



## SOURCES OF LOWER PALEOZOIC SANDSTONES FROM THE NORA-SUKHOTINO TERRANE: RESULTS OF U-Th-Pb AND Lu-Hf ISOTOPE STUDIES OF THE DETRITAL ZIRCONS

Y.V. Smirnov  

Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Relochniy ln, Blagoveshchensk 675000, Russia

**ABSTRACT.** This paper presents the results of comprehensive geological and geochemical studies of sandstones from the Belaya basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane of the northeastern flank of South Mongolia-Khingian orogenic belt, as well as the results of isotopic (U-Th-Pb and Lu-Hf) studies of detrital zircons therefrom. The sandstones from the Belaya basin are characterized by significant variations in the composition of clastic material and major rock-forming elements, and by correspondence to arkoses and litharenites. They were accumulated due to erosion of geochemically mature felsic and intermediate igneous rocks. The sandstones are dominated by Ordovician, Cambrian, and Neoproterozoic zircons. The youngest zircons in sandstones from the Belaya basin are dated back to  $451 \pm 8$  Ma, with the lower age boundary set at the Late Ordovician. The Ordovician zircons, which have positive  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  values and Early Paleozoic – Neoproterozoic Hf-model ages, could have been derived from island arc complexes. The Cambrian and Neoproterozoic zircon grains with positive  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  values and Neo – Mesoproterozoic Hf-model ages could have been derived from Early Paleozoic and Neoproterozoic igneous rocks of the Bureya or Mamyn terranes. The available geological materials provide evidence that the sandstones from the Belaya basin are a fragment of the Early Paleozoic accretionary complex, which formed in the Early Paleozoic along the southeastern margin of the Mamyn (Xing'an) massif. However, a small amount of data on the Early Paleozoic and Neoproterozoic magmatism of the region hinders drawing more definite conclusions.

**KEYWORDS:** Nora-Sukhotino terrane; Early Paleozoic; sandstones; geochemistry; detrital zircons

**FUNDING:** The studies were done under the support of RSF grant 21-77-10001, <https://rscf.ru/en/project/21-77-10001/>.

### RESEARCH ARTICLE

Received: January 18, 2022

Revised: April 25, 2022

Accepted: May 16, 2022

**Correspondence:** Yuri V. Smirnov, [smirnova@ascnet.ru](mailto:smirnova@ascnet.ru)

**FOR CITATION:** Smirnov Y.V., 2022. Sources of Lower Paleozoic Sandstones from the Nora-Sukhotino Terrane: Results of U-Th-Pb and Lu-Hf Isotope Studies of the Detrital Zircons. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0671. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0671

## ПИТАЮЩИЕ ПРОВИНЦИИ ДЛЯ НИЖНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ НОРА-СУХОТИНСКОГО ТЕРРЕЙНА: РЕЗУЛЬТАТЫ U-Th-Pb И Lu-Hf ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ

Ю.В. Смирнов

Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 675000, Благовещенск, пер. Релочный, 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В публикации приведены результаты комплексных геологических, геохимических исследований песчаников бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна северо-восточного фланга Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, а также изотопных (U-Th-Pb и Lu-Hf) исследований детритовых цирконов из них. Установлено, что песчаники бассейна р. Белой характеризуются значительными вариациями состава обломочного материала и основных породообразующих компонентов, соответствуя аркозам и литаренитам. Их накопление происходило за счет размыва «зрелых» в геохимическом отношении магматических пород преимущественно кислого и среднего состава. В исследованных песчаниках преобладают цирконы ордовикского, кембрийского и неопротерозойского возраста. Возраст наиболее молодой популяции цирконов из песчаника бассейна р. Белой  $451 \pm 8$  млн лет, в связи с чем нижняя возрастная граница накопления приходится на поздний ордовик. Источниками ордовикских цирконов с положительными величинами  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  и раннепалеозойскими – неопротерозойскими значениями Hf-модельного возраста, по-видимому, являлись островодужные комплексы соответствующего возраста. Источниками кембрийских и неопротерозойских цирконов с положительными величинами  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  и нео- и мезопротерозойскими значениями Hf-модельного возраста, вероятно, являлись раннепалеозойские и неопротерозойские магматические образования Буреинского или Мамынского террейна. Имеющиеся геологические материалы позволяют рассматривать песчаники бассейна р. Белой в качестве фрагмента раннепалеозойского аккреционного комплекса, сформированного в раннем палеозое вдоль юго-восточной окраины Мамынского массива. Однако более определенным выводам мешает слабая изученность раннепалеозойского и неопротерозойского магматизма рассматриваемого региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Нора-Сухотинский террейн; ранний палеозой; песчаники; геохимия; детритовые цирконы

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-10001, <https://rscf.ru/project/21-77-10001/>.

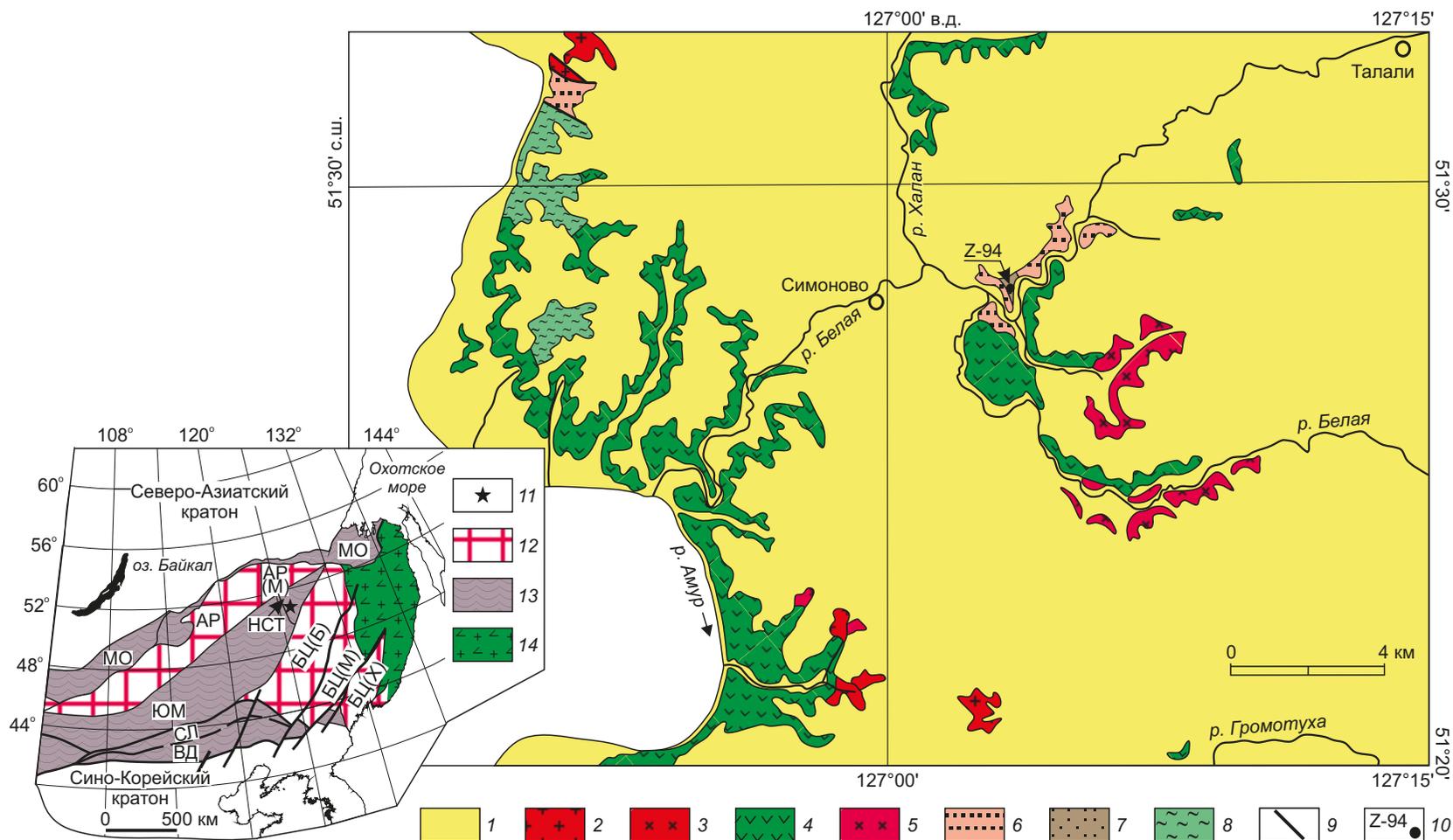
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основной структурный план Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) определяется сочетанием многочисленных континентальных массивов и разновозрастных складчатых поясов [Mossakovsky et al., 1993; Parfenov et al., 2003; и др.]. Одним из таких поясов является Южно-Монгольско-Хинганский орогенный пояс (ЮМХОП), протягивающийся от Рудного Алтая и смежных районов Китая в Южную Монголию и далее на северо-восток Китая и в приграничные районы Приамурья, где «теряется», пережимаясь Мамыньским и Буреинским (Туранским) террейнами. Северо-восточный фланг ЮМХОП в российской литературе обычно рассматривается в качестве Нора-Сухотинского террейна [Khanchuk, 2006].

ЮМХОП (рис. 1) на северо-западе ограничен Мамыньским террейном, который в российской геологической литературе выделяется в качестве восточной части Аргунского супертеррейна [Parfenov et al., 2001; Khanchuk, 2006; и др.]. В англоязычных тектонических схемах [Hu et al., 2020; Liu Y. et al., 2017; Wu F.Y. et al., 2011; Zhou et al., 2015; и др.] геологические структуры Мамыньского террейна рассматриваются как северо-восточное продолжение Мамыньского массива.

