

УДК 550.93:551.73:552.3

РАННЕПЕРМСКИЕ АДАКИТЫ НОРА-СУХОТИНСКОГО ТЕРРЕЙНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА: ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ (U-Pb, LA-ICP-MS) И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Ю.В. Смирнов¹, В.Б. Хубанов²

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

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

Представлены результаты геохимических и геохронологических (U-Pb, LA-ICP-MS) исследований плагиогранитов массива горы Змеиная Нора-Сухотинского террейна. По химическому составу изученные породы относятся к образованиям известково-щелочной серии высокоглиноземистого типа, сформированным в результате коллизионных процессов на заключительном этапе развития Нора-Сухотинского террейна. Высокие значения соотношения Sr/Y при низких концентрациях Y и Yb свидетельствуют об адакитовой природе исследованных пород. Анализ микроэлементного состава плагиогранитов позволяет предполагать, что формирование исходных для них магм связано с плавлением метабазитов при высоких показателях давления ($P > 15$ кбар). Средневзвешенный конкордантный возраст наиболее молодой популяции цирконов из образца плагиогранита составляет 295 ± 4 млн лет, что соответствует ранней перми. Учитывая морфологические особенности цирконов, полученный возраст можно рассматривать как возраст кристаллизации плагиогранитов.

Геохимия, U-Pb данные, ранняя пермь, адакиты, Нора-Сухотинский террейн

EARLY PERMIAN ADAKITES OF THE NORA-SUKHOTINO TERRANE IN THE EAST OF THE CENTRAL ASIAN OROGENIC BELT: GEOCHRONOLOGICAL (U-Pb, LA-ICP-MS) AND GEOCHEMICAL DATA

Yu. V. Smirnov, V.B. Khubanov

We present results of geochemical and geochronological (U-Pb, LA-ICP-MS) studies of plagiogranites of the Mt. Zmeinaya massif in the Nora-Sukhotino terrane. The studied rocks are of calc-alkaline series and peraluminous type. They formed in collision settings at the final stage of evolution of the Nora-Sukhotino terrane. The high Sr/Y ratios and low Y and Yb contents of the plagiogranites indicate that these are adakitic rocks. The trace element composition of the rocks suggests their high-pressure (>15 kbar) genesis through the melting of metabasites. The youngest zircon population from the plagiogranite has a mean weighted concordant age of 295 ± 4 Ma, which corresponds to the early Permian. With regard to the zircon morphology, the obtained age can be considered the age of the plagiogranites.

Nora-Sukhotino terrane, early Permian, adakites, geochemistry, U-Pb data

ВВЕДЕНИЕ

В строении восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, согласно существующим тектоническим схемам [Парфенов и др., 2003; Ханчук, 2006], выделяются такие крупные континентальные массивы, как Аргунский и Бурей-Цзямусинский и разделяющий их Южно-Монгольско—Хинганский орогенный пояс (ЮМХОП). Северо-восточный фланг ЮМХОП в российской литературе рассматривается в качестве Нора-Сухотинского террейна [Ханчук, 2006].

История развития ЮМХОП охватывает значительный временной промежуток начиная с ордовика до ранней перми [Ханчук, 2006]. В последние годы нами были изучены с помощью современных (в том числе геохронологических) методов исследования магматические образования, характеризующие ранне- и среднепалеозойские этапы развития ЮМХОП [Смирнов и др., 2012, 2016, 2021; Смирнов, Сорокин, 2017]. В то же время многие вопросы, касающиеся модели формирования пояса дискуссионны. Для понимания строения и эволюции развития пояса большее значение имеют гранитоиды, которые несут в себе важную информацию о возрасте и характере геодинамических событий. В пределах Зей-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна широко распространены массивы, сложенные гранитоидами октябрьского комплекса. Последние выявлены не только на территории Нора-Сухотинского террейна, но и Мамынского террейна Аргунского континентального массива, границы между

