)

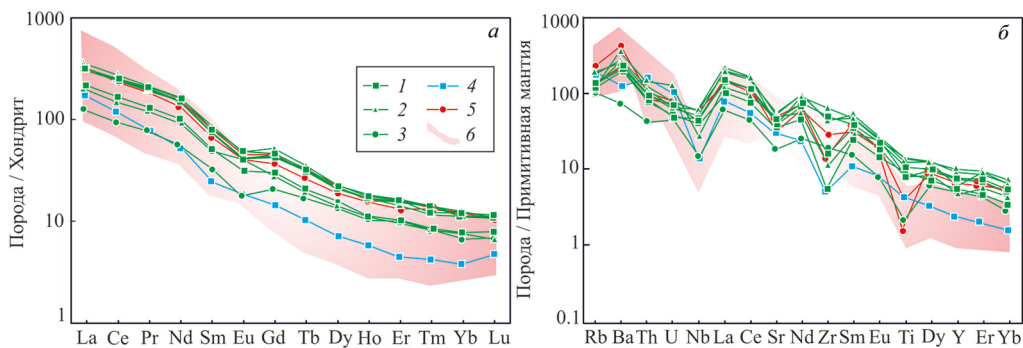


Рис. 6. Распределение редких и редкоземельных элементов в кварцевых монцогаббро-монцодиорит-гранодиоритах Потуданского плутона, нормированные к хондриту (а) и примитивной мантии (б) по (Sun and McDonough, 1989). Цифрами на рисунке показаны: 1 — кварцевые монцогаббро, 2 — кварцевые монцогаббродиориты-монцодиориты, 3 — гранодиориты; 4 — гибридный тип; 5 — павловский тип; 6 — поле павловских гранитоидов по (Терентьев и Савко, 2017)

($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64$) (рис. 6, а). Он обогащен Rb, Ba, U, La, Ce, наряду с пониженными содержаниями Nb, Zr, Ti и Th. От кварцевых монцогаббро-диоритов к гранодиориту происходит уменьшение содержаний Ba, Th, U, Sr, Ti и значений отношений $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$, Eu/Eu^* .

Павловский тип. Хондрит-нормализованные спектры REE близки к кварцевым монцодиоритам потуданского типа и к самым средним дифференциатам из гранитоидов Павловского батолита (поле павловских гранитоидов см. в работе (Терентьев и Савко, 2017) и на рис. 5, а): LREE (легкие РЗЭ) преобладают над HREE

(тяжелыми РЗЭ) — $(\text{La}/\text{Yb})_N = 25.4\text{--}25.8$ и $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 3.1\text{--}3.7$, также отмечается отрицательная европиевая аномалия Eu/Eu^* (0.7–0.8). Обогащение Rb, Ba, U и обеднение Ti, Nb, Sr, Zr относительно примитивной мантии выражено более контрастно, чем в породах плутона Потудань (рис. 6, б).

Гибридный тип. Для образца кварцевого монцодиорита содержание кремнезема составляет 61 %, при этом наблюдаются умеренные концентрации Fe_2O_3 (7.11 %) и MgO (2.76 %), высокие содержания щелочей Na_2O (3.53 %), K_2O (3.37 %), CaO (5.44 %) и TiO_2 (0.92 %) (Петракова и Терентьев, 2018).

Хондрит-нормализованные спектры близки к более кислым разновидностям павловских гранитоидов: сильно обогащены LREE относительно HREE — $(\text{La}/\text{Yb})_N = 45.1$ и $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 3.9$, европиевый минимум не выражен ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.94$). Относительно примитивной мантии они демонстрируют сильное обогащение Rb, Ba, Th, U и обеднение Nb, Zr и Ti.

5.2. U-Pb изотопный возраст кристаллизации циркона кварцевого монцогаббро плутона Потудань

Результаты изотопного U-Pb датирования циркона для кварцевого монцогаббро плутона Потудань приведены в прил. 2.2. Циркон представлен удлинено-призматическими кристаллами и обломками кристаллов длиной от 200 до 600 мкм и шириной от 150 до 240 мкм, в некоторых зернах хорошо проявлена грубая осциляционная зональность (характерно для циркона из габброидов), что предполагает их исходную магматическую природу (рис. 7).

Конкордантный U-Pb возраст составляет 2056.0 ± 7.0 млн лет (СКВО = 5.7; вероятность конкордантности равна 0.017; рис. 7, а). В пределах ошибки он совпадает со средневзвешенным $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастом 2061.0 ± 5.4 млн лет (прил. 2.2, рис. 7). Отношение Th/U варьирует от 0.4 до 2.79, что также характерно для циркона магматического происхождения (прил. 2.2).

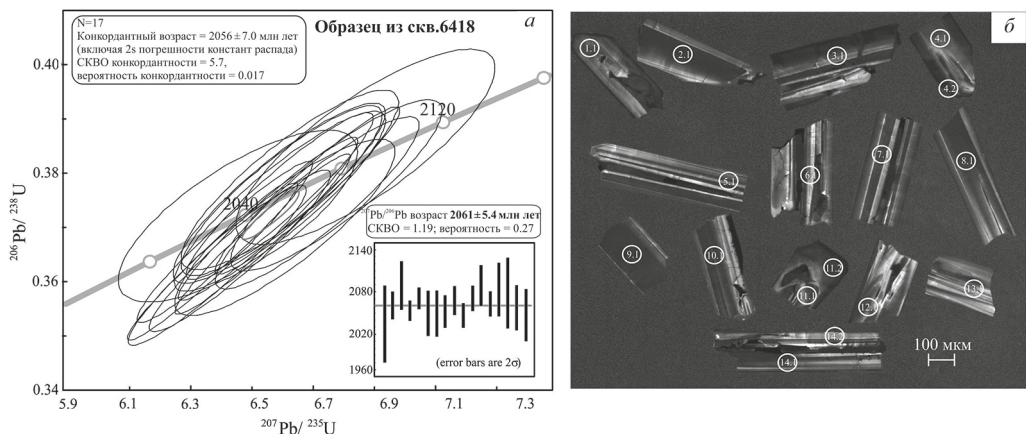


Рис. 7. U-Pb диаграмма с конкордией для цирконов из кварцевого монцогаббро плутона Потудань (проба 6418/66.0) (а). Микрофотографии зерен циркона пробы 6418/66.0 (б), выполненные в режиме катодолуминесценции. Номера аналитических точек соответствуют приведенным в прил. 2.2

