

УДК 550.93:551.7/24(571.52+517.3)

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАННЕНПРОТЕРОЗОЙСКОЙ НИЖНЕЙ КОРЫ В СТРУКТУРАХ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА (НА ПРИМЕРЕ БАЙДАРИКСКОГО ТЕРРЕЙНА)

© 2022 г. И. К. Козаков^a, *, Т. И. Кирнозова^b, М. М. Фугзан^b, Ю. В. Плоткина^a

^aИнститут геологии и геохронологии докембра РАН, Санкт-Петербург, Россия

^bИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: ivan-kozakov@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.06.2021 г.

После доработки 19.09.2021 г.

Принята к публикации 10.11.2021 г.

Строение Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) определяется сочетанием неопротерозойских и палеозойских палеоокеанических и островодужных комплексов и блоков с докембрийским фундаментом. Среди наиболее крупных блоков в центральном сегменте ЦАСП был выделен Дзабханский террейн, который первоначально рассматривался как микроконтинент с раннедокембрийским фундаментом. В его составе объединялись Байдарикский, Тарбагатайский, Сонгинский и собственно Дзабханский террейны, отнесенные к раннедокембрийским “кратонным” терреинам. Исследования, проведенные к настоящему времени, показали, что раннедокембрийские комплексы были установлены только в северо-западной части Байдарикского терреина и идерском комплексе Тарбагатайского терреина. Общим для них является формирование складчатой структуры на рубеже около 1855 млн лет, что характерно для фундамента древних кратонов Северной Евразии. Особенностью раннепротерозойских чарнокитоидов Байдарикского терреина с возрастом $1854 \pm 5 \pm 4$ млн лет является присутствие в них ксенолитов пород гранулитовой фации. Ранее данные ксенолиты рассматривались как относящиеся к породам бумбугерского комплекса, вмещающим массив чарнокитоидов. Однако для цирконов из ксенолитов двупироксеновых гранулитов был установлен возраст 1850 ± 4 млн лет, практически совпадающий с возрастом вмещающих их чарнокитов – 1854 ± 5 млн лет. Эти данные показали, что с чарнокитоидами, расплавы которых были образованы на уровне нижней коры, выносятся в зону метаморфизма амфиболитовой фации фрагменты раннепротерозойской нижней коры. Полученные новые результаты датирования циркона (2413 ± 12 млн лет), выделенного из ксенолита двупироксенового кварцевого диорита (эндербита) в этих чарнокитоидах, позволили по-новому взглянуть на особенности раннепротерозойского метаморфизма гранулитовой фации, которые отражают стадии формирования нижней коры в геологическом развитии раннедокембрийских комплексов Байдарикского терреина.

Ключевые слова: геохронология, цирконы, архей, ранний протерозой, гранулиты, нижняя кора, Дзабханский террейн, Центрально-Азиатский складчатый пояс

DOI: 10.31857/S0869590322020030

ВВЕДЕНИЕ

Строение Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) определяется сочетанием неопротерозойских и палеозойских палеоокеанических и островодужных комплексов и блоков с докембрийским фундаментом (Моссаковский и др., 1993; Диценко, 1994). Среди наиболее крупных блоков в центральном сегменте ЦАСП ранее рассматривались Дзабханский и Тувино-Монгольский терреины (рис. 1а), которые первоначально были включены в состав Боксон–Хубсугул–Дзабханского палеомикроконтинента (Беличенко, Боос, 1988; Беличенко и др., 1994; Зайцев, 1990). Дзабханский террейн объединяет Байдарикский, Тарба-

гатайский, Сонгинский и собственно Дзабханский терреины, которые позднее были отнесены к раннедокембрийским “кратонным” терреинам (Badarch et al., 2002) или нерасчлененным по возрасту метаморфическим терреинам без разделения на палеозойские, ранне- и позднедокембрийские (Buriánek et al., 2017). Исследования, проведенные к настоящему времени, показали многоэтапность формирования структурно-вещественных комплексов данных композитных терреинов в неопротерозое (Козаков и др., 1997, 2014, 2017, 2021а, 2021б; Ярмолюк и др., 2017; Ярмолюк, Дегтярев, 2019; Kovach et al., 2021). При этом раннедокембрийские кристаллические комплексы были

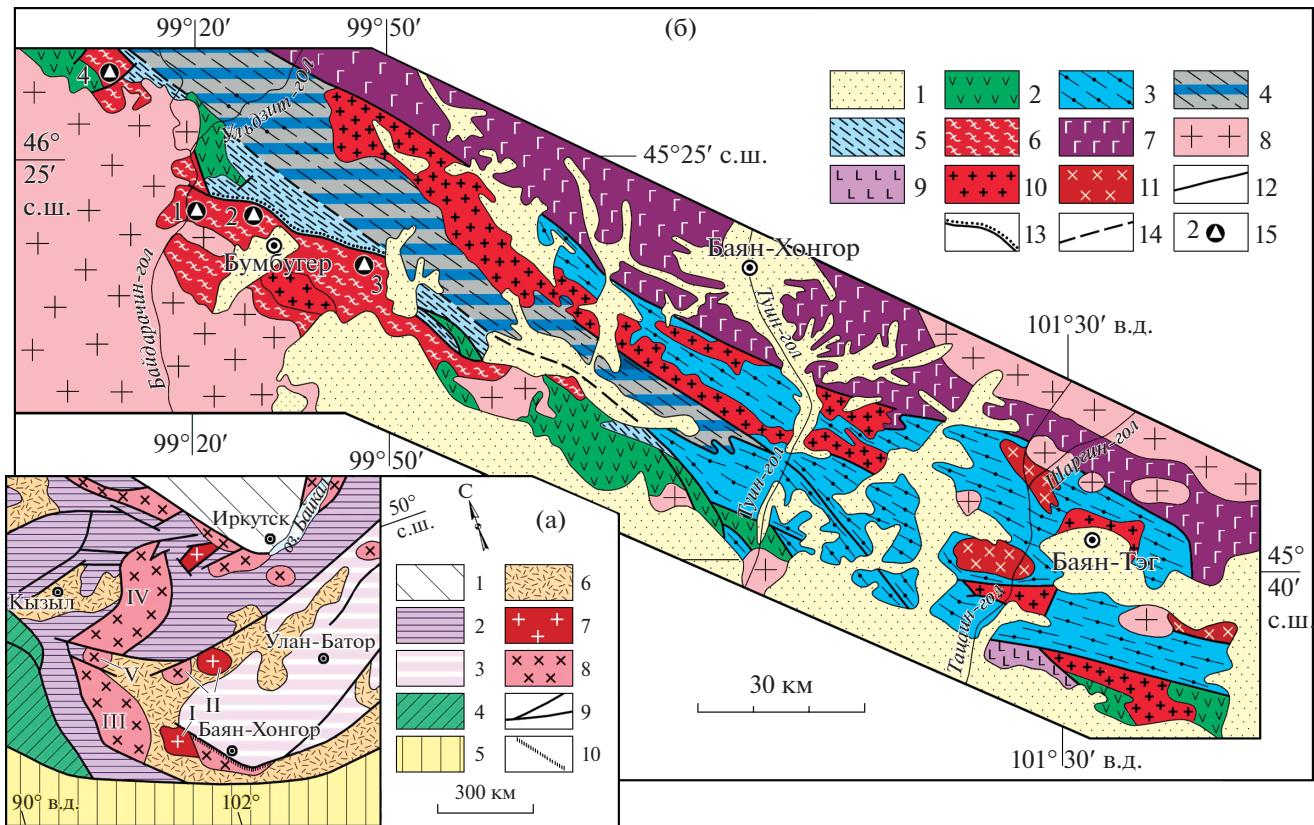


Рис. 1. (а) Схема геологического положения раннедокембрийских и неопротерозойских комплексов в структурах Центральной Азии и (б) схема соотношения раннедокембрийского Бумбугерского блока и кристаллических комплексов неопротерозойского Южно-Хангайского метаморфического пояса Байдарикского террейна (с использованием: Козаков, 1986; Козаков и др., 2005, 2007, 2015, 2021а, 2021б, 2021в; Jian et al., 2010).

(а): 1 – Сибирская платформа; 2 – ранние каледониды; 3 – толщи турбидитного бассейна среднего–позднего палеозоя; 4 – поздние каледониды; 5 – герциниды; 6 – вулканоплутонические пояса позднего палеозоя–мезозоя; 7, 8 – фрагменты континентальной коры с раннедокембрийским (7) и неопротерозойским (8) основанием; 9 – главные тектонические границы; 10 – положение Южно-Хангайского метаморфического пояса. Римские цифры: I – Байдарикский террейн; II – Тарбагатайский террейн; III – Дзабханский террейн; IV – Тувино-Монгольский террейн; V – Сонггинский террейн.

(б): 1 – мезозойские и кайнозойские отложения; 2 – нерасчлененные средне- и верхнепалеозойские отложения; 3, 4 – нерасчлененные метаморфические породы Южно-Хангайского метаморфического пояса; 5 – метаморфические породы повышенного давления, 4 – двуслюдяные, гранат-биотитовые и биотитовые гнейсы с горизонтами мраморизованных известняков; 5 – ульдзитгольский комплекс: филлиты, черные сланцы (неопротерозой); 6 – нерасчлененные байдарагинский и бумбугерский комплексы раннего докембра; 7 – нерасчлененные палеоокеанические породы Баянхонгорской зоны; 8 – нерасчлененные гранитоиды позднего палеозоя; 9 – габроиды (ранний палеозой?); 10 – нерасчлененные гранитоиды венда–раннего палеозоя; 11 – габбро-диорит-гранитовый комплекс Тацангольского блока; 12 – тектонические границы и зоны разломов; 13 – зона стратиграфического несогласия в основании толщ ульдзитгольского комплекса мезо-неопротерозоя; 14 – предполагаемая сдвиговая зона сочленения толщ ульдзитгольского комплекса и Южно-Хангайского метаморфического пояса; 15 – положение участков проведения геохронологических исследований в раннедокембрийском блоке Байдарикского террейна: 1 – тоналитовые гнейсы байдарагинского комплекса; 2 – массив чарнокитоидов с ксенолитами гранулитов и эндербитов (рис. 2); 3 – массив эндербитов, 2364 ± 6 млн лет (рис. 3); 4 – Олонхудукский массив, 1772 ± 1 млн лет.

