УДК 552.3+550.4+550.93+551.24

ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА И ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ ИНТРУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВЕНДСКОЙ ОСТРОВОДУЖНОЙ СТРУКТУРЫ ОЗЕРНОЙ ЗОНЫ МОНГОЛИИ

С.Н. Руднев¹, О.М. Туркина¹, В.Г. Мальковец^{1, 2}, Е.А. Белоусова³, П.А. Серов⁴, В.Ю. Киселева¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Научно-исследовательское геологическое предприятие АК АЛРОСА, 678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия

³ Australian Research Council Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems / GEMOC, Department of Earth and Planetary Science, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia

⁴ Геологический институт КНЦ РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

Приведены данные по геохимии, Sr-Nd изотопному составу пород и Lu-Hf изотопному составу магматических и ксеногенных цирконов из гранитоидов и габброидов, приуроченных к вендской островодужной структуре Озерной зоны. Плагиогранитоиды, габброиды и кварцевые диориты (559—542 млн лет) относятся к вендскому субдукционному этапу магматизма, тогда как двуполевошпатовые граниты (~483 млн лет) маркируют кембрийско-ордовикские аккреционно-коллизионные процессы.

Установлено, что мафическим источником плагиогранитоидов служили вулканиты вендской островной дуги и/или ее океанического основания, образованные из деплетированной мантии. Это доказывается перекрывающимися положительными величинами є_{ма} плагиогранитоидов и вмещающих вулканитов, а также близкими к DM значениями єнг магматических цирконов из плагиогранитоидов. Более низкие величины є_{№ 1} габбро и кварцевых диоритов Таван-Хаирханского и Шутхуинского массивов и є_{нг} цирконов из этих пород, а также повышенные $({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_0$ и концентрации K₂O, Rb, Th свидетельствуют в пользу генерации из менее деплетированного мантийного источника, представленного перидотитами мантийного клина, изменение изотопного состава которого произошло на предшествующем субдукционном этапе, под действием флюидов и при участии субдуцированных осадков. Наименее радиогенный изотопный состав Hf магматических и ксеногенных цирконов из ордовикских аккреционно-коллизионных двуполевошпатовых гранитов массива Их-Замын предполагают их формирование в результате плавления венд-кембрийской островодужной коры при участии более дифференцированных коровых источников, обогащенных Th, Nb, легкими РЗЭ и имеющих пониженные головораст ксеногенных цирконов (≤716 млн лет) в изученных гранитоидах и габброидах и сходство их изотопного Hf состава с магматическими цирконам из тех же пород подтверждают формирование вендской островной дуги Озерной зоны во внутриокеанической обстановке на значительном удалении от древних континентальных источников, подобных Дзабханскому микроконтиненту.

Интрузивный магматизм, геохимия, изотопия, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Западная Монголия

INTRUSIVE COMPLEXES OF THE LATE NEOPROTEROZOIC ISLAND ARC STRUCTURE OF THE LAKE ZONE (Mongolia): ISOTOPE SYSTEMATICS AND SOURCES OF MELTS

S.N. Rudnev, O.M. Turkina, V.G. Mal'kovets, E.A. Belousova, P.A. Serov, V.Yu. Kiseleva

We present data on the geochemical and Sr–Nd isotope compositions of rocks and on the Lu–Hf isotope composition of magmatic and xenogenic zircons from granitoids and gabbroids of the late Neoproterozoic island arc structure of the Lake Zone. Plagiogranitoids, gabbroids, and quartz diorites (559–542 Ma) formed at the Vendian subduction stage of magmatism, and two-feldspathic granites (~483 Ma) mark Cambrian–Ordovician accretion–collision processes.

We have established that the volcanic rocks of the late Neoproterozoic island arc and/or its oceanic base, which formed from the depleted mantle, were the mafic source of plagiogranitoids. This is proved by the overlapping positive ε_{Nd} values of plagiogranitoids and the host volcanic rocks and by the commensurate ε_{Hf} values of magmatic zircons from the plagiogranitoids and depleted mantle. The lower ε_{Nd} values of gabbro and quartz diorites from the Tavan Hayrhan and Shuthuyn plutons, the lower ε_{Hf} values of zircons from these rocks, and the high ($^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ ratios and K₂O, Rb, and Th contents point to the generation of these rocks from a less depleted mantle source, namely, mantle wedge peridotites. The isotope composition of the latter changed at the

previous subduction stage under the impact of fluids and with the contribution of subducted sediments. The least radiogenic Hf isotope composition of magmatic and xenogenic zircons from Ordovician accretion–collisional two-feldspathic granites of the Ih Zamiin pluton suggests their formation through the melting of the late Neoproterozoic–Cambrian island arc crust with the contribution of more differentiated crustal sources enriched in Th, Nb, and LREE and characterized by low ε_{Nd} values. The age of xenogenic zircons from the same rocks confirm the formation of the late Neoproterozoic island arc of the Lake Zone in an intraoceanic setting far from ancient continental sources similar to the Dzavhan microcontinent.

Intrusive magmatism, geochemistry, isotopy, Central Asian Orogenic Belt, Western Mongolia

введение

Озерная зона Западной Монголии представляет собой островодужный венд-раннекембрийский террейн [Дергунов, 1989; Dergunov et al., 2001; Badarch et al., 2002], являющийся одним из крупных фрагментов каледонского супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Озерная зона ранних каледонид на востоке граничит с докембрийскими образованиями Дзабханского микроконтинента, а на западе и юго-западе — с поздними каледонидами Монгольского и Гобийского Алтая (рис. 1). В ее составе выделяются тектонически совмещенные блоки и пластины, сложенные разными по вещественному составу фрагментами венд-раннекембрийских островодужных вулканогенных и офиолитовых комплексов, которые в кембро-ордовике в результате аккреционно-коллизионных процессов были причленены к Дзабханскому микроконтиненту, что в конечном итоге определило покровно-складчатое строение Озерной зоны.

Геологические, геохронологические, петрогеохимические и изотопные исследования вулканических и осадочных разрезов Озерной зоны позволили выделить в ее строении две островодужные системы: вендскую (~570 млн лет) и раннекембрийскую (545—540 млн лет), которые формировались во внутриокеанических обстановках на значительном удалении от докембрийских блоков (например, Дзабханский микроконтинент) [Коваленко и др., 2004; Ярмолюк и др., 2011; Ковач и др., 2011]. Вендские островодужные вулканогенные комплексы (базальты, андезибазальты, дациты и риолиты) преимущественно развиты в восточной части Озерной зоны, а раннекембрийские (преимущественно андезиты) — в ее западной части. Согласно опубликованным данным, аккреция этих двух островодужных систем и последующая их обдукция (в первую очередь вендской островной дуги и подстилающих ее вендских (573—560 млн лет) офиолитов хр. Дариби и Хан-Тайшири [Хаин и др., 1995; Гибшер и др., 2001; Козаков и др., 2002; Khain et al., 2003; Jian et al., 2014]) на докембрийские образования Дзабханского микроконтинента происходили на рубеже 511—484 млн лет [Jian et al., 2014].

Согласно Nd изотопному составу вендских (ε_{Nd} = +9.9...+8.2) и раннекембрийских (ε_{Nd} = +9.8...+7.3) вулканических комплексов, кора Озерной зоны была образована из деплетированных мантийных источников с возможным вовлечением в область магмогенерации более древнего материала в форме субдуцированных осадков [Jahn et al., 2000a,b; Jahn, 2004; Ярмолюк и др., 2011, 2012; Ковач и др., 2011; Kröner et al., 2014].

С вендским и раннекембрийским островодужным вулканизмом тесно ассоциирует габброидный и диорит-тоналит-плагиогранитный магматизм (см. рис. 1). В пределах раннекембрийской островной дуги габброиды и плагиогранитоиды образовались в интервале 535—515 млн лет [Коваленко и др., 2004; Руднев и др., 2009, 2012, 2019; Ярмолюк и др., 2011]. U-Pb датирование цирконов из гранитоидов и габброидов Таван-Хаирханского, Восточно-Баянцаганского, Баян-Цаган-Ула, Тунгалагского, Три Холма, Шутхуинского и Их-Замын массивов, расположенных в области развития вендских островодужных вулканитов, показало, что их становление происходило в диапазоне от 559 до 483 млн лет [Руднев и др., 2021]. При этом собственно вендские островодужные интрузии образовались в узком интервале 559—542 млн лет, тогда как граниты массива Их-Замын (~483 млн лет) формировались уже на аккреционно-коллизионной стадии развития региона. U-Pb возраст ксеногенного циркона из пород вышеупомянутых массивов составляет от 716 до 529 млн лет [Руднев и др., 2021], что подтверждает ранее сделанный вывод [Ярмолюк и др., 2011; Ковач и др., 2011; Руднев и др., 2019] о формировании вендских и раннекембрийских внутриокеанических островодужных комплексов на значительном удалении от области эрозии докембрийской коры Дзабханского микроконтинента.