6. Обсуждение результатов

6.1. Состав и возраст пород плутона Потудань

Породы основного и среднего состава плутона Потудань традиционно относились к белогорьевскому (позднеархейского возраста) ультраосновному-основному комплексу на карте докембрия ВКМ (Чернышов и др., 1998; Государственная..., 2011), малочисленные тела которого также встречаются в пределах Донского террейна. Ранее было показано принципиальное отличие пород исследуемого плутона от пород белогорьевского комплекса (Петракова и Терентьев, 2018). Образования белогорьевского комплекса (со средним содержанием $\text{SiO}_2 = 47\%$) представлены пироксеновыми горнблендитами, реликтовыми пироксенитами и габброидами, в различной степени метаморфизованными, и являются высокомагнезиальными (Одокий, 1962). В отличие от них потуданские кварцевые монцогаббро-монцодиориты ($\text{SiO}_2 = 49.1\text{--}63.9\%$) являются железистыми и демонстрируют высокие содержания щелочей, особенно калия. Эти характеристики также отличают их от распространенных в регионе гранитоидов павловского комплекса, которые, в свою очередь, имеют широкий диапазон составов по SiO_2 — от 56 до 76%, являются преимущественно магнезиальными и относятся к известково-щелочной серии пород. С другой стороны, выявленные петрографические и минералогические сходства, близкие оценки температур кристаллизации (ликвидуса 1114–1154 °С, субликвидуса 700–800 °С) и давлений (2.7–3.2 кбар), их пространственная сопряженность и наличие пород с признаками гибридизации позволили выдвинуть гипотезу о смешении в разных пропорциях габброидной потуданской и гранитной павловской магм в верхнекоровых условиях (Петракова и Терентьев, 2018).

Возраст кристаллизации кварцевых монцогаббро плутона Потудань составляет 2061.0 ± 5.4 млн лет. Возраст павловских гранитоидов, по данным U-Pb изотопного датирования акцессорных цирконов, составил 2076.8 ± 3.1 млн лет (Бибикова и др., 2009). Гранитоиды Хохольско-Репьевского, Лискинского, Олымского и Россошанского массивов в составе павловского комплекса (Terentiev et al., 2020) и приведенные здесь геохронологические результаты свидетельствуют о формировании павловских гранитоидов и потуданских габброидов в узком временном интервале 2060–2075 млн лет.

Наличие двух типов магм и их смешение подтверждаются петрографическими и геохимическими данными, близким возрастом внедрения, а также морфологией цирконов гибридных пород. О почти одновременном внедрении магм основного и кислого составов, а также гибридного происхождения части пород Хохольско-Репьевского батолита свидетельствуют границы между внутренними и внешними частями циркона (рис. 8). В одних случаях они четкие и секущие структуру внутренних частей, изредка имеют прерывистые яркие в катодолюминесцентном свечении оторочки (Terentiev et al., 2020). В других случаях зональность внутренних частей, если и срезается, то под острым углом, а границы трудно различимы. Характер границ свидетельствует как о непрерывном, так и о дискретном росте циркона и подтверждает близкое время протекания двух магматических процессов, один из которых — кристаллизация циркона с грубой зональностью в расплаве габброидного

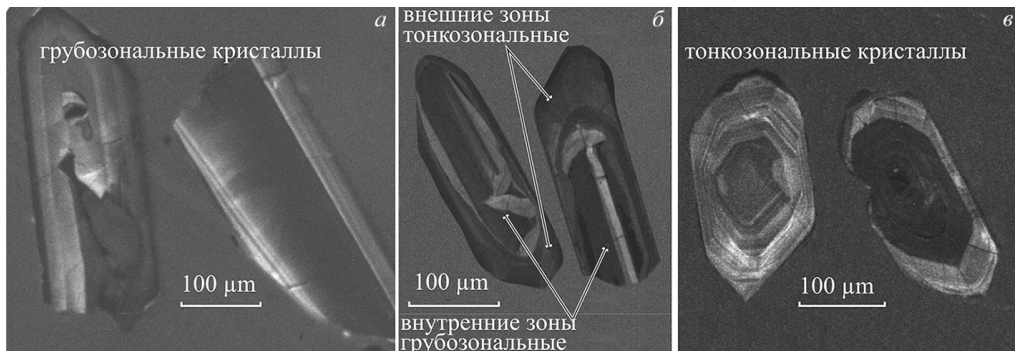


Рис. 8. Катодолюминисцентные фотографии зерен циркона из разных типов пород: *а* — кварцевое монцогаббро плутона Потудань, *б* — гибридный монцогранит, *в* — кварцевый монцодиорит павловского типа. Фото зерен циркона на рис. *б* и *в* из работы (Terentiev et al., 2020).

состава (рис. 7, 8, *а*), а второй — дораствание циркона с тонкой зональностью после примешивания порции средне-кислого расплава (рис. 8, *б*) (Terentiev et al., 2020).