Мамыньский террейн сложен преимущественно палеозойскими гранитоидами и осадочными породами, которые перекрываются мезозойскими вулканическими породами и гранитоидами [Sorokin et al., 2004, 2017a; Khanchuk, 2006; Wu F.Y. et al., 2011; Zhou et al., 2015; Li Z.Z. et al., 2018; Li Y. et al., 2020; и др.]. Сравнительно недавно в строении Мамыньского террейна также были выявлены неопротерозойские и палеопротерозойские магматические и метаморфические породы [Wu F.Y. et al., 2011; Zhou et al., 2011; Sorokin et al., 2015; Li Z.Z. et al., 2018].

На северо-востоке ЮМХОП по Селемджинскому разлому граничит с Буреинским (Туранским) террейном Бурей-Цзямусинского супертеррейна. Согласно существующим представлениям [Khanchuk, 2006; State Geological Map..., 2012; и др.], фундамент Буреинского террейна сложен условно раннедокембрийскими метаморфическими комплексами и ассоциирующими с ними массивами габброидов и гранитоидов. Однако проведенные геохронологические исследования свидетельствуют о присутствии в пределах Буреинского террейна образований не древнее неопротерозоя [Ovchinnikov et al., 2018, 2019; Sorokin et al., 2016, 2017b, 2019]. Наибольшим распространением характеризуются палеозойские



**Рис. 1.** Геологическая схема приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна (по [State Geological Map..., 1975a, 1975b, 1978], с изменениями автора).

1 – кайнозойские рыхлые отложения; 2 – раннемеловые кварцевые диориты; 3 – раннемеловые андезиты-дациты и дациты; 4 – вулканогенно-осадочные и осадочные породы раннемелового возраста; 5 – позднепалеозойские гранодиориты и граниты; 6–8 – терригенные отложения Нора-Сухотинского террейна: 6 – нижнепермские, 7 – средне- и верхнедевонские, 8 – условно силурийские; 9 – разломы; 10 – место отбора образца для U-Th-Pb и Lu-Hf изотопных исследований и его номер. Врезка: 11 – положение объекта исследований; 12 – континентальные массивы (супертеррейны): AP – Аргунский (AP(M) – Мамынский террейн), БЦ – Буряя-Цзямусинский (БЦ(Б) – Буреинский террейн, БЦ(М) – Малохинганский террейн, БЦ(Х) – Ханкайский террейн); 13 – палеозойские – раннемезозойские складчатые пояса: ЮМ – Южно-Монгольско-Хинганский (НСТ – Нора-Сухотинский террейн), МО – Монголо-Охотский, СЛ – Солонкерский, ВД – Вундурмиаю; 14 – позднеюрско-раннемеловые орогенные пояса.

**Fig. 1.** Geological map of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane (after [State Geological Map..., 1975a, 1975b, 1978], with authors' modifications).

1 – Cenozoic loose sediments; 2 – Early Cretaceous quartz diorites; 3 – Early Cretaceous andesite-dacites and dacites; 4 – Early Cretaceous volcanogenic-sedimentary and sedimentary rocks; 5 – Late Paleozoic granodiorites and granites; 6–8 – terrigenous rocks of the Nora-Sukhotino terrane: 6 – Lower Permian, 7 – Middle-Upper Devonian, 8 – presumably Silurian; 9 – faults; 10 – sampling site for U-Th-Pb and Lu-Hf isotopical studies and sample number. Inset: 11 – location of the studied objects; 12 – continental massifs (superterrane): AP – Argun (AP(M) – Mamyn terrane), БЦ – Bureya-Jiamusi (БЦ(Б) – Bureya terrane, БЦ(М) – Lesser Khingan terrane, БЦ(Х) – Khanka terrane); 13 – Paleozoic – Early Mesozoic fold belts: ЮМ – South Mongolia-Khingan (НСТ – Nora-Sukhotino terrane), МО – Mongol-Okhotsk, СЛ – Solonker, ВД – Wundurmiao); 14 – Late Jurassic – Early Cretaceous orogenic belts.

и раннемезозойские гранитоиды, а наиболее молодые породы в составе Буреинского террейна – это терригенные отложения позднепалеозойского возраста и позднемезозойские образования вулканоплутонических поясов [Khanchuk, 2006].

Как показывает накопленный к настоящему времени мировой опыт, прогресс в решении проблемы создания интегрированной геодинамической модели формирования ЦАСП возможен только на основе комплексных исследований крупных подвижных поясов. Одним из таких объектов, безусловно, является ЮМХОП. Менее изученными в настоящее время являются магматические образования и терригенные отложения приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна ЮМХОП. В этой связи был проведен анализ минералого-геохимического состава песчаников средне- и позднедевонского возраста бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. Также выполнены изотопные (U-Th-Pb и Lu-Hf) исследования детритовых цирконов из них с целью реконструкции пород питающих провинций.

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нора-Сухотинский террейн является северо-восточной частью ЮМХОП и практически полностью перекрыт отложениями Амура-Зейского осадочного бассейна. В строении террейна принимают участие вулканогенно-осадочные комплексы, условно относимые к позднему протерозою, с которыми пространственно ассоциируют тела диабазов и метагабброидов, а также терригенные и терригенно-карбонатные отложения силура, девона и раннего карбона [Khanchuk, 2006].

В последние годы установлено, что вулканогенно-терригенные комплексы неклинской и дагмарской толщ, ранее условно относимые к позднему протерозою, имеют раннепалеозойский возраст [Sorokin et al., 2017c]. При этом по своим геохимическим и Sm-Nd изотопно-геохимическим особенностям метагаббро, диабазы и метавулканы соотносятся с базитами срединно-океанических хребтов и островных дуг [Smirnov, Sorokin, 2017]. Кроме того, на основе современных методов исследований были изучены магматические образования в пределах селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. Так выявлены позднеордовикские ( $455 \pm 2$  млн лет) толеитовые габбро [Smirnov et al., 2012], раннесилурийская ( $440 \pm 10$  млн лет) монцодиорит-гранодиоритная ассоциация [Smirnov et al., 2016], а также позднедевонские ( $378 \pm 3$  млн лет) граниты [Smirnov et al., 2021].

В то же время магматические и осадочные породы приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна изучены слабо. Однако они являются одними из ключевых объектов исследований, которые несут в себе важную информацию об истории формирования Нора-Сухотинского террейна. В пределах приамурского фрагмента были изучены песчаники бассейна р. Белой (рис. 1), которые, согласно [State Geological Map..., 1975b], рассматриваются в составе отложений средне- и

позднедевонского возраста. Кроме песчаников, здесь выявлены алевропелитовые сланцы и мраморизованные известняки [State Geological Map..., 1975b]. Возраст отложений принят на основании фауны, отобранной в бассейнах рек Гуран и Большая Каменушка в 1959 г., а именно – брахиопод и морских лилий: *Hexacrinites cf. mamillatus* Yelt., *Schuchertella* sp., *Mediospirifer cf. martianofi* Stuck., *M. aff. medialis* Hall. Членики морских лилий *Hexacrinites mamillatus* являются типичными формами для среднедевонских отложений. Брахиоподы *Mediospirifer cf. martianofi* и *M. aff. medialis* являются руководящими формами для слоев гамилтон Северной Америки, и на Дальнем Востоке они соответствуют по возрасту верхней части живетских отложений и самым нижним горизонтам франского яруса [State Geological Map..., 1978].

В нашей коллекции образцов, отобранных в бассейне р. Белой, преобладают песчаники мелко- и среднезернистые и мелко- и крупнозернистые. Мелко- и среднезернистые песчаники желтовато-серого и темно-серого цвета с псаммитовой мелко- и среднезернистой структурой (размер обломков варьируется от 0.10 до 0.50 мм) и массивной текстурой. Мелко- и крупнозернистые песчаники светло-серого цвета с массивной текстурой и псаммитовой мелко- и крупнозернистой структурой (обломочный материал по размеру колеблется в широких диапазонах – от 0.10 до 0.80 мм, единичные обломки достигают 1.60 мм) с плохой сортировкой обломочного материала. Для мелко- и крупнозернистых песчаников типично присутствие обломков монокристаллического (30–40 %) и поликристаллического кварца (5–10 %), полевых шпатов (до 5 %), слюдистых и слюдисто-кварцевых сланцев (7–10 %), вулканических пород (единичные обломки). Редко в песчаниках отмечаются чешуйки мусковита и хлоритизированного биотита. В виде единичных включений наблюдается эпидот. В мелко- и среднезернистых песчаниках отмечаются более высокие содержания слюдистых и слюдисто-кварцевых сланцев (10–25 %) и более низкие содержания кварца (35–40 %). Также для них характерно присутствие полевых шпатов (до 10 %) и единичных обломков углеродистых сланцев. Цемент в песчаниках контактово-порового либо базального типа серицит-кварцевого состава. Среди акцессорных минералов выявлены циркон, гранат, апатит, магнетит, гидроксиды железа. Согласно классификации, предложенной Ф.Дж. Петтиджоном [Pettijohn, 1975], песчаники, отобранные в бассейне р. Белой, соответствуют субаркозам и сублитаренитам (рис. 2, а).

## 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Содержание породообразующих элементов в породах определено рентгенофлуоресцентным методом в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск) на рентгеновском спектрометре Рюнеер 4S, микроэлементов – методом ICP-MS в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на ICP масс-спектрометре NexION 300D. Гомогенизация

порошковых проб для рентгенофлуоресцентного анализа осуществлялась путем их сплавления со смесью метабората и тетрабората лития в муфельной печи при  $T=1050-1100$  °С. Величины интенсивности аналитических линий в ходе анализа корректировались на фон, эффекты поглощения и вторичной флуоресценции.

В ходе использования ICP-MS метода проводилось сплавление образцов (навеска 100 мг) с безводным метаборатом лития (400 мг) в стеклоглеродных тиглях марки SU-2000 при температуре 1150 °С (3 мин) в высокочастотной индукционной печи ВЧГ-4 с последующим разложением плавня смесью перегранных кислот HF и HNO<sub>3</sub> и отгонкой SiF<sub>4</sub>. Перед началом измерений проводилась настройка прибора и оптимизация инструментальных параметров с целью получения максимального значения аналитического сигнала и его стабильности при минимальном вкладе в сигнал оксидных и двухзарядных ионов, низком фоновом уровне. Была применена внешняя градуировка по раствору Tuning Solution ("tune") с концентрацией 1 мг/т следующих элементов: Ba, Be, Ce, Co, In, Mg, Pb, Rh, U.

