

## ПОЗДНЕКАМЕННОУГОЛЬНЫЕ РИОЛИТЫ ПРИАМУРСКОГО ФРАГМЕНТА НОРА-СУХОТИНСКОГО ТЕРРЕЙНА: ГЕОХИМИЯ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ

Ю.В. Смирнов<sup>1</sup>, В.Б. Хубанов<sup>2</sup>, С.И. Дриль<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Речной 1, г. Благовещенск, Россия, 675000;  
e-mail: [smirnov@ignm.ru](mailto:smirnov@ignm.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьяновой 6 а, г. Улан-Удэ, Россия, 670047;  
e-mail: [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)

<sup>3</sup>ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского 1 а, г. Иркутск, Россия, 664033;  
e-mail: [sdril@igc.irk.ru](mailto:sdril@igc.irk.ru)

Поступила в редакцию 05 октября 2022

В публикации представлены первые результаты геохимических, изотопно-геохимических (Sm-Nd) и геохронологических (U-Pb, LA-ICP-MS) исследований кислых вулканических пород, отобранных в бассейне р. Богданиха Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна северо-восточного фланга Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса. По содержанию породообразующих компонентов исследованные вулканы соответствуют высококремнистым и высокоглиноземистым риолитам. Повышенные содержания щелочей, Ga, Zr, Nb и Y, пониженные концентрации Ba, Sr, Ti, Eu, мантийные Nd изотопные метки ( $\epsilon_{Nd(t)} = +3.0 \dots +3.6$ ) позволяют классифицировать риолиты бассейна р. Богданиха как риолиты A<sub>2</sub>-типа. Конкордантный возраст наиболее молодой популяции цирконов из риолита, согласно геохронологическим (U-Pb, LA-ICP-MS) исследованиям, составляет  $301 \pm 4$  млн лет, соответствуя позднему карбону. Учитывая геохимические особенности изученных нами риолитов и существующие модели формирования Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, наиболее вероятно, они сформировались в коллизионной обстановке в результате отрыва слэба.

**Ключевые слова:** кислые вулканы, коллизионный этап, геохимия, изотопная геохимия, геохронология, Нора-Сухотинский террейн.

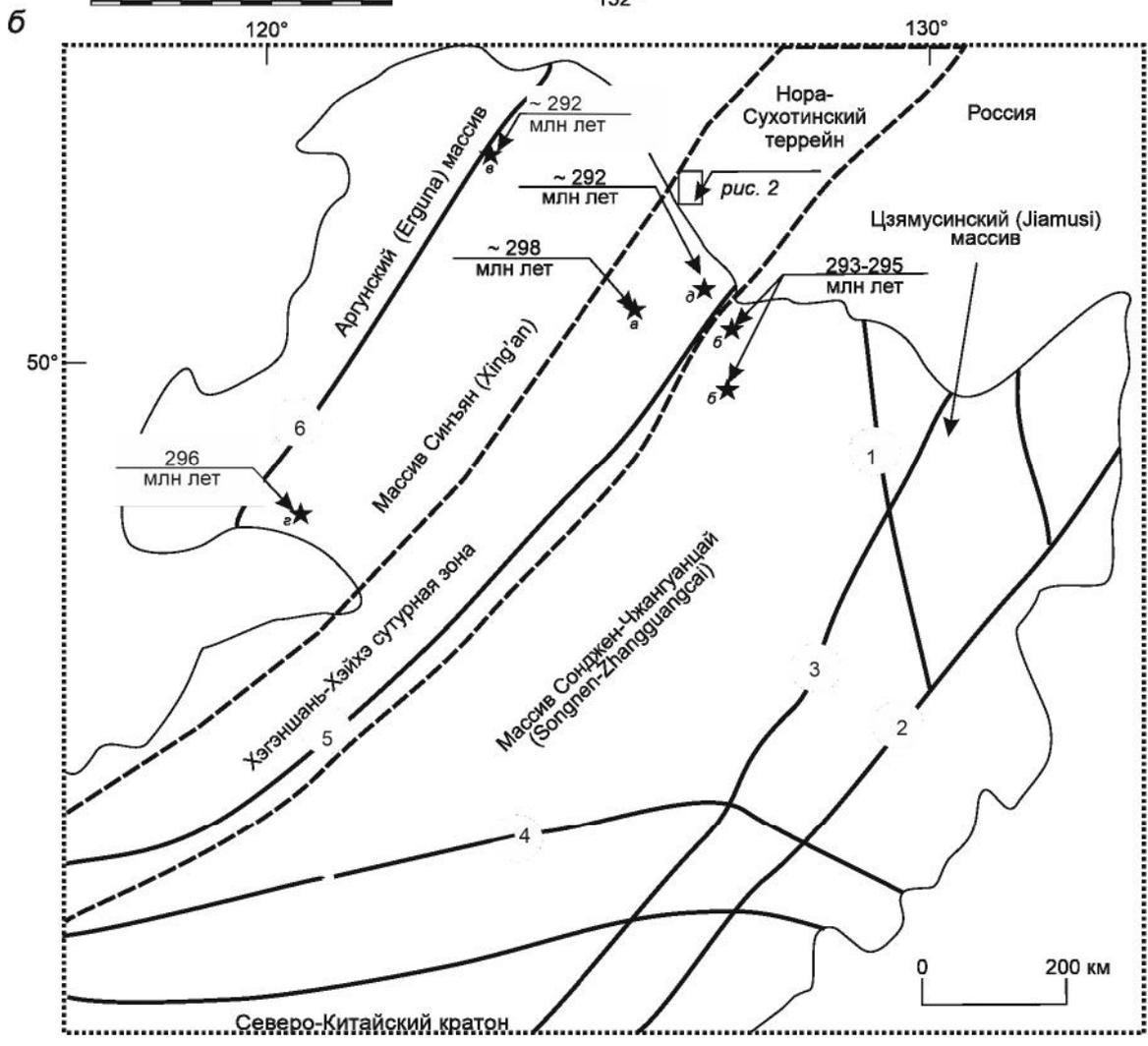
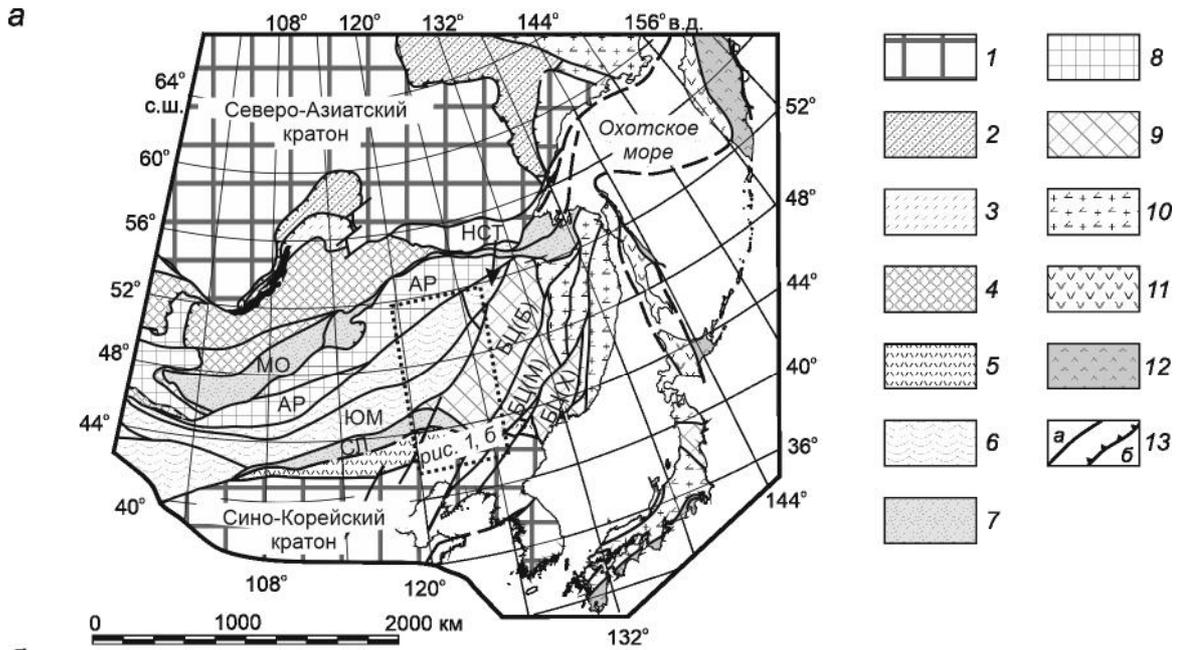
## ВВЕДЕНИЕ

В строении восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса выделяются многочисленные континентальные массивы и разделяющие их разновозрастные складчатые пояса, расположенные между Северо-Азиатским кратоном, с одной стороны, Сино-Корейским (Северо-Китайским) и Таримским кратонами, с другой [3, 23] (рис. 1, а). Южно-Монгольско-Хинганский орогенный пояс является крупной тектонической структурой, входящей в систему Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Северо-восточный фланг Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, по [1, 3], рассматривается в качестве Нора-Сухотинского террейна (рис. 1, б). В последние годы нами были проведены комплексные исследования магматических образований и осадочных толщ Нора-Сухотинского террейна в пределах Зей-Селемджинского фрагмента,

которые позволили существенно уточнить историю его формирования. Установлено, что на начальном этапе развития террейна были сформированы ордовикские вулканогенно-осадочные породы неклинской и дагмарской толщ [9], а также позднеордовикские толетовые габбро [6] и раннесилурийские гранодиориты [7], отражающие островодужные процессы в истории формирования Нора-Сухотинского террейна. В позднем девоне в обстановке скольжения (трансформной континентальной окраины) были образованы гастингсит-биотитовые граниты массива горы Медведка [8]. Однако полученные данные носят «точечный» характер, поскольку несут информацию только для более северного Зей-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна, при этом остаются не изучены поздние этапы его развития, отражающие закрытие палеоокеана.