Таким образом, по совокупности полученных данных подтверждено выделение плутона Потудань вместе с аналогичными по составу массивами в северной части Хохольско-Репьевского батолита в самостоятельный магматический комплекс, а вмещающие гранитоиды батолита предлагается рассматривать как часть павловского магматического комплекса (Terentiev et al., 2020). При этом важно отметить высококалийевый состав пород плутона, позволяющий с помощью классификационных диаграмм (Pearce, 1983; Rickwood, 1989; Ewart, 1982) отнести кварцевые монцогаббро и монцодиориты плутона Потудань к шошонитовой серии, не имеющей интрузивных аналогов в исследуемом регионе.

6.2. Условия генерации магм

Петрографические и геохимические характеристики пород основного и среднего состава потуданского комплекса в сопоставлении с нашими недавними исследованиями для гранитоидов павловского комплекса (Терентьев и Савко, 2017; Петракова и Терентьев, 2018) позволили установить для них схожий порядок кристаллизации.

Согласно петрографическим наблюдениям, на ранней стадии кристаллизуются Sr_x , Mag , Ap , Ttn_1 и сульфиды. Это подтверждается и геохимическими характеристиками пород. На бинарных диаграммах (см. рис. 5) 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 и SiO_2 (Петракова и Терентьев, 2018), 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 подтверждается полученными оценками температур кристаллизации циркона. В магмах он является субсолидусной фазой и кристаллизуется после высокотемпературного апа-

тита. Наличие близких постоянных значений 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 (Петракова и Терентьев, 2018). Кристаллизация плаггиоклаза обусловила слабую отрицательную европиевую аномалию, особенно в средних и кислых дифференциатах. Плаггиоклаз является основным минералом, накапливающим Eu^{2+} (см. рис. 6, а).

Заключительная стадия характеризует кристаллизацию Qtz, Kfs и Pl_{2-3} . При этом отмечается обогащение LILE такими, как Ba, Sr, Rb в основных дифференциатах, а затем их деплетирование к средним (в потуданских) и кислым (в павловских) дифференциатам. Эта смена составов указывает на позднюю кристаллизацию калиевых полевых шпатов, биотита и кварца (см. рис. 6, б).

Обогащенные спектры LILE и LREE характерны для контаминации расплава коровым веществом. Контаминация павловских гранитоидов материалом коры подтверждается как обнаружением ксенолитов амфиболитов донской серии в гранитоидах, так и присутствием древних ядер цирконов с возрастом ~2.8 млрд лет (Terentiev et al, 2020). Но, несмотря на указанные свидетельства контаминации коровым веществом павловских гранитоидов, этот процесс в геохимических характеристиках пород для обоих комплексов не проявлен однозначно.

В сравнении с мантийными базальтовыми породами компоненты земной коры обычно характеризуются низкими содержаниями отношений Nb/Ta, Nb/La, Sm/Nd и высокими La/Sm, Th/La, Th/Nb (например, Foland et al., 1993; Fowler, 1988; Wang et al., 2014). Каких-либо отчетливых корреляций между этими элементами с $mg\#$ (магнезиальностью) изученных пород не выявлено. Однако стоит отметить высокие содержания отношений La/Sm (4–12), Th/Ta (2–20) в породах обоих нами изученных комплексов. Учитывая, что Th/Ta = 2.1 в примитивной мантии (Sun and McDonough, 1989), можно предполагать контаминацию коровым веществом и, как следствие, увеличение Th/Ta отношения.

Отношение Ce/Pb, которое рассматривается как надежный индикатор корового вклада в мантийные расплавы, имеет широкие вариации от 2 до 12: в континентальной коре Ce/Pb = 3.91 (Rudnick, Gao, 2003), в OIB Ce/Pb = 25 (Sun and McDonough, 1989).

Отдельного внимания заслуживают достаточно высокие и постоянные значения отношения Nb/Ta для потуданских пород: Nb/Ta = 13–21, что близко к хондритовым значениям, и 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).

Умеренные и постоянные содержания Th и Pb, низкое значение отношения Th/Yb (2.56–3.92), отсутствие значимой положительной Zr аномалии на спайдердиаграммах для габброидов плутона Потудань и основных, и средних дифференциатов павловских магм (см. рис. 6, б) выступают против значительной контаминации коровым веществом, что нельзя сказать о гибридных породах и кислых дифференциатах павловских магм, у которых эти показатели выше: Th/Yb = 7–128 (Терентьев и Савко, 2017).

Несмотря на высокие содержания Nb, следует отметить отрицательные аномалии Nb-Ta-Zr-Hf, что несовместимо со значительным вкладом коровых материалов.

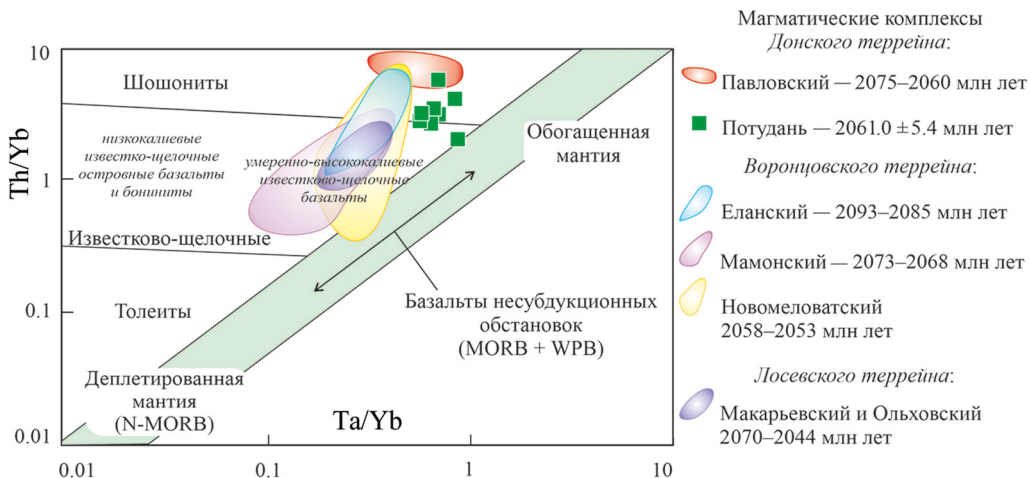


Рис. 9. Дискриминантная диаграмма Th/Yb–Ta/Yb по (Pearce, 1983), разделяющая мантийные источники, связанные и не связанные с субдукцией. На диаграмму вынесены значения для пород с SiO₂ менее 60 %

Принимая во внимание вышеизложенное, в изученных образцах коровая контаминация проявлена незначительно и фракционная дифференциация сыграла главную роль в формировании пород.