Для расчета концентраций была использована градуировка по сертифицированным растворам CLMS-1-4 фирмы SPEX (США) с концентрацией элементов 0.1, 1.0 и 5.0 нг/мл с контролем дрейфа сигнала по внутреннему стандарту, в качестве которого выбран <sup>103</sup>Rh. Нивелирование матричного эффекта достигалось путем разбавления готовых растворов проб для анализа в 10000 раз. Для перевода анализируемого раствора в аэрозоль использовался концентрический низкотоковый распылитель Meinhard (0.1 мл/мин). Пределы обнаружения оценивались по 3σ критерию и пересчитывались на содержание в твердом веществе с учетом фактора разбавления. Для оценки правильности результатов анализа были использованы стандартные образцы горных пород различного состава геологических служб США, Японии, Китая и России.

Извлечение детритовых цирконов проводилось в минералогической лаборатории Института геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск) с применением тяжелых жидкостей. U-Th-Pb изотопные исследования зерен цирконов проведены в Геохронологическом центре Аризонского университета на ICP масс-спектрометре Thermo Element 2, оснащенный системой лазерной абляции Photon Machines Analyte G2. Глубина кратера составляла 15 мкм, диаметр кратера 20 мкм. Детальное описание аналитических процедур приведено на сайте лаборатории ([www.laserchron.org](http://www.laserchron.org)). Конкордантный возраст рассчитан в программе Isoplot v. 3.6 [Ludwig, 2008], которая использовалась для построения кривых относительной вероятности возраста детритовых цирконов. Все погрешности возраста приведены на уровне  $\pm 2\sigma$ .

Lu-Hf изотопные исследования цирконов выполнены также в Геохронологическом центре Аризонского университета с использованием многоколлекторного масс-спектрометра с индуктивносвязанной плазмой (MC-ICP-MS) Nu High-Resolution и эксимерного лазера

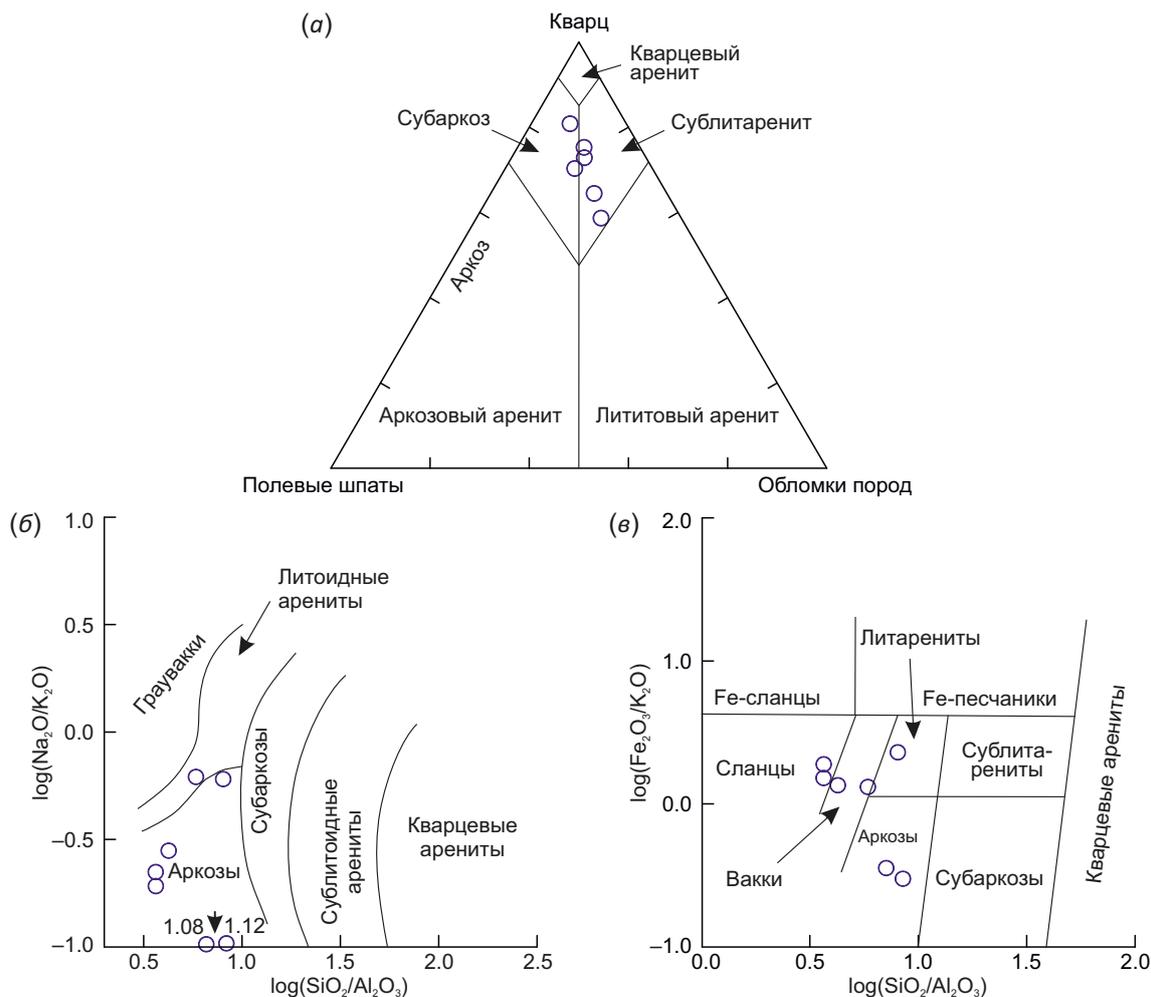
Analyte G2. При этом Lu-Hf изотопные анализы проводились в том же участке цирконов (в той же точке), что и U-Th-Pb анализы. Детали аналитической методики изложены на сайте лаборатории. Для расчета величин  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  использована константа распада <sup>176</sup>Lu ( $\lambda=1.867e^{-11}$ ) по [Scherer et al., 2001; Söderlund et al., 2004], хондритовые отношения <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf (0.282785) и <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf (0.0336) по [Bouvier et al., 2008]. Коровые Hf-модельные возрасты  $t_{\text{Hf}(C)}$  рассчитаны по среднему отношению <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf в континентальной коре, равному 0.0093 [Amelin, Davis, 2005; Vervoort, Patchett, 1996]. Для расчета изотопных параметров деплетированной мантии использованы современные отношения <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.28325 и <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf=0.0384 [Griffin et al., 2004].

#### 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД

Одним из важных аспектов изучения осадочных пород является анализ основных петрогенных компонентов, расчет на их основе петрохимических модулей и индексов. С помощью этих данных можно провести классификацию осадочных пород и уточнить физико-химические условия осадконакопления. Результаты химических исследований песчаников бассейна р. Белой приведены в табл. 1. Песчаники бассейна р. Белой характеризуются пониженными значениями  $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  и  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ , лежащими в основе классификационной диаграммы Ф. Дж. Петтиджона с соавторами [Pettijohn et al., 1972], и соответствуют преимущественно аркозам (рис. 2, б). На диаграмме  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  [Herron, 1988], разработанной для классификации не только песчаников, но и для более тонких терригенных отложений, рассматриваемые песчаники локализуются в полях сланцев, вакк, литаренитов и аркозов (рис. 2, в).

Для классификации осадочных пород Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [Yudovich, Ketris, 2011] предложены петрохимические модули. Так, гидролизатный ( $\text{ГМ}=\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MnO}/\text{SiO}_2$ ) и алюмокремниевый ( $\text{АМ}=\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) модули позволяют разделить песчаные и глинистые породы, в основе которых преобладает, с одной стороны, кремнезем, а с другой – продукты гидролиза. Песчаники бассейна р. Белой характеризуются значительными вариациями значений  $\text{ГМ}=0.13-0.37$  и  $\text{АМ}=0.12-0.28$  (табл. 2), типичными для пород преимущественно кварцевого (нормо- и миоцилитов), а также грауваккового и аркозового состава (гипосиаллитов). Различия песчаников по химическому составу, вероятно, связаны с возрастанием в составе мелко- и среднезернистых песчаников обломков слюдястых и слюдясто-кварцевых сланцев и уменьшением обломков кварца по сравнению с таковыми в мелко- и крупнозернистых песчаниках.

Для реконструкции степени химического выветривания исходных пород использовались индексы химического выветривания, рассчитанные в молекулярных количествах (табл. 2). Повышенные значения кремнетитанового индекса ( $\text{STI}=82-91$ ) [Jayawardena, Izawa, 1994], индекса преобразования плагиоклазов



**Рис. 2.** Диаграммы Полевые шпаты – Кварц – Обломки пород [Pettijohn, 1975] (a),  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  [Pettijohn et al., 1972] (б),  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  [Herron, 1988] (в) для песчаников бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

**Fig. 2.** Feldspar-quartz-rock fragments diagram [Pettijohn, 1975] (a),  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  [Pettijohn et al., 1972] diagram (б), and  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  [Herron, 1988] diagram (в) for sandstones of the Belaya River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane.