установлены только в байдарагинском и бумбугерском комплексах северо-западной части Байдарикского террейна (Козаков, 1986; Ранний докембрий ..., 1993; Козаков др., 1997, 2007, 2021а), идерском комплексе Тарбагатайского террейна (Козаков и др., 2011; Kröner et al., 2015), а также Гарганской глыбе северо-восточной части Тувино-Монгольского террейна (Kovach et al., 2004; Анисимова и др., 2009; Bold et al., 2019) (рис. 1а).

Общим для раннедокембрийских блоков Байдарикского и Тарбагатайского террейнов является формирование их внутренней складчатой структуры в раннем протерозое на рубеже около 1855 млн лет. Раннепротерозойский метаморфизм и складчатость, определяющие внутреннюю структуру этих блоков, не накладываются на постметаморфические граниты, возраст которых 1825 ± 5 млн лет, и постакреционные аортозиты Олонхудук-

ского и Хунжилингольского массивов с возрастами 1772 ± 1 и 1778 ± 10 млн лет¹ соответственно (Ранний докембрий ..., 1993; Козаков и др., 2011, 2008б). В раннедокембрийском идерском комплексе Тарбагатайского террейна установлены сходные оценки возраста метаморфизма гранулитовой фации для чарнокитоидов и эндербитов — 1859 ± 3 и 2542 ± 1.4 млн лет (U-Th-Pb метод SIMS, Kröner et al., 2015).

Особенностью раннедокембрийских гранатовых гиперстенсодержащих и гранатовых чарнокитоидов Байдарикского террейна (1854 ± 5 млн лет) является присутствие в них ксенолитов пород гранулитовой фации преимущественно основного состава, которые рассматривались как относящиеся к вмещающим породам байдарагинского или бумбугерского комплексов (Козаков, 1986; Ранний докембрий ..., 1993). Основанием для этого послужило присутствие в них реликтовых парагенезисов гранулитовой фации. Новые результаты геохронологических исследований циркона из ксенолита двупироксенового эндербита позволили по-новому взглянуть на особенности раннепротерозойского метаморфизма гранулитовой фации, которые отражают стадии формирования нижней коры раннего протерозоя в геологическом развитии раннедокембрийских комплексов Байдарикского террейна.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ВОЗРАСТ РАННEDОКЕМБРИЙСКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУМБУГЕРСКОГО БЛОКА БАЙДАРИКСКОГО ТЕРРЕЙНА

Байдарикский террейн представляет собой гетерогенную структуру, в которой развиты ранне- и позднедокембрийские кристаллические комплексы. Однако раннедокембрийские комплексы установлены только в его северо-западной части и были отнесены нами к самостоятельному Бумбугерскому блоку² (рис. 1б). В этом блоке представлены породы, испытавшие метаморфические преобразования в архее и раннем протерозое (Ранний докембрий ..., 1993). В этих породах были выделены два комплекса: байдарагинский и бумбугерский.

Гнейсы, кристаллические сланцы, содержащие пироксены, и амфиболиты, отвечающие по составу единой базальт-андезит-дакитовой маг-

матической серии, были отнесены к архейскому байдарагинскому комплексу. Для тоналитовых гнейсов байдарагинского комплекса U-Pb методом по цирконам была получена оценка возраста 2646 ± 45 млн лет (точка 1 на рис. 1б). Данные цирконы кристаллизовались из расплава, поэтому полученная оценка рассматривалась как показывающая возраст образования расплава тоналит-трондемитового комплекса (Ранний докембрий ..., 1993). Возраст метаморфизма, происходившего на рубеже позднего архея и раннего протерозоя ($\sim 2514 \pm 23$ млн лет), был измерен (получен ИК) по метаморфогенным цирконам, имеющим геохимическую специфику, характерную для гранулитовой фации (Ранний докембрий ..., 1993); присутствие в тоналитовых гнейсах цирконов (2848 ± 27 млн лет, U-Th-Pb, SIMS), предположительно, отражает позднеархейский возраст их протолита (Козаков и др., 2007).

В составе бумбугерского комплекса были выделены две толщи: 1) “контрастная” толща, в которой представлены кристаллические сланцы основного состава и лейкократовые плагиогнейсы; 2) толща форстеритсодержащих мраморов, магнетитовых кварцитов, пироксеновых и амфиболовых сланцев, гранатовых и биотитовых гнейсов и лейкократовых плагиогнейсов. В обеих толщах, а также в породах байдарагинского комплекса на современном эрозионном срезе становление главных картируемых структур и региональный метаморфизм амфиболитовой фации определялись по возрасту синметаморфических гранатовых (иногда гиперстен и энстатит-гранатовых) интрузивных чарнокитоидов с возрастом 1854 ± 5 млн лет (точка 1 на рис. 2), а его завершение фиксируют постметаморфические субщелочные граниты и граносиениты с возрастом 1825 ± 5 млн лет (Ранний докембрий ..., 1993; Козаков и др., 2007).

В восточной части Бумбугерского блока (рис. 1б) установлен массив эндербитов (точка 1 на рис. 3) с возрастом 2370 ± 20 млн лет; позднее были проведены дополнительные аналитические исследования и получено более точное значение — 2364 ± 6 млн лет (Бибикова и др., 1990; Котов и др., 1995). На рубеже около 1855 млн лет эндербиты массива были рассланцованны в условиях амфиболитовой фации совместно с вмещающими их породами бумбугерского комплекса. Однако в отдельных частях массива и вмещающих породах, где данная сланцеватость амфиболитовой фации ограниченно развита, сохранилась более ранняя кристаллизационная сланцеватость — по гиперстену; это позволяет говорить о том, что внедрение и завершение кристаллизации расплава данных эндербитов и затем наложение сланцеватости (по гиперстену) происходили в условиях гранулитовой фации около 2360–2370 млн лет назад (Ранний докембрий..., 1993). Для жильных гранитов, секущих мигматитовую и метаморфи-

¹ Приводимые далее в тексте возрастные значения определены U-Pb методом по циркону (ID-TIMS); возрастные данные, полученные другими методами, указаны в тексте.

² Ранее весь Байдарикский террейн выделялся как раннедокембрийский Байдарикский блок (Тектоника ..., 1974). Учитывая одинаковые названия этого блока и композитного Байдарикского террейна, целесообразно его переименовать и назвать Бумбугерским блоком по названию Бумбугерского сомона (рис. 1б).

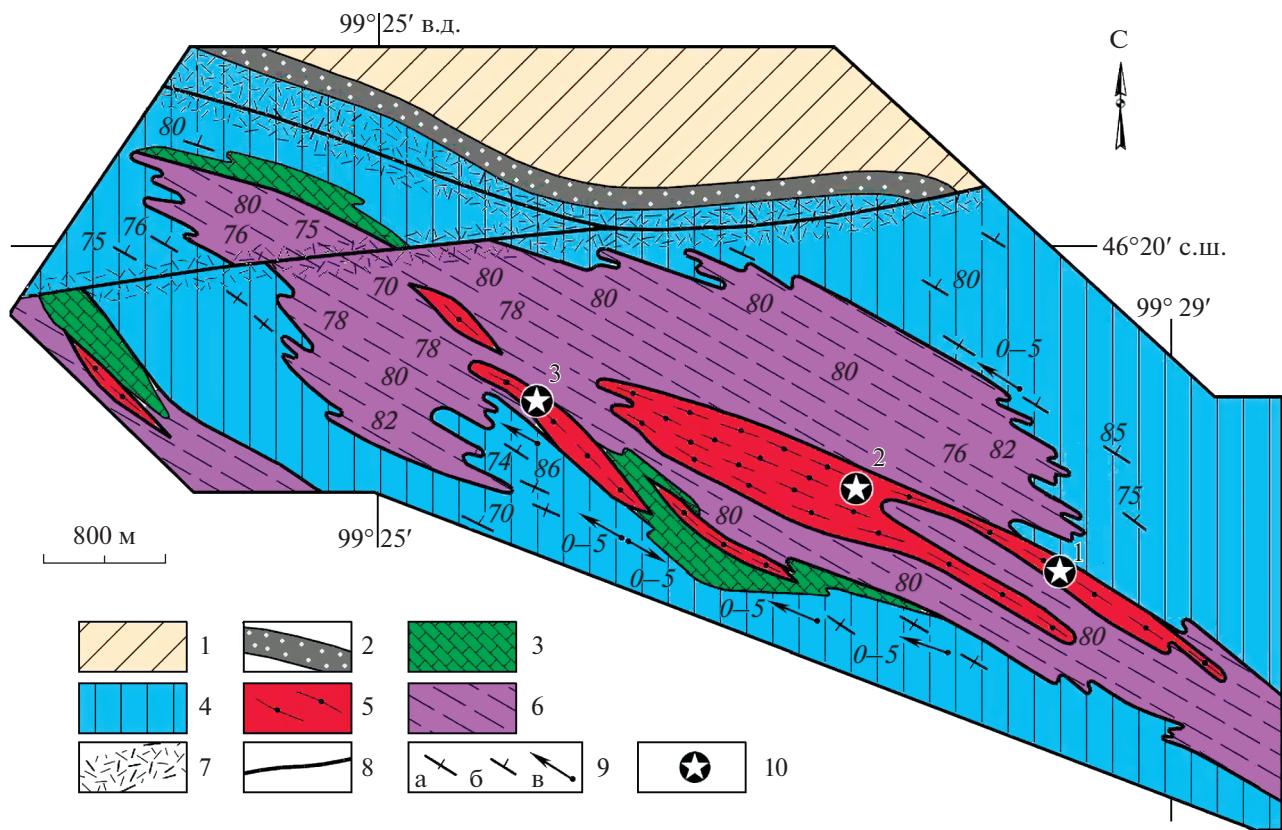


Рис. 2. Схема строения массива синметаморфических гранатовых и гиперстен-гранатовых чарнокитотов (с использованием: Козаков, 1986; Козаков и др., 2007; Ранний докембрий ..., 1993).