Целью настоящей работы является выяснение условий формирования исходных расплавов и характера магмообразующих источников для плагиогранитоидов и габброидов вендского возраста (Таван-Хаирханский, Восточно-Баянцаганский, Баян-Цаган-Ула, Тунгалагский, Три Холма и Шутхуинский массивы) и гранитов ордовикского возраста (массив Их-Замын), расположенных в поле развития вендских островодужных вулканогенных комплексов. Более подробная информация о составе и строении этих массивов дана в работах [Руднев и др., 2012, 2021]. Авторами статьи было проведено геохимическое и изотопно-геохимическое исследование (Sm-Nd и Rb-Sr методы) пород вышеупомянутых массивов, а также анализ Hf изотопного состава разновозрастных генераций магматического и ксеногенного циркона. Использование Hf изотопных характеристик магматического и ксеногенного циркона, в отличие от Sm-Nd изотопных исследований пород, позволяет более корректно оценить вклад различных субстратов в генезис гранитоидов и габброидов на различных геодинамических этапах развития региона.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержания петрогенных элементов определены рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре ARL-9900 XL в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, Россия, аналитики Н.Г. Карманова, А.Н. Торяник). Содержания редких и редкоземельных элементов выполнены методом ICP MS на установке Finnigan Element в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, Россия, аналитики И.В. Николаева, С.В. Палесский) по методике [Николаева и др., 2008]. Погрешности определения содержаний редких и редкоземельных элементов составили менее 10 %.

Sm-Nd изотопные исследования выполнены по валовым пробам в Геологическом институте Кольского научного центра PAH (Апатиты, Россия) на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 (RPQ). Нормирование изотопных отношений Nd осуществляли по отношению ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219. Ошибка в ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd отношениях составляет 0.3 % (2 σ). Холостое загрязнение на период измерений составило 0.06 нг для Sm и 0.3 нг для Nd. Среднее значение отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте *J*Nd_{*i*}-1 за период измерений составило 0.512090 ± 13 (*N* = 15). Значение параметра $\varepsilon_{Nd}(T)$ рассчитано относительно однородного хондритового резервуара (CHUR) с современными характеристиками ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512638; ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.1967 [Jacobsen, Wasserburg, 1984]. Модельные возрасты *T*_{Nd}(DM) вычислены по данным [Goldstein, Jacobsen, 1988] для резервуара деплетированной мантии с (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)₀ = 0.513151 и ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.21365. При расчете модельных возрастов по двухстадийной модели [Liew, Hofmann, 1988] среднекоровое значение ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd отношения принято равным 0.12 [Taylor, McLennan, 1985].

Rb-Sr изотопные исследования проведены по валовым пробам в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, Россия) на масс-спектрометре MI-1201 AT. Погрешность определения отношений ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr не превышает 1 %. Средние значения отношений ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в стандартах составило: VNIIM (0.70800 \pm 7, N = 30) и ISG-1 (0.71732 \pm 10, N = 30).

Изотопный состав Hf в пирконе определялся с использованием лазерного пробоотборника Photon Machines Eximer 193 nm на мультиколлекторном масс-спектрометре Nu Plasma в Аналитическом центре GEMOC Macquarie University (Сидней, Австралия). Измерения проводились в гелиевой атмосфере, диаметр пучка лазера 40-65 мкм, частота — 5 Гц, с плотностью энергии лазерного излучения 8.44 мДж/ пульс. Процедура коррекции и используемые значения описаны в работах [Griffin et al., 2004; Pearson et al., 2008; Belousova et al., 2009]. Для контроля воспроизводимости результатов и стабильности работы прибора применяли стандартные образцы цирконов TEMORA-II и Mud Tank. Расчет значений є_н проводился с использованием константы распада 176 Lu = 1.865×10^{-11} лет⁻¹ [Scherer et al., 2001]. Для расчета модельного возраста Т(DM) (относительно линии эволюции деплетированной мантии) использовались следующие изотопные отношения для DM: (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf); = 0.279718 на 4.56 млрд лет и ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = = 0.0384. При этих значениях современное отношение ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf составляет 0.28325, что близко к среднему значению для базальтов срединно-океанических хребтов [Griffin et al., 2000, 2004]. Модельные возрасты Т(DM) являются минимальными значениями возраста источника магмы, из которой кристаллизовался циркон. Вследствие этого для каждого образца циркона также рассчитывали модельные возрасты $T(DM)^{c}$, при расчете которых предполагается, что магма выплавлялась из средней континентальной коры с изотопным отношением 176 Lu/ 177 Hf = 0.015, которая, в свою очередь, также выплавлялась из деплетированной мантии [Griffin et al., 2000].

ГЕОХИМИЯ

Геохимическая характеристика пород изученных массивов проведена на основе 25 анализов редких и редкоземельных элементов, охватывающих все петрографические разности (табл. 1). Поскольку петрохимическая характеристика пород подробно рассмотрена в работе [Руднев и др., 2021], то ниже дается лишь краткая информация.

По петрохимическим характеристикам плагиогранитоиды массивов Три Холма, Баян-Цаган-Ула, как видно на рис. 2, *a*—*b*, отвечают породам известково-щелочной серии нормального ряда с низким до умеренного содержанием K₂O (0.81—2.23 мас. %), при вариациях SiO₂ (54.7—73.17 мас. %) и Al₂O₃



Рис. 1. Схема геологического строения Озерной зоны (составлена с упрощениями по данным [Geological ..., 1999; Руднев и др., 2009, 2012, 2019, 2021; Ярмолюк и др., 2011]).

1—6 — стратифицированные образования: 1 — Дзабханский микроконтинент (ДЗ), 2, 3 — Озерная зона (ОЗ): 2 — вендские островодужные осадочно-вулканогенные комплексы (нерасчлененные), 3 — раннекембрийские островодужные осадочно-вулканогенные комплексы (нерасчлененные); 4 — раннесреднепалеозойские аккреционные комплексы Монгольского Алтая (МА, нерасчлененные), 5 — среднепалеозойские осадочные и вулканогенные комплексы (нерасчлененные); 6 — мезокайнозойские отложения (нерасчлененные); 7—13 — интрузивные образования: 7 — неопротерозойские офиолитовые комплексы (нерасчлененные), 8, 9 — интрузивные комплексы вендского возраста (8 — габброиды, 9 — гранитоиды), 10, 11 — интрузивные комплексы нерасчлененные), 13 — интрузивные комплексы девона (нерасчлененные), 14 — тектонические нарушения, 15, 16 — U-Pb возраст цирконов (млн лет). В круглых скобках даны номера массивов и плутонов: 1 — Шаратологойский, 2 — Западно-Баян-Хаирхан-



Рис. 2. Дискриминационные диаграммы для пород изученных интрузивных ассоциаций:

a — SiO₂—(K₂O + Na₂O), по [Le Maitre, 1989], где I—III — поля состава пород: I — нормальной щелочности, II — умеренной щелочности, III — повышенной целочности; *б* — SiO₂—K₂O, по [Rickwood, 1989], где I—IV — поля состава пород: I — низкокалиевые, II — умеренно калиевые, III—IV — высококалиевые; *в* — Ab—An—Or, по [O'Connor, 1965], где A — тоналит, B гранодиорит, С — адамеллит, D — трондьемит, Е — гранит. Анализы см. табл. 1; *г*—*е* — см. пояснения в тексте. *I* — диорит-тоналит-плагиогранитная ассоциация массива Три Холма, 2 — габброиды Таван-Хаирханского массива, 3 — плагиогранитная ассоциация Восточно-Баянцаганского массива, *4* — диорит-тоналит-плагиогранитная ассоциация массива Баян-Цаган-Ула, *5*, *6* — плагиогранитные ассоциации Тунгалагского массива (*5* — ранняя, *6* — поздняя), *7* — кварцевые диориты Шутхуинского массива, *8* — граниты массива Их-Замын.

(13.27—18.30 мас. %). Породы этих массивов обнаруживают широкие вариации Rb (5—23 г/т), Sr (194—757 г/т), Ba (145—640 до 1321 г/т), Nb (0.82—1.18 г/т) и Ta (0.08—0.3 г/т) (см. рис. 2, *г*—*е*). Вместе они характеризуются низкими суммарными содержаниями редкоземельных элементов (31—46 г/т, при незначительном преобладании легких лантаноидов над тяжелыми ((La/Yb)_N = 1.5—3.9)), а также умеренными концентрациями Y (9.1—20.6 г/т), Zr (40—122 г/т), Hf (1.2—3.4 г/т, см. табл. 1). Значения отношений Sr/Y составляет 11—71.

Плагиограниты Тунгалагского (ранняя (1) и поздняя (2) ассоциации, рис. 3) и Восточно-Баянцаганского массивов характеризуются более высоким содержанием SiO₂ (68—75 мас. %) и пониженным Al₂O₃ (11.67—13.86 мас. %) по сравнению с породами вышеописанных массивов. По содержанию K₂O

ский, 3 — Харанурский, 4 — Шутхуинский, 5 — Дарви, 6 — Бумбат-Хаирханский, 7 — Три Холма, 8 — Таван-Хаирханский, 9 — Восточно-Баянцаганский, 10 — Баян-Цаган-Ула, 11 — Баясгалантский, 12 — Тунгалагский, 13 — Хатан-Хунгинский, 14 — Тугригский, 15 — Удзур-Хунгинский, 16 — Их-Замын, 17 — офиолиты хр. Дариби, 18 — офиолиты хр. Хан-Тайшири. В прямоугольниках светлым шрифтом показаны возрасты гранитоидов раннекембрийского возраста, по данным [Руднев и др., 2009, 2012, 2019], жирным шрифтом — гранитоидов и габброидов вендского возраста, по данным [Руднев и др., 2021], а также пород офиолитовых комплексов, по данным [Гибшер и др., 2001; Козаков и др., 2002; Jian et al., 2014].

На врезке показана тектоническая схема Западной Монголии. Докембрийские микроконтиненты: ДЗ — Дзабханский, ЮГ — Южно-Гобийский; ОЗ — островная дуга Озерной зоны (поздний неопротерозой — ранний палеозой); аккреционные комплексы (ранний — средний палеозой): МА — Монголо-Алтайский, ЮМ — Южно-Монгольский. Звездочкой красного цвета показано положение массивов плагиогранитоидов и габброидов вендского возраста, звездочкой желтого цвета — раннекембрийского возраста.