Возможность участия мантийного источника в образовании плутона Потудань подтверждают высокие отношения Sr/Y, (La/Yb)_N, (Dy/Yb)_N, указывающие на присутствие граната в рестите. Отсутствие или слабые Eu-аномалии можно рассматривать как индикатор генерации магмы ниже поля стабильности плагиоклаза. Немаловажным аргументом в пользу большего участия мантийного компонента являются повышенные содержания Cr, Ni, MgO с низкими содержаниями SiO₂ и высокие ликвидусные температуры кристаллизации минералов.

Таким образом, представленные геохимические характеристики скорее предполагают гетерогенность их источника с большим вкладом мантийного компонента. Выраженная в породах потуданского и павловского комплексов двойственность: с одной стороны, обогащенность мантийными компонентами (MgO, Cr, Ni, Nb и пр.), с другой — сильное обогащение LILE и LREE является характерной особенностью постколлизийного магматизма (Liegeois, 1998). Для постколлизийного магматизма, которому предшествовали обстановки активной окраины и коллизии, характерны: 1) внедрение значительных объемов известково-щелочных, преимущественно высококальциевых пород с подчиненным количеством шошонитовых (которыми являются потуданские породы); 2) приуроченность магматизма к шовным зонам; 3) возможность образования магматических источников в результате предшествующих процессов субдукции и коллизии с вовлечением корового материала или литосферной/астеносферной мантии. Геохимический источник, связанный с предшествующей субдукцией, подтверждается высокими отношениями Th/Yb — Ta/Yb (рис. 9).

На дискриминационных диаграммах Дж. Пирса (Pearce, 1984) составы пород попадают в область постколлизийных гранитоидов и поля вулканических дуг, что характерно для пород, образующихся в обстановках растяжения и тесно ассоции-

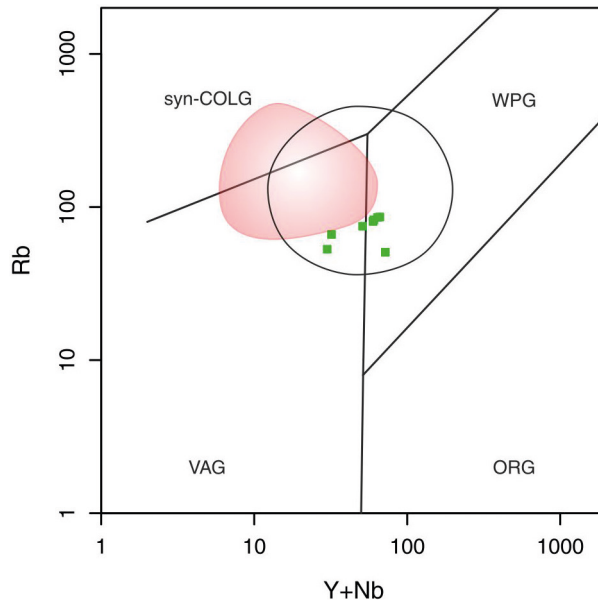


Рис. 10. Дискриминантная диаграмма Дж. Пирса (Pearce, 1984) с фигуративными точками составов пород Хохольско-Репьевского батолита: зеленые квадраты — потуданский тип, красное поле — павловский тип

рующих в пространстве или во времени с конвергентными окраинами в зависимости от природы источника (рис. 10).

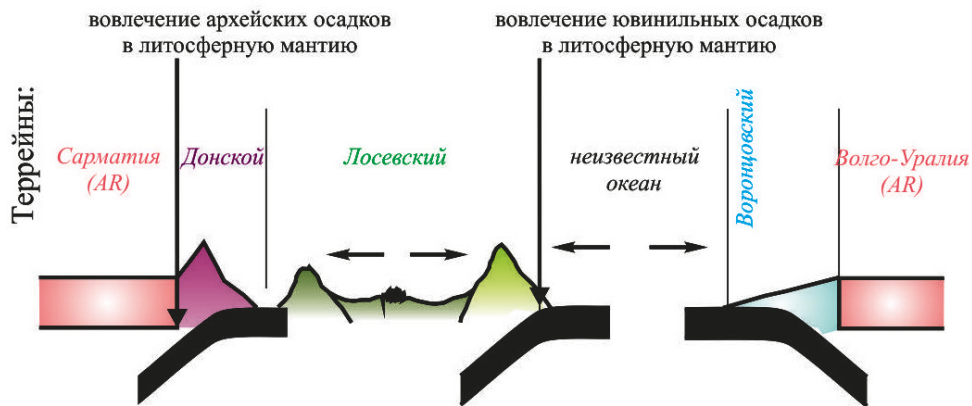
6.3. Геодинамическая позиция Донского террейна

В зоне сочленения Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона (ВЕК) 2170–2120 млн лет назад существовали зоны субдукции (Terentiev et al., 2016b), где происходило обогащение верхней мантии коровым компонентом, а сам регион представлял собой активную континентальную окраину (Терентьев, 2005; Щипанский и др., 2007; Terentiev et al., 2020) (рис. 11).