1, 2 – ульяновогольский комплекс мезо-неопротерозоя: 1 – черные сланцы, филлиты, 2 – горизонт кварцитов и гравеллитов; 3, 4 – раннепротерозойский бумбугерский комплекс: 3 – мраморы, кварциты, известково-силикатные гнейсы, биотитовые гнейсы и гнейсы, 4 – кристаллические сланцы основного состава, тоналитовые гнейсы; 5, 6 – магматические породы: 5 – синметаморфические гранатовые и гиперстен-гранатовые чарнокитоиды с ксенолитами гранулитов и эндербитов, 6 – рассланцованные в условиях амфиболитовой фации чарнокитоиды; 7 – катаклазиты; 8 – разломы; 9 – вертикальная (а) и наклонная (б) кристаллизационная сланцеватость, ориентировка линейности и шарниров складок (в); 10 – положение геохронологических проб: 1 – гранат-гиперстеновые чарнокиты, 1854 ± 5 млн лет, 2 – ксенолит эндербита, 2410 ± 11 млн лет, 3 – гранат-ортопироксен-клинопироксеновый гранулит, 1826 ± 27 млн лет (U-Th-Pb, SIMS, Demoux et al., 2009).

ческую полосчатость, установлен возраст 2308 ± 4 млн лет (Ранний докембрий ..., 1993; Котов и др., 1995). В них не проявлены наложенные складчатость и рассланцевание, но развита фельдшпатизация, более поздняя по отношению к лейкосомам мигматитов. Формирование данных гранитов, по-видимому, оторвано от метаморфизма (~ 2370 млн лет) и, возможно, связано с образованием более поздних постаккреционных гранитов. Фельдшпатизация происходила после образования субвертикальной кристаллизационной сланцеватости северо-западного направления, связанной со становлением главных картируемых структур, т.е. после завершения метаморфизма (1854 ± 5 млн лет), возможно, в связи с формированием посткинематических гранитов (1825 ± 5 млн лет). В период раннепротерозойского эпизода метаморфизма (1860–1825 млн лет) все породы раннедокембрийского Бумбугерско-

го блока Байдарикского террейна были переработаны в условиях метаморфизма амфиболитовой фации. Надо отметить, что в байдарагинском комплексе не были обнаружены гранитоиды с близким к ~ 2370 млн лет возрастом, а в породах бумбугерского комплекса не установлено более ранних эпизодов метаморфизма, близких к 2500–2550 млн лет, поэтому верхнюю возрастную границу интервала формирования толщ бумбугерского комплекса определяют эндербиты, возраст которых 2364 ± 6 млн лет. Можно также предполагать, что сочленение пород бумбугерского и байдарагинского комплексов происходило после внедрения эндербитов, а спаявший их метаморфизм амфиболитовой фации был приурочен к рубежу около 1855 млн лет.

О времени формирования пород бумбугерского комплекса позволяют судить исследования

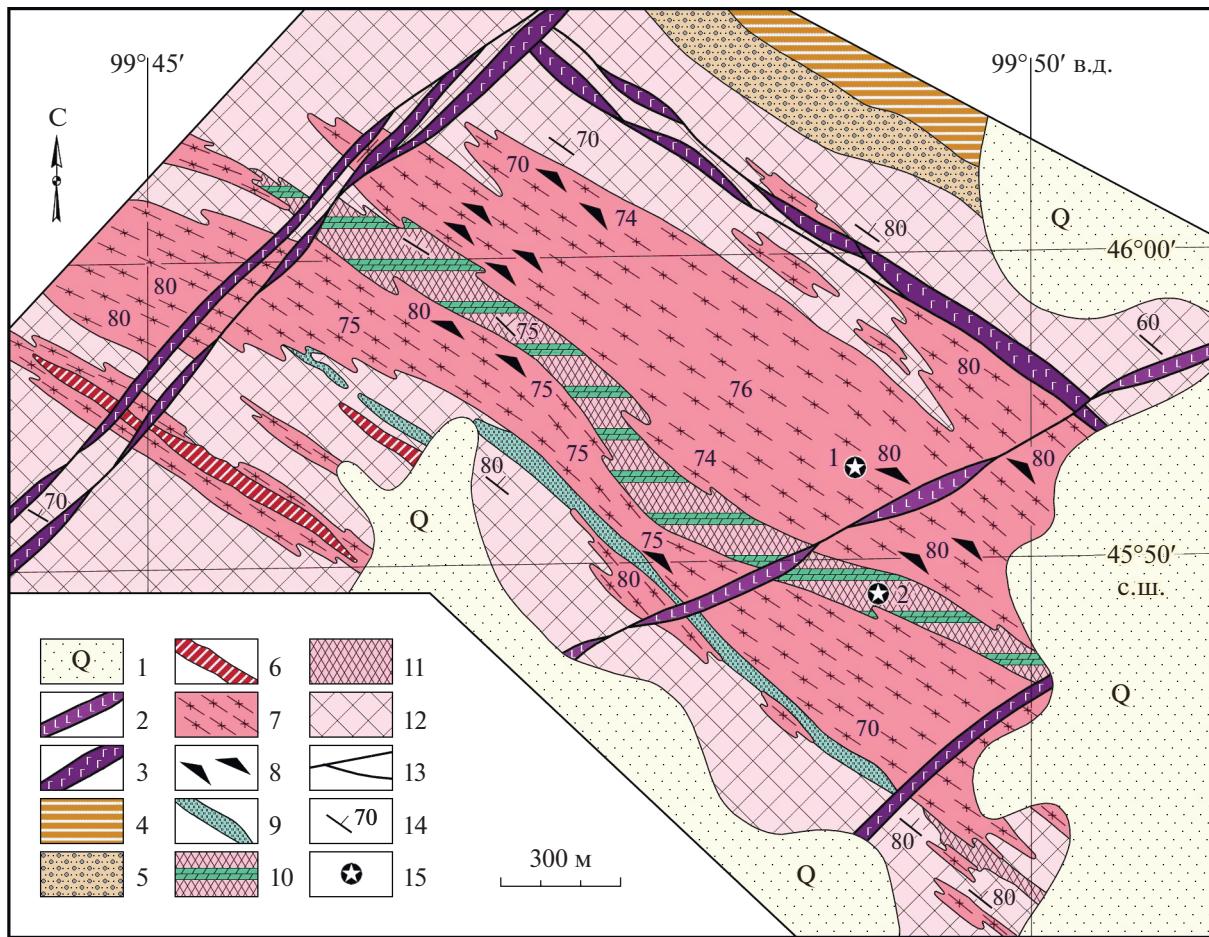


Рис. 3. Схема геологического строения массива эндербитов с возрастом 2364 ± 6 млн лет (Бибикова и др., 1990; Ранний докембрий ..., 1993).

1 – рыхлые отложения; 2 – диабазы (палеозой?); 3 – порфириты (ранний палеозой?); 4, 5 – улдзитгольский комплекс мезо-неопротерозоя; 6 – филлитовидные сланцы, 5 – базальный горизонт кварцитов; 6 – дайки метабазитов, рассланцованные в амфиболитовой фации; 7 – эндербиты рассланцованные в амфиболитовой фации (гнейсогранодиориты); 8 – реликты эндербитов со сланцеватостью по гиперстену; 9–12 – бумбугерский комплекс (ранний протерозой): 9 – магнетитовые кварциты, 10 – толща переслаивания форстеритсодержащих мраморов, кальцифиров, биотитовых и гранатовых гнейсов, 11 – мигматизированные гранатовые гнейсы, 12 – кристаллические сланцы основного состава и плагиогнейсы с реликтами гранулитов; 13 – разломы; 14 – ориентировка кристаллизационной сланцеватости амфиболитовой фации; 15 – положение геохронологических проб: 1 – эндербиты, 2364 ± 6 млн лет, 2 – гранатовые гнейсы толщи переслаивания карбонатных и метатерригенных пород.

детритовых цирконов (U-Th-Pb, SIMS). Для метатерригенных гранатовых гнейсов этого комплекса (точка 2 на рис. 3) был установлен возрастной интервал – 2.64–2.45 млрд лет (Козаков и др., 2007). Преобладающими являются ядра цирконов с возрастным диапазоном около 2.45–2.55 млрд лет, среднее значение возраста $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ которых составляет 2501 ± 33 млн лет. Можно полагать, что накопление терригенных пород бумбугерского комплекса происходило 2500–2365 млн лет назад. Таким образом, источниками метатерригенных пород бумбугерского комплекса вполне могли быть породы байдарагинского комплекса, метаморфизованные около 2500 млн лет назад, а затем вошедшие в состав протолита пород бумбугер-

ского комплекса. Это находит подтверждение в значениях Nd-модельных возрастов. Для бумбугерского комплекса установлено преобладание древнего (3.0–3.2 млрд лет) корового вещества в источниках метавулканитов и метаосадков без заметного влияния более молодых ювенильных или супракrustальных источников; плагиогнейсы и амфиболиты байдарагинского комплекса имеют сходные значения Nd-модельных возрастов в интервале 3.1–3.3 млрд лет (Ранний докембрий ..., 1993; Козаков и др., 1997).

К настоящему времени установлено, что на современном эрозионном срезе в Бумбугерском блоке Байдарикского террейна фиксируется проявление регионального метаморфизма, достига-

ющего уровня гранулитовой фации: в архейском байдарагинском комплексе ~ 2550 млн лет, в раннепротерозойском бумбугерском комплексе ~ 2365 млн лет; при этом в обоих комплексах проявлен метаморфизм амфиболитовой фации на рубеже ~ 1855 млн лет.