На территории Китая часть Южно-Монгольско-Хинганского пояса на существующих в настоящее



время тектонических схем [22, 28 и др.] выделена как зона крупного разлома или Хэгэншань-Хэйхэ (Hegenshan–Heihe) сутурной зоны (ХХСЗ) (рис. 1, б). В пределах ХХСЗ установлены позднеордовикские и раннесилурийские островодужные андезиты и андезибазальты [18]. Заключительный (коллизийный) этап развития ХХСЗ охватил период времени начиная с позднего карбона по раннюю пермь [13, 22, 31, 34 и др.]. Согласно геофизическим исследованиям [15], коллизия блоков Синъян (Xing'an) и Сонджен (Songnen), закрытие палеоокеана и формирование ХХСЗ происходили начиная с ~320 млн лет до ~290 млн лет назад. Кроме того постколлизийный этап ХХСЗ охарактеризован массивами гранитоидов А-типа с возрастом  $292 \pm 4$  млн лет,  $299 \pm 1$  и  $298 \pm 1$  млн лет [28, 37], сформированных в результате отрыва слэба (slab break-off).

Одними из ключевых объектов, позволяющими «соединить» информацию, полученную для китайского и российского сегментов Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, являются осадочные и магматические комплексы Приамурского фрагмента, которые из-за значительного перекрытия рыхлыми отложениями Амуро-Зейской впадины выходят на поверхность фрагментарно.

В статье представлены первые результаты минералого-геохимических, изотопно-геохимических (Sm-Nd) и геохронологических (U-Pb, LA-ICP-MS) исследований вулканических пород кислого состава, отобранных в бассейне р. Богданиха (рис. 2), левого притока р. Амур. Главной целью исследований являлось определение их генезиса в составе Нора-Сухотинского террейна.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

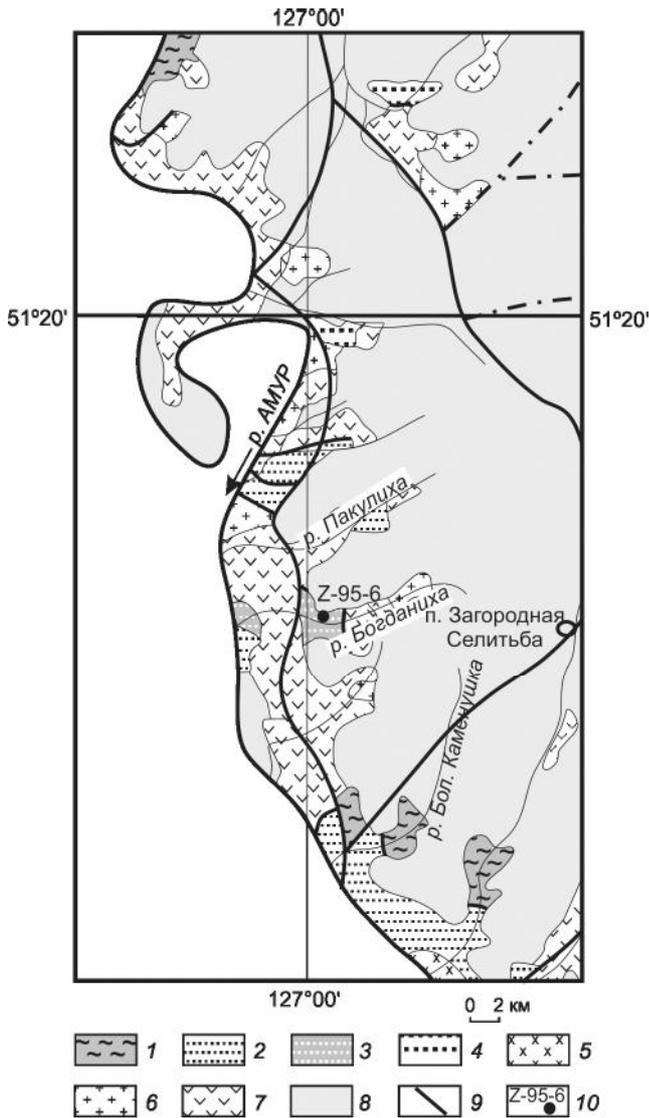
Осадочные и вулканогенно-осадочные породы в пределах Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна представляют собой фрагменты аккреционных и островодужных комплексов, слагающие разрозненные выходы, часто перекрытые отложениями Амуро-Зейской впадины (рис. 2). Объектами данного исследования являются вулканические породы, отобранные в бассейне р. Богданиха ( $51^{\circ}09'51.8''$  с.ш.,  $127^{\circ}00'42.9''$  в.д.). Согласно [4], вулканические породы совместно с терригенными отложениями, а именно, кварцевыми и полимиктовыми песчаниками, аргиллитами, глинистыми сланцами, гравелитами и конгломератами, объединены в состав богданихинской свиты. Существующие представления о строении богданихинской свиты достаточно противоречивы, так как основаны на описании разрозненных частных обнажений и искусственных выработок. Породы богданихинской свиты встречаются также в бассейнах рек Берея, Каменушка, Кутухан и в междуречье Малая Каменушка – Пакулиха (левобережье р. Амур). Общая мощность свиты 400–1100 м. Возраст свиты принят серпухов-башкирский на основании находок органических остатков флоры *Asterocalamites chaetophylloides* Radez., *Angaropteridium askyzense* (Zal.) Radez., *Rhodea* sp., *Rhacopteris* sp., *Dictioxylon*(?), *Angarocarpus ananievii* Such., обнаруженных в аргиллитах в бассейне р. Богданиха [4, 5]. Континентальный и мелководно-морской характер богданихинской свиты дает основание предполагать, что свита представляет собой моллассу, которая сформировалась в коллизийной геодина-

**Рис. 1.** Геологическая схема восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (а), составлена по [3] с изменениями авторов.

Условные обозначения (а): 1 – кратоны и их фрагменты; 2 – складчато-надвиговые пояса окраины кратона; 3–7 – домезозойские орогенные пояса: 3 – позднепермские, 4 – позднекембрийско-раннеордовикские, 5 – силурийские, 6 – позднепалеозойские, 7 – позднепалеозойско-раннемезозойские; 8–9 – фрагменты домезозойских континентальных массивов: 8 – позднепермские, 9 – раннепалеозойские; 10–12 – мезозойские и кайнозойские орогенные пояса: 10 – позднеюрские, 11 – поздне меловые, 12 – кайнозойские; 13 – основные разломы: (а) – с крутым и (б) – с пологим падением. Сокращения (а): континентальные массивы (супертеррейны): АР – Аргунский, БЦ – Бурей-Цзямусинский в составе: Бурейского (БЦ(Б)), Малохинганского (БЦ(М)), Ханкайского (БЦ(Х)), складчатые пояса: МО – Монголо-Охотский, СЛ – Солонкерский, ЮМ – Южно-Монгольско-Хинганский (НСТ – Нора-Сухотинский террейн).

На врезке (б) показано положение исследуемых образований Нора-Сухотинского террейна, по [4], а также сутурных зон, по [24, 28, 33, 38, 39]: 1 – Муданьцзян (Mudanjiang); 2 – Дуньхуа-Мишань (Dunhua–Mishan); 3 – Цзямуси-Ютонг (Jiamusi–Yitong); 4 – Солонкер-Хра Морон-Чанчунь (Solonker–Xra Moron–Changchun); 5 – Хэгэншань-Хэйхэ (Hegenshan–Heihe) 6 – Хигуита-Тайюань (Xiguita–Tayuan).

а – раннепермские гранитоиды массива Шаншенфу (Shanshenfu) Хэгэншань-Хэйхэ сутурной зоны [28], б – раннепермские вулканы массива Сонджен-Чжангуанцай (Songnen–Zhangguangcai) [22], в – раннепермские сиенограниты массива Синъян (Xing'an) [33], г – раннепермские гранитоиды массива Синъян (Xing'an) [20], д – раннепермские щелочные граниты массива Дахейшань (Daheishan) Хэгэншань-Хэйхэ сутурной зоны [37].



**Рис. 2.** Геологическая схема Нора-Сухотинского террейна северо-восточной части Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса. Составлена по [4], с изменениями авторов.

Условные обозначения: 1–4 – палеозойские осадочные и вулканогенно-осадочные породы Нора-Сухотинского террейна: 1 – позднесилурийского возраста, 2 – ранне- и среднедевонского возраста, 3 – ранне-среднекаменноугольного возраста; 4 – раннепермского возраста, 5 – средне-позднекаменноугольные гранодиориты и граниты тырмо-буреинского комплекса, 6 – мезозойские граниты, гранодиориты и диориты, 7 – осадочные и вулканогенно-осадочные породы раннемелового возраста, 8 – кайнозойские рыхлые отложения, 9 – разломы, 10 – место отбора и номер образца для U-Pb геохронологических исследований.

мической обстановке. В то же время, вулканогенная часть свиты осталась не исследованной. На правом берегу р. Богданиха в дорожном карьере среди кайнозойских рыхлых отложений Амуро-Зейской впадины встречаются риолиты светло-серого цвета с порфи-

ровой структурой и темно-серого цвета с афировой структурой. Форма залегания вулканитов не установлена. Контакты с нижележащими образованиями задернованы. Объектами исследований являлись светло-окрашенные риолиты с порфировой структурой.

#### МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералого-петрографические исследования вулканических пород богданихинской свиты проводились по 16 образцам с помощью поляризационного микроскопа Axio Scope A1. Определение состава породообразующих минералов выполнено в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск). Работы проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV JEOL, оснащенного комплексной системой микроанализа OXFORD INSTRUMENTS.