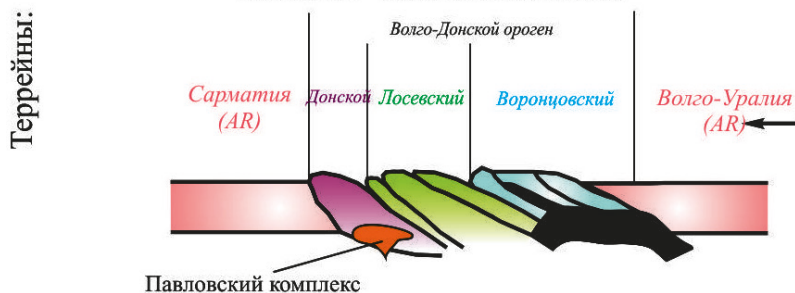
Воронцовский террейн рассматривается как аккреционная призма (Щипанский, 2007; Базиков и Савко, 2013), мафитовые интрузивные комплексы (мамонский и еланский) имеют толеитовые и известково-щелочные геохимические характеристики.

Для соседнего Лосевского террейна предлагается формирование в системе окраинный бассейн — островная дуга. Формирование этой системы определено возрастом 2170–2120 млн лет назад (Терентьев, 2016; Terentiev et al., 2017). Состав и характер вулканизма в это время проявлен от толеитового (+риолиты с адакитовой геохимией) до известково-щелочного (Щипанский 2007; Терентьев и Савко, 2016; Terentiev et al., 2017). Интрузивные породы здесь представлены усманским трондьемит-тоналит-плагиогранитным комплексом с характеристиками ТТГ, которые прорывают породы лосевской серии. U-Pb возраст гранитов составляет 2.09–2.07 млрд лет (Terentiev et al., 2018). Породы ольховского кварцдиорит-

Субдукция 2170–2120 млн лет назад



Коллизия ~ 2100 млн лет назад



Постколлизонное растяжение

2080–2050 млн лет



Рис. 11. Схема тектонической эволюции Волго-Донского орогена и размещение поздние и постколлизонных комплексов, модифицировано по (Terentiev et al., 2020)

кварцмонцодиорит-лейкогранодиоритного комплекса внедряются 2.07–2.04 млрд лет назад (Terentiev et al., 2016 a), относятся к известково-щелочной серии и близки к I-гранитам. Предполагается участие в образовании плутонических комплексов как мантийных, так и коровых компонентов (Терентьев, 2014; Терентьев и Савко, 2016; Terentiev et al., 2016b; Терентьев и Савко, 2017; Terentiev et al., 2018).

Донской террейн развивался в активноокраинной обстановке, как энсиалическая дуга (Терентьев и Савко, 2017; Терентьев, 2018; Terentiev et al., 2020). Накопле-

ние толщ донской серии в морском бассейне подтверждается прослоями мраморов и известково-силикатных пород (протолиты — известняки и мергели). Метаморфизованные вулканиды, известные в террейне, относятся к известково-щелочной высококальциевой серии, однако разделяются на железистую и высокомагнезиальную ветви. Наиболее широко развиты гранитоиды павловского комплекса, они относятся к поздне-коллизийному и постколлизийному этапам формирования пород региона (Терентьев, 2018; Terentiev et al, 2020).

Несмотря на близкое развитие интрузивного магматизма, гранитоиды рассмотренных террейнов различаются по геохимическим характеристикам, что указывает на их происхождение из разных магматических источников. Учитывая латеральную изменчивость в содержании K_2O , с ростом его в сторону архейского Курского блока, обогащение LILE и LREE в павловских гранитоидах в сравнении с гранитоидами Лосевского террейна, можно предполагать, что породы Донского террейна в палеопротерозое формировались «на» или «вблизи» окраины древнего континента. Последнему не противоречат и геофизические данные, указывающие на присутствие архейской континентальной коры в Донском террейне (Минц и др., 2017).

7. Выводы

1. Породы плутона Потудань и гранитоиды павловского комплекса кристаллизовались по схожему сценарию: с фракционированием клинопироксена и Fe-Ti-оксидов на ранних стадиях, затем плагиоклаза и амфибола и поздней кристаллизацией калиевого полевого шпата, кварца и биотита.
2. Особенности геохимии пород плутона Потудань, их пространственно-временная связь с гранитоидами павловского комплекса, а также морфологические особенности циркона подтверждают процессы гибридизма (смешения габброидной и гранитоидной магм) при кристаллизации пород композитного батолита.
3. Время кристаллизации плутона Потудань составляет 2061 ± 5 млн лет и отвечает постколлизийному тектоническому этапу в зоне сочленения Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона.
4. Для интрузивных комплексов Донского террейна предполагается участие обогащенного гетерогенного источника с высокими содержаниями щелочей, LILE и LREE, мантийная компонента подтверждается повышенными содержаниями MgO, Cr, Ni, Ti, а также высокими отношениями Sr/Y, (La/Yb)_N, (Dy/Yb)_N, указывающими на глубинное происхождение магм. Гетерогенность источника могли обеспечить субдукционные события, происходившие около 2.1 млрд лет назад.

Благодарности

Авторы приносят свою благодарность заведующему лабораторией Петро- и рудогенеза ИГГД РАН доктору геолого-минералогических наук Ш. К. Балтыбаеву за проявленный интерес и конструктивные комментарии к данной работе. Также благодарим Е. Х. Кориш (ВГУ, г. Воронеж) за помощь в выделении монофракции циркона, аналитика Н. В. Родионова (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург) за U-Pb изо-

топное датирование циркона, а также аналитиков В. А. Шишлова и В. Л. Кудряшова (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург) за выполнение ICP-MS анализов. Спасибо рецензентам за проявленный интерес к данной работе и ценные рекомендации, которые способствовали улучшению статьи.