© Смирнов Ю.В., Хубанов В.Б., 2023

✉ e-mail: smirnova@ascnet.ru

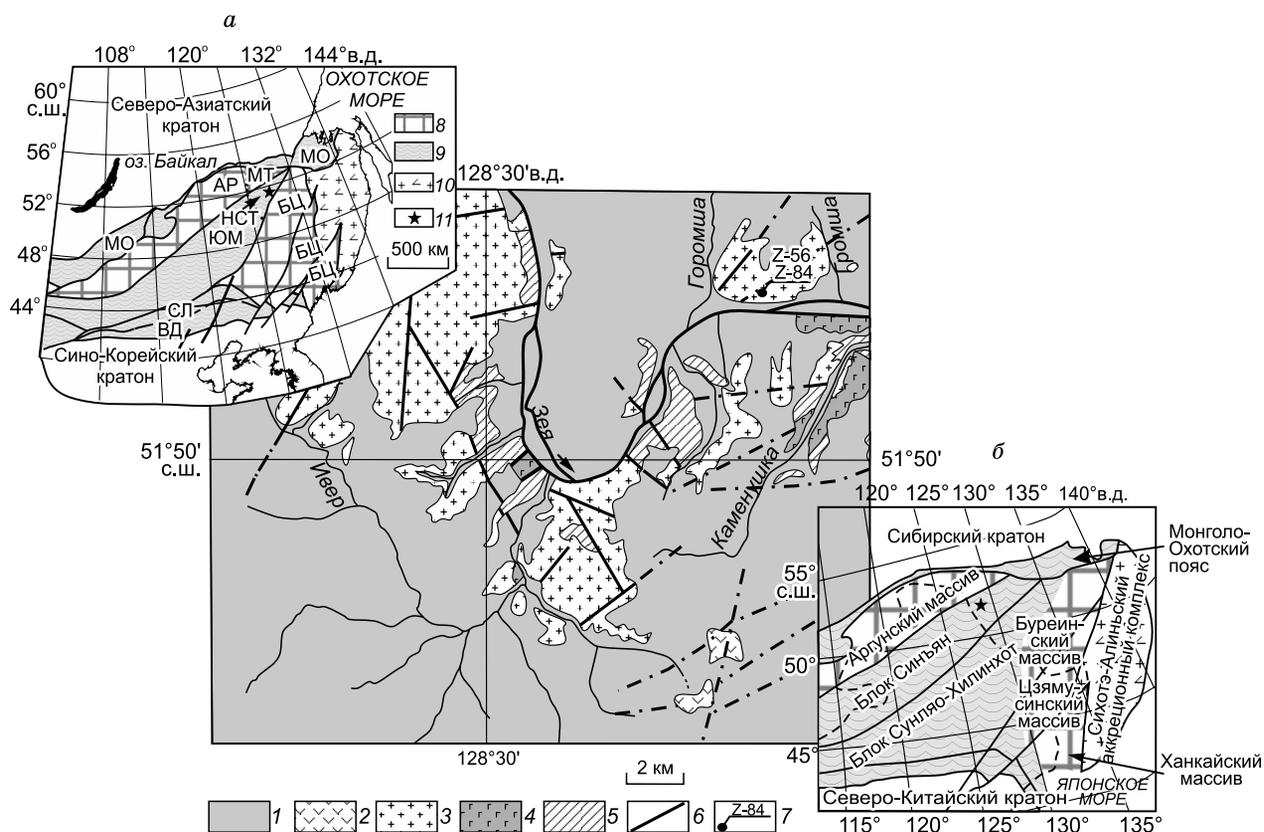


Рис. 1. Геологическая схема Зeya-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

Составлена по [Васькин, 1986] с изменениями авторов. 1 — кайнозойские рыхлые отложения, 2 — раннемеловые вулканические породы среднего и кислого состава, 3 — раннепалеозойские (?) граниты, 4 — раннепалеозойские (?) магматические породы монцодиорит-гранодиоритной ассоциации, 5 — раннепалеозойские (?) вулканогенно-осадочные образования неклинской и дагмарской толщ, 6 — главные разломы, 7 — место отбора образцов для геохимических и U-Pb геохронологических исследований и их номера. Врезка а: 8 — континентальные массивы (супертеррейны): АР — Аргунский (МТ — Мамынский террейн), БЦ — Буря-Цзямусинский; 9 — палеозойско-раннемезозойские складчатые пояса: ЮМ — Южно-Монгольско-Хинганский (НСТ — Нора-Сухотинский террейн), МО — Монголо-Охотский, СЛ — Солонкерский, ВД — Вундурмиа; 10 — позднеюрско-раннемеловые орогенные пояса, 11 — положение объекта исследований. Врезка б: положение объекта исследований (11) на тектонической схеме, по [Li et al., 2018; Zhang et al., 2020].

которыми являются нечеткими (рис. 1, врезка а). Возраст гранитоидов октябрьского комплекса принят условно раннепалеозойским [Мартынюк и др., 1990] или ордовикским [Сережников, Волкова, 2007; Петрук, Волкова, 2012]. Однако проведенные в последние годы U-Pb геохронологические исследования позволили установить, что образования, ранее объединяемые в состав октябрьского комплекса, являются разновозрастными. Так, для гранитоидов Мамынского террейна получены следующие оценки возрастов (млн лет): 507 ± 8 и 488 ± 7 (Ултучинский массив), 495 ± 2 (Гарь-Ултучинский массив), 488 ± 8 и 488 ± 5 (Усть-Инканский массив), 488 ± 5 (Косматинский массив), 376 ± 8 (Усть-Селемджинский массив), 208 ± 6 (Усть-Дугдинский массив) и 190 ± 1 (Шимановский массив) [Сорокин и др., 2004; Sorokin et al., 2017].

