

УДК 550.4:550.42:550.93:552.11:552.3 (571.51)

## МЕТАБАЗИТОВЫЕ ПОРОДЫ СРЕДНЕГО ЗААНГАРЬЯ, ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ: Е-MORB РЕЛИКТЫ НЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

©2017 г. В. В. Врублевский<sup>1</sup>, Р. Н. Никитин<sup>1</sup>, П. А. Тишин<sup>1</sup>, А. В. Травин<sup>2,1</sup><sup>1</sup>Томский государственный университет, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36, e-mail: vasvr@yandex.ru;<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

Поступила в редакцию 02.12.2016 г.; принята к печати 21.02.2017 г.

Приведены первые данные по <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датированию методом ступенчатого нагрева, геохимии редких рассеянных элементов (ICP-MS) и изотопному (Nd, Sr) составу metabasites в бассейнах малых притоков рр. Вельмо и Большой Пит заангарской части Енисейского кряжа. Изученные породы образуют небольшие ареалы субсогласных будинированных пластинообразных тел амфиболитов среди мраморов, кальцифиров и кристаллических сланцев позднего архея и относятся к производными метапикрит-базальтового комплекса. Они имеют сланцеватое полосчатое строение и состоят из роговой обманки в ассоциации с андезином, биотитом, цоизитом, карбонатом, кварцем и аксессуарным апатитом, сфеном, ильменитом. Минеральный парагенезис соответствует условиям низкотемпературного метаморфизма амфиболитовой фации. По химическому составу (SiO<sub>2</sub> – 44–49, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O – 2–4, TiO<sub>2</sub> – 1.1–1.8, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12–17, CaO – 8–11, MgO – 7–11 мас. %; FeO(t)/MgO 1–2) породы соответствуют базальтам и трахибазальтам толеитовой серии океанического дна. Установленный позднедокембрийский (≈700 млн лет) возраст породообразующего амфибола сопоставим с начальными стадиями развития Палеоазиатского океана. По характеру распределения LILE (Ba ≈ 20–1000, Sr ≈ 100–635 г/т) и HFSE (REE – 46–83, Nb – 4–10, Ta – 0.3–0.7, Zr – 30–90, Th 0.6–1.1, U ≈ 0.2 г/т) мафитовые породы соответствуют толеитовым E-MORB, которые формировались в условиях задугового спрединга и имели обогащенный астеносферный источник. Изотопные особенности (ε<sub>Nd</sub>(t) – +3.6...–5.2; T<sub>Nd</sub>DM ≈ 1.4–2.2 млрд лет; <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t) – 0.7046–0.7154) свидетельствуют о том, что мантийный диапиризм мог сопровождаться смешением материала плюмовой, субдукционной и коровой природы (DMM + PREMA + EM). Повышенные концентрации HREE (La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> – 1–3, LREE/HREE – 2.2–3.2) и Y позволяют предполагать отсутствие ретитового граната и экстракцию исходной толеитовой магмы E-MORB в условиях ≈ 4–20 % равновесного плавления шпинелевого лерцолита верхней мантии.

**Ключевые слова:** metabasites, амфиболиты, геохимия, геохронология, Енисейский кряж, Родиния, Палеоазиатский океан, базальтовый магматизм

## METABASITES OF MIDDLE TRANSANGARIA, YENISEI RIDGE: E-MORB RELICTS OF NEOPROTEROZOIC LITHOSPHERE

Vasilii V. Vrublevskii<sup>1</sup>, Radim N. Nikitin<sup>1</sup>, Platon A. Tishin<sup>1</sup>, Aleksei V. Travin<sup>2,1</sup><sup>1</sup>Tomsk State University, 36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia, e-mail: vasvr@yandex.ru;<sup>2</sup>Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Acad. Koptuyuga av., Novosibirsk, 630090, Russia

Received 02.12.2016; accepted 21.02.2017

This work presents first results on <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating by stepwise heating method, as well as geochemistry of rare trace elements by ICP-MS and isotopic (Nd, Sr) composition of metabasites from tributaries basins of Velmo and Bolshoi Pit rivers (Transangaria, Yenisei ridge). The studied rocks form small areas of concordant boudined plate-shape amphibolite bodies among Late Archaean marbles, calciphyres, schists, and are derived from a metapicrite-basalt complex. They have schistose and banded structure and consist of hornblende with andesine, biotite, zoisite, carbonate, quartz, as well as accessory apatite, sphene, and ilmenite. Mineral paragenesis corresponds to the conditions of low-temperature metamorphism of amphibolite facies. Chemical composition of rocks (wt %): 44–49 SiO<sub>2</sub>, 2–4 Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 1.1–1.8 TiO<sub>2</sub>, 12–17 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8–11 CaO, 7–11 MgO; FeO(t)/MgO 1–2 correspond to basalts and trachybasalts of the tholeiitic series from the ocean floor. Rock-forming age of amphibole is Late Precambrian (≈700 Ma) that matches early stages of Paleo Asian Ocean development. According to distribution of LILE (ppm) (≈20–1000 Ba, ≈100–635 Sr) and HFSE (ppm) (46–83 REE, 4–10 Nb, 0.3–0.7 Ta, 30–90 Zr, 0.6–1.1 Th, ≈0.2 U), studied rocks coincide with tholeiitic E-MORB, which formed in the setting of back-arc spreading and had enriched asthenospheric source. Isotopic specifics: ε<sub>Nd</sub>(t) from +3.6 to –5.2; T<sub>Nd</sub>DM ≈ 1.4–2.2 Ga; 0.7046–0.7154 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t) indicate that mantle diapirism could have been accompanied by mixing of plume, subduction and crust (DMM + PREMA + EM) material. High concentrations of HREE (La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 1–3,

**Для цитирования:** Врублевский В.В., Никитин Р.Н., Тишин П.А., Травин А.В. (2017) Метабазитовые породы Среднего Заангарья, Енисейский кряж: E-MORB реликты неопротерозойской литосферы. *Литосфера*, 17(5), 67–84. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-067-084

**For citation:** Vrublevskii V.V., Nikitin R.N., Tishin P.A., Travin A.V. (2017) Metabasites of Middle Transangaria, Yenisei Ridge: E-MORB relicts of Neoproterozoic lithosphere. *Litosfera*, 17(5), 67–84. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-067-084

LREE/HREE – 2.2–3.2) and Y allow us to assume absence of restite garnet and extraction of primary tholeiitic E-MORB magma under setting/conditions of  $\approx 4\text{--}20\%$  equilibrium melting of spinel lherzolite from upper mantle.

**Keywords:** metabasites, amphibolites, geochemistry, geochronology, Yenisei ridge, Rodinia, Paleasian Ocean, basaltic magmatism

#### Acknowledgements

The authors are grateful to the staff of the Analytical Center “Geochemistry of Natural Systems” of Tomsk State University (Tomsk), the Laboratory of Geochronology and Isotope Geochemistry of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (Apatity) and the Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS (Novosibirsk) for their participation in the research.

*The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project 5.8988.2017/6.7).*

## ВВЕДЕНИЕ

Современные геодинамические реконструкции океанов рассматривают проявления мафитового магматизма как своеобразный индикатор тектонических режимов в обстановках спрединга, субдукции, внутриплитных горячих точек [Pearce, 2008; Богатиков и др., 2010; Dilek, Furnes, 2011]. Как правило, его докембрийские производные подвергаются метаморфическим преобразованиям, что маскирует магматическую природу и условия эволюции первоначальных базальтоидных ассоциаций.

Метабазитовые комплексы фиксируются во многих регионах мира, отражая различные стадии развития палеоокеанов [Ernst, 2014]. Характерным примером является складчато-надвиговый пояс Енисейского кряжа, где среди древних метаморфических толщ Заангарья и Ангаро-Канского выступа распространены субсогласные тела измененных базитов и/или амфиболитов протерозойского возраста [Корнев и др., 1999; Ножкин и др., 2007, 2011; Туркина, Ножкин, 2008, 2014; Лиханов, Ревердатто, 2015]. В заангарской части их проявления приурочены к Татарско-Ишимбинскому глубинному разлому и Приенисейской сдвиговой зоне. По времени образования метабазитовые породы сопоставимы с рубежами  $\approx 1100$ ,  $800\text{--}780$  и  $700$  млн лет, совпадающими с эпохами раскальвания суперконтинента Родинии и раскрытия Палеоазиатского океана [Meert, Powell, 2001; Meert, Torsvik, 2003]. Продукты мафитового магматизма, сопровождающего эти процессы, отмечаются во многих фрагментах древней литосферы [Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. Предполагается, что происхождение родоначальных расплавов было вызвано мантийной активностью, которая в океанической обстановке способствовала возникновению ассоциаций типа MORB, BABB, OIB. По-видимому, развитием рифтогенеза в неопротерозое обусловлено внедрение субсинхронных ( $\approx 780\text{--}740$  млн лет) габбро-долеритов Саяно-Байкальского дайкового пояса на южной окраине Сибирского кратона [Гладкочуб и др., 2007].

Исследованные нами метабазитовые породы в средней части Заангарья по геохимическим признакам сопоставимы с толеитовыми производными E-MORB магматизма. Предположительно, его развитие связывается с формированием активной континентальной окраины на начальном этапе эволюции Палеоазиатского океана.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Содержания петрогенных и редких элементов измерены методами рентгенофлуоресцентного анализа (XRF, энергодисперсионный спектрометр Oxford ED2000) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр высокого разрешения Agilent 7500cx) соответственно, в Аналитическом центре “Геохимия природных систем” Томского государственного университета (ТГУ, г. Томск). Химический состав породообразующих амфиболов определен на электронном микроскопе Vega TS5130/36 LM с системой микроанализа INCA Energy + INCA Wave (ТГУ, г. Томск).

Изотопный состав Sm–Nd и Rb–Sr изучен по методике [Баянова, 2004] на масс-спектрометрах Finnigan MAT 262 и МИ 1201–Т в Геологическом институте КНЦ РАН, г. Апатиты. Концентрации Rb и Sr определены изотопным разбавлением с точностью 1%. Среднее по стандарту La Jolla  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511828 \pm 22$  ( $N = 9$ ) на 14.04.2015 г. Величина эпсилон и первичные изотопные отношения неодима и стронция рассчитаны на возраст 700 млн лет (современный CHUR  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ ;  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ ), UR ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$ ;  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0827$ ). Модельный возраст T(Nd)DM рассчитан с учетом современного состава деплетированной мантии:  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51315$ ;  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2137$ .

Изотопный состав аргона в породообразующем амфиболе измерен на масс-спектрометре Noble gas 5400 в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) после облучения фракций (0.25–0.5 мм) на ядерном реакторе Томского политехнического университета и очистки выделенного газа по принятой методике [Врублевский и др., 2011].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ  
 И  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ХРОНОЛОГИЯ

Енисейский кряж представляет собой докембрийский ороген на западной окраине Сибирского кратона. В его субмеридиальной структуре выделяется два различных по строению сегмента: Заангарье и более древний Ангаро-Канский выступ. Согласно палеогеодинамическим реконструкциям складчато-надвиговый пояс заангарской части Енисейского кряжа мог возникнуть в результате коллизии одного или нескольких террейнов и окраины Сибирского кратона в интервале ~ 1100–950, 900–850 и 760–720 млн лет [Vernikovskiy et al. 2003; Верниковский и др., 2009; Лиханов и др., 2014; Kuzmichev, Sklyarov, 2016]. При этом считается, что тектоническая эволюция сопровождалась гранитоидными интрузиями [Верниковский, Верниковская, 2006] и двухэтапным (~850 и 800 млн лет) метаморфизмом [Лиханов и др., 2010; Likhanov et al., 2015]. Предположительно, эпоха неопротерозойского тектогенеза завершилась аккрецией островодужных и офиолитовых комплексов Приенисейского пояса ~700–630 млн лет назад [Vernikovskiy et al., 2003]. В Заангарье почти синхронно с ней (~730–610 млн лет) происходило развитие внутриплитного гранитного, щелочного и карбонатитового магматизма [Врублевский и др., 2003, 2011; Верниковский, Верниковская, 2006; Сазонов и др., 2007; Верниковский и др., 2008; Ножкин и др., 2008; Gertner et al. 2011; Романова и др., 2012], производные которого преимущественно распространены вдоль Татарско-Ишимбинской разломной зоны в Центральном-Ангарском террейне. На всем своем протяжении она также контролирует размещение большинства проявлений докембрийских метабазитовых пород в регионе (рис. 1а). Их изначально вулканогенная природа и формирование в условиях палеорифтинга установлены для индикаторных базальтоидных ассоциаций Приангарья и Тейско-Чапского прогиба на севере Енисейского кряжа [Ножкин и др. 2007, 2008, 2011].