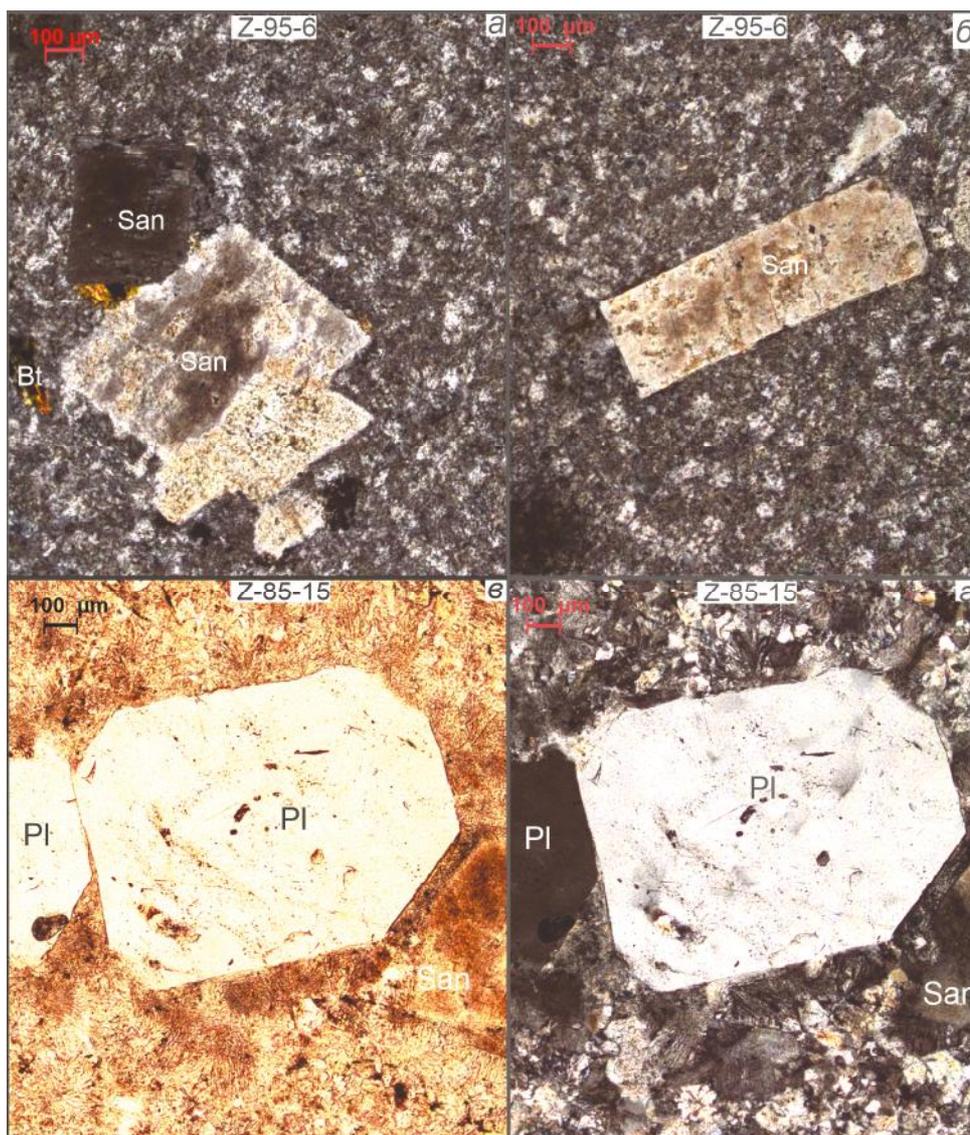
Определение содержаний породообразующих элементов в породах выполнено рентгенофлуоресцентным методом в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск) на рентгеновском спектрометре Pioneer 4S, а микроэлементов – методом ICP-MS в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)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

Изотопно-геохимические (Sm-Nd) исследования пород проводились в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН (г.Иркутск). Измерения изотопного состава Sm и Nd выполнены на 9-коллекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICP-MS Neptune Plus в статическом режиме. При расчете величин  $\epsilon_{Nd(t)}$  использованы современные значения однородного хондритового резервуара (CHUR), по [19], и деплетированной мантии (DM), по [16].

Для U-Pb геохронологических исследований были выделены зерна циркона в минералогической лаборатории Института геологии и природопользования ДВО РАН с применением тяжелых жидкостей. Непосредственно U-Pb геохронологические исследования выполнены в ЦКП «Геоспектр» Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) на одноколлекторном магнитно-секторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Element XR (Termo Scientific), оснащенный устройством лазерной абляции UP-213 (New Wave Research). Детально описание аналитических процедур приведено в публикации [10]. Обработка полученных результатов производилась с помощью программ Glitter [17] и Isoplot v. 3.6 [26].

#### ОСНОВНЫЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Среди изученных нами образцов присутствуют риолиты светло-серого цвета с порфировой структу-



**Рис. 3.** Микрофотографии образцов риолитов бассейна р. Богданиха Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

Сокращения: Pl – плагиоклаз, San – санидин, Bt – биотит.

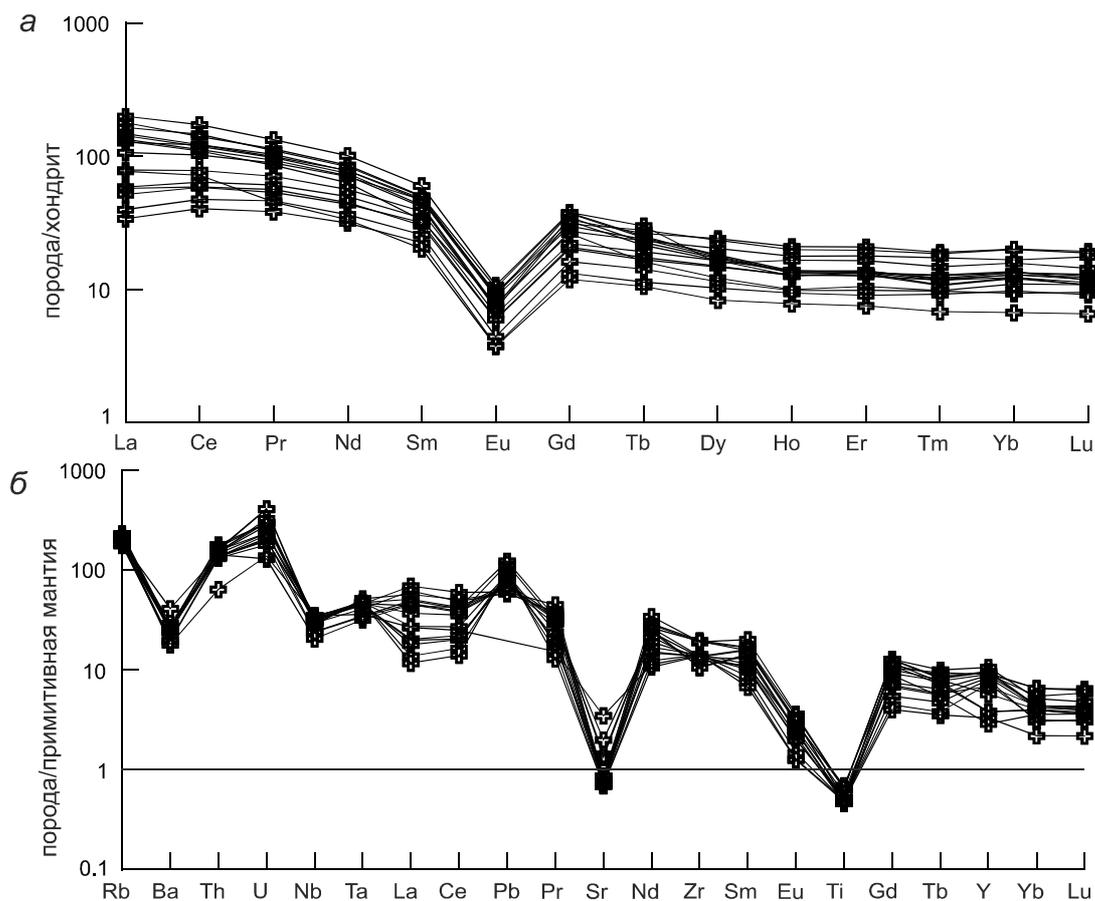
рой и массивной текстурой. Фенокристы представлены преимущественно полевыми шпатами (санидином и плагиоклазами) и кварцем размером от 2 до 5 мм (редко достигают 20 мм) (рис. 3). Реже наблюдаются чешуйки биотита и мусковита. Единичны вкрапленники роговой обманки. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом и магнетитом.

По содержанию  $\text{SiO}_2$  (75.51–78.91 мас. %) и щелочей ( $\text{K}_2\text{O}$  (3.78–5.18 мас. %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (2.94–4.46 мас. %)) исследуемые вулканиты соответствуют высококалийным риолитам (рис. 4, а, б, табл. 1). На диаграмме  $\text{SiO}_2 - (\text{FeO}^*/(\text{FeO}^* + \text{MgO}))$  [14] фигуративные точки состава риолитов расположены в поле железистых

образований (рис. 4, в). Повышенные значения величин  $A/\text{CNK}$  (1.03–1.35) и  $A/\text{NK}$  (1.04–1.38) позволяют отнести их к высокоглиноземистым породам (рис. 4, з). По величинам  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$  (6.60–9.32 мас. %) риолиты отвечают породам щелочно-известковистой серии (рис. 4, д).

Суммарные содержания редкоземельных элементов в риолитах варьируют от 64 до 240 г/т. Для исследованных вулканитов типичны слабо- и умереннодифференцированные спектры распределения лантаноидов  $[\text{La}/\text{Yb}]_n = 3.50\text{--}13.43$  и ярко выраженная отрицательная европиевая аномалия ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.19\text{--}0.26$ ) (рис. 5, а). Для риолитов характерны по-





**Рис. 5.** График распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) (а) и спайдер-диаграмма (б) для риолитов бассейна р. Богданиха Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. Состав хондрита – по [29], состав примитивной мантии – по [32].

вышенные содержания Rb (112–147 г/т), Zr (118–219 г/т), Nb (14–25 г/т), Ta (1.3–2.1 г/т) и Ga (13.8–18.6 г/т) при пониженных концентрациях Ba (125–286 г/т), Sr (14–73) г/т и Ti (600–899 г/т) (рис. 5, б, табл. 1).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ Sm-Nd ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований приведены в табл. 2. Риолиты, отобранные в бассейне р. Богданиха, характеризуются положительными значениями  $\varepsilon_{Nd(t)}$  = +3.0...+3.6 и величинами  $t_{Nd(DM)}$  = 774–835 млн лет.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из риолита бассейна р. Богданиха (обр. Z-95-6) было проанализировано 28 зерен циркона, которые можно разделить по возрасту на две группы. Для наиболее молодых 25 проанализированных цирконов (участки 1, 3, 4, 5, 7, 8, 14, 15, 17, 18, 21, 22, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 и 40) значения возрастов

по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  варьируют в интервале от 295 до 309 млн лет (табл. 3). Все цирконы имеют отчетливую осциляторную зональность (рис. 6), содержания U и Th варьируют от 86 до 1610 г/т и от 94 до 816 г/т, соответственно. Значения величины отношения  $\text{Th}/\text{U}$  = 0.34–1.00 свидетельствуют о магматическом происхождении цирконов. Средневзвешенный конкордантный возраст составляет  $301 \pm 4$  млн лет (СКВО = 1.10; вероятность конкордантности = 0.40 %), который идентичен возрасту, рассчитанному с помощью алгоритма TuffZircAge [25],  $301 +1/ - 2$  млн лет (рис. 7). Одно зерно циркона (участок 28) характеризуется раннекаменноугольным возрастом ( $330 \pm 3$  млн лет). Для двух цирконов (участки 12 и 13) получены конкордантные оценки возраста по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  –  $428 \pm 4$  и  $438 \pm 4$  млн лет.