**Таблица 1.** Химический состав представительных образцов нижнепалеозойских песчаников приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна

**Table 1.** Chemical compositions of representative samples of the Lower Paleozoic sandstones of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane

Компоненты	Z-94	Z-94-1	Z-91	Z-88-1	Z-88-2	Z-88-3	Z-88-4
SiO <sub>2</sub>	85.25	82.83	81.28	71.47	66.28	67.61	78.21
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.23	0.49	0.76	0.75	0.74	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.05	11.68	10.12	16.89	18.21	18.60	13.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0.76	1.04	3.05	3.33	5.26	4.10	2.10
MnO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.08	0.04	0.02
MgO	0.12	0.27	0.88	0.72	0.61	0.55	0.48
CaO	0.10	0.10	0.11	0.59	0.27	0.23	0.22
Na <sub>2</sub> O	0.21	0.22	0.81	0.70	0.54	0.61	1.00
K <sub>2</sub> O	2.55	2.96	1.35	2.50	2.82	2.74	1.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.02	0.02	0.28	0.11	0.09	0.12
П.п.п.	0.86	1.32	1.58	2.40	4.77	4.40	2.08

Таблица 1 (продолжение)

Table 1 (continued)

Компоненты	Z-94	Z-94-1	Z-91	Z-88-1	Z-88-2	Z-88-3	Z-88-4
Сумма	99.23	99.25	98.15	99.66	99.70	99.71	99.76
Rb	92	105	44	62	111	115	56
Sr	79	91	183	184	133	137	147
Ba	202	272	303	411	508	492	303
La	28.85	29.49	25.43	22.73	15.21	14.78	16.18
Ce	62.22	60.36	49.48	47.40	34.42	34.00	33.58
Pr	6.88	7.12	6.15	5.46	3.96	3.83	3.71
Nd	25.15	26.05	23.08	21.31	16.24	15.81	14.25
Sm	4.44	4.60	3.76	3.85	3.73	3.43	2.64
Eu	0.79	0.88	0.84	0.84	0.92	0.80	0.61
Gd	3.60	3.68	3.29	3.37	4.82	4.11	2.70
Tb	0.55	0.57	0.50	0.47	0.81	0.70	0.40
Dy	3.29	3.51	2.80	2.39	4.94	4.39	2.34
Ho	0.61	0.73	0.52	0.44	0.96	0.87	0.47
Er	1.88	1.97	1.42	1.38	2.94	2.73	1.44
Tm	0.28	0.32	0.22	0.19	0.42	0.40	0.21
Yb	1.85	2.01	1.31	1.34	2.86	2.76	1.47
Lu	0.26	0.27	0.21	0.21	0.44	0.41	0.23
Y	18	20	16	10	25	22	11
Th	9.75	9.23	7.48	10.65	10.48	10.14	7.50
U	1.78	1.90	1.27	4.72	11.66	10.54	12.06
Zr	162	169	243	407	323	346	230
Hf	4.23	4.45	6.43	1.80	4.48	4.33	2.42
Nb	6	6	8	5	12	11	7
Ta	0.51	0.47	0.55	0.52	1.21	1.11	0.72
Co	1	2	8	6	12	12	6
Ni	25	23	25	16	24	16	19
V	25	33	54	57	99	98	68
Cr	109	109	106	87	63	65	123
Eu/Eu*	0.58	0.63	0.71	0.69	0.66	0.65	0.69
[La/Yb] <sub>n</sub>	10.57	9.98	13.21	11.53	3.61	3.64	7.48
ΣREE	141	142	119	111	93	89	80

Примечание. Оксиды в мас. %, элементы в г/т. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – общее железо в форме Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Note. Oxides are given in wt. %, elements – in ppm. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* is the total iron as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

(PIA=85–94) [Fedo et al., 1995] и низкие значения индекса вариации состава пород (ICV=0.45–0.78) [Cox et al., 1995] в рассматриваемых песчаниках свидетельствуют о химической «зрелости» пород в области сноса.

Далее рассмотрим особенности микроэлементного состава пород с целью реконструкции состава пород питающих провинций. Многие микроэлементы при транспортировке из областей сноса в бассейн осадконакопления переносятся без существенных изменений их содержания. При этом их определенные концентрации и соотношения несут в себе информацию о составе материнских пород. В песчаниках бассейна р. Белой концентрации редкоземельных элементов изменяются от

80 до 142 г/т, отмечается преобладание легких лантаноидов над тяжелыми ([La/Yb]<sub>n</sub>=3.61–13.21) и четко проявлена отрицательная европиевая аномалия (Eu/Eu\* = 0.58–0.71) (рис. 3, а; см. табл. 1). Подобные вариации редкоземельных элементов свидетельствуют о преобладании в области сноса магматических пород кислого состава.

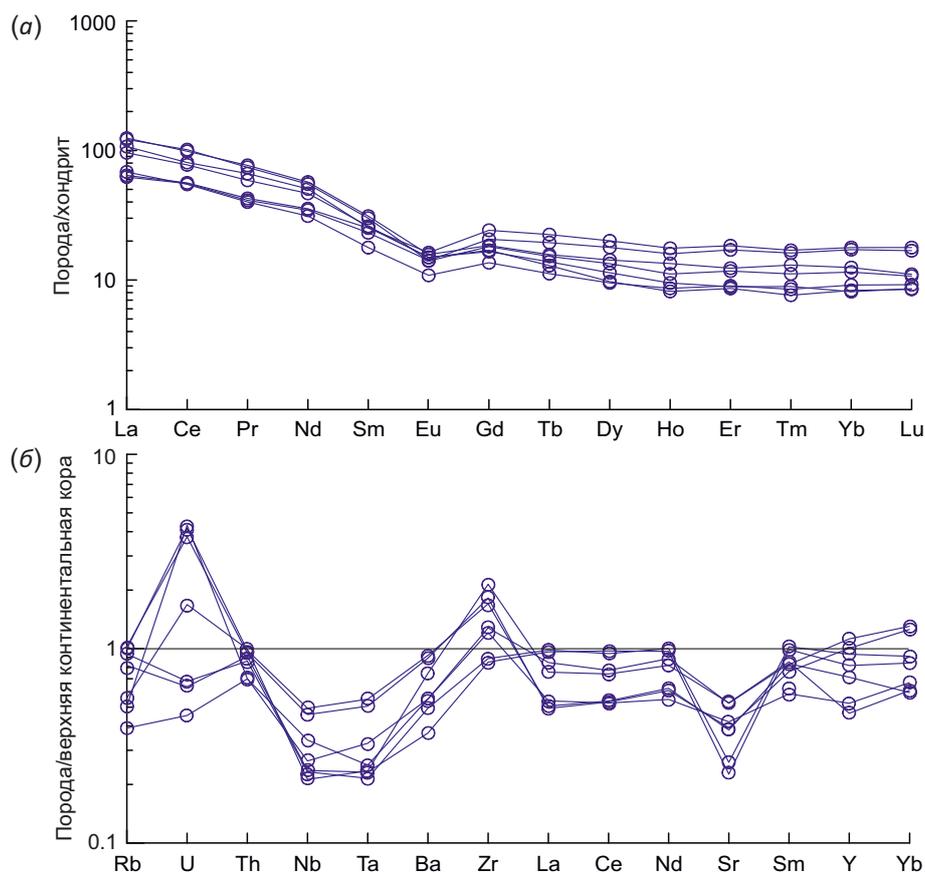
В рассматриваемых песчаниках отмечаются близкоровые значения большинства элементов-примесей. Дефицит характерен лишь для Nb (5–12 г/т), Ta (0.47–1.21 г/т), Ba (202–508 г/т) и Sr (79–184 г/т) (рис. 3, б; см. табл. 1). Стоит отметить также, что для песчаников установлены значительные вариации содержаний U

**Таблица 2.** Значения петрохимических модулей и индексов химического выветривания для нижнепалеозойских песчаников приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна**Table 2.** The lithochemical moduli and chemical weathering indices for the Lower Paleozoic sandstones of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane

Образцы	AM	ГМ	PIA	STI	ICV
Z-94	0.12	0.13	93	91	0.45
Z-94-1	0.14	0.16	94	90	0.46
Z-91	0.12	0.17	85	88	0.78
Z 88-1	0.24	0.29	86	84	0.58
Z 88-2	0.28	0.37	92	82	0.57
Z 88-3	0.28	0.35	92	82	0.51
Z 88-4	0.17	0.20	85	87	0.52
min	0.12	0.13	85	82	0.45
max	0.28	0.37	94	91	0.78

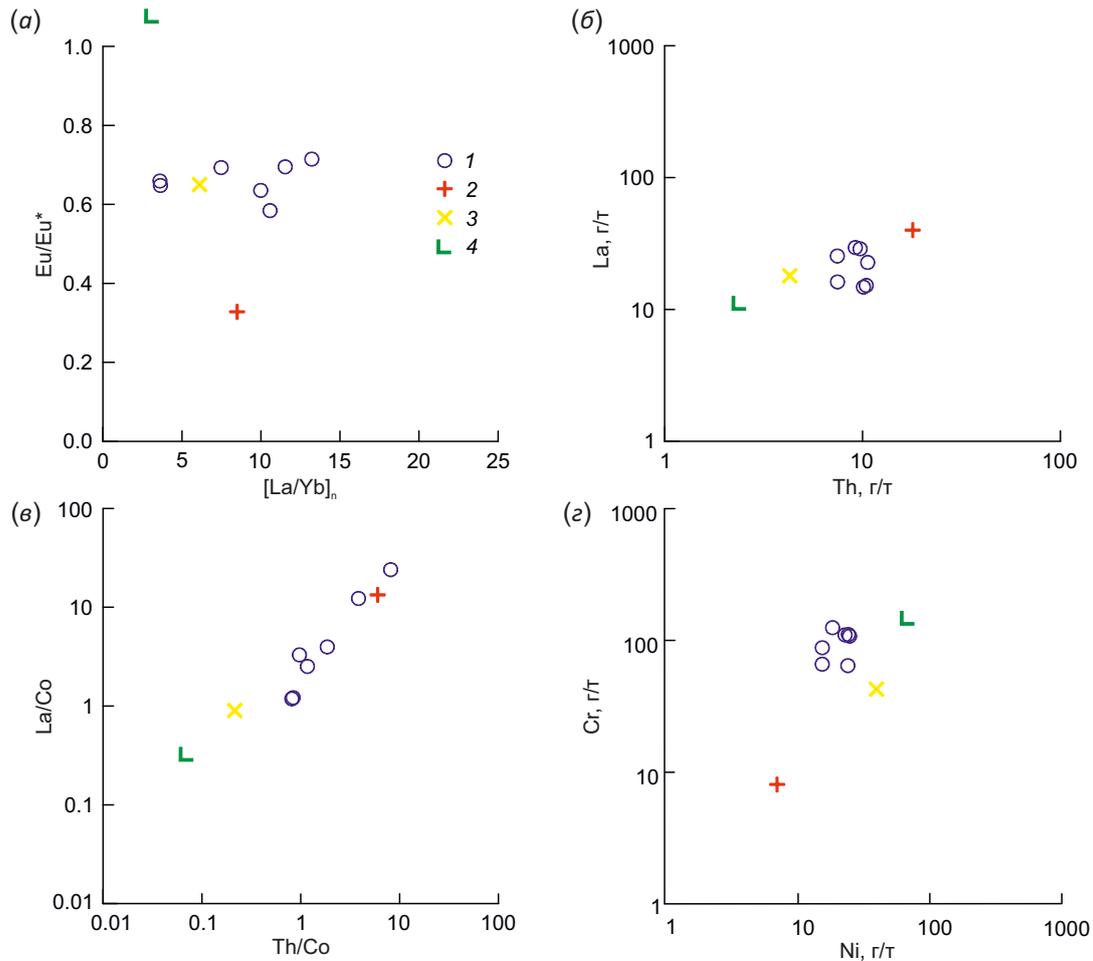
Примечание. AM= $Al_2O_3/SiO_2$  [Yudovich, Ketris, 2011]; ГМ= $(Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$  [Yudovich, Ketris, 2011]; PIA= $100 \cdot (Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)$  [Fedo et al., 1995]; STI= $((SiO_2/TiO_2)/[(SiO_2/TiO_2)+(Al_2O_3/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)]) \cdot 100$  [Jayawardena, Izawa, 1994]; ICV= $(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+MnO+TiO_2)/Al_2O_3$  [Cox et al., 1995].