Изученные нами метабазиты образуют ограниченные по площади ареалы субсогласных будинированных пластинообразных тел (до 2000 × 30 м) амфиболитов среди карбонатных пород (мраморов, каль-

цифиров) и кристаллических сланцев в долинах рек Тырада и Малая Кадра, притоков рр.Теи и Панимбы соответственно (рис. 1б). Согласно легенде к государственной геологической карте эти амфиболиты объединяются в шумихинский метапикрит-базальтовый комплекс, входящий в состав малогаревской метасерии позднеархейского(?) возраста [Государственная геологическая карта ..., 2009]. Амфиболиты представляют собой мелко-среднезернистые породы темно-зеленого цвета со сланцевато-полосчатой, реже массивной текстурой. Для них характерно гранонематобластовое строение, основные минералы представлены магнезиально-железистой роговой обманкой (табл. 1), средним плагиоклазом ( $An_{26-38}$ ), в качестве второстепенных рассматриваются кварц, ортоклаз, цоизит, кальцит, биотит, апатит, сфен, ильменит. Минеральные парагенезисы соответствуют условиям низкотемпературных зон амфиболитовой фации метаморфизма.

Время образования амфибола из метабазитовых пород оценивалось по результатам изотопного Ar-Ar анализа (табл. 2, рис. 2). Спектр выделения аргона по образцу из местонахождения на реке Малая Кадра характеризуется хорошо выраженным 3-х ступенчатым плато (извлечение  $^{39}\text{Ar}$  ~ 93 %) в диапазоне  $675 \pm 10$  млн лет, что может соответствовать времени закрытия K-Ar изотопной системы минерала. В метабазитовых породах реки Тырада его спектр имеет два плато с дискордантными значениями возраста  $707 \pm 6$  и  $544 \pm 5$  млн лет. Для наиболее высокотемпературных ступеней с близкими датами характерны максимальное отношение Ca/K и повышенная доля выделенного  $^{39}\text{Ar}$  ~ 54 %, позволяющие предполагать образование амфибола в позднем рифее. Полученная датировка ~700 млн лет совпадает с интегральным возрастом (~697 млн лет) образца из бассейна р. Малая Кадра, что может свидетельствовать об относительной синхронности изученных метабазитовых пород. По-видимому, наблюдаемое низкотемпературное спектральное плато на 544 млн лет является следствием перестройки изотопной системы минерала в условиях ретроградного метаморфизма, связанного с надвиговой тектоникой [Likhanov et al., 2015] и развитием более позднего внутриплитного магматизма в регионе.

Таблица 1. Химический состав породообразующих амфиболов в метабазитах, мас. %.

Table 1. Chemical composition of rock-forming amphiboles in metabasites, wt %

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	FeO*	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Σ
Бассейн р. Малая Кадра										
1	43.82	0.53	11.05	10.30	0.29	17.42	11.98	1.07	0.24	96.70
2	42.67	0.44	10.77	9.68	0.26	16.31	11.23	1.08	0.23	92.67
Бассейн р. Тырада										
3	42.92	0.58	12.06	8.30	0.28	18.32	11.40	1.47	0.53	95.86

Примечание. В каждом образце проводилось по 10 измерений. \* – суммарное железо.

Note: 10 measurements were carried out for each sample. \* – total iron.

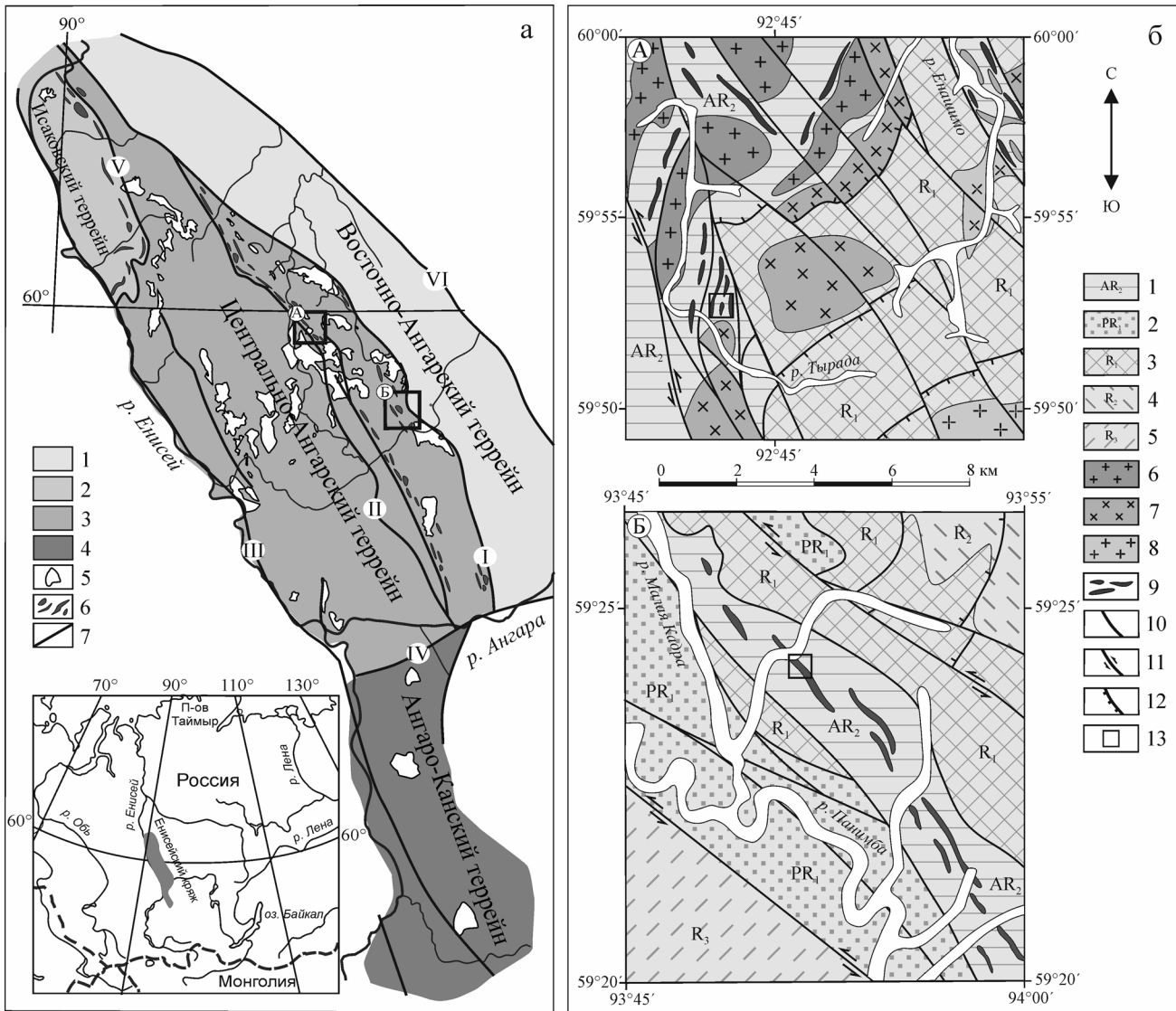


Рис. 1. Геологическая позиция метабазитовых пород Заангарья.

а – структурно-тектоническая схема Енисейского кряжа, по [Vernikovskiy et al., 2003; Ношкин и др., 2011]. 1 – мезо- и неопротерозойские метаосадочные комплексы Восточно-Ангарского террейна; 2 – неопротерозойские метаосадочные и вулканогенные комплексы Исаковского террейна; 3 – архейские, палео-, мезо- и неопротерозойские метаосадочные комплексы Центрально-Ангарского террейна; 4 – архейские и палеопротерозойские гранулитовые и гнейсовые комплексы Ангаро-Канского террейна; 5 – гранитоидные массивы; 6 – пояса распространения метабазитовых пород; 7 – региональные зоны разломов: I – Ишимбинская, II – Татарская, III – Енисейская, IV – Нижне-Ангарская, V – Исаковская, VI – Ангаро-Бахтинская.

б – схемы геологического строения в бассейнах рек Тырада (А) и Малая Кадра (Б), составлены по материалам геологических съемок (Стороженко, Зуев, 1981; Хисамутдинов, 1990; Стороженко, Васильев, 2003; Журавлев, Попереков, 2004; Колямкин, Середенко, 2006), 1 – плагиогнейсы, гнейсы, мраморы, амфиболиты малогаревского комплекса архея (AR<sub>2</sub>); 2 – мраморы, амфиболиты, биотитовые кристаллосланцы, кварциты палеопротерозоя (PR<sub>1</sub>, рязановская свита); 3–5 – породы рифейского (R<sub>1–3</sub>) возраста: 3 – биотит-хлорит-серицитовые сланцы, кварцевые и аркозовые метапесчаники кординской свиты, 4 – серицит-хлоритовые сланцы горбилковской и удерейской свит, 5 – филлиты шунтарской свиты; 6–8 – гранитоидные комплексы неопротерозоя: 6 – тейский, 7 – среднетырадинский, каламинский, 8 – чиримбинский, аяхтинский; 9 – амфиболиты; 10–12 – дизъюнктивные нарушения: субвертикальные разломы (10), сдвиги (11), надвиги (12); 13 – места отбора проб.

На врезке показано географическое расположение Енисейского кряжа.

Fig. 1. Geological position of Transangarian metabasites.

а – Structural tectonic scheme of Yenisey ridge [Vernikovskiy et al., 2003; Nozhkin et al., 2011]. 1 – Meso- and Neoproterozoic metasediment complexes of East Angarian terrain; 2 – Neoproterozoic metasediment and volcanogenic complexes of Isakovskiy terrain; 3 – Paleoproterozoic, Meso- and Neoproterozoic metasediment complexes of Central Angarian terrain; 4 – Archean and Paleoproterozoic granulitic and gneiss complexes of Angarian-Kansk terrain; 5 – granitoid massifs; 6 – metabasites distribution belts; 7 – re-

gional fault zones: I – Ishimbinskaya, II – Tatarskaya, III – Yeniseiskaya, IV – Nizhne-Angarskaya, V – Isakovskaya, VI – Angaro-Bakhtinskaya.

б – schemes of geological structure of areas of Tyrada (А) and Malaya Kadra (Б) according to materials of geological surveys (Storozhenko, Zuev, 1981; Hisamutdinov, 1990; Storozhenko, Vasil'ev, 2003; Zhuravlev, Poperekov, 2004; Kolyamkin, Seredenko, 2006), 1 – plagiogneisses, gneisses, marbles, amphibolites of Malogarevsky complex (AR<sub>2</sub>); 2 – marbles, amphibolites, biotite schists, Paleoproterozoic quartzites (PR<sub>1</sub>, Ryazanovskaya Formation); 3–5 – Riphean (R<sub>1-3</sub>) rocks: biotite-chlorite-sericite schists, quartzose and arkose metasandstones (Kordinskaya Formation) (3), sericite-chlorite schists (Gorbilokskaya and Udereyskaya Formations) (4), phyllites (Shuntarskaya Formation) (5) all; 6–8 – Neoproterozoic granitoid complexes: Tevsky (6), Srednetyradinsky, Kalaminsky (7), Chirimbinsky, Ayakhtinsky (8); 9 – amphibolites; 10–12 – disjunctive faults: subvertical faults (10), strike-slip faults (11), thrust faults (12); 13 – sampling points.

Geographical location of Yenisei ridge is shown on the inset.