Таким образом, установлено, что возраст наиболее молодой популяции цирконов  $301 \pm 4$  млн лет. Полученное значение интерпретируется как возраст кристаллизации риолитов. Более древние цирконы имеют ксеногенное происхождение.

Таблица 1. Химический состав представительных образцов риолитов бассейна р. Богданиха Приамурского фрагмента Нора-Сухогинского террейна

| Компо-<br>ненты                  | Z-95   | Z-95-1 | Z-95-3 | Z-95-4 | Z-95-6        | Z-95-8 | Z-95-9 | Z-95-10 | Z-85  | Z 85-2 | Z 85-14 | Z 85-15 | C-792-2 | C-1004-<br>1 | C-1005-<br>2 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|-------|--------|---------|---------|---------|--------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                 | 77.58  | 77.13  | 77.48  | 77.40  | <b>76.37</b>  | 76.77  | 75.89  | 76.56   | 78.91 | 77.65  | 76.11   | 76.23   | 76.81   | 75.51        | 75.83        |
| TiO <sub>2</sub>                 | 0.11   | 0.11   | 0.12   | 0.11   | <b>0.10</b>   | 0.11   | 0.11   | 0.11    | 0.14  | 0.14   | 0.15    | 0.14    | 0.10    | 0.11         | 0.13         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 12.68  | 12.94  | 12.96  | 13.02  | <b>12.70</b>  | 12.85  | 12.70  | 12.87   | 12.33 | 12.81  | 13.78   | 13.85   | 12.69   | 13.44        | 13.91        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * | 0.87   | 0.55   | 0.42   | 0.52   | <b>1.51</b>   | 1.46   | 1.42   | 1.16    | 1.03  | 1.05   | 0.96    | 0.96    | 0.94    | 0.58         | 0.33         |
| MnO                              | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | <b>0.08</b>   | 0.06   | 0.06   | 0.02    | 0.01  | 0.01   | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.02         | 0.01         |
| CaO                              | 0.05   | 0.04   | 0.07   | 0.08   | <b>0.02</b>   | 0.03   | 0.08   | 0.01    | 0.12  | 0.16   | 0.15    | 0.16    | 0.23    | 0.16         | 0.13         |
| MgO                              | 0.09   | 0.07   | 0.07   | 0.08   | <b>0.12</b>   | 0.12   | 0.10   | 0.11    | 0.11  | 0.12   | 0.11    | 0.11    | 0.25    | 0.03         | 0.03         |
| Na <sub>2</sub> O                | 3.99   | 4.26   | 4.07   | 4.14   | <b>4.46</b>   | 4.32   | 4.17   | 4.04    | 2.94  | 3.38   | 3.75    | 3.64    | 3.58    | 4.30         | 3.86         |
| K <sub>2</sub> O                 | 4.88   | 4.69   | 4.73   | 4.64   | <b>4.51</b>   | 4.86   | 4.62   | 5.16    | 3.78  | 3.84   | 4.14    | 4.08    | 4.804   | 5.18         | 5.00         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.04   | <b>0.03</b>   | 0.03   | 0.03   | 0.03    | 0.02  | 0.02   | 0.02    | 0.03    | 0.02    | 0.03         | 0.02         |
| П.П.П.                           | 0.42   | 0.39   | 0.62   | 0.47   | <b>0.35</b>   | 0.38   | 0.44   | 0.25    | 0.41  | 0.63   | 0.52    | 0.51    | 0.55    | 0.61         | 0.76         |
| Сумма                            | 100.71 | 100.22 | 100.58 | 100.51 | <b>100.25</b> | 100.99 | 99.62  | 100.32  | 99.80 | 99.81  | 99.70   | 99.72   | 99.98   | 99.94        | 100.01       |
| Ga                               | 17.24  | 17.42  | 17.32  | 16.91  | <b>18.46</b>  | 18.55  | 18.29  | 17.81   | 17.16 | 16.72  | 17.08   | 17.59   | 14.90   | 14.02        | 14.48        |
| Rb                               | 134    | 117    | 122    | 113    | <b>126</b>    | 147    | 128    | 126     | 137   | 136    | 142     | 145     | 124     | 112          | 120          |
| Sr                               | 15     | 14     | 18     | 15     | <b>16</b>     | 17     | 15     | 18      | 15    | 18     | 15      | 16      | 73      | 30           | 42           |
| Cs                               | 0.31   | 0.16   | 0.43   | 0.22   | <b>0.16</b>   | 1.91   | 0.47   | 0.16    | 1.85  | 1.82   | 1.74    | 2.04    | 1.81    | 1.54         | 1.63         |
| Ba                               | 174    | 176    | 204    | 172    | <b>178</b>    | 186    | 187    | 184     | 166   | 173    | 167     | 169     | 125     | 134          | 286          |
| La                               | 8.04   | 9.41   | 13.57  | 13.87  | <b>18.65</b>  | 30.06  | 25.24  | 12.23   | 38.95 | 42.29  | 34.89   | 47.22   | 18.24   | 31.59        | 30.83        |
| Ce                               | 24.75  | 29.07  | 36.02  | 39.07  | <b>47.80</b>  | 74.56  | 62.55  | 35.69   | 89.69 | 86.12  | 74.81   | 105.56  | 44.05   | 68.75        | 66.98        |
| Pr                               | 3.55   | 4.29   | 5.21   | 5.63   | <b>6.56</b>   | 9.23   | 8.23   | 4.95    | 10.20 | 10.51  | 9.57    | 12.34   | 4.20    | 8.64         | 7.93         |
| Nd                               | 14.39  | 16.60  | 20.48  | 22.73  | <b>25.65</b>  | 35.58  | 32.12  | 19.88   | 38.13 | 38.99  | 35.43   | 46.16   | 15.26   | 32.57        | 28.88        |
| Sm                               | 3.31   | 3.81   | 4.47   | 5.08   | <b>5.69</b>   | 7.10   | 6.96   | 4.69    | 7.36  | 7.42   | 6.91    | 8.87    | 2.98    | 6.16         | 4.89         |
| Eu                               | 0.21   | 0.25   | 0.33   | 0.36   | <b>0.41</b>   | 0.52   | 0.52   | 0.34    | 0.50  | 0.58   | 0.49    | 0.60    | 0.21    | 0.40         | 0.44         |
| Gd                               | 2.62   | 3.21   | 3.99   | 4.38   | <b>5.41</b>   | 6.59   | 6.17   | 4.11    | 7.39  | 7.46   | 5.92    | 7.50    | 2.36    | 6.47         | 5.21         |
| Tb                               | 0.41   | 0.51   | 0.60   | 0.69   | <b>0.83</b>   | 0.95   | 1.00   | 0.62    | 0.88  | 0.90   | 0.86    | 1.08    | 0.38    | 0.77         | 0.58         |
| Dy                               | 2.51   | 2.81   | 3.61   | 4.03   | <b>4.98</b>   | 5.90   | 5.73   | 3.68    | 4.45  | 4.37   | 4.27    | 3.85    | 2.04    | 4.04         | 2.98         |
| Ho                               | 0.51   | 0.53   | 0.70   | 0.76   | <b>0.97</b>   | 1.14   | 1.08   | 0.69    | 0.75  | 0.75   | 0.73    | 0.90    | 0.43    | 0.69         | 0.54         |
| Er                               | 1.44   | 1.57   | 2.01   | 2.13   | <b>2.85</b>   | 3.32   | 3.14   | 2.12    | 2.20  | 2.18   | 2.13    | 2.62    | 1.20    | 2.06         | 1.68         |
| Tm                               | 0.23   | 0.24   | 0.29   | 0.32   | <b>0.43</b>   | 0.47   | 0.46   | 0.31    | 0.29  | 0.30   | 0.29    | 0.36    | 0.17    | 0.26         | 0.24         |
| Yb                               | 1.56   | 1.50   | 2.06   | 2.18   | <b>2.67</b>   | 3.22   | 3.21   | 2.14    | 2.06  | 2.14   | 1.98    | 2.53    | 1.08    | 1.94         | 1.76         |
| Lu                               | 0.22   | 0.23   | 0.30   | 0.29   | <b>0.43</b>   | 0.47   | 0.46   | 0.31    | 0.29  | 0.32   | 0.28    | 0.35    | 0.16    | 0.26         | 0.26         |

ОБСУЖДЕНИЕ

По содержанию основных породообразующих компонентов кислые вулканы бассейна р. Богданиха соответствуют высокремнистыми риолитам. Риолиты характеризуются повышенными значениями соотношения  $FeO^*/(FeO^* + MgO)$ , высокими концентрациями Ga, Zr, Nb и Y в совокупности с деплетированием в отношении Ba, Sr, Ti, Eu (рис. 5, табл. 1), что типично для риолитов А-типа [12, 14, 30, 35], а также положительными значениями величины  $\epsilon_{Nd(T)}$ , которые свидетельствуют об участии ювенильного материала в их образовании (табл. 2). Данный вывод согласуется с положением фигуративных точек состава риолитов на диаграммах  $(CaO + Al_2O_3) - (CaO/(FeO^* + MgO + TiO_2))$  [11],  $Al_2O_3 - (CaO/(FeO^* + MgO + TiO_2))$  [11],  $(Zr + Nb + Ce + Y) - ((Na_2O + K_2O)/CaO)$  [35] (рис. 8, а, б, в). По содержанию Ga, Al и Ce изученные вулканы локализуются вдоль границы, разделяющей граниты М-, I-, S-типов и А-типа (рис. 8, г). По содержанию микроэлементов, лежащих в основе диаграмм Y – Nb – Ce [12], Y – Nb – Ga×3 [12] они соответствуют риолитам А<sub>2</sub>-типа (рис. 9). Породы данного типа, согласно [2, 12, 14, 35 и др.], формируются в поздне- и постколлизийных обстановках.