Note. AM= $Al_2O_3/SiO_2$  [Yudovich, Ketris, 2011]; ГМ= $(Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$  [Yudovich, Ketris, 2011]; PIA= $100 \cdot (Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)$  [Fedo et al., 1995]; STI= $((SiO_2/TiO_2)/[(SiO_2/TiO_2)+(Al_2O_3/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)]) \cdot 100$  [Jayawardena, Izawa, 1994]; ICV= $(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+MnO+TiO_2)/Al_2O_3$  [Cox et al., 1995].



**Рис. 3.** График распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) (а) и спайдердиаграмма (б) для песчаников бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. Состав хондрита – по [McDonough, Sun, 1995], состав верхней континентальной коры – по [Taylor, McLennan, 1985].

**Fig. 3.** Chondrite-normalized REE patterns (a) and a spidergram (b) for sandstones of the Belaya River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane. Chondrite-normalizing values are presented after [McDonough, Sun, 1995]. Upper-continental crust-normalizing values are presented after [Taylor, McLennan, 1985].



**Рис. 4.** Диаграммы  $(La/Yb)_n - Eu/Eu^*$  (a), Th – La (б), Th/Co – La/Co (в), Ni – Cr (г) для песчаников бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. 1 – песчаники бассейна р. Белой; 2–4 – состав по [Condie, 1993]: 2 – граниты, 3 – андезиты, 4 – базальты.

**Fig. 4.**  $(La/Yb)_n - Eu/Eu^*$  (a), Th – La (б), Th/Co – La/Co (в) and Ni – Cr (г) diagrams for sandstones of the Belaya River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane. 1 – sandstones of the Belaya River basin; 2–4 composition presented after [Condie, 1993]: 2 – granites, 3 – andesites, 4 – basalts.

(1.27–12.06 г/т). При этом наиболее высокие концентрации урана типичны для мелко- и среднезернистых песчаников, в которых отмечается присутствие углеродистых сланцев.

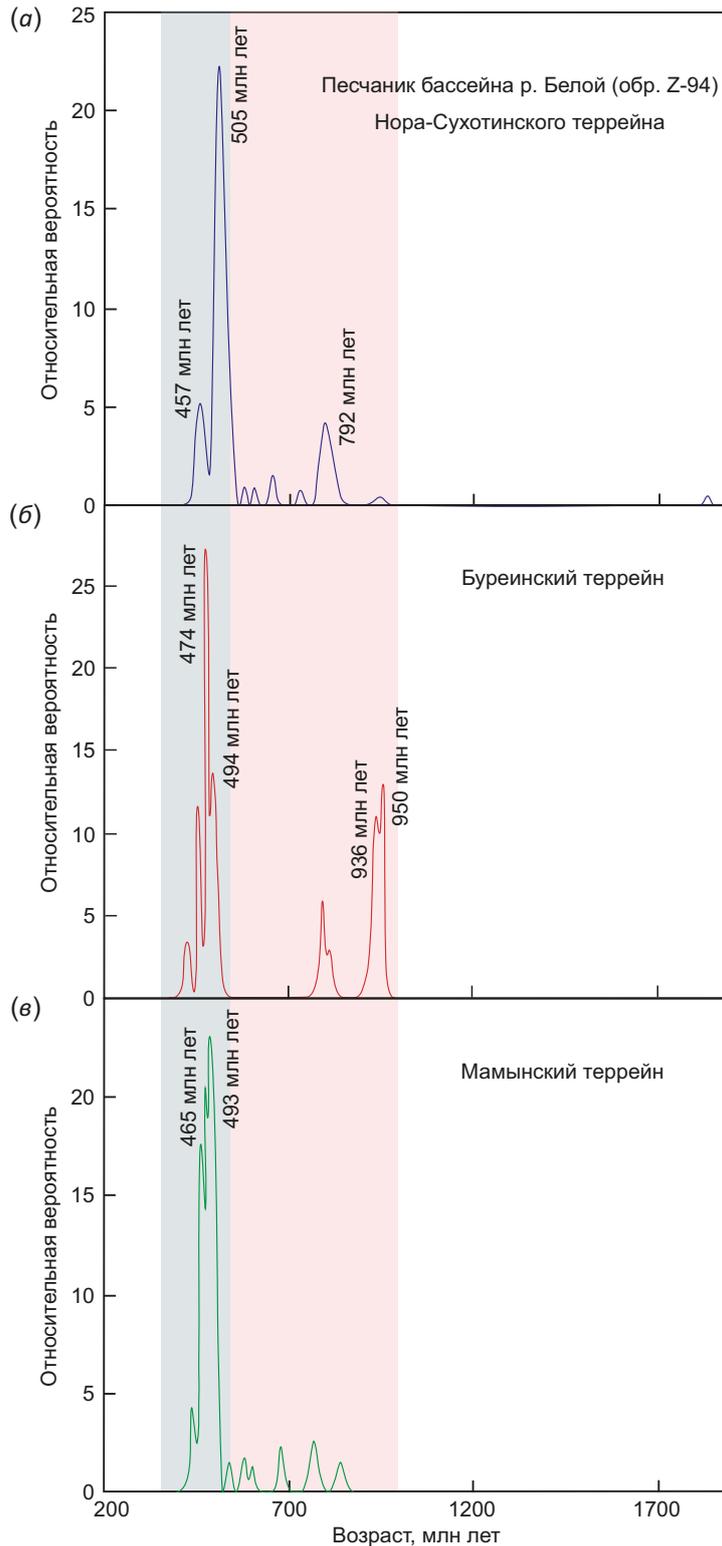
Для реконструкции состава пород в областях сноса использовались диаграммы, в основе которых лежат соотношения лантаноидов и ряда других микроэлементов. Песчаники бассейна р. Белой на диаграммах  $[La/Yb]_n - Eu/Eu^*$ , Th – La, Th/Co – La/Co, Ni – Cr близки по составу к осадкам, сформированным за счет размыва магматических пород кислого и среднего состава (рис. 4).

**5. РЕЗУЛЬТАТЫ U-Th-Pb И Lu-Hf ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ**

Из мелко- и крупнозернистого песчаника бассейна р. Белой (обр. Z-94) было проанализировано 114 зерен детритовых цирконов. Для 90 зерен цирконов получены конкордантные оценки возраста. Возрастной интервал цирконов от 448 до 1836 млн лет. Главные пики

на кривой относительной вероятности возрастов соответствуют значениям 457, 505, 792 млн лет (рис. 5, а). Доминирующая часть цирконов характеризуется кембрийско-ордовикским возрастом (448–540 млн лет, 70 зерен); значения пиков на кривой относительной вероятности возрастов составляют 505 и 457 млн лет. Конкордантный возраст трех наиболее молодых цирконов составляет 451±8 млн лет. В выборке также присутствуют неопротерозойские цирконы (576–941 млн лет, 19 зерен); значение пика на кривой относительной вероятности возрастов составляет 792 млн лет. Для одного зерна получена палеопротерозойская оценка возраста (1836 млн лет).