В свою очередь, на территории Нора-Сухотинского террейна для гранитоидов, становление которых также отнесено к ордовику [Петрук, Волкова, 2012], получены позднедевонские (378 ± 3 млн лет) [Смирнов и др., 2021] и раннесилурийские (440 ± 10 млн лет) [Смирнов и др., 2016] значения возрастов. При этом первые отражают проявление обстановки трансформной континентальной окраины, а вторые — обстановку активной континентальной окраины или энсиалической островной дуги в истории формирования ЮМХОП. В этой связи в настоящее время актуально дальнейшее изучение массивов гранитоидов, распространенных в пределах Нора-Сухотинского террейна, с целью уточнения их возраста и обстановок формирования. Объектами данного исследования являются плагиограниты массива горы Змеиная. Данный массив прослеживается вдоль правого берега р. Зeya от р. Горомша до р. Громша и перекрыт рыхлыми кайнозойскими отложениями Амуро-Зейской впадины. Размер массива составляет ~ 6 км² (см. рис. 1).

Таблица 1. Химический состав представительных образцов плаггиогранитов массива горы Зменная
Зая-Селедзгинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна

| Компонент | Z-56 | Z-56-1 | Z-56-2 | Z-56-3 | Z-56-4 | Z-56-5 | Z-84 | Z-84-1 | Z-84-2 | Z-84-3 | Z-84-4 | Z-84-5 | Z-84-6 | Z-84-7 | Z-84-8 | Z-84-9 |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 73.14 | 72.97 | 72.59 | 72.77 | 73.09 | 72.88 | 71.65 | 71.03 | 71.08 | 70.40 | 70.98 | 71.29 | 70.49 | 71.19 | 70.87 | 71.10 |
| TiO ₂ | 0.08 | 0.12 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.14 |
| Al ₂ O ₃ | 14.65 | 15.30 | 15.51 | 14.90 | 14.73 | 15.52 | 14.37 | 14.76 | 14.79 | 15.11 | 15.13 | 14.44 | 15.64 | 14.61 | 14.98 | 15.32 |
| FeO* | 1.29 | 1.38 | 1.21 | 1.36 | 1.37 | 1.48 | 1.81 | 1.65 | 1.53 | 1.88 | 1.77 | 1.66 | 1.69 | 1.95 | 1.72 | 1.56 |
| MnO | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| CaO | 1.67 | 1.38 | 1.12 | 1.71 | 1.50 | 1.00 | 2.29 | 2.12 | 1.62 | 2.09 | 1.23 | 2.25 | 1.45 | 2.17 | 2.09 | 1.33 |
| MgO | 0.26 | 0.34 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.36 | 0.54 | 0.49 | 0.49 | 0.52 | 0.54 | 0.54 | 0.53 | 0.55 | 0.50 | 0.55 |
| Na ₂ O | 4.91 | 5.34 | 5.66 | 5.86 | 5.80 | 5.79 | 6.05 | 6.77 | 5.53 | 7.22 | 6.50 | 6.26 | 6.59 | 6.56 | 6.90 | 6.18 |
| K ₂ O | 3.25 | 2.22 | 2.45 | 2.19 | 2.26 | 1.77 | 1.81 | 1.47 | 2.71 | 1.15 | 1.84 | 1.69 | 1.67 | 1.34 | 1.22 | 1.98 |
| P ₂ O ₅ | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.04 |
| П.пл. | 0.55 | 0.73 | 0.89 | 0.59 | 0.66 | 0.86 | 0.53 | 0.68 | 0.74 | 0.63 | 0.88 | 0.67 | 0.83 | 0.72 | 0.74 | 0.88 |
| Сумма | 99.87 | 99.85 | 99.88 | 99.86 | 99.87 | 99.85 | 99.27 | 99.16 | 98.64 | 99.19 | 99.07 | 99.03 | 99.08 | 99.29 | 99.24 | 99.10 |
| Li | 5.6 | 9.1 | 8.2 | 6.8 | 5.8 | 8.6 | 8.9 | 7.1 | 7.2 | 9.1 | 10.8 | 7.7 | 11.5 | 10.4 | 9.9 | 7.6 |
| Ga | 8.90 | 12.16 | 12.84 | 9.72 | 9.58 | 12.67 | 13.23 | 13.08 | 11.79 | 13.67 | 13.68 | 13.41 | 13.49 | 13.74 | 13.94 | 13.39 |
| Rb | 50 | 52 | 51 | 49 | 49 | 45 | 41 | 34 | 49 | 31 | 45 | 35 | 38 | 34 | 31 | 42 |
| Sr | 890 | 986 | 996 | 876 | 862 | 911 | 948 | 970 | 832 | 1097 | 911 | 1008 | 1014 | 1031 | 1069 | 948 |
| Cs | 0.42 | 0.61 | 0.38 | 0.57 | 0.71 | 0.58 | 0.48 | 0.44 | 0.41 | 0.44 | 0.36 | 0.39 | 0.40 | 0.42 | 0.38 | 0.37 |
| Ba | 4233 | 1275 | 1822 | 1513 | 1096 | 1024 | 1453 | 1218 | 4237 | 626 | 1092 | 1216 | 1099 | 767 | 714 | 1388 |
| La | 2.12 | 2.15 | 3.35 | 3.16 | 3.73 | 5.26 | 4.00 | 3.83 | 2.82 | 2.78 | 4.68 | 4.07 | 3.52 | 2.58 | 4.16 | 3.06 |