Литература

- Базиков, Н. С., Савко К. А. (2013). Фазовые равновесия редкоземельны минералов в метаосадочных породах Воронцовской серии Воронежского кристаллического массива и возраст метаморфизма. *Труды НИИ Геологии ВГУ*, 69.
- Бибикова, Е. В., Богданова, С. В., Постников, А. В., Попова, Л. П., Кирнозова, Т. И., Фугзан, М. М., Глущенко, В. В. (2009). Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 17 (6), 3–16.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (2011). Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). *Серия Центрально-Европейская. Лист М-37. Воронеж, М-37*. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Епифанов, Б. П. (1959). Вопросы стратиграфии докембрия Курско-Воронежской антеклизы. *Материалы по геологии и полезным ископаемым центральных районов Европейской части СССР. Вып. 2: Курская магнитная аномалия*. Калуга: Калужское книжное изд-во, 28–52.
- Минц, М. В., Глазнев, В. Н., Муравина, О. М. (2017). Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры. *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 4, 5–23.
- Одокий, А. А. (1962). Некоторые данные по докембрию юго-восточной части Воронежской области. *Тезисы межобластного геологического совещания по геологии и минеральным ресурсам ЦЧО*. Воронеж.
- Петракова, М. Е., Терентьев, Р. А. (2018). Петрографические и минералогические признаки взаимодействия гранитоидных и габброидных магм плутона Потудань, Воронежский кристаллический массив. *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 1, 32–45. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1422>
- Савко К. А., Скрябин В. Ю. (1999). Петрология форстерит-клиногумитовых мраморов Воронежского кристаллического массива. *Геология и геофизика*, 40 (4), 592–605.
- Савко, К. А., Самсонов, А. В., Ларионов, А. Н., Ларионова, Ю. О., Базиков, Н. С. (2014). Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования. *Петрология*, 22 (3), 235–264.
- Савко К. А., Самсонов А. В., Холин В. М., Базиков Н. С. (2017) Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 25 (2), 3–26.
- Терентьев, Р. А. (2005). Раннепротерозойский палеобассейн Лосевской шовной зоны (Воронежский кристаллический массив). *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 1, 81–94.
- Терентьев, Р. А. (2014). Габбродиорит-тоналит-трондьемитовая и монцодиорит-кварцдиоритовая ассоциации макарьевских интрузивов (Воронежский кристаллический массив). *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 1, 62–72.
- Терентьев, Р. А. (2018). Геология Донской серии докембрия Воронежского кристаллического массива. *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 2, 5–19. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.2/1494>
- Терентьев, Р. А., Савко, К. А. (2016). Высокомагнезиальные низкотитанистые габбро-гранитные серии в палеопротерозое восточной Сарматии: геохимия и условия формирования. *Геология и геофизика*, 57 (6), 1155–1183.
- Терентьев, Р. А., Савко, К. А. (2017). Минеральная термобарометрия и геохимия палеопротерозойских магнезиально-калиевых гранитоидов Павловского плутона, Восточно-Европейский кратон. *Вестник ВГУ. Серия. Геология*, 3, 34–45.
- Чернышов, Н. М., Лосицкий, В. В., Молотков, С. П. (1998). Структурно-тектоническое районирование ВКМ (по геологическим и геофизическим данным). *Современные проблемы геологии: материалы юбилейной научной сессии геолог. ф-та ВГУ*. Воронеж, 5–7.

- Щипанский, А. А., Самсонов, А. В., Петрова, А. Ю., Ларионова, Ю. О. (2007). Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое. *Геотектоника*, 1, 43–70.
- Bogdanova, S. V., In Gee, D. G. and Beckholmen, M. (1993). *Segments of the East European Craton*. EUROPROBE in Jablonna 1991: Polish Academy of Science Publications of the Institute of Geophysics A–20, 33–38.
- Ewart, A. (1982). The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range, in Thorp, R. S. (ed.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, New York, 25–95.
- Foland, K. A., Landoll, J. D. and Henderson, C. M. B. (1993). Formation of cogenetic quartz and nepheline syenites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 697–704.
- Fowler, M. B. (1988). Elemental evidence for crustal contamination of mantle-derived Caledonian syenite by metasediment anatexis and magma mixing. *Chem. Geol.*, 69, 1–16.
- Gorbatshev R. and Bogdanova S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64, 3–21.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523–548.
- Kuno, H. (1966). Lateral variation of basaltic magma types across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology*, 29, 195–222.
- Larionov, A. N., Andreichev, V. A. and Gee, D. G. (2004). The Vendian alkaline igneous suite Northern Timan: zircon ages of gabbros and syenites, in Gee, D. G., Pease, V. (eds.), *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society, London, Memoirs, 30, 69–74.
- Liégeois, J. P., Navez, J., Hertogen, J. and Black R. (1998) Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45, 1–28.
- Ludwig, K. R. (2008). *Isoplot/Ex ver. 3.6*. Berkeley Geochronology Center. Special Publications 4. Berkeley.
- Middlemost, E. A. K. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37, 215–224.
- Pearce, J. A. Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956–983.
- Pearce, J. A. (1983). *Role of the Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins*. Shiva Publications, Nantwich, Cheshire, 230–249.
- Pfänder, J. A., Munker, C., Stracke, A. and Mezger, K. (2007). Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts — implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 254, 158–172.
- Rickwood, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams, which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247–263.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003). Composition of the continental crust, in Rudnick, R. L. (ed.), *The Crust*. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1–64.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society London Special Publications*, 42, 313–345.
- Terentiev R. A., Savko, K. A. and Santosh, M. (2017). Paleoproterozoic Evolution of the Arc-back-arc System in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP Geochronology and Geochemistry of the Losevo Volcanic Suite. *American Journal of Science*, 317, 707–753.
- Terentiev, R. A., Savko, K. A., Petrakova, M. E., Santosh, M. and Korish, E. H. (2020). Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Research*, 346, 1–24. <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Terentiev, R. A., Savko, K. A. and Santosh, M. (2018). Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovsky ring complex. *Journal of the Geological Society*, 175, 86–99.
- Terentiev, R. A., Savko, K. A., Santosh, M., Korish, E. H. and Sarkisyan, L. (2016a). Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: Age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Research*, 287, 48–72.
- Terentiev, R. A., Skryabin, V. Yu. and Santosh, M. (2016b). U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: tectonic implications on Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 273, 165–184.