Изотопные Lu-Hf исследования были проведены для 20 зерен детритовых цирконов (табл. 3; рис. 6). В выборку включены цирконы, характеризующиеся конкордантными значениями возраста. Среди кембрийских и позднеордовикских цирконов явно преобладают зерна с положительными величинами  $\epsilon_{Hf(t)}$  = +0.5...+14.3 и значениями Hf-модельного возраста  $t_{Hf(C)}$  = 1.2–0.5 млрд лет

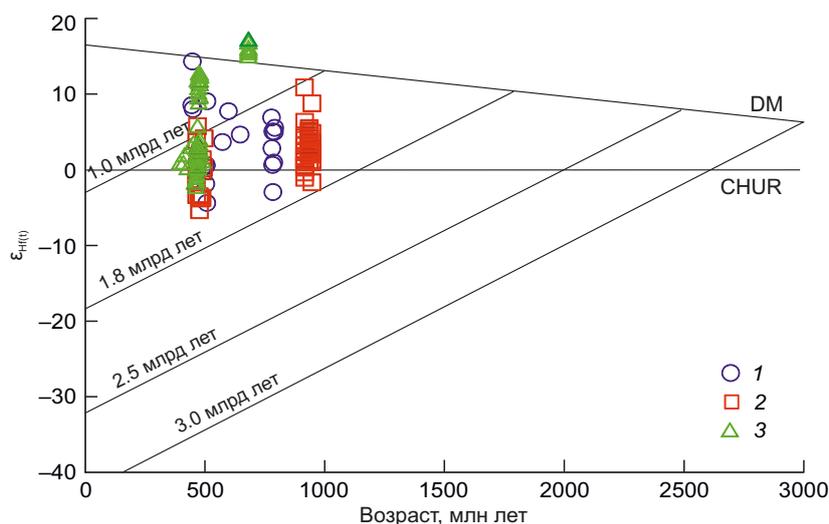


**Рис. 5.** Кривые относительной вероятности возрастов детритовых цирконов для песчаника (обр. Z-94) бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна (а), магматических и метаморфических пород Буреинского террейна по данным [Guryanov et al., 2018; Ovchinnikov et al., 2021; Sorokin et al., 2011a, 2011b, 2016, 2017b, 2019; Yang et al., 2020] (б), магматических и метаморфических пород Мамынского террейна по данным [Sorokin, Kudryashov, 2017; Sorokin et al., 2004, 2015; Ge et al., 2007; Hu et al., 2020; Li Z.Z. et al., 2018; Wu F.Y. et al., 2011; Xu et al., 2015; Zhou et al., 2011, 2015] (в).

**Fig. 5.** Relative probability curves showing age distributions of detrital zircons from (a) sandstones (sample Z-94) of the Belaya River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane, igneous and metamorphic rocks of the Bureya terrane after [Guryanov et al., 2018; Ovchinnikov et al., 2021; Sorokin et al., 2011a, 2011b, 2016, 2017b, 2019; Yang et al., 2020] (б), igneous and metamorphic rocks of the Mamyn terrane after [Sorokin, Kudryashov, 2017; Sorokin et al., 2004, 2015; Ge et al., 2007; Hu et al., 2020; Li Z.Z. et al., 2018; Wu F.Y. et al., 2011; Xu et al., 2015; Zhou et al., 2011, 2015] (в).

**Таблица 3.** Результаты Lu-Hf изотопных исследований цирконов для нижнепалеозойского песчаника (обр. Z-94) приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна**Table 3.** The Lu-Hf isotopic data on zircons from the Lower Paleozoic sandstone (sample Z-94) of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane

№ п/п	№ обр. / № зерна	Возраст, млн лет	$(^{176}\text{Yb}+^{176}\text{Lu})/^{176}\text{Hf}$ (%)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}(t)}$	$t_{\text{Hf}(DM)}$	$t_{\text{Hf}(C)}$
1	Z-94/33	448	21.0	0.001409	0.282746±18	8.5	0.7	0.8
2	Z-94/80	451	11.5	0.001111	0.282906±24	14.3	0.5	0.5
3	Z-94/76	453	24.0	0.001486	0.282729±24	8.0	0.8	0.8
4	Z-94/102	507	11.2	0.000680	0.282476±27	0.5	1.1	1.2
5	Z-94/83	507	17.3	0.001006	0.282413±35	-1.9	1.2	1.4
6	Z-94/118	507	9.6	0.000649	0.282480±26	0.6	1.1	1.2
7	Z-94/130	509	17.4	0.001191	0.282483±24	0.6	1.1	1.2
8	Z-94/107	511	12.2	0.001046	0.282340±31	-4.4	1.3	1.5
9	Z-94/123	512	9.4	0.000984	0.282719±27	9.1	0.8	0.8
10	Z-94/26	576	22.9	0.001185	0.282529±32	3.7	1.0	1.1
11	Z-94/67	601	10.3	0.000784	0.282625±21	7.8	0.9	1.0
12	Z-94/91	650	17.4	0.001112	0.282511±28	4.7	1.0	1.1
13	Z-94/58	781	15.6	0.001077	0.282495±35	6.9	1.1	1.1
14	Z-94/116	783	21.2	0.001305	0.282383±27	2.8	1.2	1.3
15	Z-94/1	786	31.1	0.002023	0.282329±38	0.6	1.3	1.4
16	Z-94/29	787	11.2	0.000690	0.282434±30	5.1	1.1	1.2
17	Z-94/30	787	30.2	0.001833	0.282225±35	-2.9	1.5	1.6
18	Z-94/129	791	31.8	0.001925	0.282334±35	1.0	1.3	1.4
19	Z-94/104	794	21.0	0.001304	0.282437±33	5.0	1.2	1.2
20	Z-94/97	795	13.3	0.000790	0.282444±21	5.6	1.1	1.2

**Рис. 6.** Диаграмма возраст (млн лет) –  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  для цирконов из 1 – песчаника (обр. Z-94) бассейна р. Белой приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна, 2 – магматических образований Буреинского террейна [Ovchinnikov et al., 2021; Sorokin et al., 2019; Yang et al., 2020], 3 – магматических образований Мамынского террейна [Hu et al., 2020; Li Z.Z. et al., 2018]. DM – деплетированная мантия, CHUR – однородный хондритовый резервуар.**Fig. 6.** Crystallization age (Ma) –  $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$  diagram for zircon grains from 1 – sandstone (sample Z-94) of the Belaya River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane, 2 – igneous rocks of the Bureya terrane [Ovchinnikov et al., 2021; Sorokin et al., 2019; Yang et al., 2020], 3 – igneous rocks of the Mamyn terrane [Hu et al., 2020; Li Z.Z. et al., 2018]. DM – depleted mantle, CHUR – chondrite uniform reservoir.

(табл. 3). Лишь два зерна из этой возрастной популяции характеризуются слабоотрицательными величинами  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)} = -4.4 \dots -1.9$  и значениями Hf-модельного возраста  $t_{\text{Hf}(C)} = 1.5 - 1.4$  млрд лет (табл. 3). Неопротерозойские цирконы имеют положительные значения  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)} = +0.6 \dots +7.8$  при  $t_{\text{Hf}(C)} = 1.4 - 1.0$  млрд лет за исключением одного зерна тонийского возраста со значением  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)} = -2.9$  и  $t_{\text{Hf}(C)} = 1.6$  млрд лет.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные комплексные минералого-геохимические исследования песчаников бассейна р. Белой, а также U-Th-Pb и Lu-Hf изотопные исследования детритовых цирконов из них позволяют реконструировать состав и возраст пород питающих провинций.

Песчаники бассейна р. Белой характеризуются значительными вариациями состава обломочного материала и основных породообразующих компонентов, соответствуя аркозам и литаренитам. Приведенная выше информация о химическом составе песчаников бассейна р. Белой указывает на их накопление за счет размыва «зрелых» в геохимическом отношении магматических пород преимущественно кислого и среднего состава.

Согласно результатам U-Th-Pb изотопного исследования детритовых цирконов, возраст наиболее молодой популяции детритовых цирконов из песчаника бассейна р. Белой составляет  $451 \pm 8$  млн лет, что в стратиграфической шкале определяет нижний возраст накопления осадков как поздний ордовик. В то же время на геологической карте масштаба 1:200000 [State Geological Map..., 1975b] эти песчаники отнесены к живет-франскому ярусу девона. Обилие девонской фауны не дает возможности ставить под сомнение присутствие девонских отложений в изучаемом районе. В то же время необходимо отметить, что эта фауна собрана не в данной локации. Кроме того, практически полное отсутствие обнажений не позволяет уверенно коррелировать разрезы осадочных пород. Все это в совокупности не позволяет исключать того, что исследованные песчаники в бассейне р. Белой могут относиться к более ранней истории, в частности к силурийским терригенным отложениям, также выделяемым в этом районе [State Geological Map..., 1975b].

Результаты U-Th-Pb исследований свидетельствуют о доминировании в области сноса пород кембрийско-ордовикского и неопротерозойского возраста (см. рис. 5, а). Согласно [Parfenov et al., 2003; Xu et al., 2015; Liu Y. et al., 2017; Hu et al., 2020; и др.], ЮМХОП сформировался в палеозое в результате закрытия океанического пространства. Однако полярность зон субдукции, существовавших в ходе тектонической эволюции этого пояса, дискуссионна [Hu et al., 2020; Liu Y. et al., 2017; и др.]. Во Введении отмечалось, что северо-восточный фланг ЮМХОП граничит с одной стороны с Мамынским террейном и с Буреинским – с другой. В этой связи можно предполагать, что исследованные песчаники являются фрагментом аккреционного комплекса

либо одной, либо другой упомянутой континентальной структуры.

Для того чтобы внести ясность в решение этой проблемы, используя полученные результаты изотопных исследований, вначале необходимо рассмотреть хронологию геологических событий в истории формирования Мамынского и Буреинского террейнов.

В пределах Буреинского террейна в последние годы выявлены магматические и метаморфические комплексы раннего палеозоя и неопротерозоя. В качестве источников тонийских цирконов, по-видимому, стоит рассматривать магматические породы нятыгранского и туловчихинского комплексов [Sorokin et al., 2016, 2017b, 2019; Yang et al., 2020]. Вопрос об источниках эдиакарских и криогеновых цирконов открыт, так как в структуре Буреинского террейна отсутствуют образования данного возраста, для которых были бы получены достоверные геохронологические данные, что, возможно, связано со слабой изученностью террейна. Примерами раннепалеозойских образований являются риолиты туранской серии с возрастом  $504 \pm 8$  млн лет [Sorokin et al., 2011b], гранитоиды кивилийского и суларинского комплексов, для которых приводятся определения в интервале 530–453 млн лет [Guryanov et al., 2018; Sorokin et al., 2011a; Ovchinnikov et al., 2021]. В целом, пики раннепалеозойской и неопротерозойской магматической активности отражены на рис. 5, б, и приходятся на 474, 494, 936, 950 млн лет.