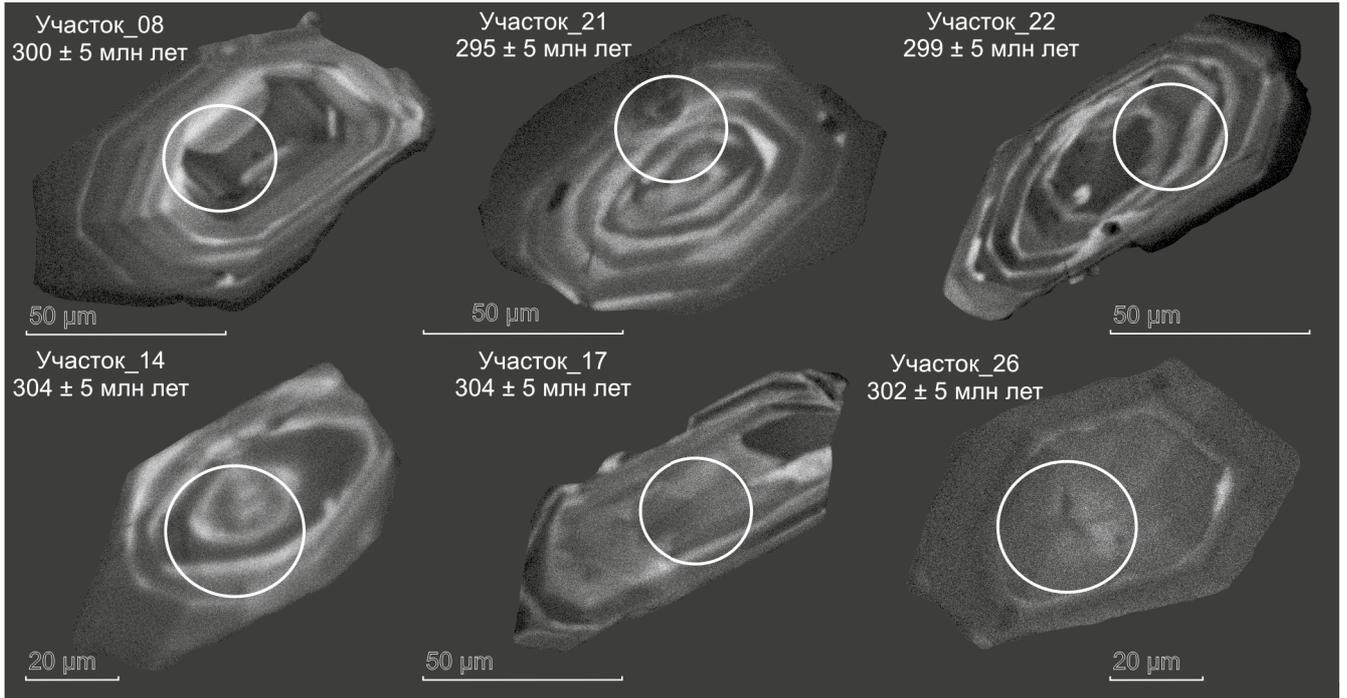
Геохронологические (U-Pb) исследования цирконов позволили выявить, что возраст риолитов, входящих в состав богданихинской свиты, позднекаменноугольный ( $301 \pm 4$  млн лет). Полученный возраст характеризует ранее не известный позднекаменноугольный этап магматизма в структуре Нора-Сухотинского террейна. Эти данные противоречат существующим представлениям о ранне-среднекаменноугольном возрасте свиты. Однако, учитывая то, что возраст свиты принят на основании находок органических остатков в осадочных породах [5], а контакты с вулканическими породами не установлены, то, наиболее вероятно, в состав богданихинской свиты были объединены разновозрастные образования.

Проведенные исследования позволяют сопоставить возраст и состав магматических комплексов Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса. Полученная для риолитов оценка возраста в пределах погрешности совпадает с оценками возраста гранитоидов ХХСЗ ( $292 \pm 4$ ,  $299 \pm 1$  и  $298 \pm 1$  млн лет), формирование которых происходило в результате отрыва слэба (slab break-off) в постколлизийной геодинамической обстановке. Значения соотношений

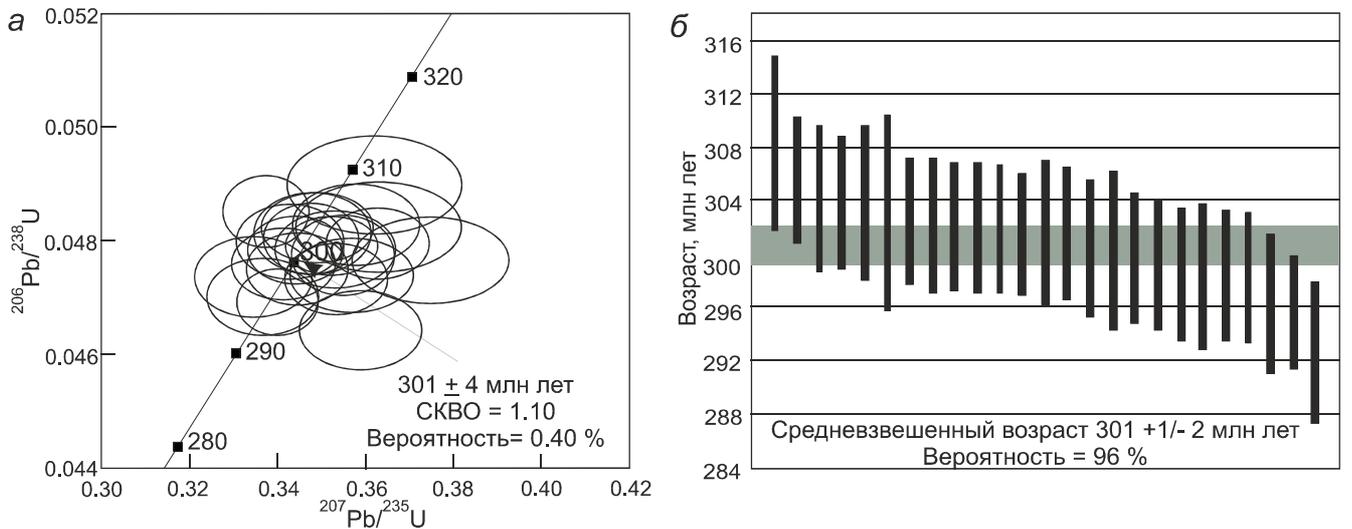
*Примечание.* Содержания главных элементов приведены в мас. %, элементов-примесей – в г/т.  $Fe_2O_3^*$  – общее железо в форме  $Fe_2O_3$ . Выделен образец, по которому производилось определение возраста по циркону.

Таблица 1. (Продолжение).

| Комп-<br>ненты | Z-95  | Z-95-1 | Z-95-3 | Z-95-4 | Z-95-6       | Z-95-8 | Z-95-9 | Z-95-10 | Z-85  | Z 85-2 | Z 85-14 | Z 85-15 | C-792-2 | C-1004  | C-1004-<br>1 | C-1005-<br>2 |
|----------------|-------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|---------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------------|
| Y              | 33    | 36     | 38     | 40     | <b>41</b>    | 42     | 41     | 31      | 43    | 44     | 26      | 48      | 15      | 17      | 17           | 13           |
| Nb             | 23    | 24     | 23     | 25     | <b>24</b>    | 23     | 23     | 22      | 20    | 21     | 21      | 22      | 25      | 17      | 17           | 14           |
| Ta             | 1.93  | 1.97   | 1.81   | 1.82   | <b>1.94</b>  | 1.89   | 1.90   | 1.91    | 2.11  | 1.67   | 1.93    | 1.87    | 1.47    | 1.39    | 1.42         | 1.30         |
| Zr             | 154   | 159    | 152    | 158    | <b>150</b>   | 153    | 150    | 153     | 212   | 219    | 216     | 213     | 157     | 118     | 119          | 139          |
| Th             | 11.78 | 12.35  | 11.53  | 11.5   | <b>13.07</b> | 15.13  | 14.21  | 12.77   | 13.64 | 12.64  | 13.40   | 13.35   | 5.43    | 11.18   | 11.46        | 12.07        |
| U              | 4.16  | 4.91   | 4.10   | 4.70   | <b>6.24</b>  | 6.16   | 6.25   | 5.84    | 8.60  | 6.84   | 4.91    | 8.56    | 2.90    | 3.74    | 4.36         | 2.71         |
| Pb             | 18    | 16     | 16     | 15     | <b>17</b>    | 23     | 21     | 17      | 11    | 11     | 14      | 11      | не опр. | 13      | 13           | 12           |
| Cu             | 8     | 10     | 8      | 10     | <b>7</b>     | 9      | 9      | 12      | 7     | 11     | 10      | 7       | 9       | не опр. | не опр.      | не опр.      |
| Zn             | 36    | 28     | 23     | 20     | <b>41</b>    | 44     | 49     | 36      | 39    | 17     | 12      | 14      | 8       | 50      | 32           | 35           |
| Sc             | 45.6  | 42.1   | 43.4   | 45.3   | <b>49.0</b>  | 42.0   | 43.7   | 45.9    | 3.6   | 4.2    | 3.6     | 4.3     | 1.1     | 3.4     | 3.3          | 3.3          |
| V              | 1.0   | 1.2    | 1.2    | 1.0    | <b>1.4</b>   | 1.6    | 1.4    | 2.8     | 0.6   | 0.8    | 0.6     | 0.7     | 0.7     | 1.2     | 0.8          | 1.0          |
| Cr             | 109   | 123    | 82     | 82     | <b>131</b>   | 140    | 126    | 121     | 52    | 46     | 49      | 55      | 225     | 165     | 147          | 119          |
| Co             | 1.5   | 1.5    | 1.1    | 1.2    | <b>1.5</b>   | 1.4    | 1.2    | 1.4     | 0.3   | 0.3    | 0.3     | 0.3     | 0.3     | 0.6     | 0.4          | 0.2          |
| Ni             | 17    | 13     | 13     | 6      | <b>12</b>    | 22     | 20     | 8       | 2     | 2      | 2       | 2       | 9       | 3       | 2            | 7            |



**Рис. 6.** Микрофотографии кристаллов цирконов, выполненные в режиме катодолуминесценции из риолита бассейна р. Богданиха (обр. Z-95-6) Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна. Белым кружком отмечен участок датирования. Возраст приведен с погрешностью  $\pm 2\sigma$ .