Wang, X., Li, Z., Li, J. and Pisarevsky, S. A. (2014). Genesis of the 1.21 Ga Marnda Moorn Large igneous province by plume-lithosphere interaction. *Precambrian Research*, 241, 85–103.

Статья поступила в редакцию 29 июля 2020 г.
Статья рекомендована к печати 6 декабря 2021 г.

Контактная информация:

Петракова Марина Евгеньевна — maribya@mail.ru
Терентьев Роман Анатольевич — terentiev@geol.vsu.ru
Юрченко Анастасия Владимировна — yurchenko-nasty@yandex.ru
Савко Константин Аркадьевич — ksavko@geol.vsu.ru

Geochemistry and geochronology of quartz monzogabbro-monzodiorite-granodiorites of the Potudan pluton (Volga-Don orogen)*

M. E. Petrakova^{1,2}, R. A. Terentiev²,
A. V. Yurchenko¹, K. A. Savko²

¹ Precambrian Institute of Geology and Geochronology,
Russian Academy of Sciences,
2, nab. Makarova, St Petersburg, 199034, Russian Federation
² Voronezh State University,
1, Universitetskaya pl., Voronezh, 394006, Russian Federation

For citation: Petrakova, M. E., Terentiev, R. A., Yurchenko, A. V., Savko, K. A. (2022). Geochemistry and geochronology of quartz monzogabbro-monzodiorite-granodiorites of the Potudan pluton (Volga-Don orogen). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (1), 74–96.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.105> (In Russian)

This article presents new and summaries of previously published geochemical and geochronological data on rocks of the Potudan pluton and host granitoids of the Kholhol-Repyevka batholith in the central part of the Don Terrane (DT) of Volga-Don orogen. The host granitoids of the Kholhol-Repyevka batholith are assigned to the Pavlovsk granitoid complex, which is widespread in the southern part of the DT. The studied Potudan pluton rocks are differentiated from quartz monzogabbro to granodiorites. They are ferroan, meta-aluminous, and the K₂O content displays their relationship to the shoshonite series. For the intrusive complexes of the Don terrane, it is assumed that an enriched heterogeneous source with high contents of alkalis, large-scale lithophile elements and light rare earth elements is involved, the mantle component is confirmed by increased of MgO, Cr, Ni, Ti, as well as high Sr/Y ratios, (La/Yb)_N, (Dy/Yb)_N, indicating the deep origin of magmas. The source heterogeneity could have been provided by subduction events about 2.1 Ga. The U-Pb zircon age of crystallization of the Potudan pluton rocks (using the SHRIMP II instrument) is 2061 ± 5.4 Ma and corresponds to the postcollision event in the junction zone of the Sarmatia and Volga-Uralia segments of the East European Craton. Association of Potudan rocks with Pavlovsk granitoids in time and space and also morphological features of zircon from various types of rock suites prove the effect of hybridization process during crystallization of the composite batholith. The new data make it possible to expand our understanding of the evolution of crust of the Don Terrane and geodynamic regims of its formation.

* The studies were supported by the research project IGGD RAS No. FMUW-2022-0002 of the Ministry of Education and Science of Russia.

Keywords: Volga-Don orogen, paleoproterozoic, shoshonitic magmatism, enriched source, post-collision tectonic setting.