В Мамынском (Xing'an) террейне раннепалеозойские магматические и метаморфические образования представлены так же широко, как и в Буреинском, при меньшем распространении неопротерозойских образований, хотя последнее может быть связано с недостаточным количеством данных. Так, среди неопротерозойских магматических и ортомагматических пород следует упомянуть габбро с возрастом  $583 \pm 6$  млн лет и кварцевые диориты с возрастом  $607 \pm 8$  млн лет гаринского комплекса [Sorokin et al., 2015], сланцы Чалукской района [Li Z.Z. et al., 2018] и гнейсы комплекса Синхуадукоу [Wu F.Y. et al., 2011; Zhou et al., 2011]. Примерами раннепалеозойских образований являются магматические и метаморфические, широко распространенные на территории как России, так и Китая, для которых, согласно U-Pb геохронологическим исследованиям, возраст варьируется в интервале 541–488 млн лет [Sorokin et al., 2004, 2017a; Sorokin, Kudryashov, 2017] и 499–446 млн лет [Ge et al., 2007; Wu F.Y. et al., 2011; Zhou et al., 2011, 2015; Xu et al., 2015; Li Z.Z. et al., 2018; Hu et al., 2020] соответственно. Этапы проявления магматической активности в пределах Мамынского террейна отражены на рис. 5, в, а их пики приходятся на 465 и 493 млн лет.

Выше упоминалось, что наиболее древние магматические образования в пределах российской части ЮМХОП представлены позднеордовикскими ( $455 \pm 2$  млн лет) толеитовыми габбро [Smirnov et al., 2012], сформированными, по всей видимости, в обстановке островной дуги. На сопредельной территории КНР в пределах

этого пояса к наиболее древним магматическим комплексам относятся позднеордовикские и раннесилурийские островодужные вулканиты [Guo et al., 2009; Wu G. et al., 2015]. Это согласуется с присутствием в исследованных песчаниках позднеордовикских цирконов с положительными значениями  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)} = +8.0...+14.3$  при  $t_{\text{Hf}(C)} = 0.8-0.5$  млрд лет (табл. 3). Таким образом, источником позднеордовикских цирконов, по-видимому, могут быть магматические породы островных дуг соответствующего возраста.

Источником кембрийских и неопротерозойских цирконов являются магматические и метаморфические породы Буреинского или Мамынского террейна. Анализируя кривые вероятности возраста детритовых цирконов из песчаников бассейна р. Белой (обр. Z-94), а также из кембрийских и неопротерозойских магматических пород Буреинского и Мамынского террейнов, следует отметить определенное сходство всех трех графиков (см. рис. 5). В этой связи нет оснований для предпочтения какого-то одного из двух упомянутых массивов как поставщика обломочных цирконов в изученные песчаники. Сравнение Hf-изотопного состава цирконов из песчаников бассейна р. Белой (обр. Z-94) с таковым из кембрийских и неопротерозойских магматических пород Буреинского и Мамынского террейнов также не решает проблему. Рис. 6 иллюстрирует очевидное сходство Hf-изотопного состава цирконов из сравниваемых геологических структур.

В существующих геодинамических реконструкциях [Xu et al., 2015; Liu Y. et al., 2017; Liu B. et al., 2021; Hu et al., 2020] предполагается, что при формировании северо-восточного фланга ЮМХОП субдукция в раннем палеозое была направлена на северо-запад (в современных координатах), т.е. под Мамынский массив. В этой связи исследованные песчаники бассейна р. Белой, очевидно, следует рассматривать в качестве фрагмента аккреционного комплекса этого массива. Полученные данные не противоречат такой интерпретации, но более определенным выводам мешает слабая изученность раннепалеозойского и неопротерозойского магматизма Буреинского и Мамынского террейнов.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе проведения исследований, позволяют сделать следующие выводы:

1. Песчаники бассейна р. Белой характеризуются значительными вариациями состава обломочного материала и основных породообразующих компонентов, соответствуя аркозам и литаренитам. Их накопление происходило за счет размыва «зрелых» в геохимическом отношении магматических пород преимущественно кислого и среднего состава.

2. Возраст наиболее молодой популяции цирконов из песчаника бассейна р. Белой  $451 \pm 8$  млн лет, в связи с чем нижняя возрастная граница накопления приходится на поздний ордовик, тогда как эти породы отнесены к среднему – позднему девону. В этой связи

нельзя исключать того, что исследованные песчаники бассейна р. Белой могут относиться к силурийским терригенным отложениям, также выделяемым в этом районе.

3. Источниками ордовикских цирконов с положительными величинами  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  и раннепалеозойскими – неопротерозойскими значениями Hf-модельного возраста  $t_{\text{Hf}(C)}$ , по-видимому, являлись островодужные образования, фрагменты которых обнаружены сравнительно недавно в структуре ЮМХОП.

4. Источниками кембрийских и более древних неопротерозойских цирконов с положительными величинами  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  и нео- и мезопротерозойскими значениями Hf-модельного возраста  $t_{\text{Hf}(C)}$ , вероятно, являлись раннепалеозойские и неопротерозойские магматические образования Буреинского или Мамынского террейна.

5. Не исключено, что исследованные песчаники бассейна р. Белой входят в состав раннепалеозойского аккреционного комплекса, сформированного в раннем палеозое вдоль юго-восточной окраины Мамынского массива. Однако более определенным выводам мешает слабая изученность раннепалеозойского и неопротерозойского магматизма рассматриваемого региона.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников ЦКП «Амурский центр минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН» Е.Н. Воропаеву, О.Г. Медведеву, В.И. Рождествовину, Е.С. Сапожника, Е.В. Ушакову, ИГХ СО РАН – О.В. Зарубину, Н.В. Брянского, Т.Н. Галкину, а также персонал Геохронологического центра Аризонского университета за выполнение аналитических исследований.

Автор признателен д.г.-м.н. Т.В. Донской за ее ценные замечания к представленным материалам, которые, несомненно, позволили улучшить конечный вариант статьи.

## 9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Автор заявляет об отсутствии у него конфликта интересов. Автор прочитал рукопись и согласен с опубликованной версией.

The author has no conflicts of interest to declare. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Amelin Y., Davis W.J., 2005. Geochemical Test for Branching Decay of  $^{176}\text{Lu}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69 (2), 465–473. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.028>.

Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters* 273 (1–2), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>.

Condie K.C., 1993. Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust: Contrasting Results from

Surface Samples and Shales. *Chemical Geology* 104 (1–4), 1–37. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E).

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56 (14), 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9).

Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology* 23 (10), 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2).

Ge W.C., Wu F.Y., Zhou C.Y., Zhang J.H., 2007. Porphyry Cu-Mo Deposits in the Eastern Xing'an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization Ages and Their Geodynamic Implications. *Chinese Science Bulletin* 52, 3416–3427. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0466-8>.

Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research* 131 (3–4), 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>.

Guo F., Fan W.M., Li C.W., Miao L.C., Zhao L., 2009. Early Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Dashizhai Basalts, Inner Mongolia. *Science in China Series D: Earth Sciences* 52, 940–951. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0083-2>.

Guryanov V.A., Nigay E.V., Yurchenko Yu.Yu., Dobkin S.N., Arapov V.N., Amelin S.A., 2018. Chronology of Granitoid Magmatism in the Eastern Part of the Bureya Massif of the Central Asian Fold Belt. In: *Methods and Geological Results of the Study of Isotopic Geochronometric Systems of Minerals and Rocks. Proceedings of the Materials of the 7th Russian Conference on Isotope Geochronology (June 5–7, 2018). IGEM RAS, Moscow, p. 105–108 (in Russian) [Гурьянов В.А., Нига́й Е.В., Юрченко Ю.Ю., Добкин С.Н., Арапов В.Н., Амелин С.А. Хронология гранитоидного магматизма восточной части Буреинского массива Центрально-Азиатского складчатого пояса // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород: Материалы 7-й Российской конференции по изотопной геохронологии (5–7 июня 2018 г.). М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 105–108]*.

Herron M.M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58 (5), 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

Hu X.-L., Yao S.-Z., Tan C.-Y., Zeng G.-P., Ding Z.-J., He M.-C., 2020. Early Paleozoic Geodynamic Evolution of the Eastern Central Asian Orogenic Belt: Insights from Granitoids in the Xing'an and Songnen Blocks. *Geoscience Frontiers* 11 (6), 1975–1992. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.05.018>.

Jayawardena U.S., Izawa E., 1994. A New Chemical Index of Weathering for Metamorphic Silicate Rocks in Tropical Regions: A Study from Sri Lanka. *Engineering Geology* 36

(3–4), 303–310. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90011-6).

Khanchuk A.I. (Ed.), 2006. *Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Eastern Regions of Russia. Book 1. Dal'nauka, Vladivostok, 572 p. (in Russian) [Геодинамика, магматизм и металлогения востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.]*.

Li Y., Xu W.L., Tang J., Sun C.Y., Zhang X.M., Xiong S., 2020. Late Paleozoic Igneous Rocks in the Xing'an Massif and Its Amalgamation with the Songnen Massif, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences* 197, 104407. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104407>.

Li Z.Z., Qin K.Z., Li G.M., Jin L.Y., Song G.X., 2018. Neoproterozoic and Early Paleozoic Magmatic Records from the Chalukou Ore District, Northern Great Xing'an Range, NE China: Implications for Tectonic Evolution and Mesozoic MO Mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences* 165, 96–113. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.020>.

Liu B., Chen J.F., Han B.F., Liu J.L., Li J.W., 2021. Geochronological and Geochemical Evidence for a Late Ordovician to Silurian Arc-Back-Arc System in the Northern Great Xing'an Range, NE China. *Geoscience Frontiers* 12 (1), 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.07.002>.

Liu Y., Li W., Feng Z., Wen Q., Neubauer F., Liang C., 2017. A Review of the Paleozoic Tectonics in the Eastern Part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 43, 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.013>.

Ludwig K.R., 2008. *ISOPLOT 3.6. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 77 p.*

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Mossakovsky A.A., Ruzhentsev S.V., Samygin S.G., Kheraskova T.N., 1993. Central Asian Fold Belt: Geodynamic Evolution and Formation History. *Geotectonics* 6, 3–33 (in Russian) [Моссаковский А.А., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н. Центральнo-Азиатский складчатый пояс: геодинамическая эволюция и история формирования // Геотектоника. 1993. № 6. С. 3–33].