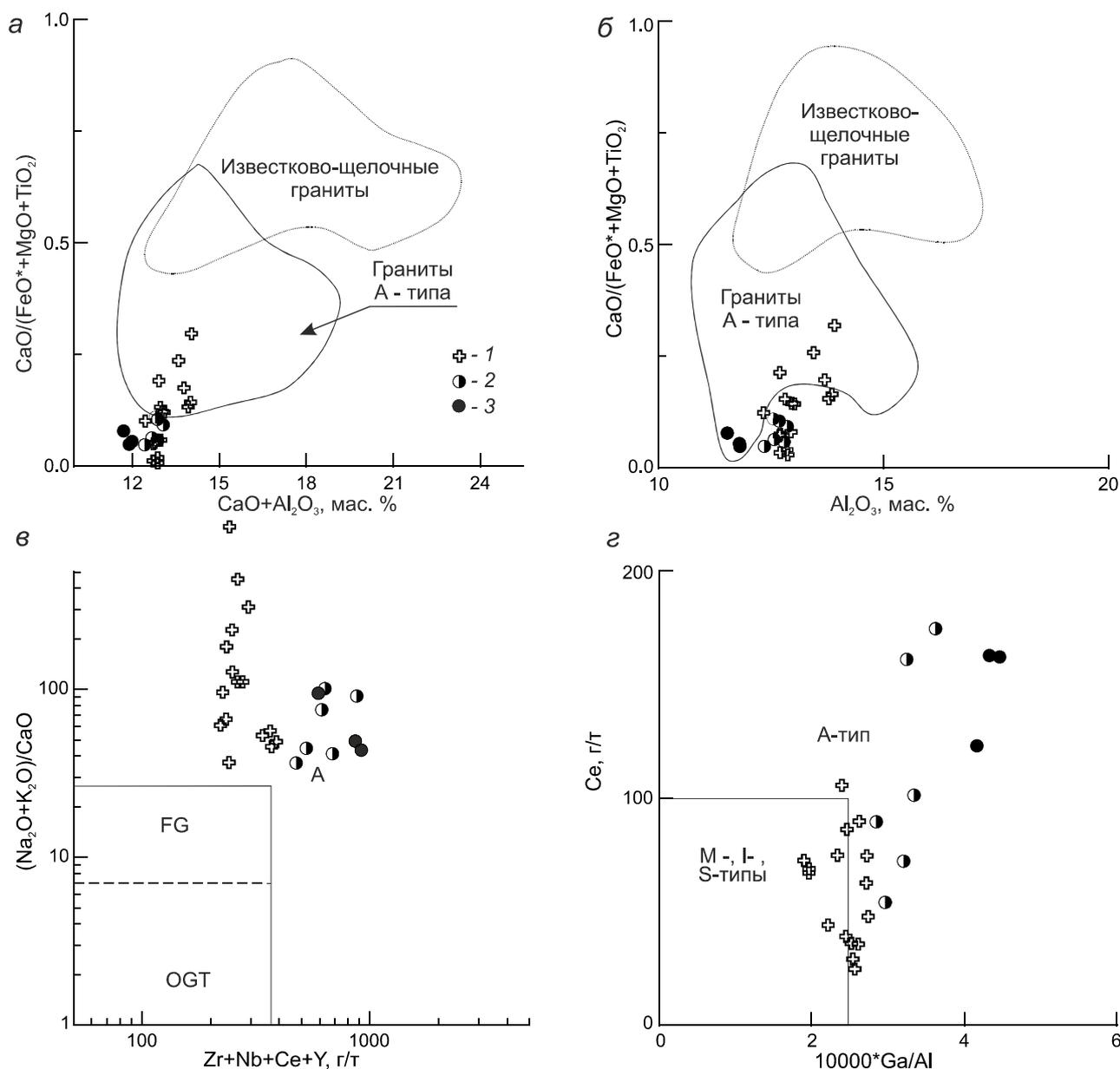


**Рис. 7.** Диаграммы с конкордией (а) и расчета средневзвешенного возраста (б) для молодой популяции цирконов из риолита бассейна р. Богданиха (обр. Z-95-6) Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

**Таблица 2.** Результаты изотопно-геохимических (Sm-Nd) исследований риолитов бассейна р. Богданиха Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

| Образец | Возраст, млн лет | Sm, г/г | Nd, г/г | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $\pm 2\sigma$ | $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ | $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ | $t_{\text{Nd(DM)}}$ , МЛН ЛЕТ |
|---------|------------------|---------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Z-95-4  | 301              | 5.08    | 22.73   | 0.1202                            | 0.512639                          | 6             | 0.0                       | +3.0                      | 835                           |
| Z-95-6  | 301              | 5.69    | 25.65   | 0.1191                            | 0.512671                          | 7             | +0.6                      | +3.6                      | 774                           |

*Примечание.* Величины ошибок ( $\pm 2\sigma$ ) определения отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  соответствуют последним значащим цифрам после запятой.



**Рис. 8.** Диаграммы  $(CaO + Al_2O_3) - (CaO/(FeO^* + MgO + TiO_2))$  (а) [11],  $Al_2O_3 - (CaO/(FeO^* + MgO + TiO_2))$  (б) [11],  $(Zr + Nb + Ce + Y) - ((Na_2O + K_2O)/CaO)$  (в) [35],  $Ga/Al - Ce$  (г) [35] для позднекаменноугольных риолитов Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

Условные обозначения: 1 – позднекаменноугольные риолиты Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна, 2 – раннепермские гранитоиды массива Шаншенфу (Shanshenfu) ХХСЗ [28], 3 – раннепермские щелочные граниты массива Дахейшань (Daheishan) ХХСЗ [37]. Сокращения (в): А – гранитоиды А-типа, OGT – нефракционированные гранитоиды М-, I- и S-типов; FG – фракционированные гранитоиды;  $FeO^*$  – суммарное железо в форме FeO.

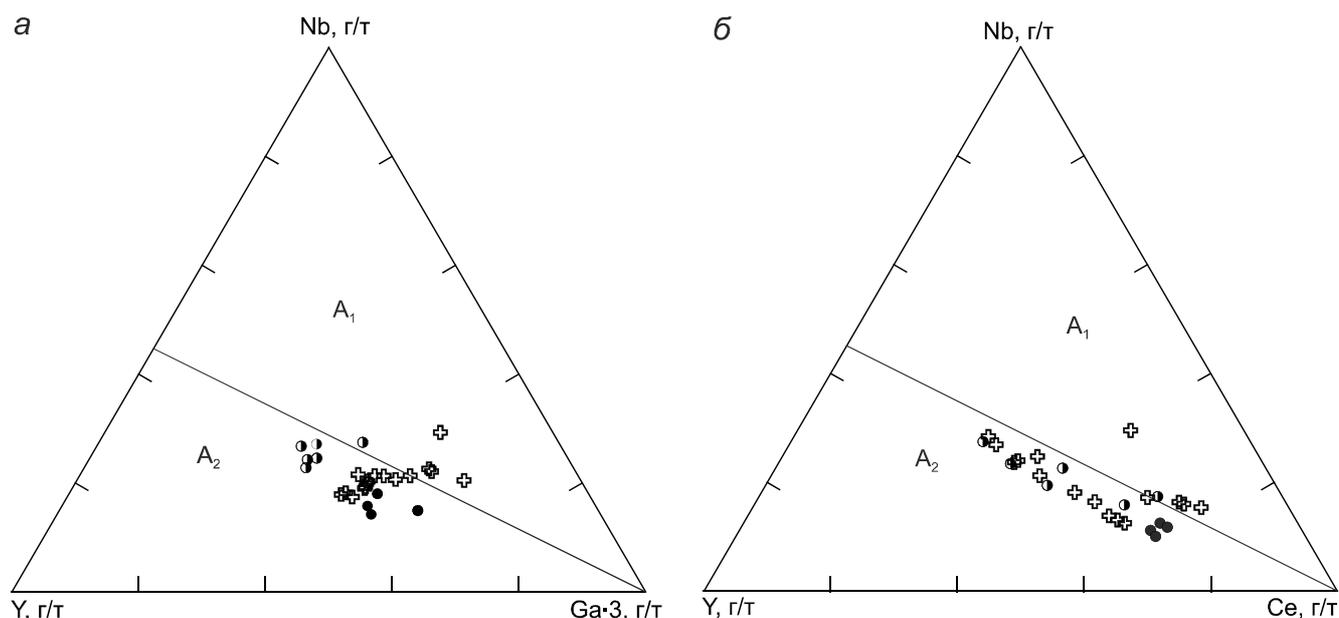
Ce/La (2.0–3.1) и Zr/La (3.5–19.2) для риолитов бассейна р. Богданиха и раннепермских гранитоидов массивов Шаншенфу (Shanshenfu) [28] и Дахейшань (Daheishan) [37] ХХСЗ (Ce/La (2.2–3.1 и 2.2–2.7), и Zr/La (4.2–19.2 и 7.2–11.2)) подобны. Близкий геохимический состав позднекаменноугольных риолитов Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна

и раннепермских гранитоидов ХХСЗ также проиллюстрирован на рис. 8, 9, что подтверждает принадлежность пород к единой вулканоплутонической ассоциации. Кроме того, в этот интервал времени на границе с ХХСЗ были сформированы риолиты с возрастом  $293 \pm 2$  и  $295 \pm 2$  млн лет [22], а также массивы гранитоидов с возрастом  $296 \pm 2$  и  $292 \pm 1$  млн лет [20,

Таблица 3. U-Pb (LA-ICP-MS) данные для цирконов из позднекаменноугольного риолита (обр. Z-95-6) Приамурского фрагмента Нора-Сухогинского террейна.