Компо-	Ta (I	аван-Хаирха габброидная	анский масо я ассоциаци	сив 1я)	Восточно- (плагиог)	Баянцаганск ранитная асс	кий массив социация)	массив Баян-Цаган-Ула (диорит-тоналит-плагиогранитная ассоциация)			
	PM-34-07	PM-37-07	PM-35-07	PM-35/1-07	PM-10-47	PM-10-49	PM-10-46	PM-44-07	PM-44/1-07	PM-44/2-07	
SiO ₂ , мас.%	46.75	48.06	48.97	52.27	68.53	69.32	69.44	54.71	63.24	65.53	
TiO ₂	0.94	0.67	0.76	0.80	0.51	0.44	0.45	0.66	0.46	0.44	
Al_2O_3	20.25	21.35	20.90	22.25	14.85	14.40	14.50	18.30	16.93	16.55	
Fe ₂ O _{3 общ.}	10.38	8.55	7.94	5.74	4.86	4.70	4.30	6.75	4.15	1.97	
MnO	0.16	0.11	0.13	0.09	0.05	0.05	0.05	0.13	0.06	0.02	
MgO	3.17	3.84	3.29	1.66	1.48	1.22	1.27	3.82	1.94	1.77	
CaO	11.85	11.56	11.34	10.97	4.07	3.54	3.78	9.10	5.40	7.04	
Na ₂ O	3.79	1.81	3.50	2.88	4.52	4.64	4.71	4.74	5.25	4.07	
K ₂ O	0.65	0.70	0.81	0.52	0.29	0.29	0.51	0.91	0.81	1.70	
П.п.п.	2.97	3.42	2.86	2.79	1.06	1.31	0.81	1.01	1.26	0.50	
P_2O_5	0.08	0.04	0.10	< 0.03	0.12	0.09	0.10	0.12	0.10	0.13	
Сумма	100.99	100.11	100.60	99.97	100.34	100.00	99.92	100.25	99.60	99.72	
Rb, г/т	_	17	15	9	2	9	8	5	9	14	
Sr	_	209	259	280	270	277	281	464	403	757	
Ba		119	150	103	119	170	132	145	177	438	
Y		7.29	15.64	14.34	37.50	32.20	34.66	19.94	9.06	10.69	
Zr		26	90	58	151	160	130	40	84	86	
Hf		0.74	2.28	1.52	4.70	4.95	4.26	1.16	2.30	2.56	
Nb		2.08	2.32	2.77	2.58	2.54	2.25	0.92	1.11	1.01	
Та		0.20	0.28	0.23	0.12	0.32	0.14	0.08	0.11	0.10	
Th		1.98	2.50	2.39	2.89	2.94	2.89	0.55	0.74	1.01	
U		0.72	72 1.21 1		1.41	1 1.31 1		0.18	0.39	0.57	
V	_	199	275	145	68	50	62	156	65	70	
Cr	_	74	60	51	22	26 21		55	38	21	
Co		23	22	16	9	8 6		46	13	6	
Ni		43	57	43	9	10	14	60	17	29	
La		5.75	6.79	6.07	9.73	9.21	10.29	3.79	4.71	3.86	
Ce		10.29	13.74	12.60	24.60	23.19	25.22	10.38	11.65	10.33	
Pr	_	1.20	1.82	1.59	3.37	3.37	3.41	1.63	1.76	1.43	
Nd		4.60	7.92	7.20	15.22	14.49	14.99	8.75	7.37	6.92	
Sm	_	1.15	2.16	1.97	4.49	3.95	4.23	2.88	1.70	1.85	
Eu		0.47	0.78	0.69	0.76	0.65	0.78	0.92	0.53	0.57	
Gd		1.13	2.20	2.12	4.35	3.84	4.15	2.98	1.65	1.54	
Tb		0.17	0.38	0.36	0.85	0.76	0.81	0.51	0.24	0.26	
Dy		1.13	2.43	2.29	5.84	5.17	5.49	3.18	1.46	1.59	
Но		0.25	0.53	0.50	1.32	1.11	1.24	0.67	0.30	0.35	
Er	_	0.71	1.53	1.36	3.92	3.32	3.67	1.77	0.81	1.01	
Tm		0.11	0.22	0.20	0.64	0.52	0.57	0.27	0.12	0.16	
Yb		0.71	1.35	1.32	4.06	3.48	3.67	1.68	0.81	1.02	
Lu	_	0.13	0.24	0.22	0.65	0.55	0.58	0.29	0.12	0.19	
ΣREE	_	27.80	42.08	38.50	79.79	73.61	79.11	39.69	33.12	31.08	
$(La/Yb)_N$	_	5.5	3.4	3.1	1.6	1.8	1.9	1.5	3.9	2.5	
$(Eu/Eu^*)_N$	_	1.3	1.1	1.0	0.5	0.5	0.6	0.9	1.0	1.0	
Sr/Y	_	29	17	20	7	9	8	23	44	71	

Таблица	1.	Содержания	редких и редкоземел	ьных элементов в г	редставите	льных обр	азцах
			гранитоидов в	и габброидов Озерн	ой зоны		

Таблица 1 (продолжение)

Компо-	(1	Туні плагиограни	галагский м итная ассоци	ассив нация, рання	я)	Тунгалагский массив (плагиогранитная ассоциация, поздняя)						
нент	PM-8-16	PM-7-16	PM-6-16	PM-9-16	PM-10-16	PM-9-15	PM-8-15	PM-13-15	PM-14/1-15	PM-11-15		
SiO ₂ , мас.%	73.70	75.15	75.36	74.98	75.02	71.59	73.86	75.47	69.86	74.54		
TiO ₂	0.31	0.31 0.28		0.25	0.29	0.30 0.26		0.25 0.31		0.28		
Al_2O_3	12.65	12.10	11.78	12.17	12.32	13.86	12.41	12.44	13.43	12.39		
Fe ₂ O _{3 общ.}	4.33	3.65	3.06	3.53	3.25	3.62	3.72	3.30	5.57	3.53		
MnO	0.06	0.06	0.09	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.08	0.03		
MgO	0.58	0.47	0.47	0.39	0.56	0.87	0.53	0.47	0.98	0.46		
CaO	2.34	1.81	1.89	1.68	2.25	3.30	2.49	1.63	2.99	2.02		
Na ₂ O	4.55	5.23	4.97	5.15	4.93	5.32	4.80	4.74	4.24	4.70		
K ₂ O	0.50	0.31	0.32	0.60	0.32	0.32	0.43	0.59	0.99	0.90		
П.п.п.	1.07	0.84	0.70	0.66	0.90	0.84	0.80	0.99	1.31	0.81		
P_2O_5	0.07	0.13	0.05	0.05	0.08	0.09	0.06	0.05	0.07	0.06		
Сумма	100.16	100.03	98.98	99.52	99.97	100.15	99.40	99.96	99.86	99.72		
Rb, г/т	10	5	4	8	2	3	11	10	19	15		
Sr	136	207	214	98	124	134	147	118	126	93		
Ba	132	97	107	203	145	134	158	199	267	267		
Y	30.68	30.69	31.23	36.13	35.25	34.61	31.13	30.66	33.95	37.34		
Zr	120	126	136	180	97	112	112	131	113	73		
Hf	3.52	3.82	3.80	5.24	3.18	3.63	3.24	3.70	3.12	2.48		
Nb	2.89	3.32	3.63	3.87	3.12	2.65	2.43	2.82	2.22	3.54		
Та	0.15	0.15	0.18	0.18	0.15	0.15	0.12	0.15	0.12	0.18		
Th	2.90	2.79	3.69	4.47	3.22	2.72	2.32	2.67	2.10	2.48		
U	1.10	1.04	0.90	1.26	0.81	0.81	1.10	0.77	0.75	0.81		
V	21	12	5	12	23	39	39 22		59	18		
Cr	32	30	45	43	34	50	86	60	70	44		
Co	6	3	3	5	4 6		5 4		8	5		
Ni	7	4	5	5	4	6	7 9		11	5		
La	16.19	10.87	20.94	18.71	15.28	11.26	11.79	17.63	6.87	12.41		
Ce	31.34	22.48	39.76	37.41	32.08	27.10	24.98	34.87	16.08	26.34		
Pr	4.21	3.20	4.58	4.85	4.08	3.89	3.25	4.50	2.50	3.49		
Nd	16.25	13.82	17.08	19.15	18.02	15.92	13.67	16.20	11.59	14.94		
Sm	3.87	3.10	3.80	4.48	4.33	4.00	3.48	3.19	3.11	3.73		
Eu	0.78	0.74	0.93	0.72	0.79	0.67	0.72	0.60	0.56	0.59		
Gd	4.35	3.95	4.25	4.93	4.69	4.34	3.95	3.90	4.04	4.56		
Tb	0.70	0.70	0.70	0.78	0.81	0.73	0.67	0.64	0.67	0.81		
Dy	4.73	4.73	4.90	5.20	5.70	5.30	4.60	4.53	4.80	5.67		
Но	1.07	1.07	1.05	1.14	1.22	1.17	1.05	0.98	1.08	1.26		
Er	3.00	3.28	3.23	3.59	3.64	3.64	3.04	2.92	3.35	3.55		
Tm	0.49	0.51	0.54	0.56	0.57	0.57	0.49	0.48	0.54	0.56		
Yb	3.20	3.40	3.47	3.80	3.61	3.70	3.20	3.22	3.56	3.52		
Lu	0.47	0.51	0.54	0.58	0.54	0.55	0.48	0.48	0.54	0.54		
ΣREE	90.66	72.35	105.76	105.90	95.35	75.38	82.84	94.12	59.27	81.96		
$(La/Yb)_N$	3.4	2.2	4.1	3.3	2.9	2.5	2.1	3.7	1.3	2.4		
$(Eu/Eu^*)_N$	0.6	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5		
Sr/Y	4	7	7	3	4	5	4	4	5	4		