Ovchinnikov R.O., Sorokin A.A., Kovach V.P., Kotov A.B., 2019. Geochemical Features, Sources, and Geodynamic Settings of Accumulation of the Cambrian Sedimentary Rocks of the Mel'gin Trough (Bureya Continental Massif). *Geochemistry International* 57, 540–555. <https://doi.org/10.1134/S0016702919050094>.

Ovchinnikov R.O., Sorokin A.A., Kudryashov N.M., 2018. Age of the Early Precambrian (?) Intrusive Complexes of the Northern Bureya Continental Massif, Central Asian Fold Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 12, 289–302. <https://doi.org/10.1134/S181971401804005X>.

Ovchinnikov R.O., Sorokin A.A., Kydryashov N.M., 2021. Early Paleozoic Magmatic Events in the Bureya Continental Massif, Central Asian Orogenic Belt: Timing and Tectonic Significance. *Lithos* 396–397, 106237. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106237>.

Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril S.I., Kirillova G.L. et al.,

2003. Model of the Formation of Orogenic Belts in Central and North-East Asia. *Pacific Geology* 22 (6), 7–41 (in Russian) [Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгагов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41].

Parfenov L.M., Popoko L.I., Tomurtogoo O., 2001. Problems of Tectonics of the Mongol-Okhotsk Orogenic Belt. *Geology of the Pacific Ocean* 16 (5), 797–830.

Pettijohn F.J., 1975. *Sedimentary Rocks*. Harper and Row, New York, 628 p.

Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R., 1972. *Sand and Sandstones*. Springer, 618 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9974-6>.

Scherer E., Münker C., Mezger K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science* 293 (5530), 683–687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>.

Smirnov Yu.V., Sorokin A.A., 2017. Geochemical and Sm-Nd Isotope-Geochemical Patterns of Metavolcanic Rocks, Diabase, and Metagabbroids on the Northeastern Flank of the South Mongolian – Khingan Orogenic Belt. *Doklady Earth Sciences* 474, 574–578. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17050178>.

Smirnov Yu.V., Sorokin A.A., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Yakovleva S.Z., Gorokhovskiy B.M., 2016. Early Paleozoic Monzodiorite-Granodiorite Association in the Northeastern Flank of the South Mongolia – Khingan Orogenic Belt (Nora – Sukhotinsky Terrane): Age and Tectonic Setting. *Russian Journal of Pacific Geology* 10, 123–131. <https://doi.org/10.1134/S1819714016020068>.

Smirnov Yu.V., Sorokin A.A., Kudryashov N.M., 2012. Early Paleozoic Gabbro-Amphibolites in the Structure of the Bureya Terrane (Eastern Part of the Central Asian Fold Belt): First Geochronological Data and Tectonic Position. *Doklady Earth Sciences* 445, 796–801. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070094>.

Smirnov Yu.V., Sorokin A.A., Kudryashov N.M., 2021. The First Evidence for Late Devonian Granitoid Magmatism in the Northeastern Flank of the South Mongolia – Khingan Orogenic Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 15, 39–50. <https://doi.org/10.1134/S1819714021010073>.

Söderlund U., Patchett P.J., Vervoort J.D., Isachsen C.E., 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Sciences Letters* 219 (3–4), 311–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3).

Sorokin A.A., Kotov A.B., Kudryashov N.M., Kovach V.P., 2015. First Evidence of Ediacaran Magmatism in the Geological History of the Mamyn Terrane of the Central Asian Fold Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 9, 399–410. <https://doi.org/10.1134/S181971401506007X>.

Sorokin A.A., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Sorokin A.P., Yakovleva S.Z., Plotkina Yu.V., Gorokhovskii B.M., 2011a. The Early Paleozoic Age of Granitoids of the Kiviliyskii Complex of the Bureya Terrane (Eastern Flank of the Central Asian Fold Belt). *Doklady Earth Sciences* 440, 1253. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11090327>.

Sorokin A.A., Kudryashov N.M., 2017. The Cambrian – Ordovician Diorite-Granodiorite-Granite Association of the Mamyn Terrane (Central Asian Fold Belt): U-Pb Geochronological and Geochemical Data. *Doklady Earth Sciences* 472, 113–118. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17010275>.

Sorokin A.A., Kudryashov N.M., Kotov A.B., Kovach V.P., 2017a. Age and Tectonic Setting of the Early Paleozoic Magmatism of the Mamyn Terrane, Central Asian Orogenic Belt, Russia. *Journal of Asian Earth Sciences* 144, 22–39. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2017.01.017>.

Sorokin A.A., Kudryashov N.M., Li Jin Yi, 2004. U-Pb Geochronology of Granitoids of the Oktyabrskiy Complex, Mamynskiy Terrane (Priamurye). *Pacific Geology* 23 (5), 54–67 (in Russian) [Сорокин А.А., Кудряшов Н.М., Ли Цзиньйи. U-Pb геохронология гранитоидов октябрьского комплекса Мамынского террейна (Приамурье) // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 5. С. 54–67].

Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Kudryashov N.M., Kotov A.B., Kovach V.P., 2017b. Two Stages of Neoproterozoic Magmatism in the Evolution of the Bureya Continental Massif of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics* 58 (10), 1171–1187. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.12.009>.

Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Kudryashov N.M., Sorokin A.P., 2016. An Early Neoproterozoic Gabbro-Granite Association in the Bureya Continental Massif (Central Asian Fold Belt): First Geochemical and Geochronological Data. *Doklady Earth Sciences* 471, 1307–1311. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16120230>.

Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Xu W., Kovach V.P., Yang H., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., Travin A.V., Plotkina Y.V., 2019. Ages and Nature of the Protolith of the Tulovchikha Metamorphic Complex in the Bureya Massif, Central Asian Orogenic Belt, Russia: Evidence from U-Th-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Data. *Lithos* 332–333, 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.001>.

Sorokin A.A., Smirnov Yu.V., Smirnova Yu.N., 2017c. Geochemical Features and Sources of Clastic Material in Paleozoic Terrigenous Deposits of the Northeastern Flank of the South Mongolia – Khingan Orogenic Belt. *Stratigraphy and Geological Correlation* 25, 146–166. <https://doi.org/10.1134/S086959381701004X>.

Sorokin A.A., Smirnov Yu.V., Smirnova Yu.N., Kudryashov N.M., 2011b. First Data on Age of Metarhyolites from the Turan Group of the Bureya Terrane, Eastern Part of the Central Asian Foldbelt. *Doklady Earth Sciences* 439, 944. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11070282>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2012. Far Eastern Series. Scale of 1:1000000. Sheet M-52 (Blagoveshchensk). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Дальневосточная. Масштаб 1:1000000. Лист М-52 (Благовещенск). СПб.: ВСЕГЕИ, 2012].

State Geological Map of USSR, 1975a. Series Amur-Zeya. Scale of 1:200000. Sheet M-52-I (The Mouth of the Bureya River). Aerogeology, Moscow (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия

Амуро-Зейская. Лист М-52-I (Устье р. Беря). М.: Аэрогеология, 1975].

State Geological Map of USSR, 1975b. Series Amur-Zeya. Scale of 1:200000. Sheet М-52-II (Nylga). Aerogeology, Moscow (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Серия Амуро-Зейская. Масштаб 1:200000. Лист М-52-II (Нылга). М.: Аэрогеология, 1975].

State Geological Map of USSR, 1978. Series Amur-Zeya. Scale of 1:200000. Sheet М-52-VII, VIII (Sergeevka). Aerogeology, Moscow (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Серия Амуро-Зейская. Масштаб 1:200000. Лист М-52-VII, VIII (Сергеевка). М.: Аэрогеология, 1978].

Taylor S.R., McLennan S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.

Vervoort J.D., Patchett P.J., 1996. Behavior of Hafnium and Neodymium Isotopes in the Crust: Constraints from Precambrian Crustally Derived Granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60 (19), 3717–3723. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00201-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00201-3).

Wu F.Y., Sun D.Y., Ge W.C., Zhang Y.B., Grant M.L., Wild S.A., Jahn B.M., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences* 41 (1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.014>.

Wu G., Chen Y.C., Sun F.Y., Liu J., Wang G., Xu B., 2015. Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes of the Early Paleozoic Igneous Rocks in the Duobaoshan Area, NE China, and Their Geological Significance. *Journal of Asian*

*Earth Sciences* 97, 229–250. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.07.031>.

Xu B., Zhao P., Wang Y.Y., Liao W., Luo Z.W., Bao Q.Z., Zhou Y.H., 2015. The Pre-Devonian Tectonic Framework of Xing'an – Mongolian Orogenic Belt (XMOB) in North China. *Journal of Asian Earth Sciences* 97, 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.07.020>.

Yang H., Xu W., Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Ge W., 2020. Geochronology and Geochemistry of Neoproterozoic Magmatism in the Bureya Block, Russian Far East: Petrogenesis and Implications for Rodinia Reconstruction. *Precambrian Research* 342, 105676. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105676>.

Yudovich Ya.E., Ketris M.P., 2011. *Geochemical Indicators of Lithogenesis (Lithological Geochemistry)*. Geoprint, Syktyvkar, 742 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Керрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.].

Zhou J.B., Wang B., Wilde S.A., Zhao G.C., Cao J.L., Zheng S.Q., Zeng W.S., 2015. Geochemistry and U-Pb Zircon Dating of the Toudaoqiao Blueschists in the Great Xing'an Range, Northeast China, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 97, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.07.011>.

Zhou J.B., Wilde S.A., Zhang X.Z., Zhao G.C., Liu F.L., Qiao D.W., Ren S.M., Liu J.H., 2011. A >1300 km Late Pan-African Metamorphic Belt in NE China: New Evidence from the Xing'an Block and Its Tectonics Implications. *Tectonophysics* 509 (3–4), 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.06.018>.