В гиперстен-гранатовых и гранатовых чарнокитоидах (1854 ± 5 млн лет), сопряженных с формированием главных картируемых северо-западных структур бумбугерского и байдарагинского комплексов, были установлены ксенолиты гранулитов (рис. 4), представленные гранат-гиперстеновыми гнейсами, двупироксеновыми кристаллическими сланцами основного состава (рис. 5); ранее предполагалось, что это ксенолиты вмещающих пород (Козаков, 1986; Козаков и др., 1997). Формирование расплавов данных чарнокитоидов и последующая кристаллизация происходили в условиях гранулитовой фации, т.е. на уровне нижней коры. При подъеме чарнокитоидов на более высокие уровни земной коры (уровень амфиболитовой фации, $P = 5\text{--}6$ кбар, $T = 700^\circ\text{C}$) в условиях деформации, приводящей к образованию прямых изоклинальных складок, в них формировалась кристаллизационная сланцеватость, параллельная осевым поверхностям и выраженная роговой обманкой и/или биотитом (Козаков, 1986). При этом первичные минералы чарнокитоидов (гиперстен и высокомагнезиальный гранат, содержащий 42–43% пиропа) замещались минералами амфиболитовой фации (биотитом, амфиболом, мусковитом), гранат в них сохранялся в виде футляровидных псевдоморфоз, сложенных агрегатами указанных минералов с реликтами граната (рис. 4). Для представленных в них ксенолитов основного состава (предположительно, образованных по габбро или базальтам), метаморфизованных в условиях гранулитовой фации ($P = 6.8 \pm 0.6$ кбар, $T = 800 \pm 27^\circ\text{C}$) была получена оценка возраста 1850 ± 4 млн лет (точка 3 на рис. 2) (U-Th-Pb метод SIMS, Kröner et al., 2017). Эти ксенолиты рассматривались как возникшие из обогащенного мантийного источника с незначительной контаминацией коровыми материалами. Таким образом, на рубеже около 1855 млн лет происходили процессы метаморфизма, образование расплава чарнокитоидов, их кристаллизация и перемещение на уровень амфиболитовой фации вместе с тектоническими пластинами толщ вмещающих пород (слайд-структуры). Такие процессы известны в свекофенидах Приладожья (Судовиков и др., 1969), раннепалеозойских метаморфитах Сангиленского блока Тувино-Монгольского террейна, герцинском Южно-Алтайском метаморфическом поясе и поздненеопротерозойском Южно-Хангайском метаморфическом поясе (Козаков и др., 2019, 2021б, 2021в).

Дальнейшие исследования раннепротерозойских (1854 ± 5 млн лет) чарнокитоидов в бумбугерском комплексе Байдарикского террейна (точка 2 на рис. 2) показали наряду с ксенолитами (1850 ± 4 млн

лет) присутствие в них более древних ксенолитов двупироксеновых диоритов – эндербитов³ (проба 7554-4), в которых не проявлено рассланцевание ни в условиях амфиболитовой фации, ни более ранней гранулитовой фации, установленных в массиве эндербитов (2364 ± 6 млн лет) (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика исследований. U-Pb геохронологические исследования были выполнены на много-коллекторном масс-спектрометре TRITON TI в Институте геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН (Москва). Кристаллы циркона для U-Pb геохронологических исследований подвергались многоступенчатому удалению поверхностных загрязнений в соляной и азотной кислоте. Химическое разложение циркона и выделение U и Pb выполняли по модифицированной методике Т.Е. Кроу (Krogh, 1973). Для изотопных исследований использовался трассер ^{208}Pb – ^{235}U . Точность определения значений U/Pb отношения и содержаний U и Pb составила $\pm 0.5\%$. Холостое загрязнение не превышало 0.1 нг Pb и 0.05 нг U. Обработку экспериментальных данных проводили с помощью программ PbDAT (Ludwig, 1991) и ISOPLOT (Ludwig, 2003). При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана (Steiger, Jager, 1976). Поправки на обычный свинец введены в соответствии с модельными величинами (Stacey, Kramers, 1975). Все ошибки приведены на уровне 2σ .

Выделение циркона из ксенолита двупироксеновых эндербитов (проба 7554-4) проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Циркон представлен идиоморфными кристаллами призматического габитуса. Основными простыми формами являются призмы {100} и {110} и дипирамиды {111}, {101}, {201}, причем участие в ограничении множества мелких граней делает дипирамидальные головки кристаллов слаженными практически до окружной формы (рис. 6). Катодолюминесцентное исследование внутреннего строения показало, что все кристаллы имеют тонкую осцилляторную зональность. В отдельных случаях выявляются измененные зоны, приуроченные к крупным включениям (рис. 7).

Для U-Pb геохронологических исследований были отобраны под бинокуляром зерна циркона из трех размерных фракций, мкм: +100, –100 + 75 и –75 + 53. В двух первых фракциях цирконы призматические темно-фиолетового цвета, прозрачные,

³ Оксиды, в мас. %: $\text{SiO}_2 = 59.54$, $\text{TiO}_2 = 0.96$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.54$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2.55$, $\text{FeO} = 3.96$, $\text{MnO} = 0.09$, $\text{MgO} = 3.28$, $\text{CaO} = 3.26$, $\text{Na}_2\text{O} = 4.41$, $\text{K}_2\text{O} = 2.58$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.41$. Сумма – 99.54. П.п.п. – 0.96; координаты: $46^\circ 16' 56.5''$ с.ш. и $99^\circ 28' 42.4''$ в.д.



Рис. 4. Фотографии выходов ксенолитов гранулитов в гранат гиперстеновых чарнокитоидах бумбугерского комплекса. (а) – ксенолит гранулита основного состава с инъекциями гранатового чарнокита (точка 2 на рис. 2); (б) – ксенолит гранулита основного состава с инъекциями гранатового чарнокита (точка 2 на рис. 2); (в) – гиперстен-гранатовый гнейсовидный чарнокит с возрастом 1854 ± 5 млн лет; (г) – ксенолит гранат-гиперстеновых гранулитов (точка 3 на рис. 2); (д) – гиперстен-гранатовый чарнокит незатронутый рассланцеванием (точка 3 на рис. 2); (е) – ксенолиты гранулитов с инъекциями гранатового чарнокита (точка 3 на рис. 2).

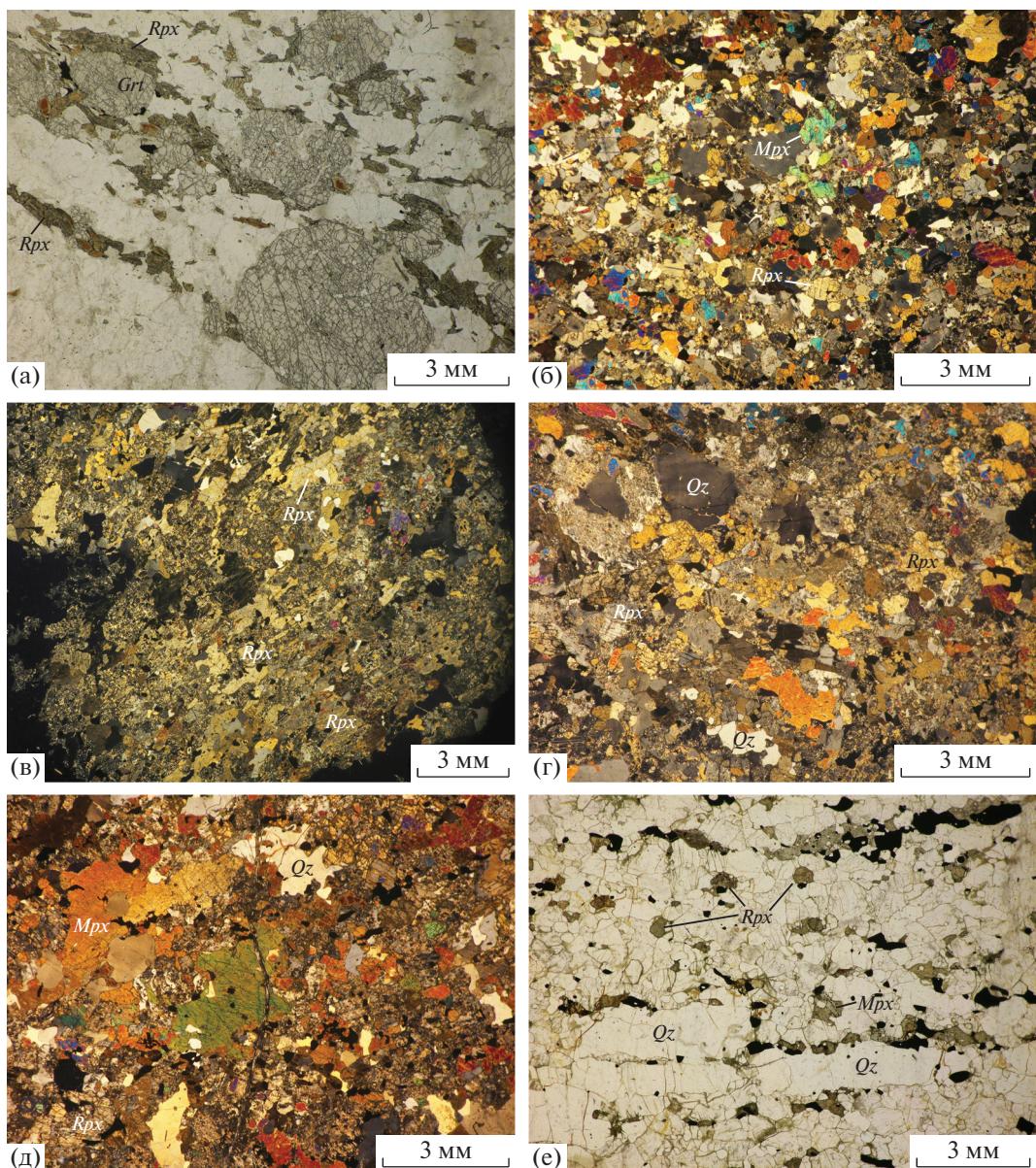


Рис. 5. Фотографии шлифов: (а) – гранат-гиперстеновый чарнокит с возрастом циркона 1854 ± 5 млн лет; (б) – двупироксеновый гранулит ксенолита; (в) – гиперстеновый гранулит из ксенолита; (г) – двупироксеновый гранулит; (д) – двупироксеновый кварцевый диорит (эндербит); (е) – гиперстеновый кварцевый диорит, 2364 ± 6 млн лет, гней-совидность по гиперстену. *Grt* – гранат, *Mpx* – моноклинный пироксен, *Rpx* – ромбический пироксен, *Qz* – кварц.

удлиненные $K_{\text{уд}} \sim 3$. В последней фракции цирконы в большинстве своем округлые, прозрачные, блестящие. Для циркона из фракции $-100 + 75$ было проведено селективное растворение (табл. 1).