| Ce | 4.90 | 4.46 | 6.62 | 7.79 | 8.86 | 11.91 | 8.07 | 7.66 | 5.46 | 5.49 | 9.45 | 8.08 | 7.01 | 5.25 | 8.41 | 6.21 |
| Pr | 0.63 | 0.59 | 0.81 | 1.06 | 1.12 | 1.22 | 0.92 | 0.88 | 0.61 | 0.63 | 1.08 | 0.94 | 0.82 | 0.59 | 1.00 | 0.72 |
| Nd | 2.16 | 2.29 | 3.20 | 3.81 | 4.61 | 4.53 | 3.46 | 3.28 | 2.30 | 2.36 | 4.023 | 3.52 | 3.19 | 2.17 | 3.77 | 2.69 |
| Sm | 0.36 | 0.44 | 0.59 | 0.64 | 0.80 | 0.77 | 0.64 | 0.59 | 0.39 | 0.46 | 0.71 | 0.64 | 0.64 | 0.44 | 0.72 | 0.52 |
| Eu | 0.23 | 0.22 | 0.30 | 0.20 | 0.18 | 0.30 | 0.23 | 0.24 | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.24 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.18 |
| Gd | 0.38 | 0.38 | 0.53 | 0.65 | 0.65 | 0.78 | 0.63 | 0.57 | 0.39 | 0.50 | 0.65 | 0.60 | 0.67 | 0.47 | 0.72 | 0.49 |
| Tb | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.09 | 0.06 |
| Dy | 0.23 | 0.33 | 0.34 | 0.45 | 0.50 | 0.40 | 0.35 | 0.31 | 0.22 | 0.37 | 0.37 | 0.35 | 0.44 | 0.33 | 0.43 | 0.28 |
| Ho | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.05 |
| Er | 0.11 | 0.14 | 0.15 | 0.19 | 0.18 | 0.20 | 0.16 | 0.14 | 0.10 | 0.18 | 0.17 | 0.15 | 0.20 | 0.16 | 0.19 | 0.12 |
| Tm | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| Yb | 0.10 | 0.12 | 0.11 | 0.19 | 0.19 | 0.16 | 0.13 | 0.18 | 0.08 | 0.14 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.14 | 0.16 | 0.08 |
| Lu | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| Y | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Nb | 7 | 7 | 7 | 9 | 7 | 6 | 10 | 7 | 8 | 7 | 11 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ta | 0.09 | 0.17 | 0.10 | 0.13 | 0.42 | 0.40 | 0.26 | 0.90 | 0.37 | 0.36 | 0.37 | 0.36 | 0.36 | 0.40 | 0.43 |
| Zr | 164 | 173 | 162 | 182 | 186 | 191 | 158 | 212 | 188 | 191 | 194 | 197 | 197 | 207 | 185 |
| Th | 0.34 | 0.66 | 0.70 | 0.66 | 0.42 | 0.43 | 0.32 | 0.50 | 0.43 | 0.54 | 0.37 | 0.29 | 0.29 | 0.49 | 0.34 |
| U | 0.05 | 0.09 | 0.08 | 0.11 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.10 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 |
| Pb | 14 | 14 | 7 | 5 | 9 | 9 | 8 | 8 | 4 | 10 | 6 | 8 | 8 | 9 | 5 |
| Cu | 65 | 58 | 6 | 10 | 12 | 12 | 14 | 20 | 22 | 16 | 12 | 18 | 18 | 20 | 15 |
| Zn | 160 | 108 | 41 | 42 | 71 | 59 | 168 | 55 | 59 | 78 | 51 | 61 | 61 | 50 | 72 |
| Sc | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 0.9 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.5 | 1.5 |
| V | 17.0 | 10.0 | 14.0 | 14.0 | 16.0 | 14.0 | 15.0 | 11.0 | 12.0 | 12.0 | 9.0 | 12.0 | 12.0 | 17.0 | 16.0 |
| Cr | 84 | 50 | 68 | 137 | 85 | 92 | 93 | 96 | 86 | 63 | 85 | 90 | 90 | 100 | 46 |
| Co | 1.7 | 0.9 | 0.8 | 1.7 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 0.8 | 1.1 | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 0.8 |
| Ni | 16.0 | 15.0 | 14.0 | 18.0 | 14.0 | 18.0 | 19.0 | 23.0 | 18.0 | 16.0 | 15.0 | 19.0 | 19.0 | 19.0 | 14.0 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 8.16 | 8.05 | 8.06 | 7.56 | 7.86 | 8.24 | 8.24 | 8.37 | 8.34 | 7.95 | 8.26 | 7.90 | 7.90 | 8.12 | 8.16 |
| FeO*/MgO | 4.96 | 4.69 | 4.72 | 4.11 | 3.35 | 3.37 | 3.12 | 3.62 | 3.28 | 3.07 | 3.19 | 3.54 | 3.54 | 3.44 | 2.84 |
| Eu/Eu* | 1.92 | 0.96 | 0.74 | 1.19 | 1.10 | 1.24 | 1.52 | 1.37 | 0.91 | 1.17 | 1.06 | 1.59 | 1.59 | 1.06 | 1.07 |
| (La/Yb) _n | 14.92 | 11.14 | 13.47 | 22.28 | 21.14 | 22.20 | 25.02 | 13.38 | 21.26 | 21.23 | 16.22 | 12.91 | 12.91 | 17.86 | 26.19 |
| (Gd/Yb) _n | 3.19 | 2.73 | 2.79 | 3.95 | 3.96 | 3.92 | 4.13 | 2.86 | 3.51 | 3.74 | 3.67 | 2.83 | 2.83 | 3.67 | 4.95 |
| ΣREE | 11 | 18 | 21 | 26 | 19 | 18 | 13 | 13 | 22 | 19 | 17 | 12 | 12 | 20 | 14 |