Таблица 1 (окончание)

Компонент		М (гра	Шутхуинский массив (диоритовая ассоциация)					
	PM-16-16	PM-17-16	PM-13A-16	PM-20-16**	PM-21-16**	PM-83-18	PM-81-18	PM-82-18
SiO ₂ , мас.%	68.98	69.98	71.20	56.64	55.92	58.20	58.44	60.10
TiO ₂	0.26	0.21	0.23	0.22	0.31	0.67	0.66	0.62
Al ₂ O ₃	15.53	14.91	15.07	19.56	19.64	16.84	16.71	16.26
Fe ₂ O _{3 общ.}	2.93	2.45	2.36	3.05	3.29	9.43	9.12	8.13
MnO	0.08	0.07	0.07	0.09	0.08	0.18	0.18	0.15
MgO	0.93	0.79	0.76	1.04	1.12	2.51	2.48	2.21
CaO	2.14	1.96	1.21	5.25	5.17	6.57	6.61	5.89
Na ₂ O	4.43	4.36	4.44	6.29	6.06	3.14	3.15	3.24
K ₂ O	2.84	3.10	3.15	1.98	1.65	1.16	1.14	1.34
П.п.п.	1.10	1.56	1.27	5.27	6.11	0.55	0.67	1.76
P_2O_5	0.08	0.07	0.08	0.05	0.05	0.13	0.13	0.10
Сумма	99.31	99.46	99.84	9944	99.79	99.38	99.31	99.80
Rb, г/т	64	70	69	_		26	27	29
Sr	388	352	289	_		224	221	190
Ba	640	516	513	_		229	219	282
Y	19.44	10.69	10.71	_		23.16	23.20	21.49
Zr	101	92	89	_		99	88	97
Hf	2.77	2.73	2.66	—	—	2.63	2.25	2.62
Nb	8.68	7.21	6.99		—	3.58	3.32	3.00
Та	0.93	0.48	0.72		—	0.23	0.20	0.23
Th	16.98	11.93	13.32	—	—	4.00	3.78	3.96
U	2.36	2.63	1.37		—	0.47	0.35	0.61
V	32	25	23			146	140	134
Cr	26	34	23	—		28	22	18
Co	4	4	4	—		23	20	19
Ni	9	7	5	—		7	12	7
La	37.85	19.43	24.61			12.91	12.75	12.31
Ce	71.45	37.27	51.05	—		28.32	27.71	26.12
Pr	7.92	4.17	5.68			3.47	3.47	3.19
Nd	25.92	14.26	18.22			14.71	15.13	12.84
Sm	3.92	2.24	2.66			3.39	3.40	2.80
Eu	0.58	0.47	0.50			1.00	0.97	0.86
Ga	5.28	2.01	2.25			5.05 0.61	5./4 0.61	5.29 0.55
Dv	2.02	0.30	1.70			2.67	2.70	2.54
Dy Но	0.60	0.26	0.24			0.84	0.81	0.73
Fr	1.70	1.10	0.34			2 33	2 34	2.21
Tm	0.29	0.18	0.50			0.36	0.36	0.34
Yh	1.90	1.17	1.00			2.36	2.40	2.16
Lu	0.27	0.18	0.16			0.36	0.37	0.33
ΣREE	159.16	84.84	109.66	_		77.98	77.83	71.26
(La/Yb) _M	13.4	11.2	16.6	_	_	3.7	3.6	3.8
(Eu/Eu*) _N	0.5	0.7	0.6		_	0.9	0.8	0.9
Sr/Y	20	33	27	_	_	9	9	8

Примечание. $Eu^* = (Sm + Gd)/2.$



Рис. 3. Редкоземельные спектры вендских и ордовикских интрузивных пород Озерной зоны.

Анализы см. табл. 1. Нормирование проводилось по [Sun, McDonough, 1989].

(0.32—0.90 мас. %) они попадают в поле низкокалиевых гранитоидов. По концентрациям Rb (2—19 г/т), Ва (97—267 г/т) они сопоставимы с вышеописанными плагиогранитоидами, но отличаются более высокими концентрациями Zr, Hf, Nb, Ta, Y, редкоземельных элементов (Σ P3 \Im = 59.3—106 г/т, (La/Yb)_N = = 1.3—4.1, см. рис. 3), наличием отрицательных аномалий Eu на спектрах P3 \Im и пониженным содержанием Sr (93—281 г/т) и Sr/Y (3—9). Повышенное содержание SiO₂, несовместимых редких элементов и обеднение Eu и Sr свидетельствует о большей дифференцированности этих пород в сравнении с плагиогранитоидами массивов Три Холма и Баян-Цаган-Ула. Плагиогранитоиды всех массивов по содержанию Al₂O₃, повышенным концентрациям тяжелых P3 \Im и Y, пониженным индикаторным отношениям (La/Yb)_N и Sr/Y относятся к тоналит-трондьемит-гранодиоритовым (TTГ) комплексам низкоглиноземистого типа [Arth, 1979].

Лейкогаббро Таван-Хаирханского массива отвечают основным породам нормального ряда, а именно габброидам высокоглиноземистого низкотитанистого типа [Изох и др., 1998]. Для них характерны низкие концентрации высокозарядных элементов (Zr, Hf, Nb, Ta) и суммарные содержания редкоземельных элементов (P3Э = 27.8—42.1 г/т), преобладание легких лантаноидов над тяжелыми (La/Yb)_N = = 3.1-5.5), слабые положительные аномалии по Еu и высокие содержания V и Cr. Несмотря на низкое содержание SiO₂, габброиды близки по содержанию K₂O, Rb, Th к плагиогранитам. Еще более высокими концентрациями K₂O, Rb и Th, превышающими таковые плагиогранитов, обладают кварцевые диориты Шутхуинского массива. Кварцевые диориты имеют слабофракционированное распределение P3Э ((La/Yb)_N = 3.6-3.8) с обогащением легкими лантаноидами.

Двуполевошпатовые граниты массива Их-Замын отвечают гранитоидам известково-щелочной серии повышенной калиевости. Содержания SiO₂ и Al₂O₃ в породах массива находятся в узком диапазоне — 69.0—71.2 и 15.53—14.91 мас. % соответственно (см. табл. 1, рис. 2, *a*—*e*). Для пород характерны более высокие концентрации K₂O (2.8—3.2 мас. %), Rb (64—70 г/т), Sr (289—388 г/т), Ba (513—640 г/т), высокозарядных (Nb, Ta, Th и U) и редкоземельных (Σ P3Э = 84.8—155.1 г/т, (La/Yb)_N = 11.2—16.6) элементов по сравнению с вышеописанными породными ассоциациями, а также минимумы по Eu на спектрах РЗЭ (см. рис. 2, *z*—*e*, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Sm-Nd и Rb-Sr изотопная характеристика пород. Изотопные исследования проведены по тем же пробам, для которых определены U-Pb возрасты по циркону [Руднев и др., 2021]. Вендские гранитоиды и габброиды Озерной зоны Западной Монголии имеют широкие вариации Sr-Nd изотопных параметров (табл. 2, рис. 4), что позволяет выделить среди них две группы. В первую группу попадают тоналиты и кварцевые диориты массива Баян-Цаган-Ула (543 ± 3 млн лет), плагиограниты Восточно-Баянцаганского массива (555 ± 2 млн лет) и Тунгалагского массива (547 ± 6 и ~533 млн лет, ранняя и поздняя ассоциации соответственно) и кварцевые диориты, тоналиты и плагиограниты массива Три Холма (544 ± 7 млн лет). Они характеризуются высокими положительными значениями $\varepsilon_{Nd}(T)$, варьирующими в узком диапазоне от 10.3 до 7.3, и низкими значениями отношений изотопов стронция ((⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ = 0.7030—0.7036), указывающими на деплетированный характер магмообразующих источников. На диаграмме ε_{Nd} —возраст (см. рис. 4) точки их изотопного состава попадают в поле вендских островодужных вулканогенных и осадочных комплексов Озерной зоны ($\varepsilon_{Nd}(570) = +9.9...+6.6$) [Ковач и др., 2011; Kröner at al., 2014].

Ко второй группе относятся лейкогаббро Таван-Хаирханского массива (559 ± 2 млн лет) и кварцевые диориты Шутхуинского массива (542 ± 2 млн лет), которые, в отличие от пород первой группы, характеризуются положительными, но более низкими значениями $\varepsilon_{Nd} = (+2.5...+1.1)$, мезопротерозойскими Nd-модельными возрастами (T_{Nd} (DM) = 1.20—1.06 млрд лет) и высокими значениями изотопных отношений стронция (($^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.7058 - 0.7073$, см. табл. 2). На рисунке 4 точки их составов образуют самостоятельное поле, расположенное между трендом эволюции Nd-изотопного состава вендских островодужных вулканогенных и осадочных комплексов Озерной зоны и раннедокембрийских образований Дзабханского микроконтинента. Эти породы смещены относительно главного мантийного тренда в область повышенных ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, что типично для островодужных магматических пород. Несмотря на резкое отличие по петрогеохимическим характеристикам, ко второй группе по изотопному составу Nd близки двуполевошпатовые граниты массива Их-Замын (483 ± 2 млн лет): $\varepsilon_{Nd} = +1.7$, но они отличаются более низким ($^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.7041$ и, в отличие от габбро и диоритов, их изотопный состав отвечает главному мантийному тренду (см. рис. 4).