Дискордия, рассчитанная для трех точек изотопного состава цирконов: 2, 3 и 4, в последней проведено селективное растворение (табл. 1), имеет верхнее пересечение с конкордией, соответствующее возрасту 2413 ± 12 млн лет ($\text{CKBO} = 0.1$) (рис. 8). Морфологические особенности и внутреннее строение циркона позволяют предполагать его магматическое происхождение, и полу-

ченную оценку 2413 ± 12 млн лет его возраста можно рассматривать как возраст кристаллизации расплава данных эндербитов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные к настоящему времени результаты геохронологических и изотопных исследований фиксируют многоэтапное проявление в раннедокембрийском Бумбугерском блоке Байда-рикского террейна процессов регионального метаморфизма, достигающего уровня гранулито-

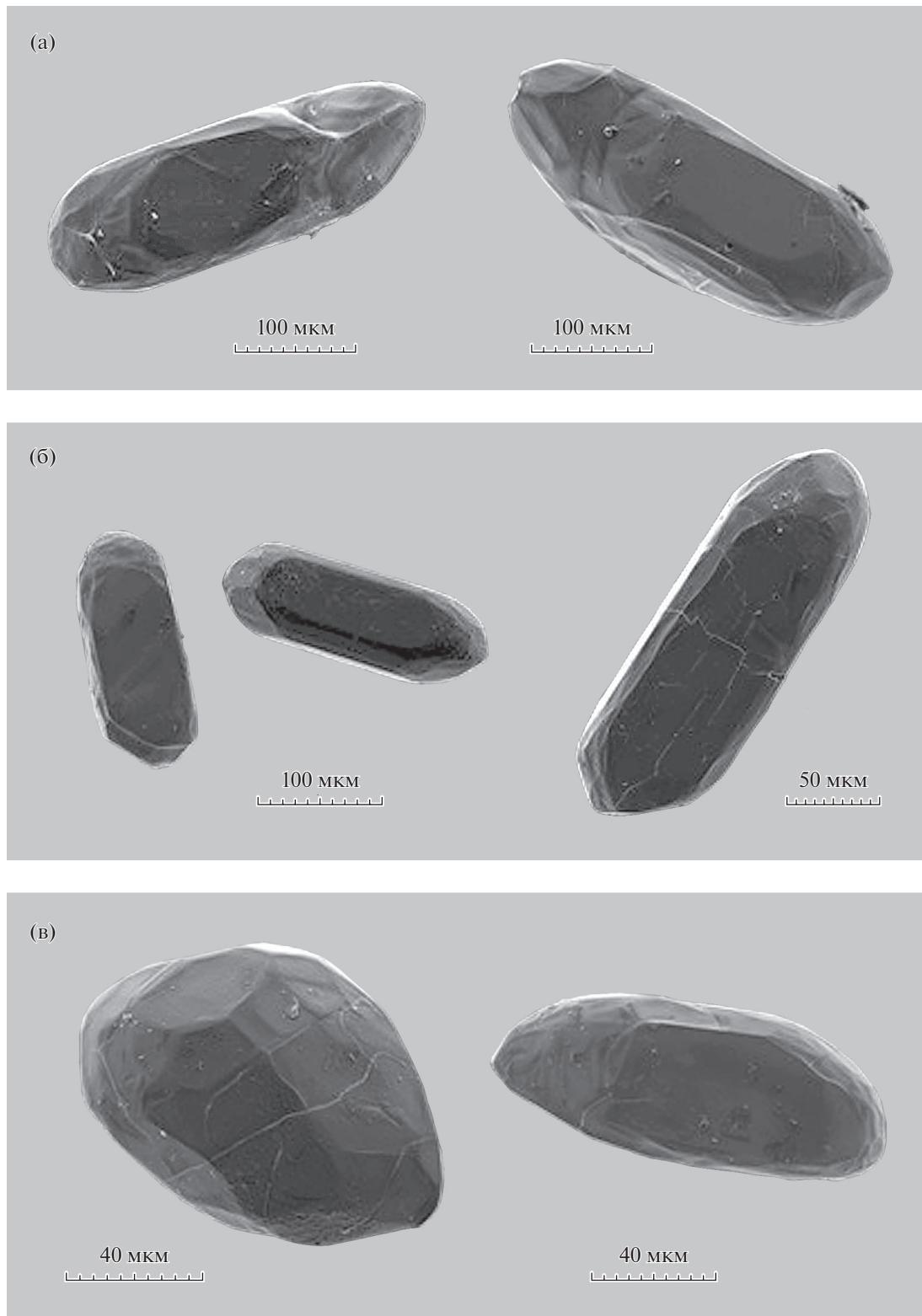


Рис. 6. Циркон из эндербита пробы 7554-4 трех размерных фракций, мкм: (а) +100; (б) –100 + 75 (в) –75 + 53. Фото получены на электронном микроскопе TESCAN MIRA3 в ГЕОХИ РАН. Циркон размерных фракций +100 мкм и –100 + 75 мкм представлен хорошо оформленными кристаллами со сглаженными вершинами ($K_{уд} = 1 : 3 – 1 : 4$). Циркон размерной фракции 75 + 53 мкм представлен округлыми и овальными зернами со сглаженными гранями.

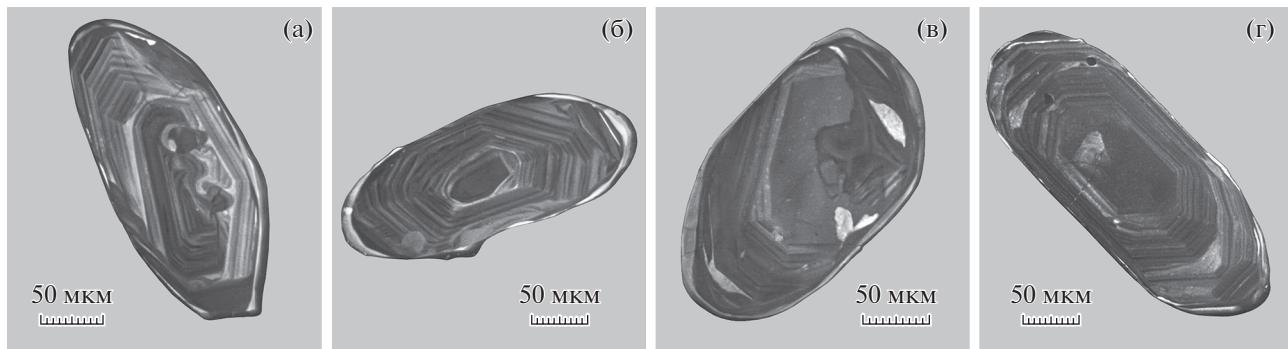


Рис. 7. Микрофотографии кристаллов циркона из пробы эндербита 7554-4, выполненные в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 в режиме катодолюминесценции.

вой фации. На современном эрозионном срезе метаморфизм гранулитовой фации, для которого было получено значение возраста 2514 ± 23 млн лет (Козаков и др., 2007), установлен в мигматизированных тоналитовых гнейсах позднеархейского байдарагинского комплекса, что примерно соответствует рубежу позднего архея и раннего протерозоя. Плагиогнейсы и амфиболиты при расчёте на возраст 2.7 млрд лет (Ранний докембрий ..., 1993) характеризуются величинами $\varepsilon_{\text{Nd}} = -0.9 \dots -3.7$ и значениями $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ в интервале 3.1–3.3 млрд лет (Козаков и др., 1997). Временной разрыв между значениями возраста кристаллизации и Nd-модельного возраста составляет около 500–600 млн лет. Можно предположить, что формирование ортопород байдарагинского комплекса происходило в обстановке активной континентальной окраины или энсиалической островной дуги (Козаков и др., 2007). Соответственно, для них проявление метаморфизма гранулитовой фации отражает переход от условий верхней коры к нижней при формировании метаморфической зональности. Выведение сформированных гранулитов на уровень амфиболитовой фации коррелирует с образованием главных картируемых прямых изоклинальных складок на рубеже около 1855 млн лет. При этом породы нижней коры ча-

стично могут перемещаться на уровень верхней коры. Примером этого могут быть гиперстеновые кварцевые диориты (эндербиты) (2364 ± 6 млн лет), переработанные в амфиболитовой фации (1850–1860 млн лет). Таким образом, в этот период породы уровня гранулитовой фации разного возраста (~ 2365 и ~ 1855 млн лет) были перемещены на уровень амфиболитовой фации.

В бумбугерском комплексе оценка возраста раннего эпизода метаморфизма гранулитовой фации имеет значение около 2360–2370 млн лет. По петрохимическим характеристикам пироксенсодержащие амфиболиты комплекса “контрастной” толщи соответствуют низкомагнезиальным и умеренно-щелочным базальтам, а гнейсы по составу соответствуют дацитам. Такие ассоциации характерны для рифтогенных структур континентов с достаточно мощной сиалической корой (Козаков и др., 2007). В целом, как отмечалось ранее, накопление терригенных пород бумбугерского комплекса происходило в возрастном интервале 2.55–2.36 млрд лет, а их источником могли быть метаморфизованные гнейсы байдарагинского комплекса – 2500–2550 млн лет (Козаков и др., 1997, 2007). Можно полагать, что для пород бумбугерского комплекса метаморфизм гранулитовой фации на рубеже около 2365 млн лет происходил

Таблица 1. Результаты U-Pb изотопных исследований циркона, пробы 7554-4 (координаты: $46^{\circ}16'56.5''$ с.ш. и $99^{\circ}28'42.4''$ в.д.)

№ п/п	Размер фракции (мкм) и ее характеристика	Навеска, мг	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
			Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	+100	1.7	100	206	2462	6.5578 ± 2	4.0967 ± 2	8.1515 ± 15	0.4010 ± 8	0.96	2248 ± 4	2174 ± 6	2316 ± 10
2	-100 + 75	1.5	102	229	3756	6.8282 ± 2	4.2664 ± 4	7.3886 ± 8	0.3743 ± 7	0.96	2160 ± 6	2050 ± 6	2266 ± 8
3	-75 + 53	1.6	113	259	3001	6.9242 ± 2	3.9092 ± 4	6.9653 ± 12	0.3602 ± 7	0.96	2107 ± 6	1983 ± 6	2230 ± 8
4	+100 CP*	40	—	—	29468	6.7234 ± 5	4.0805 ± 6	8.2521 ± 9	0.4033 ± 8	0.96	2184 ± 7	2259 ± 4	2328 ± 10

CP* – селективное растворение.