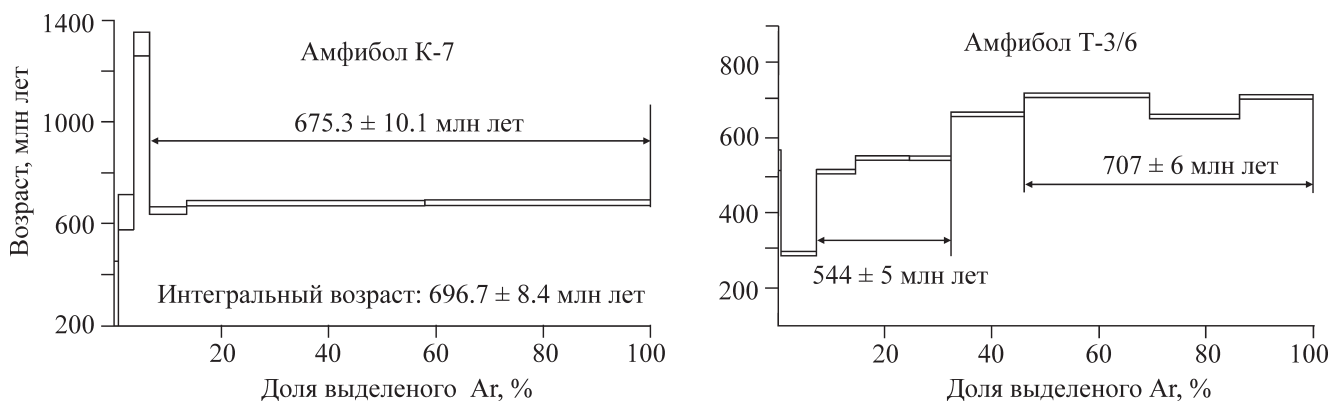
**Таблица 2.** Результаты <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar изотопного анализа амфибола метабазитовых пород в бассейнах рек Малая Кадра (обр. К-7) и Тырада (обр. Т-3/6)

**Table 2.** Results of <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar isotopic analysis of amphibole samples of metabasites from Malaya Kadra (sample K-7) and Tyrada (sample T-3/6) rivers basins

T°C	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar ± 1σ	<sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar ± 1σ	<sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar ± 1σ	<sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar ± 1σ	Σ <sup>39</sup> Ar, %	Ca/K	Возраст ± 1σ, млн. лет
Обр. К-7, 120.7 мг, J = 0.003553 ± 0.000033, возраст плато 675.3 ± 10.1 млн лет							
500	299.9 ± 56.6	0.029 ± 0.052	15.8 ± 11.4	0.944 ± 0.255	0.7	57.0	130.3 ± 323
700	192.4 ± 9.7	0.077 ± 0.039	26.8 ± 14.2	0.242 ± 0.051	3.7	96.6	645.5 ± 70.7
850	380.3 ± 13.5	0.122 ± 0.033	13.6 ± 9.5	0.274 ± 0.036	6.7	49.0	1307.4 ± 47
950	144.3 ± 1.6	0.040 ± 0.011	25.9 ± 6.9	0.074 ± 0.009	13.5	93.1	651.5 ± 15.0
1050	138.5 ± 0.87	0.024 ± 0.002	35.6 ± 1.8	0.032 ± 0.006	57.9	128.1	680.5 ± 10.2
1130	138.6 ± 0.97	0.015 ± 0.007	23.9 ± 2.3	0.031 ± 0.007	100.0	86.0	682.1 ± 11.0
Обр. Т-3/6, 135.7 мг, J = 0.003536 ± 0.000033, возраст плато 707 ± 6 млн лет							
500	134.5 ± 2.5	0.060 ± 0.02	1.266 ± 0.191	0.122 ± 0.018	0.7	4.6	539.1 ± 27.2
600	56.4 ± 0.2	0.032 ± 0.006	1.439 ± 0.032	0.023 ± 0.003	7.2	5.2	291.6 ± 5.8
700	101.2 ± 0.2	0.026 ± 0.001	1.669 ± 0.034	0.031 ± 0.002	14.5	6.0	508.5 ± 5.4
800	106.6 ± 0.3	0.025 ± 0.003	0.796 ± 0.023	0.023 ± 0.003	24.6	2.9	545.1 ± 5.8
875	108.2 ± 0.2	0.026 ± 0.004	1.501 ± 0.048	0.029 ± 0.002	32.3	5.4	544.1 ± 5.1
950	126.2 ± 0.08	0.011 ± 0.002	3.029 ± 0.015	0.004 ± 0.001	46.1	10.9	661.0 ± 5.2
1000	138.9 ± 0.07	0.017 ± 0.0006	5.004 ± 0.008	0.009 ± 0.001	69.5	18.0	710.4 ± 5.5
1050	127.3 ± 0.2	0.022 ± 0.002	4.076 ± 0.024	0.013 ± 0.002	86.3	14.7	654.3 ± 5.6
1130	139.3 ± 0.2	0.021 ± 0.002	6.994 ± 0.035	0.013 ± 0.001	100.0	25.2	706.6 ± 5.7

Примечание. J – параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

Note. J – neutron flux characterizing parameter.



**Рис. 2.** Результаты <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датирования породообразующих амфиболов.

Показаны спектры амфиболов из метабазитовых пород в бассейнах рек Тырада (обр. Т-3/6) и Малая Кадра (К-7). Стрелками обозначен возраст, рассчитанный по методу плато.

**Fig. 2.** Results of <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating of rock-forming amphiboles

Spectra of amphiboles of metabasites from basins of Tyrada (sample T-3/6) and Malaya Kadra (sample K-7) are shown. Arrows point to age calculated by plateau method.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ  
И ИЗОТОПНАЯ (Nd-Sr) СИСТЕМАТИКА

**Петрогенные и редкие элементы.** Изученные метабазиты характеризуются невысокой кремне-

кислотностью ( $\text{SiO}_2$  – 44–49 мас. %) и щелочностью ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  – 2–4 мас. %), что соответствует *TAS*-параметрам нормальных базальтов и трахибазальтов (табл. 3, рис. 3а). За исключением постоянных вариаций  $\text{TiO}_2$  (1.1–1.8 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$

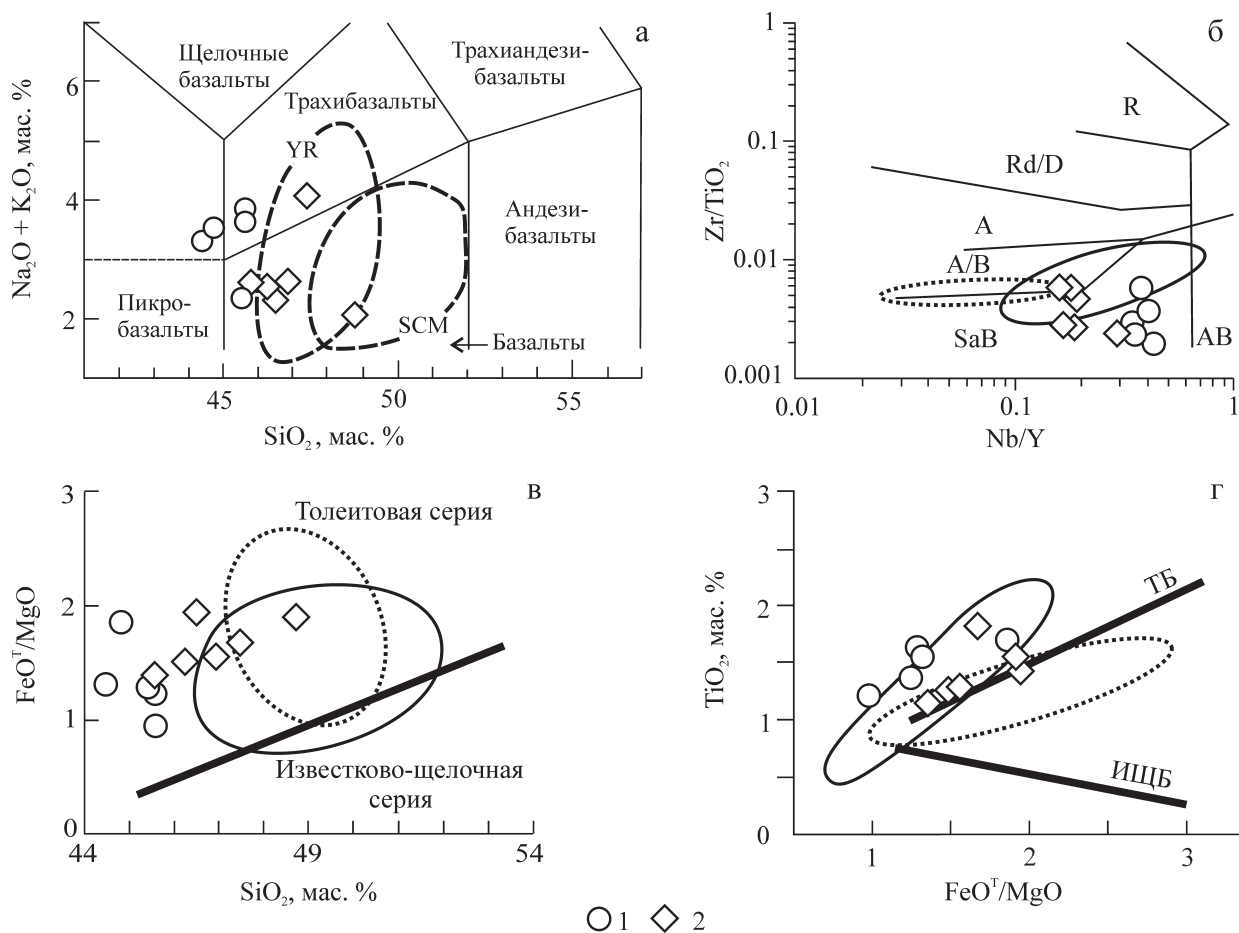
**Таблица 3.** Представительный химический состав метабазитовых пород Среднего Заангарья

**Table 3.** Representational chemical composition of metabasites of Middle Transangaria

Компонент	Бассейн р. Тырада					Бассейн р. Малая Кадра					
	T-1/1	T-5/2	T-3/3	T-3/6	T-4/2	K-7	K-9	K-10	K-11	K-12	K-13
$\text{SiO}_2$ , мас. %	45.46	45.60	44.34	44.71	45.65	46.41	46.21	45.65	46.93	47.36	48.74
$\text{TiO}_2$	1.63	1.40	1.54	1.66	1.21	1.44	1.31	1.13	1.29	1.82	1.52
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.72	13.58	14.79	13.15	13.19	12.66	13.31	12.76	13.56	12.77	13.17
$\text{Fe}_2\text{O}_3^*$	13.60	14.46	15.49	17.18	11.96	16.80	15.69	15.34	14.43	15.33	15.03
MnO	0.14	0.15	0.12	0.16	0.13	0.22	0.18	0.32	0.18	0.16	0.20
MgO	9.33	10.36	10.53	8.35	11.27	7.82	9.55	10.22	8.43	8.25	7.12
CaO	11.25	8.46	7.65	8.88	11.07	11.00	11.25	11.29	11.37	8.82	10.61
$\text{Na}_2\text{O}$	1.05	2.55	1.64	2.62	2.76	2.03	2.18	1.99	2.36	3.89	1.81
$\text{K}_2\text{O}$	1.31	1.29	1.71	0.90	1.06	0.32	0.32	0.35	0.29	0.24	0.24
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.18	0.24	0.22	0.24	0.15	0.20	0.16	0.19	0.20	0.31	0.20
П.п.п.	0.87	1.76	1.65	1.25	1.61	0.82	0.29	0.37	0.30	0.12	0.30
Сумма	98.66	98.09	98.03	97.85	98.44	98.90	100.18	99.23	99.03	98.95	98.64
Sc, г/г	32	29	39	39	33	38	38	34	37	27	27
Cr	188	144	146	133	231	138	139	135	313	127	123
Co	37	51	42	34	47	46	41	49	53	44	57
Ni	72	63	62	51	87	103	98	103	146	117	132
Li	58	32	81	37	25	11	10	10	11	11	12
Cs	0.99	0.97	9.4	2.1	1.5	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.09
Rb	54	42	137	40	70	0.62	0.74	0.97	0.94	0.91	1.7
Ba	214	740	1087	448	286	27	21	31	36	21	57
Sr	635	356	325	373	400	311	325	291	189	236	110
Y	25	22	27	27	21	24	24	23	25	20	20
Nb	10	9	10	9	7.3	3.9	4.1	4.4	4.7	3.7	6.1
Ta	0.71	0.65	0.71	0.67	0.50	0.28	0.31	0.30	0.33	0.27	0.29
Zr	61	28	90	50	27	87	36	57	75	48	36
Hf	1.5	0.84	2.2	1.2	0.89	2.4	1.1	1.7	2.2	1.5	1.3
Pb	13	24	14	13	6.1	2.1	2.5	2.4	2.3	1.9	1.9
Th	0.90	0.94	1	1.1	0.76	0.72	0.73	0.67	0.78	0.61	0.68
U	0.24	0.25	0.21	0.25	0.19	0.19	0.21	0.18	0.22	0.19	0.25
La	9	10	10	11	8	4.6	4.1	3.9	5.3	3.8	4.8
Ce	24	26	26	27	20	13	12	13	16	12	20
Pr	3.2	3.4	3.5	3.5	2.7	2.1	1.9	1.9	2.3	1.7	2
Nd	15	16	16	16	13	11	10	10	12	9	10
Sm	4.2	4.1	4.4	4.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.7	3.1	3.1
Eu	1.3	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.4	1.1	1.1
Gd	4.9	4.6	5.2	5.1	3.9	4.4	4.5	4.2	4.6	3.9	3.8
Tb	0.81	0.75	0.86	0.84	0.65	0.75	0.76	0.72	0.79	0.67	0.65
Dy	5.1	4.7	5.5	5.4	4.2	4.9	4.9	4.7	5.1	4.3	4.2
Ho	1.1	1	1.2	1.2	0.89	1.1	1.1	1	1.1	0.91	0.90
Er	3	2.7	3.2	3.1	2.5	2.9	2.9	2.7	3	2.5	2.5
Tm	0.44	0.40	0.48	0.47	0.36	0.42	0.42	0.40	0.44	0.36	0.36
Yb	2.7	2.4	2.9	2.9	2.3	2.6	2.6	2.4	2.6	2.2	2.1
Lu	0.38	0.34	0.42	0.41	0.31	0.37	0.36	0.34	0.37	0.30	0.30
$\Sigma\text{REE}$	75.1	77.6	80.8	82.6	63.5	52.7	50.1	49.7	58.7	45.8	55.8
$\Sigma\text{LREE}$	56.7	60.7	61	63.2	48.4	35.3	32.6	33.2	40.7	30.7	41
$\Sigma\text{HREE}$	18.4	16.9	19.8	19.4	15.1	17.4	17.5	16.5	18	15.1	14.8
$\text{La/Yb}_N$	2.4	3	2.5	2.7	2.5	1.3	1.1	1.2	1.5	1.2	1.6