| № п/п | Анализы    | Th, г/г | U, г/г | Th/U | Изотопные отношения               |               |                                  |               |                                  |               | Возраст, млн лет |                                  |               |                                  |               |                                   | D, % |               |     |               |      |
|-------|------------|---------|--------|------|-----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|------|---------------|-----|---------------|------|
|       |            |         |        |      | $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 1\sigma$ | Rho              | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $\pm 1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ |      | $\pm 1\sigma$ | CA  | $\pm 2\sigma$ |      |
| 1     | Участок_01 | 215     | 360    | 0.5  | 18.7756                           | 0.0012        | 0.3516                           | 0.0078        | 0.0479                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 302           | 3                                | 306           | 6                                 | 341  | 52            | 302 | 5             | 1.5  |
| 2     | Участок_03 | 154     | 355    | 0.4  | 19.1792                           | 0.0012        | 0.3442                           | 0.00747       | 0.0479                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 302           | 3                                | 300           | 6                                 | 291  | 51            | 302 | 5             | -0.5 |
| 3     | Участок_04 | 174     | 435    | 0.4  | 18.6704                           | 0.0020        | 0.3617                           | 0.0131        | 0.0490                           | 0.0006        | 0.03             | 0.03                             | 308           | 3                                | 314           | 10                                | 354  | 82            | 309 | 7             | 1.7  |
| 4     | Участок_05 | 209     | 488    | 0.4  | 18.9154                           | 0.0010        | 0.349                            | 0.0064        | 0.0479                           | 0.0004        | 0.05             | 0.05                             | 302           | 2                                | 304           | 5                                 | 322  | 44            | 302 | 5             | 0.7  |
| 5     | Участок_07 | 217     | 500    | 0.4  | 19.0108                           | 0.0010        | 0.3400                           | 0.0060        | 0.0469                           | 0.0004        | 0.03             | 0.03                             | 296           | 2                                | 297           | 5                                 | 311  | 43            | 296 | 4             | 0.5  |
| 6     | Участок_08 | 373     | 352    | 1.0  | 18.4640                           | 0.0013        | 0.3538                           | 0.0079        | 0.0474                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 298           | 3                                | 308           | 6                                 | 380  | 53            | 300 | 5             | 3.1  |
| 7     | Участок_12 | 393     | 439    | 0.8  | 17.6832                           | 0.0011        | 0.5479                           | 0.0096        | 0.0703                           | 0.0006        | 0.06             | 0.06                             | 438           | 4                                | 444           | 6                                 | 473  | 42            | 439 | 6             | 1.3  |
| 8     | Участок_13 | 250     | 316    | 0.7  | 17.7738                           | 0.0012        | 0.5327                           | 0.0104        | 0.0687                           | 0.0006        | 0.03             | 0.03                             | 428           | 4                                | 434           | 7                                 | 462  | 46            | 430 | 6             | 1.2  |
| 9     | Участок_14 | 253     | 505    | 0.5  | 19.0788                           | 0.0013        | 0.3489                           | 0.0082        | 0.0483                           | 0.0004        | 0.02             | 0.02                             | 304           | 3                                | 304           | 6                                 | 306  | 56            | 304 | 5             | 0.0  |
| 10    | Участок_15 | 198     | 532    | 0.4  | 19.8050                           | 0.0010        | 0.3375                           | 0.0065        | 0.0485                           | 0.0004        | 0.05             | 0.05                             | 306           | 3                                | 295           | 5                                 | 216  | 48            | 303 | 5             | -3.3 |
| 11    | Участок_17 | 176     | 344    | 0.5  | 18.2490                           | 0.0013        | 0.3625                           | 0.0080        | 0.0480                           | 0.0004        | 0.03             | 0.03                             | 302           | 3                                | 314           | 6                                 | 407  | 51            | 304 | 5             | 4.0  |
| 12    | Участок_18 | 186     | 428    | 0.4  | 19.2977                           | 0.0013        | 0.3428                           | 0.0082        | 0.0480                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 302           | 3                                | 299           | 6                                 | 278  | 57            | 302 | 5             | -0.9 |
| 13    | Участок_21 | 159     | 315    | 0.5  | 17.8276                           | 0.0015        | 0.3587                           | 0.0092        | 0.0464                           | 0.0005        | 0.03             | 0.03                             | 293           | 3                                | 311           | 7                                 | 454  | 59            | 295 | 5             | 6.4  |
| 14    | Участок_22 | 176     | 310    | 0.5  | 19.2323                           | 0.0012        | 0.3411                           | 0.0076        | 0.0476                           | 0.0004        | 0.02             | 0.02                             | 300           | 3                                | 298           | 6                                 | 286  | 53            | 299 | 5             | -0.6 |
| 15    | Участок_25 | 155     | 152    | 0.9  | 17.5553                           | 0.0019        | 0.37447                          | 0.0118        | 0.0477                           | 0.0005        | 0.04             | 0.04                             | 300           | 3                                | 323           | 9                                 | 491  | 72            | 302 | 6             | 7.6  |
| 16    | Участок_26 | 281     | 705    | 0.4  | 19.0148                           | 0.0011        | 0.3479                           | 0.0070        | 0.0480                           | 0.0004        | 0.05             | 0.05                             | 302           | 3                                | 303           | 5                                 | 310  | 49            | 302 | 5             | 0.2  |
| 17    | Участок_28 | 189     | 410    | 0.4  | 20.1410                           | 0.0012        | 0.35924                          | 0.0082        | 0.0525                           | 0.0005        | 0.04             | 0.04                             | 330           | 3                                | 312           | 6                                 | 178  | 56            | 327 | 6             | -5.6 |
| 18    | Участок_29 | 670     | 797    | 0.8  | 19.0190                           | 0.0012        | 0.3442                           | 0.0075        | 0.0475                           | 0.0004        | 0.03             | 0.03                             | 299           | 3                                | 300           | 6                                 | 311  | 52            | 299 | 5             | 0.4  |
| 19    | Участок_31 | 522     | 736    | 0.7  | 18.7170                           | 0.0014        | 0.3527                           | 0.0089        | 0.0479                           | 0.0005        | 0.03             | 0.03                             | 302           | 3                                | 307           | 7                                 | 348  | 59            | 302 | 5             | 1.8  |
| 20    | Участок_32 | 816     | 1610   | 0.5  | 18.8094                           | 0.0011        | 0.3517                           | 0.0067        | 0.0480                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 302           | 3                                | 306           | 5                                 | 338  | 46            | 303 | 5             | 1.3  |
| 21    | Участок_33 | 494     | 802    | 0.6  | 18.4303                           | 0.0012        | 0.3537                           | 0.0075        | 0.0473                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 298           | 3                                | 308           | 6                                 | 380  | 50            | 300 | 5             | 3.1  |
| 22    | Участок_34 | 323     | 436    | 0.7  | 18.2067                           | 0.0013        | 0.3588                           | 0.0077        | 0.0474                           | 0.0004        | 0.04             | 0.04                             | 298           | 3                                | 311           | 6                                 | 410  | 50            | 301 | 5             | 4.3  |
| 23    | Участок_35 | 256     | 568    | 0.4  | 18.6095                           | 0.0015        | 0.3577                           | 0.0092        | 0.0483                           | 0.0005        | 0.05             | 0.05                             | 304           | 3                                | 310           | 7                                 | 360  | 60            | 305 | 6             | 2.1  |
| 24    | Участок_36 | 155     | 316    | 0.4  | 18.1597                           | 0.0017        | 0.3658                           | 0.0106        | 0.0482                           | 0.0005        | 0.03             | 0.03                             | 304           | 3                                | 317           | 8                                 | 413  | 66            | 305 | 6             | 4.2  |
| 25    | Участок_37 | 589     | 658    | 0.8  | 18.5337                           | 0.0013        | 0.3547                           | 0.0080        | 0.0477                           | 0.0004        | 0.05             | 0.05                             | 300           | 3                                | 308           | 6                                 | 370  | 54            | 302 | 5             | 2.6  |
| 26    | Участок_38 | 94      | 86     | 1.0  | 18.4962                           | 0.0024        | 0.3584                           | 0.0157        | 0.0481                           | 0.0006        | 0.04             | 0.04                             | 303           | 4                                | 311           | 12                                | 372  | 99            | 304 | 7             | 2.6  |
| 27    | Участок_39 | 136     | 360    | 0.4  | 19.5235                           | 0.0014        | 0.3346                           | 0.0089        | 0.0474                           | 0.0005        | 0.03             | 0.03                             | 298           | 3                                | 293           | 7                                 | 253  | 63            | 298 | 5             | -1.7 |
| 28    | Участок_40 | 163     | 322    | 0.5  | 19.2495                           | 0.0014        | 0.3365                           | 0.0084        | 0.0470                           | 0.0005        | 0.04             | 0.04                             | 296           | 3                                | 294           | 6                                 | 283  | 60            | 296 | 5             | -0.6 |

Примечание. Rho – коэффициент корреляции между ошибками отношений  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , CA – конкордантный возраст [25], D – дискордантность, вычислялась как  $D = (\text{Возраст}(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})/\text{Возраст}(^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}) - 100) \cdot 100\%$ .



**Рис. 9.** Диаграммы Y – Nb – Ga-3 (а) [12], Y – Nb – Ce (б) [12] для позднекаменноугольных риолитов Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

Условные обозначения на рис. 8. Поля гранитоидов: A<sub>1</sub> – источниками которых являются базальты океанических островов; A<sub>2</sub> – источниками которых являются породы континентальной коры, сформированные в результате субдукционных либо коллизионных процессов.

33]. Учитывая выше приведенные данные и существующие модели формирования Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса, наиболее вероятно, что формирование позднекаменноугольных риолитов в пределах Нора-Сухотинского террейна происходило в коллизионной геодинамической обстановке в результате отрыва слэба. Данный вывод согласуется с повышенными значениями соотношений Gd/Yb (1.68–3.58), Nb/Y (0.46–1.66) и Sm/Yb (2.12–3.57) в позднекаменноугольных риолитах бассейна р. Богданиха, типичных для образований, сформированных, согласно [36], в результате отрыва слэба.

#### ВЫВОДЫ

Кислые вулканиты бассейна р. Богданиха по геохимическому составу являются высококремнистыми, высокоглиноземистыми и железистыми риолитами.