Lu-Hf изотопный состав магматического циркона. Изотопный Hf состав магматического циркона определялся в тех же точках, в которых проводилось U-Pb датирование (рис. 5). Исследования

	принитондных и тазорондных массивов																	
		Воз-		Воз-		Воз-	Sm	n Nd				T	Rb	Sr				
№ п/п	№ образца	раст,			¹⁴⁷ Sm/	143Nd/144Nd	$\epsilon_{\rm ev}(T)$	(DM-2st).			⁸⁷ Rb/	$(^{87}Sr/^{86}Sr)$	(⁸ /Sr/	$\varepsilon_{sr}(T)$				
	1 .	МЛН Г/Т		¹⁴⁴ Nd		Nu	млн лет	Γ/T		**Sr	ИЗМ.	**Sr) ₀	Sr /					
		JICI	ļ											<u> </u>				
1	PM-44-07	543	2.67	8.89	0.1819	0.513108 ± 6	10.2		3.1	486	0.01848	0.70365 ± 3	0.70350	-4.9				
2	PM-44/2-07	543	1.51	6.05	0.1504	0.513000 ± 7	10.3	_	8.6	375	0.06666	0.70355 ± 2	0.70303	-11.9				
3	PM-10-47	555	2.13	7.76	0.1659	0.513047 ± 5	8.0	_	1.6	244	0.01885	0.70345 ± 4	0.70330	-7.8				
4	C-5-66.3*	544	2.89	11.06	0.1578	0.512887 ± 3	7.6	—	17.5	278	0.18220	0.70478 ± 5	0.70337	-7.0				
5	PM-7-16	547	3.52	13.68	0.1555	0.512878 ± 7	7.6	—	5.2	190	0.07927	0.70396 ± 7	0.70334	-7.4				
6	PM-8-15	533	3.63	13.48	0.1626	0.512894 ± 6	7.3	—	11.1	127	0.25172	0.70554 ± 6	0.70363	-3.6				
7	PM-81-18	542	3.44	15.53	0.1433	0.512579 ± 7	2.5	1065	33.9	216	0.45463	0.71077 ± 2	0.70726	48.2				
8	PM-35/1-07	559	1.89	7.72	0.1483	0.512518 ± 5	1.1	1201	9.1	273	0.09693	0.70652 ± 5	0.70575	27.0				
9	PM-13A-16	483	29.17	181.95	0.0969	0.512408 ± 5	1.7	1092	77.7	274	0.82084	0.70979 ± 2	0.70414	2.9				

Таблица 2. Результаты Sm-Nd и Rb-Sr изотопных исследований пород изученных гранитоидных и габброидных массивов

Примечание. 1, 2 — массив Баян-Цаган-Ула, 3 — Восточно-Баянцаганский массив, 4 — массив Три Холма, 5, 6 — Тунгалагский массив (5 — ранняя ассоциация, 6 — поздняя ассоциация), 7 — Шутхуинский массив, 8 — Таван-Хаирханский массив, 9 — массив Их-Замын.

^{*} По данным [Руднев и др., 2012].



Рис. 4. Изотопные диаграммы є_{Nd} — возраст и є_{Nd} — є_{Sr} для пород изученных массивов.

1 — гранитоиды раннекембрийского и кембро-ордовикского возраста, по данным [Руднев и др., 2009, 2016, 2020; Ковач и др., 2011]; 2 — палеоокеанические и островодужные вулканогенные комплексы вендского возраста и ассоциирующие с ними терригенно-осадочные комплексы Озерной зоны Монголии [Ковач и др., 2011; Kroner et al., 2014]; 3, 4 — тренды эволюции изотопного состава Nd: 3 — палеоокеанических и островодужных комплексов Озерной зоны, 4 — пород Дзабханского микроконтинента [Ковач и др., 2011; Kroner et al., 2014]. На диаграмме ε_{Nd}—ε_{sr} поля I—IV, по [Фор, 1989], поля МОRB, EMI, EMII, по [Zindler, Hart, 1986]. Анализы см. табл. 2. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

проведены только по цирконам из вендских плагиогранитов Восточно-Баянцаганского массива (555 \pm 2 млн лет), кварцевых диоритов массива Баян-Цаган-Ула (543 \pm 3 млн лет), лейкогаббро Таван-Хаирханского массива (559 \pm 2 млн лет), принадлежащих к разным группам по изотопному составу Nd и Sr, а также из гранитов массива Их-Замын (483 \pm 2 млн лет).

Магматические цирконы из вендских островодужных плагиогранитоидов и габброидов (табл. 3, рис. 6) по Hf изотопным параметрам разделяются на две самостоятельные группы, соответствующие выделенным по Nd изотопным характеристикам (см. рис. 4).

В первую группу попадают магматические цирконы из плагиогранитоидов Восточно-Баянцаганского массива и кварцевых диоритов и тоналитов массива Баян-Цаган-Ула. Они характеризуются следующими значениями изотопных параметров: $\varepsilon_{\rm Hf}$ = +14.6...+13.1 и $T(\rm DM)^{\rm C}$ = 0.66—0.56 млрд лет. На диаграмме $\varepsilon_{\rm Hf}$ —возраст (см. рис. 6) они образуют компактное поле, расположенное вблизи линии деплетированной мантии.

Во вторую группу отнесены магматические цирконы из лейкогаббро Таван-Хаирханского массива с более низкими значениями $\varepsilon_{\rm Hf}$ = +6.0... +5.6 и более древними модельными возрастами ($T(\rm DM)^{C}$ = = 1.15—1.12 в сравнении с магматическими цирконами из плагиогранитоидов (см. рис. 6). Несмотря на существенные различия во времени кристаллизации и источниках магм, магматические цирконы из гранитов массива Их-Замын (483 ± 2 млн лет) отчасти пересекаются по Hf изотопным характеристикам с цирконами из лейкогаббро Таван-Хаирханского массива (559 ± 2 млн лет), но цирконы из гранитов смещены к более низким величинам $\varepsilon_{\rm Hf}$ = +5.9... +2.1.

Lu-Hf-изотопный состав ксеногенного циркона. В изученных гранитоидах и габброидах установлены ксеногенные цирконы с возрастами от 716 до 529 млн лет, которые разделяются на пять групп (~716, 658—642, 613—611, 583—559, 537—526 млн лет) [Руднев и др., 2021]. Отметим, что все эти ксеногенные цирконы, как видно на рис. 5, характеризуются отчетливо выраженной магматической зональностью. Lu-Hf изотопные исследования ксеногенного циркона были выполнены только для пород Восточно-Баянцаганского, Баян-Цаган-Ула, Таван-Хаирханского и Их-Замын массивов. Ксеногенные цирконы, подобно магматическим, по Hf-изотопным параметрам (см. табл. 3, рис. 6) делятся на две группы.

В первую группу попадают ксеногенные цирконы с возрастами 658—559 млн лет. Они преобладают в плагиогранитоидах Восточно-Баянцаганского массива (555 ± 2 млн лет) и тоналит-порфирах массива Баян-Цаган-Ула (543 ± 3 млн лет) и в единичных случаях встречаются в плагиогранитоидах массивов Три Холма и Тунгалагский (ранняя ассоциация). Среди них доминируют ксеногенные цирко-

T	~ ~	`	n	т тт/					/T A 7		<u>۱</u>
1 9	опина –	4	μουνηι τοτιι	I 11_HT	μροτοπιμιν μεσποπορομιμι	і магматинасізага і	і плоанаганнага	HUDECOUS (11 P	۱.
1 0	олина.			./			הננחטונחחטוט	пинкопач			
									·		 ,