Примечание.  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  – суммарное железо.

Note.  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  – total iron.



**Рис. 3.** Петрохимическая систематика метабазитовых ассоциаций.

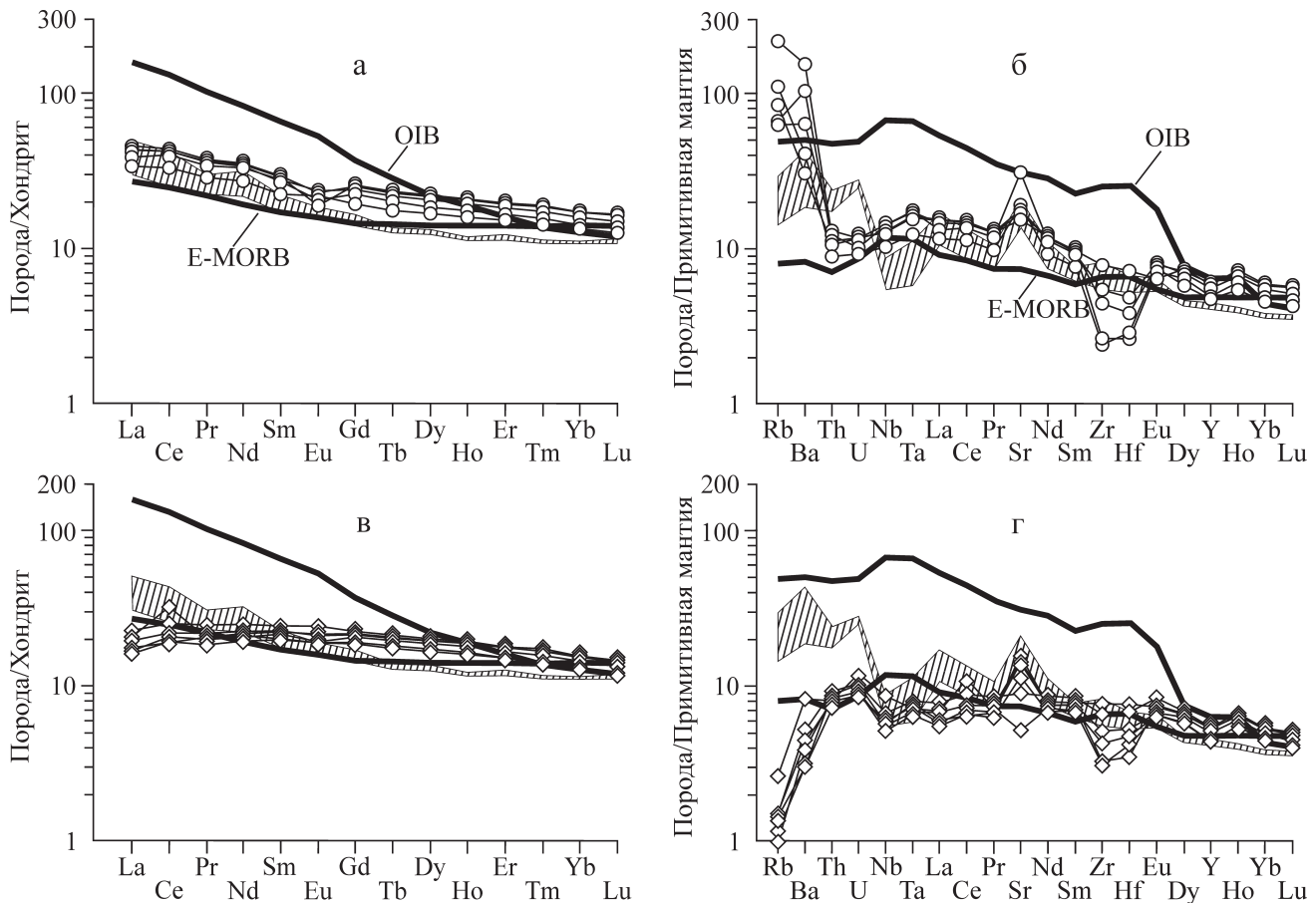
Здесь и на рис. 4, 5, 6: метабазитовые породы в бассейнах рек Тырада (1) и Малая Кадра (2).  
 а – TAS-диаграмма. Классификационные поля приведены по [Le Maitre et al., 1989]. Штриховой линией оконтурены области преобладающих составов мезо-, неопротерозойских метабазальтоидов Енисейского кряжа (YR) [Ножкин и др. 2008, 2011; Лиханов, Ревердатто, 2015] и Саяно-Байкальского дайкового пояса на южной окраине Сибирского кратона (SCM) [Гладкочуб и др., 2007].  
 б – диаграмма  $Zr/TiO_2-Nb/Y$ , по [Winchester, Floyd, 2007]. АВ – щелочные базальты, SaB – субщелочные базальты, А/В – андезиты/базальты, А – андезиты, Rd/D – риодациты/дациты, R – риолиты.  
 в–г – дискриминация базальтов толеитовой (ТБ) и известково-щелочной (ИЩБ) серий, по [Miyashiro, 1974].  
 На б–г точечный пунктир оконтуривает композиционные поля мезопротерозойских метабазитов Приангарья [Ножкин и др., 2011], сплошная жирная линия – неопротерозойские метабазиты Саяно-Байкальского дайкового пояса и Енисейского кряжа [Гладкочуб и др., 2007; Лиханов, Ревердатто, 2015].

**Fig. 3.** Petrochemical systematization of metabasites.

Here and on Fig. 4, 5, 6: metabasites of Tyrada (1) and Malaya Kadra (2) rivers basins.  
 a – TAS diagram. Classification fields are given according to [Le Maitre et al., 1989]. Dashed line delineates areas of prevailing compositions of Meso-, Neoproterozoic metabasaltoids of Yenisei Ridge (YR) [Nozhkin et al., 2008, 2011; Likhanov, Reverdatto, 2015] and Sayan-Baikal dike set at southern margin of Siberian craton (SCM) [Gladkochub et al., 2007].  
 б –  $Zr/TiO_2-Nb/Y$  diagram, according to [Winchester, Floyd, 2007]. AB – alkaline basalts, SaB – subalkaline basalts, A/B – andesites/basalts, A – andesites, Rd/D – rhyodacites/dacites, R – rhyolites.  
 в–г – discrimination of basalts of tholeiitic (ТБ) and calc-alkaline (ИЩБ) series, according to [Miyashiro, 1974].  
 б–г – composite fields of Mesoproterozoic metabasites of Transangaria (dotted line) [Nozhkin et al., 2011], Neoproterozoic metabasites of Sayan-Baikal dike set and Yenisei ridge (solid bold line) [Gladkochub et al., 2007; Likhanov, Reverdatto, 2015].

(13–15 мас. %), породы в бассейнах рек Тырада и Малая Кадра заметно отличаются по характеру щелочности ( $Na_2O/K_2O$  – 0.8–2.9, 5.7–16), средним содержаниям железа ( $Fe_2O_3$  – 14.5, 15.4 мас. %), магния ( $MgO$  – 10, 8.6 мас. %) и кальция ( $CaO$  –

9.5, 10.7 мас. %) соответственно. Наряду с другими докембрийскими метабазальтоидами Енисейского кряжа и южной окраины Сибирского кратона, общей чертой их химизма является принадлежность к производным толеитовой серии (см.



**Рис. 4.** Распределение редких элементов в метабазитовых породах.

а–б – амфиболиты бассейна р. Тырада; в–г – амфиболиты бассейна р. Малая Кадра. Средние содержания редких элементов в примитивной мантии, хондрите, базальтах океанических островов (OIB) и обогащенных базальтах срединно-океанических хребтов (E-MORB) приведены по [Sun, McDonough, 1989]. Заштрихована область, ограниченная средними составами базальтов внутриокеанических и континентальных островных дуг, по [Kelemen et al., 2003].

**Fig. 4.** Rare elements distribution in metabasites.

а–б – amphibolites of Tyrada river basin; в–г – amphibolites of Malaya Kadra river basin. Average contents of rare elements in primitive mantle, chondrite, oceanic island basalts (OIB) and enriched mid-oceanic-ridge basalts (E-MORB) are given according to [Sun, McDonough, 1989]. The area limited with average compositions of oceanic and continental island arcs basalts is shaded, according to [Kelemen et al., 2003].

рис. 3в, г), свойственной основным эффузивам океанического дна.

Установленное в амфиболитах распределение редкоземельных и большинства HFS-элементов имеет сходство со средним составом базальтов E-MORB типа (рис. 4). Вместе с тем, для пород бассейна р. Тырада характерны относительная обогащенность редкими элементами и более высокий уровень дифференцированности лантаноидов ( $\Sigma\text{REE} - 64-83$ ,  $\text{La}/\text{Yb}_N - 2.4-3$ ; см. табл. 3). Особенно заметны различия по содержанию литофильных Li, Cs, Rb, Ba, Sr, а также Pb, которое достигает или превышает уровень среднего OIB, что может быть вызвано влиянием гетерогенного мантийного источника и коровой контаминации расплава. По-видимому, признаками взаимодействия

исходных магм с материалом материковой окраины, в том числе зон субдукции, являются средние значения LILE/HFSE ( $\text{Ba}/\text{La} \approx 57$ ;  $\text{Ba}/\text{Nb} \approx 60$ ;  $\text{Rb}/\text{Nb} \approx 8$ ), значительно повышенные по сравнению с составами как метабазитов бассейна р. Малая Кадра, так и наиболее распространенных океанических базальтов.

Изученные породы обеднены Zr и Hf (27–90; 0.8–2.4 г/т), что не свойственно даже примитивным MORB (см. рис. 4). Похожие аномалии могут отражать не только региональные особенности эволюции инициального магматизма, но также в целом невысокий уровень концентрирования этих химических элементов в амфиболах [Bea et al., 2006; Coingt et al., 2013]. Кроме того, в условиях метаморфизма накопление Zr в роговой обманке просле-

**Таблица 4.** Изотопный состав неодима и стронция в амфиболитах Среднего Заангарья

**Table 4.** Isotopic composition of Nd and Sr in amphibolites of Middle Transangaria

№ образца	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})\text{T}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}\text{T}$	$\text{T}(\text{Nd})_{\text{DM}}$ , млн. лет
K-7	4.67	15.70	0.179869	$0.512672 \pm 11$	0.511847	+2.19	2156
T-3/6	4.73	17.84	0.160413	$0.512655 \pm 11$	0.511919	+3.60	1419
T-5/2	5.40	30.69	0.106336	$0.511958 \pm 13$	0.511470	-5.18	1691
№ образца	Rb, г/г	Sr, г/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\text{T}$	$\varepsilon_{\text{Sr}}\text{T}$	
K-7	0.596	205	0.008199	$0.70518 \pm 19$	0.70510	+20.7	
T-3/6	81.3	365	0.628842	$0.71088 \pm 21$	0.70460	+13.5	
T-5/2	49.9	241	0.584391	$0.72128 \pm 15$	0.71544	+168	

Примечание. Среднее по стандарту LaJolla =  $0.511828 \pm 22$  (N = 9.). Период измерений 14.04.2015 года. Расчет первичных параметров на 700 млн лет.