Примечание. Содержания главных элементов приведены в мас. %, элементов-примесей — в г/г. FeO* — общее железо в форме Fe₂O₃.

дьемит-тоналит-дацитовым комплексам и адakitам [Drummond et al., 1996] (рис. 4, а, б). По содержанию макро- и микроэлементов, лежащих в основе диаграмм SiO₂—MgO, (CaO + Na₂O)—Sr, SiO₂—Nb, Y—Sr/Y [Martin et al., 2005; Castillo, 2012], они отвечают высококремнистым адakitам из различных регионов мира (см. рис. 4, в—е), которые являются вулканическими аналогами высокоглиноземистых ТТГ комплексов.

Плагииграниты массива горы Змеиная характеризуются низкими суммарными содержаниями редкоземельных элементов (ΣREE = 11—26 мкг/г) при дифференцированном спектре лантаноидов ((La/Yb)_n = 11.14—26.19) и слабоотрицательной либо положительной европиевой аномалией (Eu/Eu* = 0.74—1.92) (рис. 5, а). На мультиэлементных диаграммах для них отмечаются низкие содержания Th, U, Nb, Ta при высоких концентрациях Sr, Ba, Zr и Pb (см. рис. 5, б).

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из плагиигранита массива горы Змеиная (обр. Z-84) было проанализировано 24 зерна циркона, которые можно разделить по возрасту на две группы.

Для наиболее молодых 10 проанализированных цирконов (зерна 3, 4, 6, 8, 12, 13, 27, 37, 38, 39) значения возрастов по отношению ²⁰⁶Pb/²³⁸U варьируют в интервале от 288 до 297 млн лет (табл. 2). Все цирконы имеют отчетливую осцилляторную зональность (рис. 6), величину Th/U = 0.20—0.55, свидетельствующие об их магматическом происхождении. Средневзвешенный конкордантный возраст составляет 295 ± 4 млн лет (СКВО = 1.94; вероятность конкордантности = 0.31), который идентичен возрасту TuffZircAge 295 ± (1—2) млн лет (рис. 7). Для 13 цирконов (зерна 1, 2, 11, 15, 17, 22, 23, 25, 29, 30, 32, 33, 36) получены более древние значения возраста по отношению ²⁰⁶Pb/²³⁸U от 362 до 529 млн лет (рис. 8, см. табл. 2). Значительное количество точек ранне- и среднепалеозойских цирконов отклоняется от конкордии (см. рис. 8), что, вероятно, связано с присутствием в цирконах нерадиогенного свинца. Одно зерно (№ 9) имеет конкордантный возраст 2732 млн лет.