N⁰	N⁰		Lu, Hf, Yb	отношения		U-РЬ воз-	Нf	s (T)	+1SF	T _{Hf} (DM),	$T_{\rm Hf}({\rm DM})^{\rm C}$,		
п/п	точки	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±1SE	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	раст, млн лет	111 initial	$c_{\rm Hf}(1)$	TISE	млрд лет	млрд лет		
	Таван-Хаирханский массив												
	Габброидная ассоциация, лейкогаббро, обр. РМ-35/1-07												
1	3	0.282616	0.000012	0.001410	0.036299	561	0.282601	6.0	0.4	0.91	1.12		
2	5	0.282622	0.000021	0.001897	0.048010	556	0.282602	5.9	0.7	0.92	1.12		
3	6	0.282616	0.000016	0.001702	0.041672	560	0.282598	5.8	0.6	0.92	1.13		
4	10	0.282620	0.000013	0.002246	0.057546	557	0.282596	5.7	0.5	0.93	1.14		
5	14	0.282616	0.000014	0.002556	0.065703	560	0.282589	5.6	0.5	0.94	1.15		
6	18*	0.282615	0.000012	0.002279	0.056798	580	0.282591	6.1	0.4	0.93	1.13		
7	22*	0.282617	0.000015	0.001664	0.043115	577	0.282599	6.3	0.5	0.92	1.12		
8	29*	0.282615	0.000015	0.001933	0.050415	578	0.282594	6.1	0.5	0.93	1.13		
9	2*	0.282607	0.000015	0.002196	0.055950	583	0.282583	5.8	0.5	0.94	1.15		
	Восточно-Баянцаганский массив Плагиогранитная ассоциация, плагиогранит, обр. РМ-10-47												
10	4	0.282858	0.000010	0.000986	0.027057	554	0.282848	14.6	0.4	0.56	0.56		
11	27	0.282852	0.000012	0.001302	0.035525	554	0.282839	14.3	0.4	0.57	0.59		
12	30	0.282861	0.000014	0.003544	0.102847	556	0.282824	13.8	0.5	0.60	0.62		
13	48	0.282828	0.000011	0.002046	0.053064	555	0.282807	13.2	0.4	0.62	0.66		
14	49	0.282854	0.000028	0.000806	0.021488	556	0.282845	14.5	0.9	0.56	0.57		
15	50	0.282855	0.000016	0.001465	0.042129	559	0.282839	14.4	0.6	0.57	0.58		
16	18*	0.282852	0.000011	0.005363	0.155621	576	0.282794	13.2	0.4	0.64	0.67		
17	21*	0.282855	0.000013	0.001311	0.034359	575	0.282841	14.8	0.5	0.57	0.57		
18	22*	0.282834	0.000010	0.001846	0.052381	574	0.282814	13.8	0.4	0.61	0.63		
19	36*	0.282819	0.000011	0.004487	0.123688	571	0.282771	12.3	0.4	0.68	0.73		
20	42*	0.282845	0.000009	0.003809	0.111224	572	0.282804	13.4	0.3	0.62	0.65		
21	47*	0.282853	0.000011	0.003160	0.088784	613	0.282816	14.8	0.4	0.60	0.60		
22	28*	0.282843	0.000022	0.003497	0.090789	642	0.282801	14.9	0.8	0.62	0.61		
23	9*	0.282901	0.000018	0.005714	0.147523	658	0.282830	16.3	0.6	_			
			T		Массив Бая	н-Цаган-Ул	18	5 D					
24		0 2020 40	циорит-тонал	ит-плагиогра	нитная ассоп	иация, тона	лит-порфир	, oop. P.	M-44/1-()/ 0.50	0.61		
24	2.1	0.282848	0.000011	0.001937	0.04/454	544	0.282828	13.7	0.4	0.59	0.61		
25	5.2	0.282826	0.000013	0.001394	0.034127	547	0.282811	13.1	0.5	0.61	0.65		
26	/.1	0.282863	0.000017	0.001238	0.033393	536	0.282851	14.3	0.6	0.56	0.57		
21	10.1	0.282850	0.000011	0.000072	0.016949	552	0.282844	14.1	0.4	0.50	0.58		
20	12.1	0.282850	0.000014	0.001420	0.030231	564	0.282850	14.1	0.5	0.58	0.59		
30	3.1*	0.282851	0.000012	0.001308	0.03/370	567	0.282835	14.9	0.4	0.55	0.55		
31	6.1*	0.282851	0.000013	0.001418	0.033316	563	0.282833	14.7	0.5	0.56	0.56		
32	11 1*	0.282802	0.000011	0.001418	0.020668	571	0.282838	14.6	0.4	0.50	0.50		
52	11.1	0.202047	0.000015	0.000024	0.020000 Массив I	ларания Пх-Замын	0.202030	14.0	0.5	0.57	0.57		
				Гранитная	ассоциация,	гранит, обр	. PM-13A-1	6					
33	3	0.282605	0.000010	0.002226	0.067675	472	0.282585	3.5	0.4	0.95	1.21		
34	26	0.282571	0.000008	0.002914	0.088925	478	0.282544	2.1	0.3	1.02	1.30		
35	27	0.282660	0.000012	0.001360	0.035075	484	0.282648	5.9	0.4	0.85	1.06		
36	38	0.282600	0.000009	0.002565	0.094078	477	0.282577	3.3	0.3	0.96	1.23		
37	39	0.282591	0.000010	0.001541	0.043794	482	0.282577	3.4	0.3	0.95	1.23		
38	2*	0.282579	0.000010	0.001364	0.035291	531	0.282565	4.1	0.4	0.96	1.22		
39	12*	0.282589	0.000010	0.002648	0.079193	536	0.282562	4.1	0.3	0.98	1.23		
40	31*	0.282602	0.000008	0.001845	0.054021	527	0.282584	4.6	0.3	0.94	1.18		
41	36*	0.282606	0.000010	0.001519	0.044858	529	0.282591	4.9	0.3	0.93	1.17		

* Точки, где проводились изотопные исследования ксеногенного циркона, остальные — магматического циркона.

ны с возрастами 583—569 млн лет, отвечающими времени формирования вендских вулканитов Озерной зоны [Ярмолюк и др., 2011] и офиолитов хр. Дариби и Хан-Тайшири [Гибшер и др., 2001; Козаков и др., 2002; Jian et al., 2014]. Вендские ксеногенные цирконы (см. табл. 3) имеют высокие значения $\varepsilon_{\rm Hf}$ (+16.3...+12.3) и поздненеопротерозойские модельные возрасты ($T(DM)^{\rm C} = 0.73$ —0.55 млрд лет) и по этим параметрам полностью перекрываются с магматическими цирконами (см. выше) из этих же пород, что пред-



Рис. 5. Катодолюминесцентные изображения циркона из вендских и кембро-ордовикских гранитоидов и габброидов Озерной зоны.

Сплошным кружком показаны точки, где проводились U-Pb изотопные исследования магматического и ксеногенного циркона [Руднев и др., 2021], пунктирным кружком — Lu-Hf методом (см. табл. 3). Над чертой — значение возраста (млн лет), под чертой — значение параметров $\varepsilon_{\rm Hf}$ и $T({\rm DM})^{\rm C}$ (млрд лет).



Рис. 6. Изотопная диаграмма $\varepsilon_{\rm Hf}$ —возраст для магматических (*a*) и ксеногенных (*б*) цирконов из вендских и кембро-ордовикских гранитоидов и габброидов Озерной зоны.

I — Таван-Хаирханский массив; 2 — Восточно-Баянцаганский массив; 3 — массив Баян-Цаган-Ула; 4 — массив Их-Замын. Анализы см. табл. 3.

полагает их захват из источника, представленного островодужными ассоциациями. Три более древних ксеногенных циркона (658—642 и 613—611 млн лет) в плагиогранитах Восточно-Баянцаганского массива по изотопному составу Hf перекрываются с ксеногенными цирконами вендского возраста.

Ко второй группе относятся ксеногенные цирконы с возрастом 583—529 млн лет из лейкогаббро Таван-Хаирханского массива и гранитов массива Их-Замын, имеющие менее радиогенный изотопный состав: Таван-Хаирханский массив (583—577 млн лет) — $\varepsilon_{\rm Hf} = +6.3...+5.8$, $T(\rm DM)^{\rm C} =$

 $(583-577 \text{ млн лет}) - \varepsilon_{\text{Hf}} = +6.3...+5.8, T(DM)^{\text{C}} = 1.15-1.12 \text{ млрд лет; массив Их-Замын (536-529 млн лет}) - \varepsilon_{\text{Hf}} = +4.9...+4.1, T(DM)^{\text{C}} = 1.23-1.17 \text{ млрд лет. Как и в случае первой группы, эти ксеногенные цирконы по Hf изотопным параметрам полностью перекрываются с магматическими цирконами из этих же пород.$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты изучения петрохимического состава и геохимических характеристик вендских островодужных интрузивных ассоциаций Озерной зоны Монголии (559—542 млн лет [Руднев и др., 2021]) показали, что среди них основной объем слагают тоналит-плагиогранитоидные ассоциации (555— 542 млн лет), а габброидные и диоритовые ассоциации (559 и 542 млн лет) присутствуют только в виде отдельных массивов. По химическому и изотопному составу пород и цирконов среди изученных вендских и ордовикских интрузивных ассоциаций обособляются три группы: 1) преобладающие тоналитплагиогранитоиды (массивы Три Холма, Восточно-Баянцаганский, Баян-Цаган-Ула и Тунгалагский), 2) лейкогаббро и кварцевые диориты (Таван-Хаирханский и Шутхуинский массивы) и 3) двуполевошпатовые граниты (массив Их-Замын).

По петрогеохимическим характеристикам и индикаторным отношениям (см. рис. 3) доминирующие породы тоналит-плагиогранитоидных ассоциаций отвечают плагиогранитоидам низкоглиноземистого типа. Согласно экспериментальным данным и результатам расчетного моделирования, исходные расплавы для этих пород формировались при частичном плавлении метабазитов при давлениях ≤8 кбар в равновесии с плагиоклаз-пироксеновыми (±амфибол) реститами [Rapp et al., 1991; Beard, Lofgren, 1991; Rapp, Watson, 1995; Туркина, 2000].

Наиболее вероятными их источниками служили вендские океанические и островодужные ассоциации Озерной зоны. Это заключение подтверждается высокими значениями ε_{Nd} в плагиогранитоидах (+10.2...+7.3; см. рис. 4, табл. 2), близкими к вмещающим вендским островодужным вулканогенным (базальты, андезибазальты) комплексам с геохимическими характеристиками N-MORB типа и осадочным отложениям Озерной зоны ($\varepsilon_{Nd}(570) = +9.9... +4.8$ [Ковач и др., 2011; Kröner et al., 2014]), а также породам офиолитовых комплексов хр. Дариби и Хан-Тайшири ($\varepsilon_{Nd}(573-560) = +8.4...+5.4$ [Хаин и др., 1995; Козаков и др., 2002; Jian et al., 2014]). В пользу такой интерпретации свидетельствует и преобладание в плагиогранитоидах вендских (583—559 млн лет) ксеногенных цирконов с изотопными параметрами ($\varepsilon_{Hf} = +16.3...+12.3$), перекрывающимися с магматическими цирконами из этих пород ($\varepsilon_{Hf} = =+14.6...+13.1$) (см. рис. 6). Все это не оставляет сомнения в образовании плагиогранитоидов в результате плавления вендской океанической/островодужной коры Озерной зоны и дает первую оценку изотопного Hf состава такой коры. Максимальные значения ε_{Nd} и ε_{Hf} и низкие ($^{87}Sr/^{86}Sr_0$) для плагиогранитоидов и какое-либо участие терригенно-осадочного материала в их образовании, и, следовательно, наиболее вероятным является плавление океанических, а не островодужных базальтов в основании островной дуги.