Note. Average value under the standard LaJolla =  $0.511828 \pm 22$  (N = 9.). Measurement period 14.04.2015. Primary parameters calculation for 700 Ma.

живается, как правило, с увеличением температуры кристаллизации минерала и степени преобразований исходной породы [Скублов, 1993; Другова и др., 1998]. Снижение значений  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ , наблюдаемое в амфиболитах Заангарья (см. рис. 3б), согласуется с субщелочной спецификой их химизма.

**Изотопы неодима и стронция.** Установленные в породах широкие вариации изотопного состава неодима ( $\varepsilon_{\text{Nd}}\text{T}$  – от +3.6 до -5.2;  $\text{T}(\text{Nd})_{\text{DM}} \approx 1.4\text{--}2.2$  млрд лет; табл. 4, рис. 5г) свидетельствуют о разнородном составе субстрата, принимавшего участие в породообразовании. С ними согласуются изотопные отношения  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\text{T}$  – 0.7046–0.7154 (см. табл. 4), которые также позволяют предполагать смешение вещества мантийных протолитов PREMA или DMM с материалом обогащенного EM-резервуара и осадочных отложений типа GLOSS. Взаимодействие с компонентами земной коры отмечается при становлении многих разновозрастных вулканических и интрузивных комплексов плюмовой природы в Северной Азии [Покровский и др., 1998; Покровский, 2000; Doroshkevich et al., 2012; Врублевский и др., 2012, 2014, 2016; Врублевский, 2015].

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Источники вещества и геодинамическая среда мафитовых пород.** В глобальных геотектонических моделях Сибирский кратон с прилегающими выступами докембрийской складчатости рассматривается как составная часть суперконтинента Родинии, сформировавшегося 1.3–0.9 млрд лет назад [Dalziel et al., 2000; Meert, Powell, 2001; Meert, Torsvik, 2003; Li et al., 2008; Pisarevsky et al., 2008; Богданова и др., 2009; Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. Считается, что последующее воздействие плюма и рифтогенез вызвали его раскалывание и образование Палеоазиатского океана, на ранних ( $\approx 800\text{--}700$  млн лет назад) стадиях которого широко проявился базальтоидный магматизм. По-видимому, установ-

ленный нами  $^{40}\text{Ar}\text{--}^{39}\text{Ar}$  изотопный возраст  $\approx 700$  млн лет по амфиболу метабазитовых пород Среднего Заангарья фиксирует верхнюю границу этого диапазона в регионе и может соответствовать времени более позднего диафореза мафитов, происшедшего при внедрении неопротерозойских (691–629 млн лет) гранитоидных и щелочных магм плюмовой природы [Верниковский, Верниковская, 2006; Романова и др., 2012].

По уровню содержаний главных петрогенных компонентов изученные метабазиты сопоставимы с толеитовыми разновидностями MORB нормальной натриевой и калиево-натриевой щелочности. Вместе с тем, наблюдаемое в них поведение большинства HFSE (см. рис. 4) указывает на происхождение пород из обогащенного мантийного/астеносферного источника, вещество которого нередко участвует в генерации E-MORB бассейнов задугового спрединга [Dilek, Furnes, 2011; Saccani, 2015]. О его вовлечении в процессы магмообразования свидетельствуют соотношения Nb, Th, Ti в метабазитах, характерные для базальтоидов окраинно-морских обстановок (см. рис. 5а, б). Среди аналогичных пород Енисейского кряжа более высокую степень обогащения, соответствующую OIB, демонстрируют только метавулканициты умеренной щелочности в северной части региона. В целом, широкие вариации значений  $\text{La}/\text{Yb}$  и  $\text{Th}/\text{Ta}$  в позднедокембрийских метабазитовых комплексах складчатого обрамления Сибирского кратона [Гладко-чуб и др., 2007; Ножкин и др., 2007, 2008, 2011] отражают их существенные геодинамические отличия (см. рис. 5в). На этом фоне породы Среднего Заангарья можно относить к производным базальтового магматизма океанических плато.

Несмотря на преобладание в составе амфиболитов обогащенного астеносферного материала типа E-MORB, установленный в них характер накопления литофильных элементов (см. рис. 4) позволяет предполагать некоторое участие в магмогенезе субдукционной компоненты. Ее влиянием обусловле-

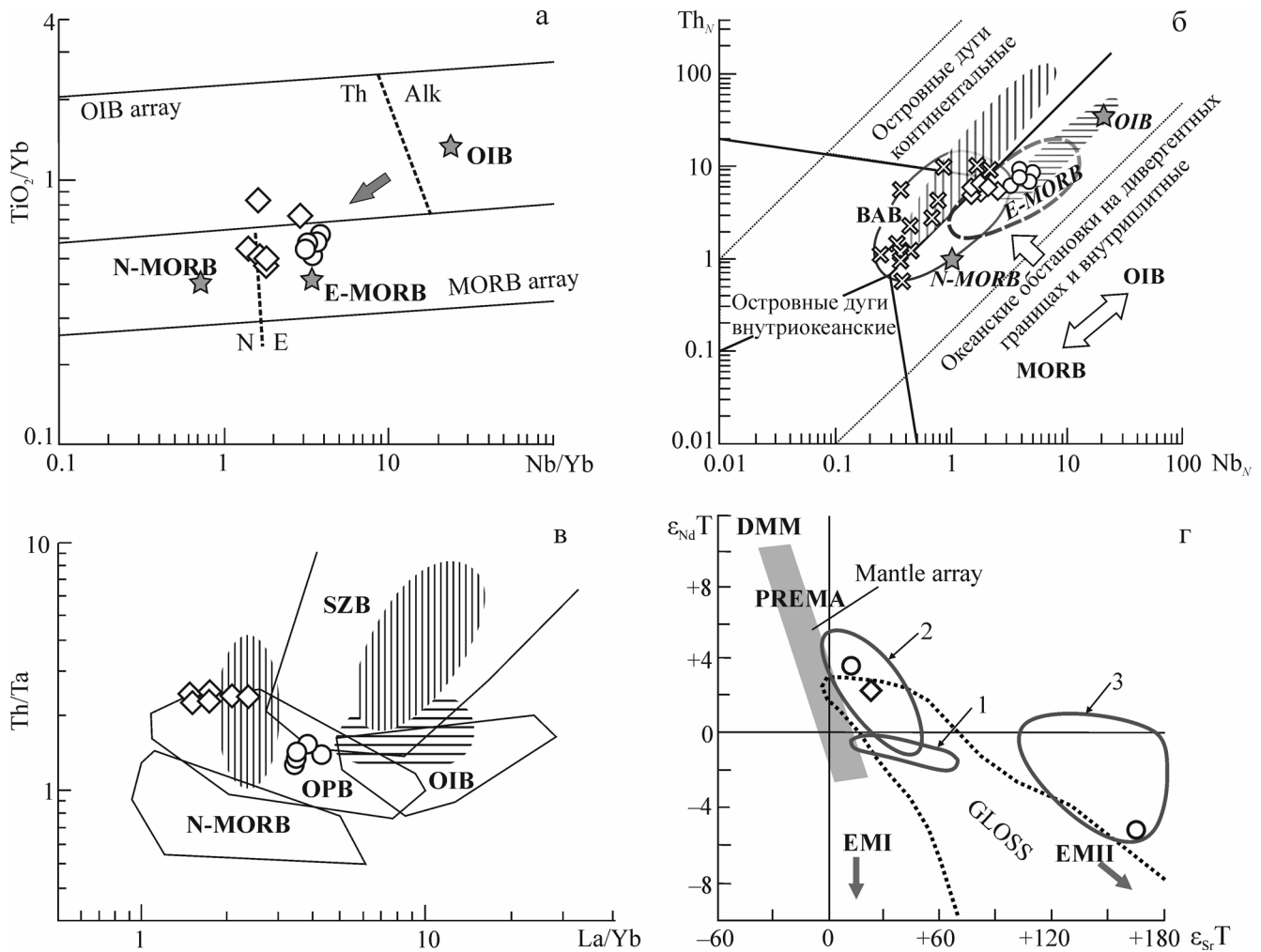


Рис. 5. Геохимическая дискриминация метабазитовых пород.

а – диаграмма  $TiO_2/Yb-Nb/Yb$  с разделением на толеитовые (Th) и щелочные (Alk) базальты, по [Pearce, 2008]. Условные значки изученных амфиболитов см. на рис. 3. Звездочками показаны средние составы нормальных и обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов (N-, E-MORB) и океанических островов (OIB), по [Sun, McDonough, 1989]. Режим взаимодействия плюма с литосферой обозначен стрелкой.

б – диаграмма  $Th_N-Nb_N$  геотектонической типизации постархейских офиолитовых/океанических базальтов, по [Saccani, 2015]. BAB (Back-Arc Basalts) – базальты задуговых бассейнов. Концентрации Th и Nb нормализованы по N-MORB [Sun, McDonough, 1989]. Крестами отмечены составы протерозойских метабазальтов бассейна реки Рыбная, Приангарье [Ножкин и др., 2011].

в – диаграмма  $Th/Ta-La/Yb$  для геодинамической интерпретации базальтов зон субдукции (SZB), океанических плато (OPB) и островов (OIB), срединно-океанических хребтов (N-MORB), по [Tomlinson, Condie, 2001].

г – изотопный состав Nd и Sr (см. табл. 4). Область “Mantle array” и положение резервуаров DMM, PREMA, EM I, EM II приведены в соответствии с их современными изотопными параметрами, по [Zindler, Hart, 1986]. Пунктиром ограничено композиционное поле GLOSS (Global Subducting Sediment), по [Plank, Langmuir, 1998]; сплошным контуром (1–3) показаны: метадиабазы и туфы,  $T \approx 840$  млн лет (1), мафит-ультрамафитовые породы офиолитового комплекса,  $T \approx 825$  млн лет (2) в Южном Китае [Zhang et al., 2012b; Zhang, Wang, 2016], метабазальты и долериты,  $T \approx 800-740$  млн лет (3) Таримского блока в СЗ Китае [Zhang et al., 2010]. На рисунке заштрихованы области преобладающих составов неопротерозойских ( $\approx 800-700$  млн лет) метабазальтоидов и долеритов Енисейского кряжа (горизонтальная штриховка) и Саяно-Байкальского дайкового пояса (вертикальная штриховка), по [Гладкочуб и др., 2007; Ножкин и др., 2008; Лиханов, Ревердатто, 2015].

Fig. 5. Geochemical discrimination of metabasites.

а –  $TiO_2/Yb-Nb/Yb$  diagram with discrimination of tholeiitic (Th) and alkaline (Alk) basalts, according to [Pearce, 2008]. Symbols for studied amphibolites are given at fig. 3. Asterisks point to average contents of normal and enriched mid-oceanic-ridge basalts (N-, E-MORB) and oceanic island basalts (OIB), according to [Sun, McDonough, 1989]. Interaction mode of plume and lithosphere is designated with the arrow.

б –  $Th_N-Nb_N$  diagram of geotectonic typification of postarchean ophiolitic/oceanic basalts, according to [Saccani, 2015]. BAB – Back-Arc Basalts. Th and Nb contents are normalized to N-MORB [Sun, McDonough, 1989]. Crosses point to proterozoic metabasalts compositions from Rybnaya river basin, Angara region [Nozhkin et al., 2011].

в – Th/Ta–La/Yb diagram for geodynamic interpretation of subduction zone basalts (SZB), oceanic plateau (OPB) and island basalts (OIB), normal mid-oceanic-ridge basalts (N–MORB), according to [Tomlinson, Condie, 2001].  
г – isotopic composition of Nd and Sr (table 4). “Mantle array” area and location of DMM, PREMA, EM I, EM II reservoirs are given according to actual isotopic parameters, according to [Zindler, Hart, 1986]. Dashed line outlines GLOSS (Global Subducting Sediment) composite field, according to [Plank, Langmuir, 1998]; solid lines 1–3 show: metadiabases and tuffs,  $T \approx 840$  mln years (1), mafic-ultramafic rocks of ophiolitic complex,  $T \approx 825$  mln years (2) in South China [Zhang et al., 2012b; Zhang, Wang, 2016], metabasalts and dolerites,  $T \approx 800$ –740 mln years (3) of Tarim plate in Northwest China [Zhang et al., 2010]. Areas of pre-vailing compositions of Neoproterozoic ( $\approx 800$ –700 mln years) metabasaltoids and dolerites of Yenisei ridge (horizontal hatching) and Sayan-Baikal dike set (vertical hatching) are shown, according to [Gladkochub et al. 2007; Nozhkin et al. 2008; Likhanov, Reverdatto, 2015].