References

- Bazikov, N. S. and Savko K. A. (2013). Phase equilibria of rare earth minerals in metasedimentary rocks of the Vorontsov Group of the Voronezh crystalline massif and the age of metamorphism. *Trudy NII Geologii VGU*, 69, 97.
- Bibikova, E. V., Bogdanova, S. V., Postnikov, A. V., Popova, L. P., Kernozova, T. I., Fugzan, M. M. and Glushchenko, V. V. (2009). Sarmatia-Volga-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigraphy. Geol. Correlation*, 17, no. 6, 561–573.
- Bogdanova, S. V., In Gee, D. G. and Beckholmen, M. (1993). *Segments of the East European Craton*. EURO-PROBE in Jablonna 1991: Polish Academy of Science Publications of the Institute of Geophysics A–20, 33–38.
- Chernyshov, N. M., Losickij, V. V. and Molotkov, S. P. (1998) Structural-tectonic zoning of the VKM (according to geological and geophysical data). *Sovremennye problemy geologii: mat-ly yubilejnoj nauchnoj sessii geolog. f-ta VGU. Voronezh*, 5–7. (In Russian)
- Epifanov, B. P. (1959). Issues of Precambrian stratigraphy of the Kursk-Voronezh anticline. *Materials of geology and mineral sources of the central regions, European part of the USSR, vol. 2: Kursk magnetic anomaly*. Kaluga Book Publishing House, 28–52. (In Russian)
- Ewart, A. (1982). The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range, in Thorp, R. S. (ed.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. New York: John Wiley and Sons, 25–95.
- Foland, K. A., Landoll, J. D., Henderson, C. M. B. (1993). Formation of cogenetic quartz and nepheline syenites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 697–704.
- Fowler, M. B. (1988). Elemental evidence for crustal contamination of mantle-derived Caledonian syenite by metasediment anatexis and magma mixing. *Chem. Geol.*, 69, 1–16.
- Gorbatshev R. and Bogdanova S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64, 3–21.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523–548.
- Kuno, H. (1966). Lateral variation of basaltic magma types across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology*, 29, 195–222.
- Larionov, A. N., Andreichev, V. A. and Gee, D. G. (2004). The Vendian alkaline igneous suite Northern Timan: zircon ages of gabbros and syenites, in Gee, D. G., Pease, V. (eds), *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society, London, Memoirs, 30, 69–74.
- Ludwig, K. R. (2008). *Isoplot/Ex ver. 3.6*. Berkeley Geochronology Center. Special Publications 4. Berkeley.
- Middlemost, E. A. K. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37, 215–224.
- Odokii, A. A. (1962). Some data on the Precambrian of the southeastern part of the Voronezh region. *Abstracts of the interregional geological meeting on the geology and mineral resources of the Central District. Voronezh*. (In Russian)
- Pearce, J. A. (1983). *Role of the Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins*. Cheshire, Shiva Publications, Nantwich, 230–249.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956–983.
- Petrakova, M. E. and Terentiev, R. A. (2018). Petrographic and mineralogical evidence of felsic and mafic magmas interaction in the Potudan pluton, Voronezh Crystalline Massif. *Proceedings of Voronezh State University. Series: "GEOLOGY"*, 1, 32–45. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1422> (In Russian)
- Pfänder, J. A., Munker, C., Stracke, A. and Mezger, K. (2007). Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts — implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 254, 158–172.
- Rickwood, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams, which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247–263.

- Savko K. A., Samsonov A. V., Holin V. M. and Bazikov N. S. (2017) Megablock Sarmatia kak oskolok superkratona Vaalbara: korreliatsiia geologicheskikh sobytii na granice arheia i paleoproterozoi. *Stratigrafiia. Geol. Korreliatsiia*, 25 (2), 3–26. (In Russian)
- Savko, K. A., Samsonov, A. V., Larionov, A. N., Larionova, Yu. O. and Bazikov, N. S. (2014). Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin. *Petrology*, 22 (3), 205–233.
- Savko, K. A. and Skryabin, V. Yu. (1999). Petrology of forsterite-clinohumite marbles of the Voronezh Crystalline Massif. *Russian Geology and geophysics*, 57 (4), 576–591.
- Shchipsansky, A. A., Samsonov, A. V., Petrova, A. Yu. and Larionova, Yu. O. (2007). Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic. *Geotectonics*, 1, 38–62.
- State Geological Map of Russian Federation on a Scale 1: 1 000 000. (2005). *The Third Generation. Central Europe Series. Sheet M-37*. St Petersburg: VSEGEI Publ. (In Russian)
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society London Special Publications*, 42, 313–345.
- Terentiev, R. A. (2005). Early Proterozoic paleobasin of the Losevo suture zone (Voronezh Crystalline Massif). *Proceedings of Voronezh State University. Series: "GEOLOGY"*, 1, 81–94. (In Russian)
- Terentiev, R. A. (2014). Gabbrodiorite — tonalite — trondjemite and monzodiorite — quartz-diorite associations of the Makaryevsky intrusion (Voronezh Crystalline Massif). *Proceedings of Voronezh State University. Series: "GEOLOGY"*, 1, 62–72.
- Terentiev R. A., Savko, K. A. and Santosh, M. (2017). Paleoproterozoic Evolution of the Arc-back-arc System in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP Geochronology and Geochemistry of the Losevo Volcanic Suite. *American Journal of Science*, 317, 707–753.
- Terentiev, R. A. (2018). Geology of the Don series from the Early Precambrian Voronezh Crystalline Massif. *Proceedings of Voronezh State University. Series: "GEOLOGY"*, 2, 5–19. (In Russian)
- Terentiev, R. A. and Savko, K. A. (2016). High-magnesian low-titanium gabbro-granite series in the Paleoproterozoic of eastern Sarmatia: geochemistry and formation conditions. *Geology and Geophysics*, 57 (6), 1155–1183.
- Terentiev, R. A. and Savko, K. A. (2017). Mineral thermobarometry and geochemistry of Paleoproterozoic magnesio-potassic granitoids of the Pavlovsk pluton, East European craton. *Proceedings of Voronezh State University. Series: "GEOLOGY"*, 3, 34–45. (In Russian)
- Terentiev, R. A., Savko, K. A., Petrakova, M. E., Santosh, M. and Korish, E. H. (2020). Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Research*, 346, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Terentiev, R. A., Savko, K. A. and Santosh, M. (2018). Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovsky ring complex. *Journal of the Geological Society*, 175, 86–99.
- Terentiev, R. A., Savko, K. A., Santosh, M., Korish, E. H. and Sarkisyan, L. (2016a). Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: Age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Research*, 287, 48–72.
- Terentiev, R. A., Skryabin, V. Yu. and Santosh, M. (2016b). U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: tectonic implications on Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 273, 165–184.
- Wang, X., Li, Z., Li, J. and Pisarevsky, S. A. (2014). Genesis of the 1.21 Ga Marnda Moorn Large igneous province by plume-lithosphere interaction. *Precambrian Research*, 241, 85–103.

Received: July 29, 2020

Accepted: December 6, 2021

Contact information:

Marina E. Petrakova — maribya@mail.ru

Roman A. Terentiev — terentiev@geol.vsu.ru

Anastasia V. Yurchenko — yurchenko-nasty@yandex.ru

Konstantin A. Savko — ksavko@geol.vsu.ru