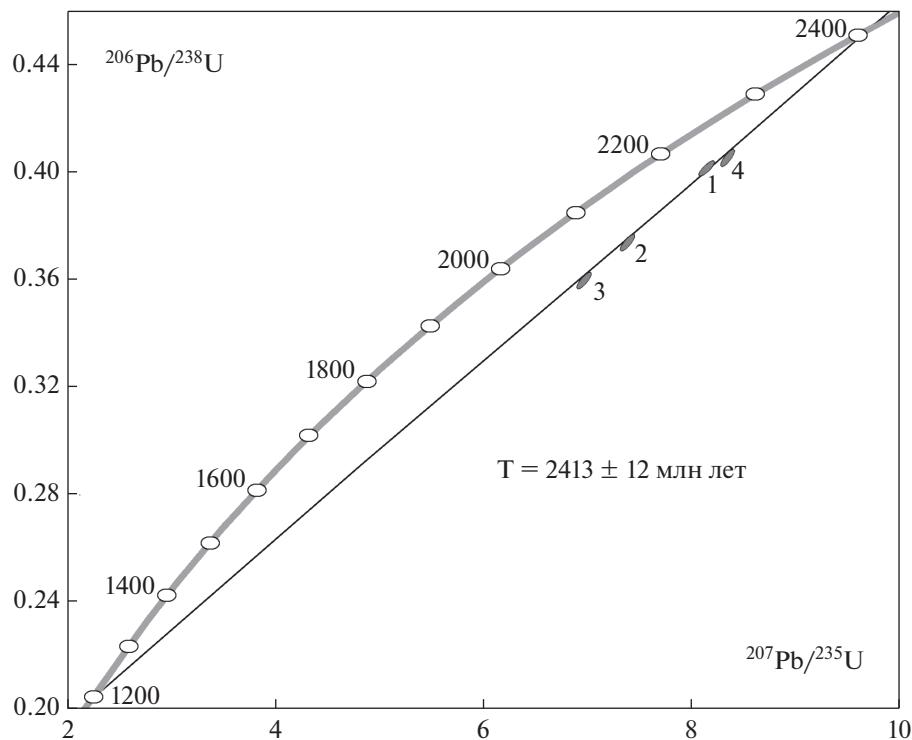


Рис. 8. Диаграмма с конкордией для цирконов из эндербита пробы 7554-4.

Номера точек соответствуют порядковым номерам в табл. 1. Точка 1 в построении дискордии не использована; использована точка 4 той же фракции (+100 мкм) после селективного растворения (СР).

при переходе от условий верхней коры к нижней при формировании метаморфической зональности. Вместе с тем наличие среди ксенолитов чарнокитоидов пород основного состава, в частности гранат-ортопироксен-клинопироксеновых гранулитов, свидетельствует о поступлении в область формирования нижней коры расплава мантийного происхождения и его смешении с коровым материалом (Kröner et al., 2017). Переработка пород гранулитовой фации (включая эндербиты) на уровне амфиболитовой фации связана с перемещением тектонических пластин в процессе метаморфизма (около 1854 ± 5 млн лет) при образовании главных картируемых прямых изоклинальных складок северо-западного простирания, определяющих структуру Бумбугерского блока Байда-рикского террейна.

Региональный метаморфизм (1850 – 1860 млн лет), с которым связана интенсивная переработка ранее метаморфизованных пород байдарагинского и бумбугерского комплексов, на современном эрозионном срезе не превышал уровня амфиболитовой фации. Однако ксенолиты метаморфических пород гранулитовой фации и двупироксеновые эндербиты (2364 ± 6 млн лет) были вынесены на поверхность синметаморфическими интрузивными

гранатовыми и энстатит-гранатовыми чарнокитоидами, возраст которых 1854 ± 5 млн лет (Козаков, 1986; Ранний докембрий ..., 1993). Их внедрение происходило в интервале между образованием лежачих складок и субвертикально ориентированных прямых изоклинальных складок. Последние определяют современную структуру ранее сформированных метаморфических пород раннедокембрийского блока и, соответственно, структурное положение массивов гранатовых чарнокитоидов и эндербитов, а также наложенную на них кристаллизационную сланцеватость (рис. 2, 3). Неизмененные парагенезисы гранулитовой фации (гранат + гиперстен + плагиоклаз \pm кварц; клинопироксен + ортопироксен + плагиоклаз) сохраняются в центральных частях ксенолитов, в краевых частях ксенолитов проявлена амфиболизация пироксенов, но кристаллизационная сланцеватость проявлена ограниченно или не развита. P - T условия их формирования соответствовали гранулитовой фации, но кристаллизация минеральных парагенезисов не сопровождалась деформациями. Наложение кристаллизационной сланцеватости по гиперстену показывает, что порода была уже закристаллизована, в противном случае фиксировалась бы трахитоидность и/или

структурой течения. Наложение регионально развитой в породах Бумбугерского блока кристаллизационной сланцеватости амфиболитовой фации, скорее всего, связано с метаморфизмом возраста ~ 1854 – 1850 млн лет.

Другое положение занимает ксенолит эндербитов (2413 ± 12 млн лет) в гранатовых чарнокитоидах. В нем не проявлено рассланцевание в условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций, как это установлено для массива эндербитов (2364 ± 6 млн лет) (рис. 3). Однако, следует отметить, что в гранатовых чарнокитоидах (рис. 2), в которых был установлен этот ксенолит, также не проявлено рассланцевание в условиях амфиболитовой фации. Другие участки массива переработаны в условиях амфиболитовой фации при образовании главных картируемых северо-западных складок. Вместе с тем установленный парагенезис ромбического и моноклинного пироксенов дает основание полагать, что кристаллизация эндербита (2413 ± 12 млн лет) происходила на уровне гранулитовой фации в статическом режиме – на уровне нижней коры. Более поздние же эндербиты с возрастом 2364 ± 6 млн лет (рис. 3) формировались как синметаморфические. Наложение на них кристаллизационной сланцеватости по гиперстену показывает, что ко времени данного этапа метаморфизма гранулитовой фации они уже в основном были закристаллизованы. В них также развита наложенная сланцеватость амфиболитовой фации (рис. 3), но она не затрагивает упомянутый ксенолит эндербитов, возраст которого 2413 ± 12 млн лет, и расположенные рядом с ним ксенолиты гранат-гиперстено-вых и двупироксеновых гранулитов.

Можно предположить, что на данном участке, в котором относительно слабо проявлено рассланцевание в условиях амфиболитовой фации (точки 1 и 2, на рис. 2), в расплаве гранатовых чарнокитоидов (1854 ± 5 млн лет) представлены гранулиты и эндербиты разных этапов и уровней формирования раннепротерозойской нижней коры. Ранее в них нами были найдены ксенолиты гранулитов, для которых был получен возраст циркона 1850 ± 4 млн лет (Ранний докембрий ..., 1993), и в предложенной позднее схеме была рассмотрена модель формирования раннепротерозойской нижней коры только в возрастном интервале 1860 – 1850 млн лет (Kröner et al., 2017). Более ранний эпизод метаморфизма гранулитовой фации (2370 – 2360 млн лет) мы связывали с формированием нижней коры, а синметаморфические эндербиты (2364 ± 6 млн лет) рассматривали в качестве коровых образований, которые были вызваны относительно локальным повышением степени метаморфизма. Установленное нами присутствие в гранат-гиперстеновых чарнокитоидах ксенолита более древнего эндербита (2413 ± 12 млн лет), ассоциирующего с многочисленными ксенолитами метабазитов основного состава (гранули-

тов), дало основание для выделения более ранней стадии формирования нижней коры в геологическом развитии Бумбугерского блока. При этом нельзя исключать возможного присутствия фрагментов архейской нижней коры, которая входила в состав источников пород бумбугерского комплекса.

В целом полученные к настоящему времени результаты геолого-геохронологических исследований Бумбугерского блока Байдарикского террейна фиксируют в его развитии проявление регионального метаморфизма, достигающего уровня гранулитовой фации в возрастных интервалах 2410 – 2360 и 1850 – 1860 млн лет (рис. 9). Сходные оценки возраста установлены для гранитоидов и метаморфизма в комплексе Лулян (Luliang Complex) фундамента Северо-Китайского кратона: 2375 ± 10 и 1872 ± 7 млн лет соответственно (U-Th-Pb, SIMS, Zhao et al., 2008). Реконструкция возможного положения Бумбугерского блока Байдарикского террейна⁴ в раннем протерозое, сделанная А.Н. Диденко на основе анализа палеомагнитных данных, была получена для постметаморфических субщелочных гранитов (1825 ± 5 млн лет), позволила сделать заключение о близости данного блока и Сино-Корейского кратона (Козаков и др., 2007). Это положение предположительно сохранилось с конца раннего протерозоя, когда они были включены в состав суперконтинента Колумбия (Rogers, Santosh, 2002), но до образования суперконтинента Родиния (Condie, 2001). В процессе распада Родинии и трансформации ее в Пангею раннедокембрийский блок Байдарикского террейна перемещался совместно с блоками Восточной Гондваны (включая блоки Северного и Южного Китая, Тарима) (Моссаковский и др., 1993; Диденко и др., 1994).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование на рубеже 2370 млн лет расплава и его кристаллизация, с которой связано образование двупироксеновых эндербитов, дает основание предполагать проявление метаморфизма гранулитовой фации более раннего этапа и, соответственно, нижней коры. Это может быть связано с проявлением в данный период мантийного магматизма с сохранением магматических камер, в которых происходила кристаллизация, а затем в ходе тектонических процессов их выведение в более верхние уровни, где они подвергались метаморфизму соответствующего уровня.

⁴ Ранее Байдарикский террейн включали в состав фундамента Дзабханского микроконтинента, рассматриваемого как раннедокембрийский. Позднее было установлено, что раннедокембрийским является только Бумбугерский блок и реконструкция показывает его возможное положение.