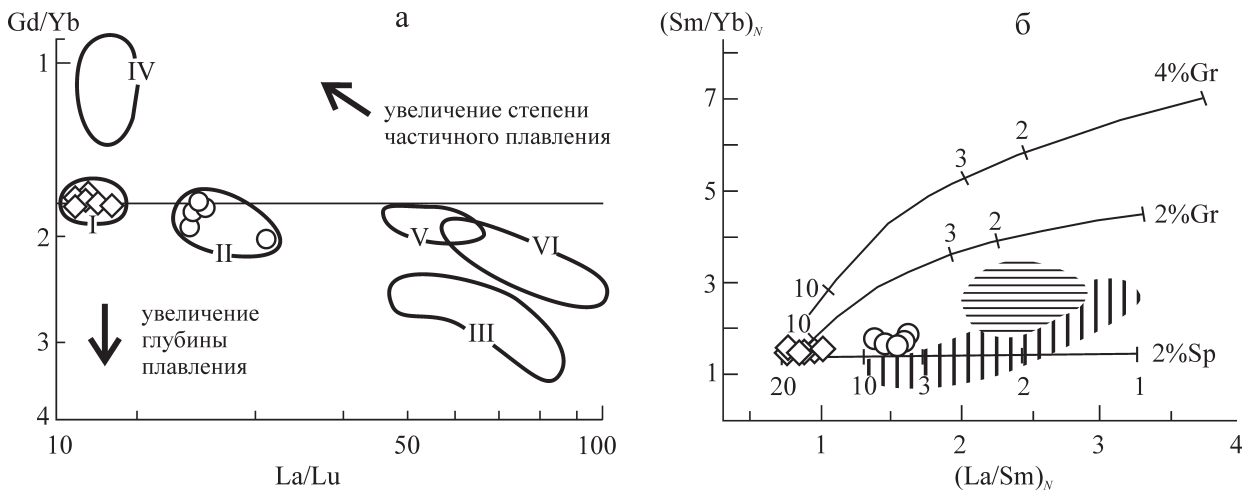
ны не только повышенные отношения LILE/HFSE, но и сопоставимые с IAB содержания Nb и Ta. Наблюдаемые в породах низкие концентрации Zr также характерны для островодужных толеитов [Pearce, Cann, 1973]. Как уже отмечалось, в данном случае дополнительным фактором такого обеднения мог быть процесс поздней амфиболитизации. Показателем вероятного взаимодействия ювенильной магмы с континентальной корой является величина  $Th/U \approx 3$ –4 в позднедокембрийских метавулканитах Заангарья, которая обычно достигает сходных значений ( $\approx 4$ ) в отложениях типа GLOSS или верхней земной коры [Plank, Langmuir, 1998; Rudnick, Gao, 2003]. По-видимому, в результате различного по масштабам смешения вещества мантии DMM/PREMA и осадков, подобных GLOSS, изотопные параметры метабазитов сильно варьируют ( $\epsilon_{Nd} +3.6 \dots -5.2$ ,  $\epsilon_{Sr} 13.5$ –168;  $T(Nd)_{DM} \approx 1.4$ –2.2 млрд лет; см. табл. 4, рис. 5г). Для кислых эффузивов бимодальных ассоциаций близкого возраста, распространенных в заангарской части Енисейского кряжа, характерны еще более обогащенные субстраты ( $\epsilon_{Nd} \approx -8 \dots -10$ ;  $T(Nd)_{DM} \approx 2.1$ –2.3 млрд лет) [Ножкин и др., 2008], что может отражать не только их длительную коровую эволюцию, но и мантийную гетерогенность с участием вещества EM. Аналогичным образом ( $\epsilon_{Nd} \approx +5 \dots -11$ ;  $\epsilon_{Sr} \approx 10$ –180) изменяется состав неопротерозойских амфиболитов, мафитовых пород офиолитовых ассоциаций, метабазальтов, долеритовых даек в кратонных областях Китая и Австралии [Li et al., 2006; Xia et al., 2012; Zhang et al., 2010, 2012a, 2012b; Zhang, Wang, 2016]. Они также считаются фрагментами древней океанской литосферы, образовавшейся при распаде Родинии, и рассматриваются как производные мантийного диапиризма, в разной степени контаминированные материалом земной коры или субдукционных флюидов.

**Происхождение материнских базитовых магм.** Для обоснования природы E–MORB привлекаются модели образования базальтовых магм в результате либо взаимодействия плюма и астеносферной мантии [Schilling et al., 1985], либо рециклинга океанической литосферы, включая OIB, в зоне субдукции [Hofmann, White, 1982; Donnelly et al. 2004; Hemond et al., 2006; Waters et al., 2011]. В последнем случае за счет инфильтрации небольших порций расплавов-флюидов, отделившихся

от эклогитизированного слэба, происходит метасоматическое обогащение перидотитов мантийного клина несовместимыми редкими элементами. Считается, что преобразованные перидотиты после длительного (сотни млн лет) нахождения в верхней мантии могут быть вовлечены в процессы  $\approx 9\%$  плавления под срединно-океаническими хребтами (выше “гранат-шпинелевого перехода”) и генерации E–MORB [Donnelly et al. 2004].

Метабазитовые породы в бассейнах рек Тырада и Малая Кадра при сходном среднем содержании Cr и Sc ( $\approx 160$ –170;  $\approx 34$  г/т) отличаются по величине Ni/Co  $\approx 1.3$ –1.9; 2.1–2.8 и  $(La/Yb)_N \approx 2.4$ –3; 1.1–1.6 соответственно, что указывает на более дифференцированный характер мафитов реки Тырада. Тем не менее, по сравнению с другими подобными комплексами неопротерозоя на окраине Сибирского кратона с коэффициентом  $(La/Yb)_N$  до  $\approx 4$ –11, их предполагаемая магматическая эволюция проявлена незначительно и геохимические особенности пород во многом могли определяться составом и степенью парциального плавления мантийного протолита. По-видимому, относительно повышенные средние концентрации HREE  $\Sigma$  (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)  $\approx 16$ –18 г/т, LREE/HREE – 2.2–3.2,  $La_N/Yb_N$  1–3 и Y  $\approx$  до 23 г/т в метабазитах Среднего Заангарья свидетельствуют об отсутствии релитового граната при магмообразовании в условиях  $\approx 4$ –20% равновесного плавления модельного лерцолита мантии, содержащего 2% шпинели (рис. 6б). Такое увеличение доли расплава может дополнительно вызывать наблюдаемое обеднение амфиболитов цирконием.

Согласно экспериментам гранат в пиролитовом субстрате MORB становится неустойчивым при  $P < 2.8$  Гпа, т.е. на глубине менее 85 км [Robinson, Wood, 1998]. Поэтому, в случае изученных мафитовых пород, предполагается, что экстракция исходной магмы E–MORB осуществлялась в лерцолитовой мантии на более низкобарическом глубинном уровне ( $\approx 60$ –80 км) фациального перехода гранат-шпинель. По сравнению с ними для близких по возрасту метабазальтов повышенной щелочности Енисейского кряжа и большинства долеритов южной окраины Сибирского кратона вероятно относительно невысокая  $\approx 1$ –10% степень плавления магматического протолита, но уже с небольшим количеством стабильного граната (см. рис. 6а, б).



**Рис. 6.** Условия генерации родительских магм метаботитов Енисейского кряжа и южной окраины Сибирского кратона.

а – диаграмма Gd/Yb–La/Lu [Boyce et al., 2015] сравнительной оценки глубины и масштабов плавления протолитов. Оконтуры области составов неопротерозойских ( $\approx 800$ –700 млн лет) метаботитовых пород в бассейнах рек Малая Кадра (I) и Тырада (II), Северного Заангарья (III) [Ножкин и др., 2008; Лиханов, Ревердатто, 2015], Шарьжалгайского выступа (IV), Бирюсинской глыбы (V), Северного и Западного Прибайкалья (VI) [Гладкочуб и др., 2007].

б – диаграмма  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ – $(\text{La}/\text{Sm})_N$  [Bi et al., 2015] составов и степени частичного плавления вероятных мантийных субстратов. Соотношения лантаноидов нормализованы по хондриту [Sun, McDonough, 1989]. На кривых плавления лерцолитов с разным содержанием граната (Gr) и шпинели (Sp) указана доля расплава в процентах. Остальные условные обозначения см. на рис. 3, 5.

**Fig. 6.** Conditions of generation of parental magma of metabasites of Yenisei ridge and southern margin of Siberian craton.

а – Gd/Yb–La/Lu diagram [Boyce et al., 2015] of comparative estimation of depth and scope of protolith fusion. Areas of distribution of neoproterozoic ( $\approx 800$ –700 Ma) metabasites from Malaya Kadra (I) and Tyrada (II) rivers basins, North Transangaria (III) [Nozhkin et al., 2008; Likhonov, Reverdatto, 2015], Sharyzhalgaysky ridge (IV), Biryusinsky block (V), North and West Baikal regions (VI) [Gladkochub et al., 2007] are delineated.

б –  $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ – $(\text{La}/\text{Sm})_N$  diagram [Bi et al., 2015] of compositions and partial fusion extent of probable mantle substrata. Lanthanides ratios are normalized to chondrite [Sun, McDonough, 1989]. Fusion curves of lherzolites with different contents of garnet (Gr) and spinel (Sp) are shown with melt percentage. The rest symbols are designated at fig. 3, 5.

Это указывает на возрастание глубины мантийного источника и подтверждается увеличением в породах Gd–Yb параметра, обычно характеризующего разную совместимость лантаноидов в гранате [Irving, Frey, 1978]. По существующим оценкам [Song et al., 2009], зависимость Gd/Yb ( $\approx 1.7$ –1.9) – La/Sm ( $\approx 1.5$ –2.5), установленная в амфиболитах Среднего Заангарья, позволяет допустить в качестве их E–MORB-источника шпинелевый перидотит с примерным соотношением 80/20 шпинели к гранату.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установленная для метаботитов изотопная дата  $\approx 700$  млн лет согласуется с возрастом некоторых аналогичных мафитовых пород в заангарской части Енисейского кряжа и сопоставима с временем процессов рифтогенного распада Родинии и раскрытия Палеоазиатского океана. Предполагается, что характерный для них диафорез эпидот-амфиболитовой фации был вызван тепловым воздействием развитых в регионе субсинхронных щелочных и гранитоидных интрузий.

2. По геохимическим особенностям амфиболиты сходны с проявлениями неопротерозойского базальтового магматизма в Енисейском кряже и соответствуют толеитовым разновидностям E–MORB, генерированных из обогащенного астеносферного источника в условиях задугового спрединга. При этом мантийный диапиризм мог сопровождаться смешением материала плюмовой (DMM + PREMA + EM), субдукционной и коровой природы.

3. Концентрации и соотношение LREE/HREE в метаботитовых породах свидетельствуют о возможности образования исходной толеитовой магмы E–MORB в условиях  $\approx 4$ –20% равновесного плавления существенно шпинелевого лерцолита верхней мантии на относительно небольших глубинах – 60–80 км.