Полученные данные позволяют рассматривать возраст наиболее молодой популяции цирконов 295 ± 4 млн лет как возраст кристаллизации плагиигранитов массива горы Змеиная. Более древние цирконы имеют ксеногенное происхождение.

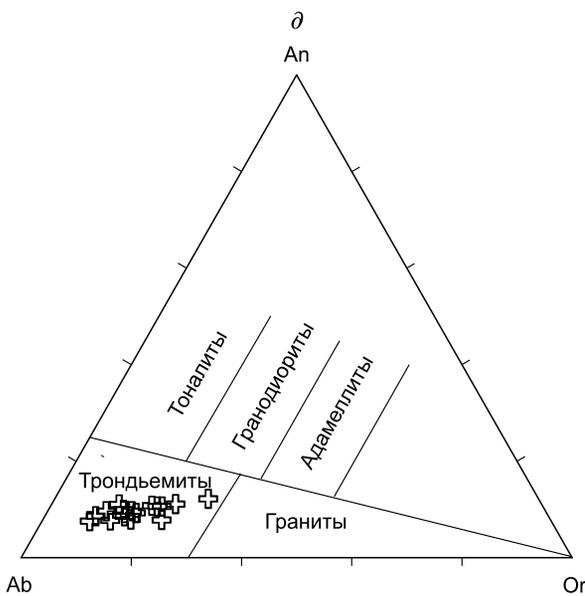
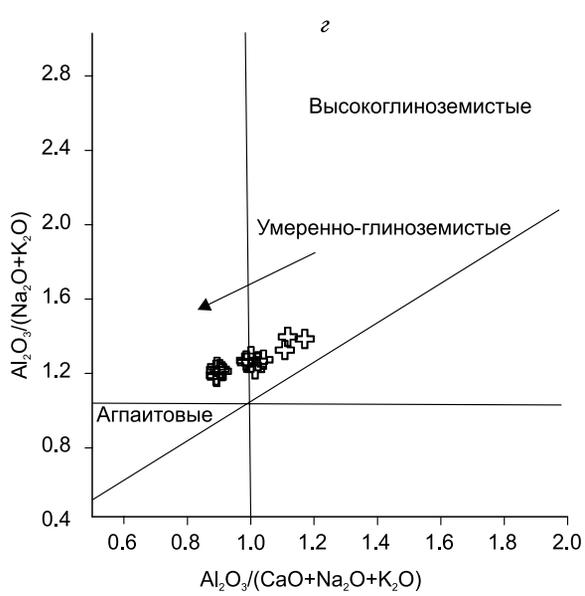
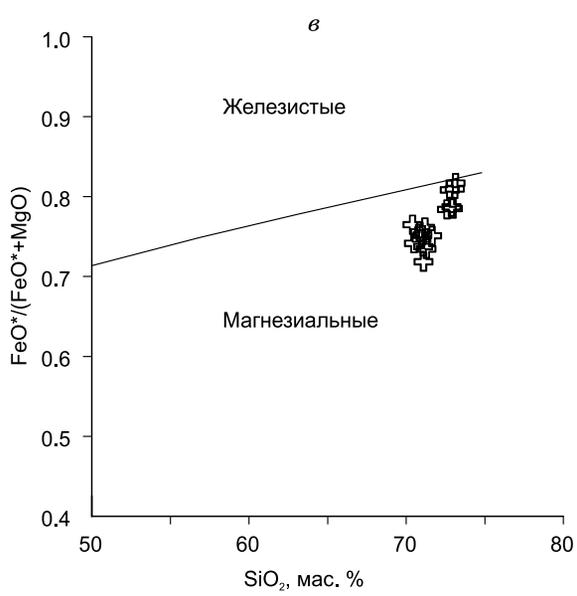
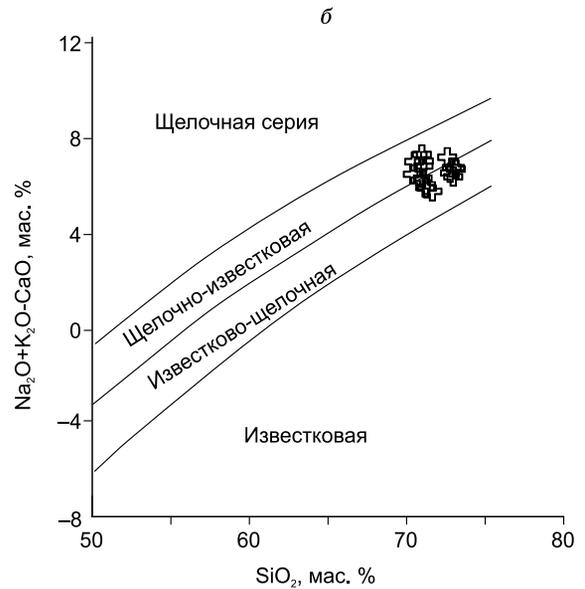
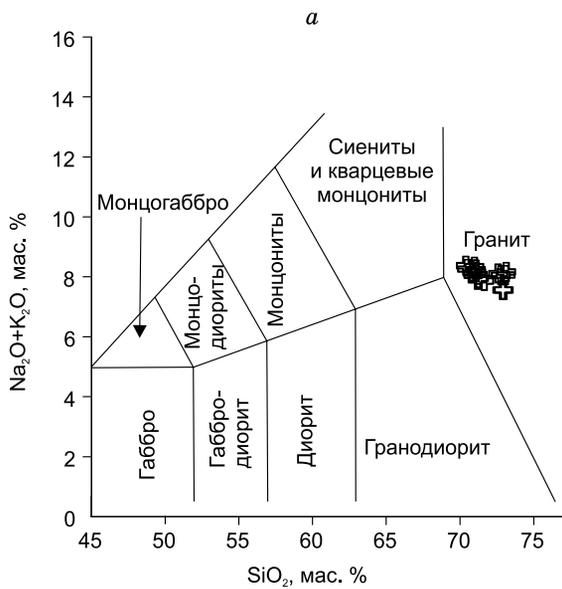