Во вторую группу попадают лейкогаббро Таван-Хаирханского массива (559±2 млн лет) и кварцевые диориты Шутхуинского массива (542 ± 2 млн лет), которые характеризуются менее радиогенным изотопным составом Nd в сравнении с породами первой группы (ϵ_{Nd} = +2.5 и +1.1 соответственно, см. табл. 2), а также отчетливо повышенным (87Sr/86Sr)₀. Породы этих массивов образовались за счет дифференциации мафических магм, производных умеренно деплетированной мантии. Это заключение подтверждается положительными, но более низкими значениями $\varepsilon_{\rm Hf}$ для магматических ($\varepsilon_{\rm Hf}$ = +6.0...+5.6, $T(DM)^{C} = 1.14 - 1.12$ млрд лет) и ксеногенных ($\varepsilon_{Hf} = +6.3...+5.8$, $T(DM)^{C} = 1.15 - 1.12$ млрд лет) цирконов из лейкогаббро в сравнении с цирконами из плагиогранитоидов первой группы. Судя по повышенным (87Sr/86Sr)₀, генерация исходных магм как габброидов, так и кварцевых диоритов происходила из мантийного клина, испытавшего метасоматоз над зоной субдукции. В этом случае формирование умеренно деплетированного мантийного источника с пониженными г_{Nd} и г_{Hf} могло быть связано с вкладом субдуцированных осадков. Согласно величинам модельного возраста габбро и кварцевых диоритов $(T_{\rm Nd}({\rm DM}) = 1.06 - 1.20$ млрд лет), субдуцированные осадки формировались за счет мезонеопротерозойской, а не раннедокембрийской коры, что согласуется с модельным возрастом ксеногенных и магматических цирконов из лейкогаббро (≤1.1—1.2 млрд лет). Вклад субдуцированных осадков в магмообразование подтверждается и повышенным содержанием некогерентных элементов (легких РЗЭ и Th) в кварцевых диоритах в сравнении с плагиогранитоидами. Эти особенности редкоэлементного и изотопного состава габброидов и диоритов отличают их генезис от плагиогранитоидов, генерация которых происходила, наиболее вероятно, из океанических базальтов в основании островной дуги.

Таким образом, изотопные параметры вендских островодужных габброидных, диоритовых и плагиогранитоидных ассоциаций первой и второй групп указывают, что их исходные расплавы выплавлялись из деплетированных, но различающихся по изотопному составу источников с $\varepsilon_{\rm Hf}$ от +16.3 до +5.6. Эти данные свидетельствуют о гетерогенности вендской надсубдукционной мантии и островодужной коры и коррелируют с широким диапазоном $\varepsilon_{\rm Nd}$ (от +9.9 до +4.8) в островодужных вулканитах и ассоциирующих осадочных породах [Ковач и др., 2011; Kröner et al., 2014].

К третьей группе относятся ордовикские двуполевошпатовые граниты массива Их-Замын (483 ± ± 2 млн лет). Породы этого массива по Nd изотопным параметрам ($\varepsilon_{Nd} = 1.7$; $T_{Nd}(DM) = 1.09$) перекрываются с породами второй группы, но отличаются более низкими є_{нг}и пониженными (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀. Магматические цирконы из гранитов имеют наиболее низкие значения $\varepsilon_{\rm Hf}$ (от +5.9 до +2.1) среди всех изученных нами пород, но сопоставимы с содержащимися в них раннекембрийскими ксеногенными цирконами ε_{Hf} (от +4.9 до +4.1). Формирование гранитов этого массива происходило после процессов аккреции и коллизии вендских и раннекембрийских островодужных систем Озерной зоны с докембрийскими образованиями Дзабханского микроконтинента. Исходные расплавы для гранитов могли формироваться за счет как вендских, так и раннекембрийских островодужных ассоциаций с умеренно деплетированными изотопными характеристиками, тектоническое совмещение которых произошло в результате аккреционно-коллизионных процессов. На это указывают геологические данные, а именно прорывание гранитами массива вендских вулканогенных и раннекембрийских вулканогенно-осадочных комплексов Озерной зоны (см. рис. 1). Этому не противоречат данные о присутствии в гранитах ксеногенного циркона с раннекембрийскими возрастами (536—529 млн лет), а также близкие значения $\varepsilon_{\rm Hf}$ магматического и ксеногенного циркона. Кроме того, в образовании двуполевошпатовых гранитов должен был участвовать более дифференцированный коровый источник, обогащенный некогерентными элементами и вовлеченный в плавление при аккреции островодужных комплексов с окраиной Дзабханского микроконтинента. Резкая смена магмообразующего субстрата проявлена как в изменении изотопного состава, так и в отчетливом обогащении гранитов K_2O , Rb, Nb, Ta, Th и U в сравнении со всеми предшествующими ассоциациями. В пользу такой интерпретации свидетельствует отсутствие гранитоидов с подобным редкоэлементным и изотопным составом на субдукционном этапе.

Все изученные островодужные интрузивные породы содержат ксеногенный циркон с ограниченным диапазоном возрастов от 716 до 559 млн лет. Важно отметить, что ксеногенные цирконы близки по изотопному составу Hf к магматическим цирконам из тех же пород и характеризуются положительными $\varepsilon_{\rm Hf}$, отражающими их ювенильный источник. Исходя из возраста ксеногенного циркона в плагиогранитоидах и габброидах ~716, 658—642, 613—611 млн лет [Руднев и др., 2021]), кора Озерной зоны могла содержать продукты эрозии пород с позднерифейскими возрастами и деплетированными изотопными характеристиками, которые наблюдаются на сопредельных с Озерной зоной территориях. К таковым можно отнести магматические образования Баян-Хонгорского офиолитового пояса с возрастом 665—636 млн лет [Ковач и др., 2005; Jian et al., 2010] и высокими положительными значениями $\varepsilon_{\rm Nd}(665) =$ +11.5...+4.9 [Ковач и др., 2005; Терентьева и др., 2008].

Отсутствие в вендских интрузиях ксеногенных цирконов древнее 716 млн лет, а также «ювенильные» изотопные характеристики цирконов из плагиогранитоидов и габброидов подтверждают формирование вендской островной дуги Озерной зоны во внутриокеанической обстановке на значительном удалении от древних континентальных источников, подобных Байдарикскому блоку Дзабханского микроконтинента. Аналогичные выводы ранее были сделаны на основе анализа данных геологического строения и Nd изотопии вендских и раннекембрийских вулканогенных комплексов [Ярмолюк и др., 2011; Ковач и др., 2011], а также U-Pb и Hf изотопии магматического и ксеногенного циркона из раннепалеозойских интрузивных ассоциаций Озерной зоны [Руднев и др., 2009, 2012, 2019, 2020].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных по петрохимии, геохимии, Sr-Nd изотопному составу пород и Lu-Hf изотопному составу магматических и ксеногенных цирконов из вендских и ордовикских интрузивных комплексов, приуроченных к вендской островодужной структуре Озерной зоны, позволяет выделить среди них три группы: вендские плагиогранитоиды, вендские габброиды и кварцевые диориты и ордовикские двуполевошпатовые граниты.

Источником вендских (559—542 млн лет) субдукционных плагиогранитоидов (Восточно-Баянцаганский, Три Холма, Баян-Цаган-Ула, Тунгалагский, Шутхуинский массивы) служила вендская океаническая/островодужная кора, образованная за счет деплетированной мантии. Это доказывается близкими высокими положительными ε_{Nd} плагиогранитоидов и островодужных вулканитов, а также близкими к DM значениями ε_{Hf} магматических и ксеногенных цирконов из этих пород.

Более низкие величины ε_{Nd} габбро и кварцевых диоритов Таван-Хаирханского и Шутхуинского массивов и ε_{Hf} цирконов из этих пород, а также повышенные (${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_0$ и концентрации K₂O, Rb, Th свидетельствуют в пользу генерации из менее деплетированного мантийного источника, представленного перидотитами мантийного клина, изменение изотопного состава которого произошло на предшествующем субдукционном этапе, под действием флюидов и при участии субдуцированных осадков. Областью эрозии таких осадков служила мезонеопротерозойская, а не раннедокембрийская кора.

Наименее радиогенный изотопный состав Hf магматических и ксеногенных цирконов из ордовикских аккреционно-коллизионных натрокалиевых гранитов массива Их-Замын (~483 млн лет) предполагает их формирование в результате плавления венд-кембрийской островодужной коры при участии более дифференцированных коровых источников, обогащенных Th, Nb, легкими РЗЭ и имеющих пониженные ϵ_{Nd} .