Авторы благодарны сотрудникам Аналитического центра “Геохимия природных систем” Томского государственного университета (г. Томск), лаборатории геохронологии и изотопной геохимии Геологического института КНЦ РАН (г. Апати-

ты) и Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) за участие в исследованиях.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 1013), Российского научного фонда (проект 5.8988.2017/6.7) и Программы повышения конкурентоспособности Томского государственного университета 2013–2020 гг.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баянова Т.Б. (2004) Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 174 с.
- Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. (2010) Магматизм, тектоника, геодинамика Земли (Ред. В.В. Ярмолюк). М.: Наука, 606 с.
- Богданова С.В., Писаревский С.А., Ли Ч.Х. (2009) Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440). Стратиграфия. Геологическая корреляция, **17**(3), 29-45.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е. (2006) Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа. Геология и геофизика, **47**(1), 35-52.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Верниковская И.В., Матушкин Н.Ю., Яснев А.М. (2008) Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? Докл. АН, **419**(1), 90-94.
- Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Советов Ю.К. (2009) Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геологоструктурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные. Геология и геофизика, **50**(4), 380-393.
- Врублевский В.В. (2015) Источники и геодинамические условия петрогенезиса Верхнепетропавловского щелочно-базитового интрузивного массива (средний кембрий, Кузнецкий Алатау, Сибирь), Геология и геофизика, **56**(3), 488-515.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Гутиерес-Алонсо Г., Хофманн М., Гринев О.М., Тишин П.А. (2014) Изотопная (U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr) геохронология щелочно-базитовых плутонов Кузнецкого Алатау. Геология и геофизика, **55**(11), 1598-1614.
- Врублевский В.В., Гринев О.М., Изох А.Э., Травин А.В. (2016) Геохимия, изотопная (Nd-Sr-O) триада и  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраст палеозойских щелочно-мафитовых интрузий Кузнецкого Алатау (на примере Белогорского плутона). Геология и геофизика, **57**(3), 592-602.
- Врублевский В.В., Крупчатников В.И., Изох А.Э., Гертнер И.Ф. (2012) Щелочные породы и карбонаты Горного Алтая (комплекс Эдельвейс): индикатор раннепалеозойского плюмового магматизма в Центрально-Азиатском складчатом поясе. Геология и геофизика, **53**(8), 945-963.
- Врублевский В.В., Покровский Б.Г., Журавлев Д.З., Аношин Г.Н. (2003) Вещественный состав и возраст пенченгинского линейного комплекса карбонатитов, Енисейский кряж, Петрология, **11**(2), 145-163.
- Врублевский В.В., Ревердатто В.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Тишин П.А. (2011) Неопротерозойский карбонатитовый магматизм Енисейского кряжа, Центральная Сибирь:  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$ -геохронология пенченгинского комплекса. Докл. АН, **437**(4), 514-519.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Скляр Е.В., Пономарчук В.А. (2007) Петрологические индикаторы процессов растяжения на юге Сибирского кратона, предшествующие раскрытию Палеоазиатского океана. Геология и геофизика, **48**(1), 22-41.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2009) Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 500 с.
- Другова Г.М., Скублов С.Г., Астафьев Б.Ю., Щеглова Т.П., Савельева Т.Е., Крылов И.Н. (1998) Особенности распределения микроэлементов в кальциевых амфиболах метаморфических пород докембрия Записки ВМО, (5), 91-104.
- Корнев Т.Я., Качевский Л.К., Ножкин А.Д., Даценко В.М., Стороженко А.А., Заблоцкий К.А., Романов А.П. (1999) Рабочая схема корреляции магматических и метаморфических комплексов Енисейского кряжа. Региональные схемы корреляции магматических и метаморфических комплексов Алтас-Саянской складчатой области. Новосибирск, СНИИГГиМС, 17-46.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. (2014) Мантийные плюмы северо-восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений. Геология и геофизика, **55**(2), 153-184.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Травин А.В. (2010) Верхнерифейский возраст кианит-силлиманитового метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  данным). Докл. АН, **433**(6), 796-801.
- Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. (2014) Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона. Геотектоника, (5), 32-53.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. (2015) Неопротерозойские комплексы-индикаторы континентального рифтогенеза как свидетельство процессов распада Родинии на западной окраине Сибирского кратона // Геохимия, (8), 675-694.
- Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. (2011) Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика, **52**(1), 158-181.
- Ножкин А.Д., Постников А.А., Наговицин А.В., Травин А.В., Станевич А.М., Юдин Д.С. (2007) Чингасанская серия неопротерозоя Енисейского кряжа: Новые данные о возрасте и условиях формирования. Геология и геофизика, **48**(12), 1307-1320.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б. Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Постников А.А., Травин А.В., Эрнст Р.Е. (2008) Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии. Геология и

- геофизика, **49**(7), 666-688.
- Покровский Б.Г. (2000) Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М.: Наука, 228 с.
- Покровский Б.Г., Андреева Е.Д., Врублевский В.В., Гринев О.М. (1998) Природа контаминации щелочно-габброидных интрузий южного обрамления Сибирской платформы по данным изотопии стронция и кислорода. *Петрология*, **6**(3), 259-273.
- Романова И.В., Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Larionov A.N. (2012) Неопротерозойский щелочной и ассоциирующий с ним магматизм в западном обрамлении Сибирского кратона: петрография, геохимия и геохронология. *Геология и геофизика*, **53**(11), 1530-1555.
- Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Федорова А.В., Гавриленко В.В., Звягина Е.А., Леонтьев С.И. (2007) Заангарский щелочной интрузив, Енисейский краж: Rb-Sr, Sm-Nd изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии. *Докл. АН*, **413**(6), 798-802.
- Скублов С.Г. (1993) Типохимизм амфиболов нюрндинского комплекса (Северо-Западное Прибайкалье). *Записки ВМО*, (6), 82-88.
- Туркина О.М., Ножкин А.Д. (2014) Геохимия и вопросы генезиса метабазитов из гранулитогнейсового комплекса Ангаро-Канского блока (юго-запад Сибирского кратона). *Геохимия*, (10), 892-906.
- Bea F., Montero P., Ortega M. (2006) A LA-ICP-MS evaluation of Zr reservoirs in common crustal rocks: implications for Zr and Hf geochemistry, and zircon-forming processes. *Canadian Mineralogist*, **44**, 693-714.
- Bi J.H., Ge W.C., Yang H., Zhao G.C., Xu W.L., Wang Z.H. (2015) Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 2015, **234/235**, 27-46.
- Boyce J.A., Nicholls I.A., Keays R.R., Hayman P.C. (2015) Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **169**(11), 21 p.
- Coint N., Barnes C.G., Yoshinobu A.S., Barnes M.A., Buck S. (2013) Use of trace element abundances in augite and hornblende to determine the size, connectivity, timing, and evolution of magma batches in a tilted batholiths. *Geosphere*, **9**(6), 1747-1765.
- Dalziel I.W.D., Mosher S., Gahagan L.M. (2000) Laurentia-Kalahari collision and the assembly of Rodinia // *J. Geol.*, **108**, 499-513.
- Dilek Y., Furnes H. (2011) Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **123**, 387-411.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M. (2012) Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data. *Lithos*, **152**, 157-172.
- Donnelly K.E., Goldstein S.L., Langmuir C.H., Spiegelman M. (2004) Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **226**, 347-366.
- Ernst R.E. (2014) Large igneous provinces. *Cambridge: Cambridge University Press*. 630 p.
- Gertner I., Tishin P., Vrublevskii V., Sazonov A., Zvyagina E., Kolmakov Y. (2011) Neoproterozoic alkaline igneous rocks, carbonatites and gold deposits of the Yenisei ridge, Central Siberia: Evidence of mantle plume activity and late collision shear tectonics associated with orogenic gold mineralization. *Resource Geology*, **61**(4), 316-343.
- Hemond C., Hofmann A.W., Vlastelic I., Nauret F. (2006) Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24° N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**(12), paper GC001317.
- Hofmann A.W., White W.M. (1982) Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 421-436.
- Irving A.J., Frey F.A. (1978) Distribution of trace elements between garnet megacrysts and host volcanic liquids of kimberlitic to rhyolitic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**(6), 771-787.
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. (2003) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry* (Eds. Holland Y.D. and Turekian K.K.). *Elsevier Ltd.*, **3**, 593-659.
- Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. (2016) The Precambrian of Transangaria, Yenisei ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? *J. Asian Earth Scis.*, **115** (1), 419-441.
- Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. *Oxford: Blackwell*, 193 p.
- Li X.H., Li Z.X., Wingate M.T.D., Chung S.L., Liu Y., Lin G.C., Li W.X. (2006) Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, **146**, 1-15.
- Li X.Z., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovskiy V. (2008) Assembly, configuration, and break-up of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, **160**, 179-210.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P. (2015) *P-T-t* constraints on polymetamorphic complexes of the Yenisei Ridge, East Siberia: Implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions. *J. Asian Earth Sciences*. **113**, 391-410.
- Meert J.G., Powell C.M. (2001) Assembly and break-up of Rodinia: introduction to the special volume. *Precambrian Research*, **110**, 1-8.
- Meert J.G., Torsvik T.H. (2003) The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, **375**, 261-288.
- Miyashiro A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. J. Sci.*, **274**, 321-355.
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*. **100**, 14-48.

- Pearce J.A., Cann J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.* **19**, 290-300.
- Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Vernikovskiy V.A. (2008) Proterozoic Siberia: a promontory of Rodinia. *Precambrian Research*, **160**, 66-76.
- Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, **145**, 325-394.
- Robinson J.A.C., Wood B.J. (1998) The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **164**(1/2), 277-284.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* (Eds. Holland Y.D. and Turekian K.K.). *Amsterdam: Elsevier Ltd.* **3**, 1-64.
- Saccani E. (2015) A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geoscience Frontiers*, **6**, 481-501.
- Schilling J.G., Thompson G., Kingsley R., Humphris S. (1985) Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic. *Nature*, **313**, 187-191.
- Song X.Y., Keays R.R., Xiao L., Qi H.W., Ihlenfeld C. (2009) Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Chemical Geology*, **262**, 246-261.
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders A.D. and Norry M.J.). *Geol. Soc. Spec. Publ.* **42**, 313-345.
- Tomlinson K.Y.R., Condie K.C. (2001) Archean mantle plumes: evidence from greenstone belt geochemistry. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.* **352**, 341-358.
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovach V.P. (2003) Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisei Ridge. *Tectonophysics*, **375**(1-4), 147-168.
- Waters C.L., Sims K.W.W., Perfit M.R., Blichert-Toft J., Blusztajn J. (2011) Perspective on the Genesis of E-MORB from Chemical and Isotopic Heterogeneity at 9-10°N East Pacific Rise. *J. Petrol.*, **52**(3), 565-602.
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, **20**, 325-343.
- Xia L., Xia Z., Xu X., Li X., Ma Z. (2012) Mid-Late Neoproterozoic rift-related volcanic rocks in China: Geological records of rifting and break-up of Rodinia. *Geoscience Frontiers*, **3**(4), 375-399.
- Zhang C., Yang D., Wang H., Dong Y., Ye H. (2010) Neoproterozoic mafic dykes and basalts in the southern margin of Tarim, northwest China: age, geochemistry and geodynamic implications // *Acta Geologica Sinica*, **84**(3), 549-562.
- Zhang A., Wang Y., Fan W., Zhang Y., Yang J. (2012a) Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc-back-arc basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite. *Precambrian Research*, **220/221**, 217-233.
- Zhang S.B., Wu R.X., Zheng Y.F. (2012b) Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogeny. *Precambrian Research*, **220/221**, 45-64.
- Zhang Y., Wang Y. (2016) Early Neoproterozoic (~840 Ma) arc magmatism: geochronological and geochemical constraints on the metabasites in the Central Jiangnan Orogen. *Precambrian Research*, **275**, 1-17.
- Zindler A., Hart S.R. (1986) Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.

## REFERENCES

- Bayanova T.B. (2004) *Vozrast reperykh geologicheskikh kompleksov Kol'skogo regiona i dlitel'nost' protsessov magmatizma* [Age of the reference geologic complexes of Kola region and magmatism processes duration]. St.Petersburg, Nauka Publ., 174 p. (In Russian)
- Bea F., Montero P., Ortega M. (2006) A LA-ICP-MS evaluation of Zr reservoirs in common crustal rocks: implications for Zr and Hf geochemistry, and zircon-forming processes. *Canadian Mineralogist*, **44**, 693-714.
- Bi J.H., Ge W.C., Yang H., Zhao G.C., Xu W.L., Wang Z.H. (2015) Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 2015, **234/235**, 27-46.
- Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. (2010) *Magmatizm, tektonika, geodinamika Zemli* (Ed. V.V. Yarmolyuk). [Magmatism, tectonics, geodynamics of the Earth]. M.: Nauka Publ., 606 p. (In Russian)
- Bogdanova S.V., Pisarevsky S.A., Li CH.KH. (2009) [Formation and desintegration of Rhodinia (according to MP-GK 440 results). *Stratigr. Geol. Korrel.*, **17**(3), 29-45. (In Russian)
- Boyce J.A., Nicholls I.A., Keays R.R., Hayman P.C. (2015) Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **169**(11), 21 p.
- Coint N., Barnes C.G., Yoshinobu A.S., Barnes M.A., Buck S. (2013) Use of trace element abundances in augite and hornblende to determine the size, connectivity, timing, and evolution of magma batches in a tilted batholiths. *Geosphere*, **9**(6), 1747-1765.
- Dalziel I.W.D., Mosher S., Gahagan L.M. (2000) Laurentia-Kalahari collision and the assembly of Rodinia // *J. Geol.*, **108**, 499-513.
- Dilek Y., Furnes H. (2011) Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **123**, 387-411.
- Donnelly K.E., Goldstein S.L., Langmuir C.H., Spiegelman M. (2004) Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **226**, 347-366.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M. (2012) Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data. *Lithos*, **152**, 157-172.