Конкордантный возраст наиболее молодой популяции цирконов из риолита составляет  $301 \pm 4$  млн лет (СКВО = 1.10; вероятность конкордантности = 0.40 %), соответствуя позднекаменноугольному периоду. Эти данные в совокупности с морфологическими особенностями цирконов позволяют принять полученный возраст как возраст рассматриваемых кислых вулканических пород. Вероятнее всего в настоящее время в состав богданихинской свиты объединены разновозрастные образования – это осадочные поро-

ды, содержащие органические остатки ранне-среднекаменноугольного возраста и позднекаменноугольные вулканические породы.

Особенности распределения микро- и макроэлементного состава риолитов, положительные величины значения  $\epsilon_{Nd(t)}$  в совокупности с существующими моделями формирования Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса свидетельствуют о формировании их в коллизионной обстановке в результате отрыва слэба.

С учетом выше приведенных данных, а также геологических сведений, касающихся истории формирования Нора-Сухотинского террейна, наиболее вероятно, что риолиты бассейна р. Богданиха являются первым свидетельством проявления коллизионных процессов в позднем карбоне в структуре Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников ЦКП «Амурского центра минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН» (Е.Н. Воропаеву, О.Г. Медведеву, В.И. Рождествовину, А.С. Сегренёва, Е.С. Сапожника, Е.В. Ушакову), ИГХ СО РАН (О.В. Зарубину, Н.В. Брянского, Т.Н. Галкину), а также персонал центра коллективного пользования «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) за проведение аналитических исследований.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: кн. 1 / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с.
- Гребенников А.В. Гранитоиды А-типа: проблемы диагностики, формирования и систематики // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 9. С. 1356–1373.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бодарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У.Дж., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 7–41.
- Петрук Н.Н., Волкова Ю.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1000000. Лист М-52 (Благовещенск). Дальневосточная серия. Третье поколение / Под ред. А.С. Вольского. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012.
- Сидоров Ю.Ф. Государственная геологическая карта СССР 1:200000. Лист М-52-VII, VIII (Сергеевка). Амуро-Зейская серия / Под ред. В.В. Соловьева. М.: Всесоюз. аэрогеол. науч.-произв. об-ние «Аэрогеология», 1978.
- Смирнов Ю.В., Сорокин А.А., Кудряшов Н.М. Раннепалеозойские габбро-амфиболиты в строении Буреинского террейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса: первые геохронологические данные и тектоническая позиция // Докл. АН. 2012. Т. 445, № 1. С. 55–60.
- Смирнов Ю.В., Сорокин А.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Гороховский Б.М. Раннепалеозойская монцодиорит-гранодиоритная ассоциация северо-восточного фланга Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса (Нора-Сухотинский террейн): возраст, тектоническая позиция // Тихоокеан. геология. 2016. Т. 35, № 2. С. 49–57.
- Смирнов Ю.В., Сорокин А.А., Кудряшов Н.М. Первые свидетельства позднедевонского гранитоидного магматизма в истории формирования северо-восточного фланга Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 1. С. 65–76.
- Сорокин А.А., Смирнов Ю.В., Смирнова Ю.Н. Геохимические особенности и источники кластического материала палеозойских терригенных отложений северо-восточного фланга Южно-Монгольско-Хинганского орогенного пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25, № 2. С. 27–48.
- Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ<sub>3</sub>-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставления с SHRIMP данными // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 241–258.
- Dall'Agno R., Oliveira D.C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites // Lithos. 2007. V. 93. P. 215–233.
- Eby G.N. Chemical subdivision of A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geol. 1992. V. 20. P. 641–644.
- Feng Z.Q., Jia J., Liu Y.J., Wen Q.B., Li W.M., Liu B.Q., Xing D.Q., Zhang L. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous magmatism in the northern Great Xing'an Range, NE China: Constraints on the timing of amalgamation of Xing'an and Songnen blocks // J. Asian Earth Sci. 2015. V. 113. P. 411–426.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification of granitic rocks // J. Petrol. 2001. V. 42, Is. 11. P. 2033–2048.
- Fu W., Hou H., Gao R., Zhou J., Zhang X., Pan Z., Huang S., Guo R. Lithospheric structures of the northern Hegenshan-Heihe suture: Implications for the Paleozoic metallogenic setting at the eastern segment of the central Asian orogenic belt // Ore Geol. Rev. 2021. V. 137, 104305.
- Goldstein, S.J.; Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematic of rivers water suspended material: Implications for crustal evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. V. 87. P. 249–265.
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS. P.J. Sylvester (Ed.) // Laser ablation ICP-MS in the Earth sciences: current practices and outstanding issues. Mineralogical association of Canada short course series. 2008. V. 40. P. 204–207.
- Guo F., Fan W.M., Li C.W., Miao L.C., Zhao L. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia // Sci. China D-Earth Sci. 2009. V. 52, N 7. P. 940–951.
- Jakobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. V. 67, Is. 2. P. 137–150.
- Ji Z., Ge W.C., Yang H., Tian D.X., Chen H.J., Zhang Y.L. Late Carboniferous–Early Permian high- and low-Sr/Y granitoids of the Xing'an Block, northeastern China: Implications for the late Paleozoic tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt // Lithos. 2018. V. 322. P. 179–196.
- Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J., Sabine P. A., Schmid R., Sorensen H., Wooley A.R. Igneous rocks. A Classification and Glossary of Terms // Recommendation of the International Union of Geological Science Subcommission on the systematics of igneous rocks. Cambridge Univ. Press., 2002. 236 p.
- Li Y., Xu W.L., Wang F., Tang J., Pei F.P., Wang Z.J. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen–Zhangguangcai Range Massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen–Zhangguangcai Range massifs // Lithos. 2014. V. 205. P. 394–410.
- Li Z.X., Cho M., Li X.H. Precambrian tectonics of East Asia and relevance to supercontinent evolution // Precambrian Res. 2003 V. 122. P. 1–6.
- Liu Y., Li W., Feng Z., Wen Q., Neubauer F., Liang C. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Res. 2017. V. 43. P. 123–148.
- Ludwig K.R., Mundil R. Extracting reliable U-Pb ages and errors from complex populations of zircons from Phanerozoic tuffs // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. P. 463.
- Ludwig K.R. Isoplot 3.6: Berkeley Geochronology Center Spec. Publ. 2008. V. 4. 77 p.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geol. Soc. Amer. Bull. 1989. V. 101. P. 635–643.
- Mao C., Lü X., Chen C. Geochemical characteristics of A-type Granite near the Hongyan Cu-Polymetallic Deposit in the East-

- ern Hegenshan-Heihe Suture Zone, NE China: Implications for petrogenesis, mineralization and tectonic setting // *Minerals*. 2019. V. 9. 309 p.
29. McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
  30. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.W. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *J. Petrol.* 1984. V. 25. N 4. P. 956–983.
  31. Shi L., Zheng C., Yao W., Li J., Cui F., Gao F., Gao Y., Xu J., Han X. Geochronological framework and tectonic setting of the granitic magmatism in the Chaihe–Moguqi region, central Great Xing’an Range, China // *J. Asian Earth Sci.* 2015. V. 113. P. 443–453.
  32. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes / *Magmatism in the ocean basins* // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. N 42. P. 313–345.
  33. Sun Y.G., Li B.L., Sun F.Y., Ding Q.F., Qian Y., Xu Q.L., Li Y.J. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of early Permian syenogranite and diabase from the northern Great Xing’an Range, northeastern China: petrogenesis and tectonic implications // *Can. J. Earth Sci.* 2020. V. 57. P. 1478–1491.
  34. Tong Y., Wang T., Jahn B.M., Sun M., Hong D.W., Gao J.F. Postaccretionary Permian granitoids in the Chinese Altai orogen: geochronology, petrogenesis and tectonic implications // *Am. J. Sci.* 2014. V. 314, N 1. P. 80–109.
  35. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contr. Miner. Petrol.* 1987. V. 95, Is. 4. P. 407–419.
  36. Whalen J.B., Hilderbrand R.S. Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks // *Lithos*. 2019. V. 348–349, 105179.
  37. Wu F.Y., Sun D.Y., Li H., Jahn B.M., Wilde S. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis // *Chem. Geol.* 2002. V. 187. P. 143–173.
  38. Wu F.Y., Sun D.Y., Ge W.C., Zhang Y.B., Grant M. L., Wild S.A., Jahn B.M. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China // *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. P. 1–30.
  39. Zhang J.M., Xu B., Yan L.J., Wang Y.Y. Evolution of the Heihe-Nenjiang Ocean in the eastern Paleo-Asian Ocean: Constraints of sedimentological, geochronological and geochemical investigations from Early-Middle Paleozoic Heihe-Dashizhai Orogenic Belt in the northeast China // *Gondwana Res.* 2020. V. 81. P. 339–361.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

после доработки 05.04.2023 г.

принята к печати 03.07.2023 г.

*Yu.V. Smirnov, V.B. Khubanov, S.I. Dril’*

### Late Carboniferous rhyolites of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane: geochemistry and geochronology

The publication presents the first results of geochemical, isotope-geochemical (Sm-Nd) and geochronological (U-Pb, LA-ICP-MS) studies on acid volcanic rocks collected in the Bogdanikha River basin of the Amur fragment of the Nora-Sukhotino terrane in the northeast of the South Mongolian–Khangai orogenic belt. In terms of the content of rock-forming components, the studied volcanic rocks correspond to high-silica and high-alumina rhyolites. Elevated contents of alkalis, Ga, Zr, Nb and Y, reduced concentrations of Ba, Sr, Ti, Eu, and mantle values of  $\epsilon\text{Nd}(t) = +3.0 \dots +3.6$  enable the rhyolites from the Bogdanikha river basin to be classified as A2-type rhyolites. The concordant age of the youngest zircon population from the rhyolite, according to geochronological (U-Pb, LA-ICP-MS) studies, is  $301 \pm 4$  Ma which corresponds to the Late Carboniferous. Taking into account the geochemical features of the studied rhyolites and the existing models for the formation of the South Mongolian–Khangai orogenic belt, it is most likely that they formed in a collisional setting as a result of slab detachment.

**Key words:** Nora-Sukhotino terrane, acid volcanic rocks, collisional stage, geochemistry, isotope geochemistry, geochronology.