Возраст ксеногенных цирконов (≤716 млн лет) в изученных гранитоидах и габброидах и близость их изотопного Hf состава к магматическим цирконам из тех же пород подтверждают формирование вендской островной дуги Озерной зоны во внутриокеанической обстановке на значительном удалении от древних континентальных источников, подобных Байдарикскому блоку Дзабханского микроконтинента. Изменение характера источников для ордовикских гранитов произошло в связи с аккрецией венд-кембрийских островодужных комплексов с окраиной Дзабханского микроконтинента.

Авторы выражают благодарность Е.А. Крук (ИГМ СО РАН, Новосибирск) за пробоподготовку и обработку графического материала и И.В. Николаевой, С.В. Палесскому (ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск), Т.Б. Баяновой (ГИ КНЦ РАН, Апатиты) за помощь в проведении аналитических исследований, а также рецензентам В.В. Ярмолюку и Т.В. Донской за замечания, ценные советы и рекомендации.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00105).

ЛИТЕРАТУРА

Гибшер А.С., Хаин Е.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Козаков И.К., Ковач В.П., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. Поздневендский возраст хантайширского офиолитового комплекса Западной Монголии // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (8), с. 1179—1185.

Дергунов А.Б. Каледониды Центральной Азии. М., Наука, 1989, 192 с.

Изох А.Э., Поляков Г.В., Гибшер А.С., Балыкин П.А., Журавлев Д.З., Пархоменко В.А. Высокоглиноземистые расслоенные габброиды Центрально-Азиатского складчатого пояса: геохимические особенности, Sm-Nd изотопный возраст и геодинамические условия формирования // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (11), с. 1565—1577.

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Карташов П.М., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Листратова Е.Н., Яковлева С.З. Халдзан-Бурегтейский массив щелочных и редкометалльных магматических пород: строение, геохронология и геодинамическое положение в каледонидах Западной Монголии // Петрология, 2004, т. 12, № 5, с. 467—494.

Ковач В.П., Джен П., Ярмолюк В.В., Козаков И.К., Лю Д., Терентьева Л.Б., Лебедев В.И., Коваленко В.И. Магматизм и геодинамика ранних стадий формирования Палеоазиатского океана: результаты геологических и геохимических исследований офиолитов Баян-Хонгорской зоны // ДАН, 2005, т. 404, № 2, с. 229—234. Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Козловский А.М., Котов А.Б., Терентьева Л.Б. Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии. П. Геохимические и Nd-изотопные данные // Петрология, 2011, т. 19, № 3, с. 1—29.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Хаин Е.В., Ковач В.П., Бережная Н.Г., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В. Этапы и тектонические обстановки формирования комплексов ранних каледонид Озерной зоны Монголии: результаты U-Pb и Sm-Nd изотопных исследований // Геотектоника, 2002, № 2, с. 80—92.

Николаева И.В., Палесский С.В., Козьменко О.А., Аношин Г.Н. Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой // Геохимия, 2008, № 10, с. 1085—1091.

Руднев С.Н., Изох А.Э., Ковач В.П., Шелепаев Р.А., Терентьева Л.Б. Возраст, состав, источники и геодинамические условия формирования гранитоидов северной части Озерной зоны Западной Монголии: механизмы роста палеозойской континентальной коры // Петрология, 2009, т. 17, № 5, с. 470—508.

Руднев С.Н., Изох А.Э., Борисенко А.С., Шелепаев Р.А., Орихаши Ю., Лобанов К.В., Вишневский А.В. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Бумбатхаирханского ареала Озерной зоны Западной Монголии (геологические, петрохимические и геохронологические данные) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 557—578.

Руднев С.Н., Изох А.Э., Борисенко А.С., Гаськов И.В. Гранитоидный магматизм и металлогения Озерной зоны Западной Монголии (на примере Бумбатхаирханского ареала) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (2), с. 207—224.

Руднев С.Н., Мальковец В.Г., Белоусова Е.А., Третьякова И.Г., Гибшер А.А. Состав и возраст плагиогранитоидов южной части Озерной зоны Западной Монголии // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (11), с. 1513—1541.

Руднев С.Н., Мальковец В.Г., Белоусова Е.А., Третьякова И.Г., Серов П.А., Киселева В.Ю., Гибшер А.А., Николаева И.В. Геохимия, Sm-Nd, Rb-Sr, Lu-Hf изотопия, условия формирования и источники плагиогранитоидов южной части Озерной зоны Западной Монголии // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (2), с. 151—174.

Руднев С.Н., Гибшер А.С., Семенова Д.В. Вендский островодужный интрузивный магматизм Озерной зоны Западной Монголии (геологические, геохронологические и петрохимические данные) // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (6), с. 765—781.

Терентьева Л.Б., Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Козловский А.М. Состав, источники и геодинамика формирования пород позднерифейской Баянхонгорской офиолитовой зоны: характеристика начальных стадий развития Палеоазиатского океана // ДАН, 2008, т. 423, № 5, с. 667—671.

Туркина О.М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты // Геохимия, 2000, № 7, с. 704—717.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М., Мир, 1989, 590 с.

Хаин Е.В., Амелин Ю.В., Изох А.Э. Sm-Nd данные о возрасте ультрабазит-базитовых комплексов в зоне субдукции Западной Монголии // ДАН, 1995, т. 341, № 6, с. 791—796.

Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Котов А.Б., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии: І. Геологические и геохронологические данные // Петрология, 2011, т. 19, № 1, с. 83—107.

Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Рыцк Е.Ю. Механизмы формирования континентальной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геотектоника, 2012, № 4, с. 3—27.

Arth J.G. Some trace elements in trondhjemites. Their implications to magma genesis and paleotectonic setting / Ed. F. Barker // Trondhjemites, dacites and related rocks. Amsterdam, Elsevier, 1979, p.123—132.

Badarch G., Cunningham W.D., Windley B.F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia // J. Asian Earth Sci., 2002, v. 21, p. 87—104.

Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kbar // J. Petrol., 1991 (32), p. 365—401.

Belousova E.A., Reid A.J., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Rejuvenation vs. recycling of Archean crust in the Gawler Craton, South Australia: evidence from U—Pb and Hf isotopes in detrital zircon // Lithos, 2009, v. 113, p. 570—582.

Dergunov A.B., Kovalenko V.I., Ruzhentsev S.V., Yarmolyuk V.V. Tectonics, magmatism, and metallogeny of Mongolia. London, Routledge, 2001, 288 p.

Geological map of Mongolia / Ed. O. Tomurtogoo. Ankara, General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey, 1999.

Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: Implications for crustal evolution // Earth Planet. Sci. Lett., 1988, v. 87, p. 249–265.

Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E.A., Jackson S.R., van Achterbergh E., O'Reilly S.Y., Shee S.R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, v. 64, p. 133—147.

Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U—Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons // Precambrian Res., 2004, v. 131, p. 231–282.

Jacobsen S.B., Wesserburg G.J. Sm-Nd evolution of chondrites and achondrites // Earth Planet. Sci. Lett., 1984, v. 67, p. 137—150.

Jahn B.M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic // Aspects of the tectonic evolution of China. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 2004, v. 226, p. 73–100.

Jahn B.M., Wu F., Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic // Trans. R. Soc. Edinburgh., 2000a, v. 91, p. 181—193.

Jahn B.M., Wu F., Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic // Episodes, 2000b, v. 23, p. 82—92.

Jian P., Kröner A., Windley B.F., Shi Y., Zhang F., Miao L., Tomurhuu D., Zhang W., Liu D. Zircon ages of the Bayankhongor ophiolite mélange and associated rocks: time constraints on Neoproterozoic to Cambrian accretionary and collisional orogenesis in Central Mongolia // Precambrian Res., 2010, v. 177, p. 162–180.

Jian P., Kröner A., Jahn B.-M., Windley B.F., Shi Y., Zhang W., Zhang F., Miao L., Tomurhuu D., Liu D. Zircon dating of Neoproterozoic and Cambrian ophiolites in West Mongolia and implications for the timing of orogenic processes in the central part of the Central Asian Orogenic Belt // Earth Sci. Rev., 2014, v. 133, p. 62–93.

Khain E.V., Bibikova E.V., Salnikova E.B., Kroner A., Gibsher A.S., Didenko A.N., Degtyarev K.E., Fedotova A.A. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions // Precambrian Res., 2003, v. 122, p. 329—358.

Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgopolova A., Seltmann R., Alexeiev D.V., Hoffmann J.E., Wong J., Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A., Degtyarev K.E., Rytsk E. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Res., 2014, v. 25, p. 103—125.

Le Maitre R.W. A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell., 1989, 193 p.

Liew T.C., Hofmann A.W. Precambian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study // Contrib. Mineral. Petrol., 1988, v. 98, p. 129–138.

O'Connor J.T.A. A classification of quartz rich igneous rock based on feldspar rations // U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1965, v. 525B, p. B79—B84.

Pearson N.J., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Precision of in situ isotope ratio measurements by LAM-MC-ICPMS // Geochim. Cosmochim. Acta, 2008, v. 72, A732.

Rapp R.P., Watson E.B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling // J. Petrol., 1995, v. 36, p. 891—931.

Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities // Precambrian Res., 1991, v. 151, p. 1–25.

Rickwood P.C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // Lithos, 1989, v. 22, p. 247—263.

Scherer E., Münker C., Mezger K. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock // Science, 2001, v. 293 (5530), p. 683—687.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes / Eds. A.D. Saunders, M. Norry // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 1989, v. 42, p. 313—345.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: Its evolution and composition. London, Blackwell, 1985, 312 p.

Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1986, v. 14, p. 493—571. doi: 10.1146/annurev.ea.14.050186.002425.

Поступила в редакцию 3 июля 2020 г., принята в печать 1 октября 2020 г.