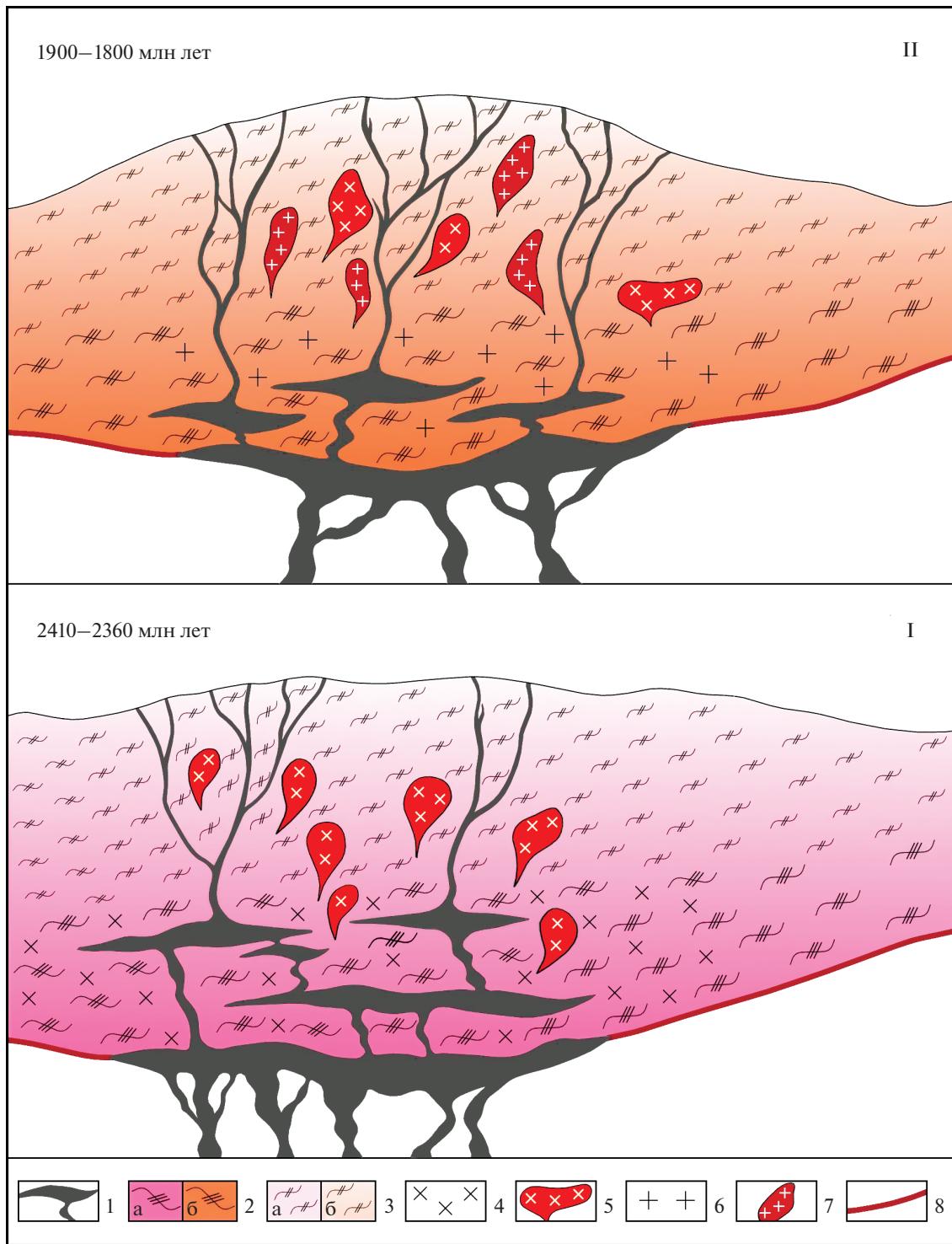


Рис. 9. Принципиальная схема формирования раннепротерозойской нижней коры в геологическом развитии Бумбугерского блока Байдарикского террейна: I – 2400–2370 млн лет II – 1860–1850 млн лет, по (Козаков и др., 1997, 2007; Kröner et al., 2015, 2017).

1 — магма основного состава, связанная с мантийным плюмом, вызывающим метаморфизм в Бумбугерском блоке; 2 — породы уровня нижней коры: (а) стадии 2400–2370 млн лет, (б) стадии 1860–1850 млн лет; 3 — породы уровня верхней коры: (а) стадии 2400–2370 млн лет, (б) стадии 1860–1850 млн лет; 4 — область образования расплава, формирующего эндербиты с возрастом 2413 ± 12 млн лет; 5 — массивы аллохтонных эндербитов (2365 млн лет), перемещенные на уровень верхней коры; 6 — область образования расплава, формирующего гранат-гиперстеновые чарнокиты с возрастом 1854 ± 5 млн лет; 7 — массивы аллохтонных чарнокитов (1854 ± 5 млн лет), перемещенные на уровень верхней коры; 8 — граница Мохо.

Все это может соответствовать установленным стадиям формирования раннепротерозойской нижней коры в развитии Бумбугерского блока. Присутствие ксенолита эндербита (2413 ± 12 млн лет) в чарнокитах (1854 ± 5 млн лет) показывает, что расплав данного эндербита формировался на уровне нижней коры более раннего этапа – $2410\text{--}2420$ млн лет. При этом ксенолиты гранулитов основного состава (1850 ± 4 млн лет) были метаморфизованы при $800 \pm 27^\circ\text{C}$ и 6.8 ± 0.6 кбар сразу после кристаллизации (Kröner et al., 2017). Присутствие разновозрастных ксенолитов в расплаве чарнокитов (1854 ± 5 млн лет) позволяет предполагать близкий возраст ксенолитов и вмещающего расплава. Синметаморфические чарнокиты кристаллизовались из расплава, полученного при смещении архейского и раннепротерозойского источников нижней коры. В результате эти породы имеют значения Nd-модельного возраста ~ 2500 млн лет (Козаков и др., 1997), в то время как постметаморфические субщелочные граниты – ~ 3000 млн лет. Таким образом, фиксируется преобладание архейского источника, который характерен для пород байдарагинского комплекса (Козаков и др., 1997). Следует отметить, что в породообразующих минералах гранатовых чарнокитов температура гомогенизации расплавных включений определена как $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$, а кристаллизация происходила на уровне амфиболитовой фации – 700°C и 5–6 кбар (Козаков и др., 1997). Можно предполагать, что мантийные расплавы основного состава поступали в нижнюю кору и вызывали метаморфизм, мигматизацию и анатексис – в результате сформированные расплавы представляли собой смеси мантийных и коровых источников (рис. 9).

Присутствие в гнейсах бумбугерского комплекса дегритовых цирконов с возрастом около 2500 млн лет (Козаков и др., 2007) показывает, что породы архейской нижней коры были размыты до уровня гранулитовой фации и затем становились источниками для раннепротерозойской верхней и нижней коры. Сформированные породы раннего протерозоя в диапазоне 2.45–2.55 млрд лет переходят на уровень нижней коры раннего протерозоя к рубежу 2370 млн лет.

В процессе регионального метаморфизма в возрастном интервале 1850–1860 млн лет на уровне гранулитовой фации происходило формирование расплава и кристаллизация чарнокитов (1854 ± 5 млн лет), которые выносят гранулы практически одинакового с ними возраста (1850 ± 4 млн лет) и эндебиты (2413 ± 12 млн лет) более ранней стадии образования нижней коры (рис. 9). В свою очередь, породы нижней коры архея и раннего протерозоя входят в состав источников терригенных пород и коровых гранитоидов неопротерозоя и фанерозоя (Козаков и др., 2021а, 2021б, 2021в; Ковач и др., 2019).

Проведенные исследования дают основание предполагать взаимосвязь процессов полиметаморфизма и формирования нижней коры. Мантийные расплавы основного состава при внедрении вызывают метаморфизм и связанные с ним мигматизацию и анатексис пород ранее сформированной нижней коры. Этот метаморфизм достигает уровня гранулитовой фации и фактически определяет новую стадию формирования нижней коры.

Благодарности. Авторы искренне признательны и выражают благодарность В.В. Ярмолюку и А.М. Ларину за предложения и рекомендации, сделанные при подготовке рукописи, что позволило более четко сформулировать изложение полученных результатов и выводы.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00297) и в рамках темы ИГГД РАН НИР FMNU-2019-0005, определение U-Pb возраста цирконов выполнено по госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимова И.В., Левицкий И.В., Сальникова Е.Б. и др. Возраст фундамента Гарганской глыбы (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований // Изотопные системы и время геологических процессов. Материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии. СПб: “ИП Каталкина”, 2009. Т. 1. С. 34–35.
- Бибикова Е.В., Байкова В.С., Гороховский Б.М. и др. Раннепротерозойский рубеж докембрия Байдарикского блока Центральной Монголии // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1990. № 7. С. 57–62.
- Беличенко В.Г., Боос Р.Г. Боксон–Хубсугул–Дзабханский палеомикроконтинент в структуре центрально-азиатских палеозоид // Геология и геофизика. 1988. № 12. С. 20–28.
- Беличенко В.Г., Скляров Е.В., Добрецов Н.Л., Томуртогoo О. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7/8. С. 29–40.
- Диденко А.Н., Моссаковский А.А., Печерский Д.М. и др. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7/8. С. 59–75.
- Зайцев Н.С. Тектоника Монголии // Эволюция геологических процессов и металлогения Монголии. М.: Наука, 1990. С. 15–22.
- Ковач В.П., Козаков И.К., Ван К.-Л. (K.-L. Wang) и др. Возраст и источники терригенных пород базальной пачки цаганаоломской свиты Дзабханского террейна, Центрально-Азиатский складчатый пояс: результаты U-Th-Pb геохронологических, Lu-Hf и Sm-Nd изотопных исследований // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2019. Т. 27. № 5. С. 63–81.
- Козаков И.К. Докембрейские инфраструктурные комплексы Монголии. Л.: Наука, 1986. 144 с.
- Козаков И.К., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. Корообразующие процессы в геологическом развитии

Байдарикского блока Центральной Монголии: Sm-Nd изотопные данные // Петрология. 1997. Т. 5. № 3. С. 240–248.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Котов А.Б. и др. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования кристаллических комплексов восточного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Проблемы тектоники Центральной Азии. М.: ГЕОС, 2005. С. 137–170.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Wang T. и др. Кристаллические комплексы нижнего докембрая Дзабханского микроконтинента Центральной Азии: возраст, источники, тектоническая позиция // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 2. С. 3–24.