- Drugova G.M., Skublov S.G., Astafev B.Yu., Shcheglova T.P., Savel'eva T.E., Krylov I.N. (1998) Features of microelements distribution in calcium amphiboles from Precambrian metamorphic rocks. *Zapiski VMO.* (5), 91-104. (In Russian)
- Ernst R.E. (2014) Large igneous provinces. *Cambridge: Cambridge University Press.* 630 p.
- Gertner I., Tishin P., Vrublevskii V., Sazonov A., Zvyagina E., Kolmakov Y. (2011) Neoproterozoic alkaline igneous rocks, carbonatites and gold deposits of the Yenisei ridge, Central Siberia: Evidence of mantle plume activity and late collision shear tectonics associated with orogenic gold mineralization. *Resource Geology*, **61**(4), 316-343.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., Ponomarchuk V.A. (2007) Petrological indicators of tension processes at the south of the Siberian craton, which predate the Paleasian ocean opening *Geol. Geofiz.*, **48**(1), 22-41. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federacii. (2009) Mashtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Angaro-Enisejskaya. List O-46. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Series Angara-Yenisei. O-46 sheet. Explanatory letter] St.Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 500 p. (In Russian)
- Hemond C., Hofmann A.W., Vlastelic I., Nauret F. (2006) Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24° N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**(12), paper GC001317.
- Hofmann A.W., White W.M. (1982) Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 421-436.
- Irving A.J., Frey F.A. (1978) Distribution of trace elements between garnet megacrysts and host volcanic liquids of kimberlitic to rhyolitic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**(6), 771-787.
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. (2003) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry* (Eds. Holland Y.D. and Turekian K.K.). *Elsevier Ltd.*, **3**, 593-659.
- Kornev T.Ya., Kachevsky L.K., Nozhkin A.D., Datsenko V.M., Storozhenko A.A., Zablotsky K.A., Romanov A.P. (1999) Working scheme for correlation of the magmatic and metamorphic complexes of Yenisei ridge. *Regional'nye skhemy korrelyatsii magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Altae-Sayanskoj skladchatoj oblasti*. [Regional schemes for the correlation of magmatic and metamorphic complexes of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk, SNIIGiMS, 17-46. (In Russian)
- Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. (2016) The Precambrian of Transangaria, Yenisei ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? *J. Asian Earth Scis.*, **115** (1), 419-441.
- Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. (2014) Mantle plumes of the northeast Asia and their role in endogenous mineral deposits formation. *Geol. Geofiz.*, **55**(2), 153-184. (In Russian)
- Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. *Oxford: Blackwell*, 193 p.
- Li X.H., Li Z.X., Wingate M.T.D., Chung S.L., Liu Y., Lin G.C., Li W.X. (2006) Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, **146**, 1-15.
- Li X.Z., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovskiy V. (2008) Assembly, configuration, and break-up of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, **160**, 179-210.
- Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. (2014) Grenville tectonic events and evolution of Yenisei ridge, western margin of Siberian craton. *Geotektonika*, (5), 32-53. (In Russian)
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. (2015) Continental rifting indicating Neoproterozoic complexes as the evidence of Rhodinia disintegration processes at the western margin of Siberian craton. *Geokhimiya*, (8), 675-694. (In Russian)
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P. (2015) *P-T-t* constraints on polymetamorphic complexes of the Yenisei Ridge, East Siberia: Implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions. *J. Asian Earth Sciences*. **113**, 391-410.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Travin A.V. (2010) Upper Riphean age of kyanite-sillimanite metamorphism at Transangaria of Yenisei ridge (according to <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating) *Dokl. Akad. Nauk.*, **433**(6), 796-801. (In Russian)
- Meert J.G., Powell C.M. (2001) Assembly and break-up of Rodinia: introduction to the special volume. *Precambrian Research*, **110**, 1-8.
- Meert J.G., Torsvik T.H. (2003) The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, **375**, 261-288.
- Miyashiro A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. J. Sci.*, **274**, 321-355.
- Nozhkin A.D., Postnikov A.A., Nagovicin A.V., Travin A.V., Stanevich A.M., Yudin D.S. (2007) Chingasansk neoproterozoic series of Yenisei Ridge: New data on the age and conditions of formation. *Geol. Geofiz.*, **48**(12), 1307-1320.
- Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevol'ko P.A. (2011) Late Proterozoic magmatism stages and age boundaries of gold mineralization at the Yenisei ridge. *Geol. Geofiz.*, **52**(1), 158-181. (In Russian)
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bayanova T.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Postnikov A.A., Travin A.V., Ernst R.E. (2008) Neoproterozoic riftogenic and intraplate magmatism at the Yenisei ridge as the indicator of Rhodinia disintegration processes. *Geol. Geofiz.*, **49**(7), 666-688. (In Russian)
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*. **100**, 14-48.
- Pearce J.A., Cann J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.* **19**, 290-300.
- Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V., Gladko-

- chub D.P., Vernikovskiy V.A. (2008) Proterozoic Siberia: a promontory of Rodinia. *Precambrian Research*, **160**, 66-76.
- Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, **145**, 325-394.
- Pokrovskij B.G. (2000) *Korovaya kontaminatsiya mantiynykh magm po dannym izotopnoi geokhimii* [Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry data]. Moscow, Nauka Publ., 228 p. (In Russian)
- Pokrovskiy B.G., Andreeva E.D., Vrublevskii V.V., Grinev O.M. (1998) The nature of contamination of the alkali-gabbroid intrusions from southern margin of the Siberian platform according to strontium and oxygen isotopic studies results. *Petrologiya*, **6**(3), 259-273. (In Russian)
- Robinson J.A.C., Wood B.J. (1998) The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **164**(1/2), 277-284.
- Romanova I.V., Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Yu., Larionov A.N. (2012) Neoproterozoic alkaline and associated magmatism at the western margin of Siberian craton: petrography, geochemistry and geochronology. *Geol. Geofiz.*, **53**(11), 1530-1555. (In Russian)
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* (Eds Holland Y.D. and Turekian K.K.). Amsterdam: Elsevier Ltd. **3**, 1-64.
- Saccani E. (2015) A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geoscience Frontiers*, **6**, 481-501.
- Sazonov A.M., Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Fedorova A.V., Gavrilenko V.V., Zvyagina E.A., Leont'ev S.I. (2007) Transangarian alkaline intrusion, Yenisei ridge: Rb-Sr-, Sm-Nd-isotope dating and late Precambrian feldspathoidic magmas sources. *Dokl. Akad. Nauk*, **413**(6), 798-802. (In Russian)
- Schilling J.G., Thompson G., Kingsley R., Humphris S. (1985) Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic. *Nature*, **313**, 187-191.
- Skublov S.G. (1993) Typochemism of Nyurundukansky complex amphiboles (Northwest Cisbaikalia). *Zapiski VMO*, (6), 82-88. (In Russian)
- Song X.Y., Keays R.R., Xiao L., Qi H.W., Ihlenfeld C. (2009) Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China // *Chemical Geology*, **262**, 246-261.
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders A.D. and Norry M.J.). *Geol. Soc. Spec. Publ.* **42**, 313-345.
- Tomlinson K.Y.R., Condie K.C. (2001) Archean mantle plumes: evidence from greenstone belt geochemistry. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.* **352**, 341-358.
- Turkina O.M., Nozhkin A.D. (2014) Geochemistry and origin issues of metabasites from granulitic gneiss complex of Angarian-Kansk terrain (southwest of Siberian craton). *Geokhimiya*, (10), 892-906. (In Russian)
- Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu., Matushkin N.Yu., Melkin D.V., Sovetov Yu.K. (2009) The geodynamic evolution of the folded framing and the west margin of the Siberian craton in the Neoproterozoic: geological, structural, sedimentological, geochronological and paleomagnetic data. *Geol. Geofiz.*, **50**(4), 380-393. (In Russian)
- Vernikovskij V.A., Vernikovskaya A.E. (2006) Tectonics and evolution of granitoid magmatism of Yenisei ridge // *Geol. Geofiz.*, **47**(1), 35-52. (In Russian)
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Sal'nikova E.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Kotov A.B., Kovach V.P., Vernikovskaya I.V., Matushkin N.Yu., Yasevnev A.M. (2008) Late Riphean alkaline magmatism in the western margin of the Siberian Craton: Is it the result of continental rifting or accretionary events? *Dokl. Akad. Nauk*, **419**(1), 90-94. (In Russian)
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovach V.P. (2003) Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisei Ridge. *Tectonophysics*, **375**(1-4), 147-168.
- Vrublevskii V.V. (2015) Sources and geodynamic conditions of petrogenesis of the Verkhnepetropavlovsky alkali-basic igneous massif (Middle Cambrian, Kuznetsk Alatau, Siberia) *Geol. Geofiz.*, **56**(3), 488-515. (In Russian)
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutierrez-Alonso G., Khofmann M., Grinev O.M., Tishin P.A. (2014) Isotope (U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr) dating of alkali-basic intrusions of Kuznetsk Alatau. *Geol. Geofiz.*, **55**(11), 1598-1614. (In Russian)
- Vrublevskii V.V., Grinev O.M., Izokh A.Eh., Travin A.V. (2016) Geochemistry, isotope (Nd-Sr-O) triad and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating of paleozoic alkali-mafic intrusions of Kuznetsk Alatau (by the example on Belogorsky pluton). *Geol. Geofiz.*, **57**(3), 592-602. (In Russian)
- Vrublevskii V.V., Krupchatnikov V.I., Izokh A.Eh., Gertner I.F. (2012) Alkaline rocks and carbonatites of Altai Mountains (Edelweiss complex): the indicator of the early Paleozoic plume magmatism in the Central Asian fold belt. *Geol. Geofiz.*, **53**(8), 945-963. (In Russian)
- Vrublevskii V.V., Pokrovskii B.G., Zhuravlev D.Z., Anoshin G.N. (2003) Material composition and age of the penchenginsky carbonatites linear complex, Yenisei ridge. *Petrologiya*, **11**(2), 145-163. (In Russian)
- Vrublevskii V.V., Reverdatto V.V., Izokh A.Eh., Gertner I.F., Yudin D.S., Tishin P.A. (2011) Neoproterozoic carbonatitic magmatism of Yenisei ridge, Central Siberia: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-dating of the penchenginsky complex. *Dokl. Akad. Nauk.*, **437**(4), 514-519. (In Russian)
- Waters C.L., Sims K.W.W., Perfit M.R., Blichert-Toft J., Blusztajn J. (2011) Perspective on the Genesis of E-MORB from Chemical and Isotopic Heterogeneity at 9-10°N East Pacific Rise. *J. Petrol.*, **52**(3), 565-602.
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, **20**, 325-343.
- Xia L., Xia Z., Xu X., Li X., Ma Z. (2012) Mid-Late Neoproterozoic rift-related volcanic rocks in China: Geological records of rifting and break-up of Rodinia. *Geoscience Frontiers*, **3**(4), 375-399.
- Zhang A., Wang Y., Fan W., Zhang Y., Yang J. (2012a) Ear-

- liest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc-back-arc basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite. *Precambrian Research*, **220/221**, 217-233.
- Zhang C., Yang D., Wang H., Dong Y., Ye H. (2010) Neoproterozoic mafic dykes and basalts in the southern margin of Tarim, northwest China: age, geochemistry and geodynamic implications // *Acta Geologica Sinica*, **84**(3), 549-562.
- Zhang S.B., Wu R.X., Zheng Y.F. (2012b) Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogeny. *Precambrian Research*, **220/221**, 45-64.
- Zhang Y., Wang Y. (2016) Early Neoproterozoic ( $\approx$ 840 Ma) arc magmatism: geochronological and geochemical constraints on the metabasites in the Central Jiangnan Orogen. *Precambrian Research*, **275**, 1-17.
- Zindler A., Hart S.R. (1986) Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.