Козаков И.К., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. и др. Кристаллические комплексы Тарбагатайского блока раннекаледонского супертеррейна Центральной Азии // Петрология. 2011. Т. 19. № 4. С. 445–464.

Козаков И.К., Ковач В.П., Бибикова Е.В. и др. Позднерифейский этап формирования кристаллических комплексов Дзабханского микроконтинента: геологические, геохронологические и Nd изотопно-geoхимические данные // Петрология. 2014. Т. 22. № 5. С. 516–545.

Козаков И.К., Кирнозова Т.И., Ковач В.П. и др. Позднерифейский возраст кристаллического фундамента карбонатного чехла Дзабханского микроконтинента // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23. № 3. С. 3–12.

Козаков И.К., Кузнецов А.Б., Эрдэнэжаргал Ч. и др. Неопротерозойские комплексы фундамента шельфового чехла Дзабханского террейна восточного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. Т. 25. № 5. С. 3–16.

Козаков И.К., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. и др. Геодинамическая обстановка формирования поли- и монометаморфических комплексов Южно-Алтайского метаморфического пояса, Центрально-Азиатский складчатый пояс // Петрология. 2019. Т. 27. № 3. С. 233–257.

Козаков И.К., Анисимова И.В., Сальникова Е.Б. и др. Анортозиты Олонхудукского массива Байдарикского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: геологическое положение, возраст // Петрология. 2020. Т. 28. № 2. С. 139–149.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Ковач В.П. и др. Формирование неопротерозойской континентальной коры в структурах центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2021а. Т. 29. № 2. С. 55–65.

Козаков И.К., Аносова М.О., Кирнозова Т.И., Плоткина Ю.В. Формирование кристаллических комплексов Тацангольского блока Южно-Хангайского метаморфического пояса позднего неопротерозоя, Центрально-Азиатский складчатый пояс // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021б. Т. 29. № 2. С. 23–36

Козаков И.К., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. и др. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования метаморфических комплексов юго-западной части Тувино-Монгольского террейна, Центрально-Азиатский складчатый пояс // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021в. Т. 29. № 4. С. 3–26.

Котов А.Б., Козаков И.К., Бибикова Е.В. и др. Продолжительность эпизодов регионального метаморфизма в областях полициклического развития эндогенных процессов: результаты U-Pb геохронологических исследований // Петрология. 1995. Т. 3. № 6. С. 622–631.

Митрофанов Ф.П., Бибикова Е.В., Козаков И.К. и др. Архейский изотопный возраст тоналитовых “серых” гнейсов в структурах каледонид Центральной Монголии // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 2. С. 670–674.

Моссаковский А.А., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н. Центрально-Азиатский складчатый пояс: геодинамическая эволюция и история формирования // Геотектоника. 1993. № 6. С. 3–33.

Ранний докембрий Центрально-Азиатского складчатого пояса // Отв. ред. И.К. Козаков. СПб.: Наука, 1993. 266 с.

Судовиков Н.Г., Глебовицкий В.А., Сергеев А.С. и др. Геологическое развитие глубинных зон подвижных поясов. Л.: Изд. Наука, ЛО, 1969. 228 с.

Тектоника Монгольской Народной Республики // Под ред. А.Л. Яншина. М.: Наука, 1974. 283 с.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Лебедев В.И. Неопротерозойские магматические комплексы Сонгинского блока (Монголия): проблема формирования и корреляции докембрийских террейнов Центрально-Азиатского орогенного пояса // Петрология. 2017. Т. 25. № 4. С. 362–394.

Ярмолюк В.В., Дегтярев К.Е. Докембрйские терреины Центрально-Азиатского орогенного пояса: сравнительная характеристика, типизация и особенности тектонической эволюции // Геотектоника. 2019. № 1. С. 3–43.

Condie K.C. Continental Growth During Formation of Rodinia // Gondwana Res. 2001. V. 4. № 1. P. 5–16.

Badarch G., Cunningham W.D., Windley B.F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for Phanerozoic crustal growth of Central Asia // J. Asian Earth Sci. 2002. V. 21. P. 87–110.

Bold U., Isozaki Yu., Aoki Sh. et al. Precambrian basement, provenance implication, and tectonic evolution of the Garagan block of the Tuva-Mongolia terranes, Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Res. 2019. V. 75. P. 172–183.

Buriánek D., Schulmann K., Hrdličková K. et al. Geochemical and geochronological constraints on distinct Early Neoproterozoic and Cambrian accretionary events along southern margin of the Baydrag Continent in western Mongolia // Gondwana Res. 2017. V. 47. P. 200–227.

Demoux A., Kröner A., Liu D., Badarch G. Precambrian crystalline basement in southern Mongolia as revealed by SHRIMP zircon dating // Int. J. Earth Sci. 2009. V. 98. P. 1365–1380.

Jian P., Kröner A., Wyndley B.F. et al. Zircon age of the Bayankhongor ophiolite melange and associated rocks: Time constraints on Neoproterozoic to Cambrian accretionary and collisional orogenesis in Central Mongolia // Precambrian Res. 2010. V. 177. P. 162–180.

Kovach V., Kozakov I., Kröner A. et al. Early Neoproterozoic crustal growth and microcontinent formation of the north-central Central Asian Orogenic Belt: New geological, geo-chronological, and Nd-Hf isotopic data on the Mélange Zone within the Zavkhan terrane, western Mongolia // Gondwana Res. 2021. V. 91. P. 254–276.

- Kovach V.P., Matukov D.L., Berezhnaya N.G. et al.* SHRIMP zircon age of the Gargan block tonalites – find early Precambrian basement of the Tuvino-Mongolian microcontinent, Central Asia mobile belt // 32th IGC. Session T31.01 – Tectonics of Precambrian mobile belts. Abstract. Florence. 2004. V. 1. P. 1263.
- Krogh T.E.* A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination // Geochim. Cosmochim. Acta. 1973. V. 37. P. 485–494.
- Kröner A., Kovach V., Kozakov I. et al.* Zircon ages and Nd-Hf isotopes in UHT granulites of the Ider Complex: A cratonic terrane within the Central Asian Orogenic Belt in NW Mongolia // Gondwana Res. 2015. V. 27. P. 1392–1406.
- Kröner A., Kovach V., Kozakov I. et al.* Granulites and Palaeoproterozoic lower crust of the Baidarik Block, Central Asian Orogenic Belt of NW Mongolia // J. Asian Earth Sci. 2017. V. 145. Pt. B. P. 393–407.
- Lu S., Li H., Zhang Ch., Niu G.* Geological and Geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments // Precamb. Res. 2008a. V. 160. Is. 1–2. P. 94–107.
- Lu S., Zhao G., Wang Hu., Hao G.* Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review // Precamb. Res. 2008b. V. 160. P. 77–93.
- Ludwig K.R.* PbDat for MS-DOS, version 1.21 // U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 88-542. 1991. 35 p.
- Ludwig K.R.* Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Spec. Publ. 2003. V. 4.
- Rogers J.J.W., Santosh M.* Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent // Gondwana Res. 2002. V. 5. № 1. P. 5–22.
- Stacey J.S., Kramers I.D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26. P. 207–221.
- Steiger R.H., Jager E.* Subcommission of geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Lett. 1976. V. 36. P. 359–362.
- Zhao G., Wilde S.A., Sun Min et al.* SHRIMP U-Pb zircon ages implications for the accretions and evolution of Trans-North China Orogen // Precamb. Res. 2008. V. 60. P. 213–226.

Stages of the Early Proterozoic Lower Crust Formation in the Structures of the Central Asian Folded Belt (on the Example of the Baydarik Terrane)

I. K. Kozakov¹, T. I. Kirnozova², M. M. Fugzan², and Ju. V. Plotkina¹

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The structure of the Central Asian Folded Belt (CAFБ) is determined by a combination of Neoproterozoic and Paleozoic Paleoceanic and island-arc complexes and blocks with Precambrian foundations. Among the largest blocks in the central segment of the CAFБ, the Dzabkhan terrane was singled out, which was initially considered as a microcontinent with an Early Precambrian foundation. The structure of the Central Asian Folded Belt is determined by a combination of Neoproterozoic and Paleozoic paleoceanic and island-arc complexes and blocks with Precambrian foundations. Among the largest blocks in the central segment of the CAFБ, the Dzabkhan terrane was singled out, which was initially considered as a microcontinent with an Early Precambrian foundation. It included the Baidarik, Tarbagatai, Songinsky and, in fact, Dzabkhan terranes, attributed to the Early Precambrian “cratonic” terranes. Studies conducted to date have shown that Early Precambrian complexes were established only in the northwestern part of the Baydarik terrane and the Ider complex of the Tarbagatai terrane. Common to them is the formation of a folded structure at the turn of about 1855 million years, which is characteristic of the foundation of the ancient cratons of Northern Eurasia. A feature of the Early Proterozoic charnockitoids of the Baydarik terrane with an age of 1854 ± 5 million years is the presence of xenoliths of granulite facies rocks in them. Previously, these xenoliths were considered as belonging to the rocks of the Early Proterozoic Bumbuger or Archean Baidaragin complexes containing this array of charnockitoids. However, for zircons from xenoliths of two-pyroxene granulites, the age of 1850 ± 4 Ma was established, almost coinciding with the age of the charnockites containing them— 1854 ± 5 Ma. These data showed that fragments of the Early Proterozoic lower crust were brought into the metamorphism zone of the amphibolite facies with charnockitoids whose melts were formed at the level of the lower crust. The obtained new results of the dating of zircon (2413 ± 12 Ma) isolated from the xenolith of the two-pyroxene quartz diorite (enderbite) in these charnockitoids allowed a new look at the features of the Early Proterozoic metamorphism of the granulite facies, which reflect the stages of formation of the lower crust in the geological development of the Early Precambrian complexes of the Baydarik terrane..

Keywords: geochronology, zircons, archaean, early Proterozoic, granulites, lower crust, Dzabkhan terrane, Central Asian folded belt