Рис. 3. Диаграммы для плагиогранитов массива горы Змеяная Зей-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

a — SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ [Le Maitre et al., 2002], *б* — SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ [Frost et al., 2001], *в* — SiO_2 — $\text{FeO}^*/(\text{FeO}^* + \text{MgO})$ [Frost et al., 2001], *г* — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ [Maniar, Piccolli, 1989], *д* — Ab—An—Or [O'Connor, 1965].

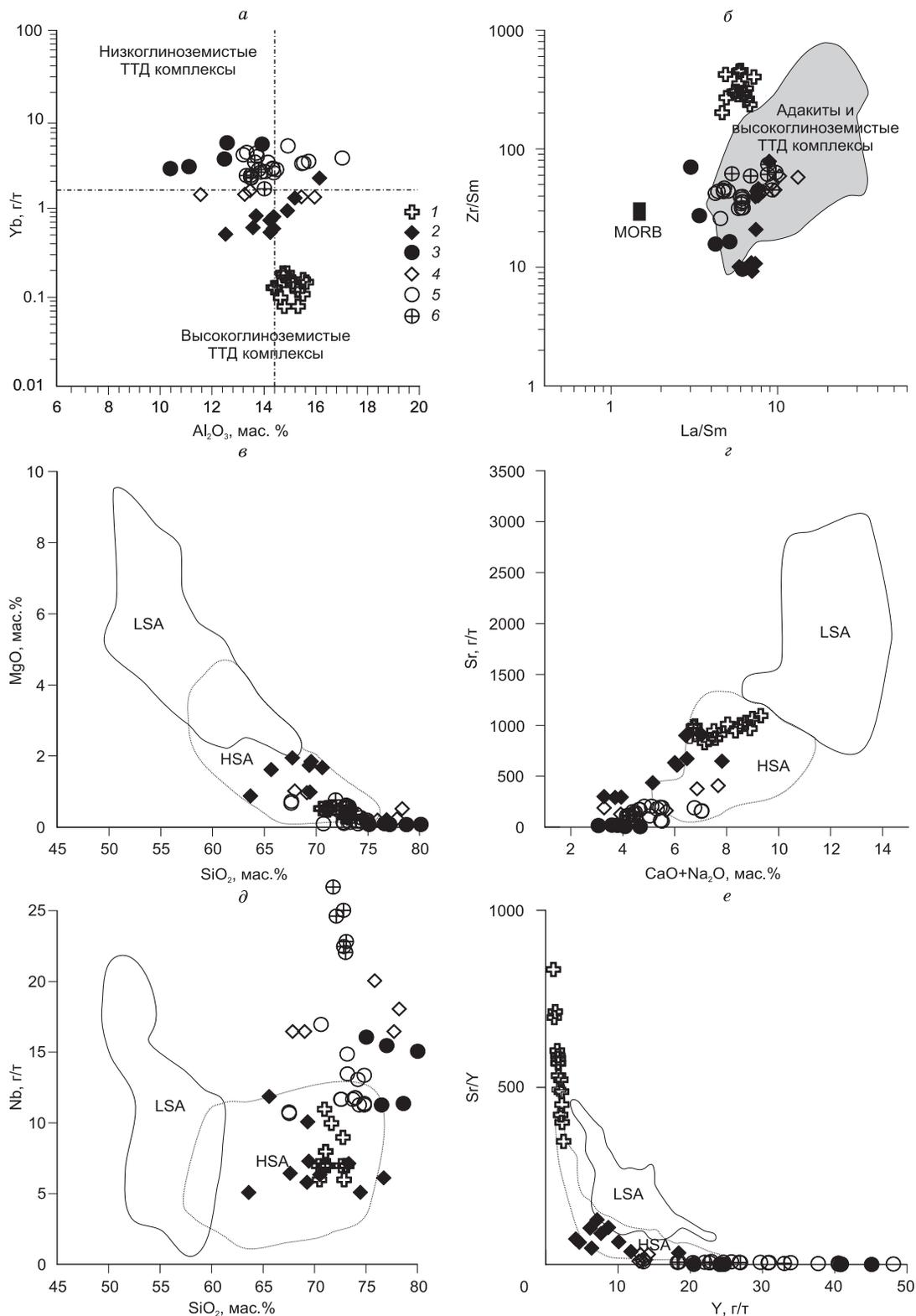


Рис. 4. Диаграммы для плагиогранитов массива горы Змеиная Зейя-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

a — Al₂O₃—Yb [Drummond et al., 1996], *б* — La/Sm—Zr/Sm [Drummond et al., 1996], *в* — SiO₂—MgO [Martin et al., 2005], *г* — (CaO + Na₂O)—Sr [Martin et al., 2005], *д* — SiO₂—Nb [Martin et al., 2005], *е* — Y—Sr/Y [Castillo, 2012]. *a, б*: ТТД комплексы — трондьемит-тоналит-дацитовые комплексы. Поля составов (*в–е*) низкокремнистых адакитов (LSA), высококремнистых адакитов (HSA) из различных регионов мира, по данным [Martin et al., 2005; Castillo, 2012]. 1 — плагиограниты массива горы Змеиная, 2 — позднекаменноугольные гранитоиды блока Синъян (Xing'an) [Ji et al., 2018], 3 — раннепермские гранитоиды блока Синъян [Ji et al., 2018], 4 — позднекаменноугольные вулканические породы блока Сунляо-Хилинхот (Songliao-Xilinhot) [Li et al., 2014], 5 — раннепермские вулканические породы блока Сунляо-Хилинхот [Li et al., 2014], 6 — раннепермские сиенограниты блока Синъян [Sun et al., 2020].

Таблица 2. U-Pb (LA-ICP-MS) данные для цирконов из плагногранита горы Звенная Зей-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна

| № п/п | № зерна | U | | U/Th | Изотопные отношения | | | | | | Возраст, млн лет | | | | | | D | * | | | |
|-------|---------|-----|------|------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------------|----|------|---------------|------|---------------|
| | | Th | U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | $\pm 1\sigma$ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | $\pm 1\sigma$ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | $\pm 1\sigma$ | Rho | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | $\pm 1\sigma$ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | $\pm 1\sigma$ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | | $\pm 1\sigma$ | CA | $\pm 2\sigma$ |
| 1 | PRB01 | 156 | 178 | 1.1 | 0.0580 | 0.0012 | 0.5942 | 0.0113 | 0.0744 | 0.0006 | 0.02 | 463 | 4 | 474 | 7 | 528 | 6 | 465 | 7 | 2.4 | |
| 2 | PRB02 | 124 | 145 | 1.2 | 0.0569 | 0.0011 | 0.5822 | 0.0106 | 0.0743 | 0.0006 | 0.04 | 462 | 4 | 466 | 7 | 486 | 6 | 463 | 7 | 0.8 | |
| 3 | PRB03 | 69 | 186 | 2.7 | 0.0529 | 0.0012 | 0.3416 | 0.0072 | 0.0469 | 0.0004 | 0.01 | 295 | 2 | 298 | 6 | 326 | 5 | 296 | 4 | 1.1 | * |
| 4 | PRB04 | 99 | 430 | 4.3 | 0.0533 | 0.0009 | 0.3437 | 0.0053 | 0.0468 | 0.0004 | 0.02 | 295 | 2 | 300 | 4 | 341 | 5 | 296 | 4 | 1.7 | * |
| 5 | PRB06 | 778 | 1670 | 2.2 | 0.0530 | 0.0007 | 0.3391 | 0.0039 | 0.0465 | 0.0004 | 0.02 | 293 | 2 | 296 | 3 | 328 | 3 | 294 | 4 | 1.3 | * |
| 6 | PRB08 | 32 | 88 | 2.8 | 0.0542 | 0.0016 | 0.3464 | 0.0095 | 0.0464 | 0.0004 | 0.03 | 292 | 3 | 302 | 7 | 3817 | 7 | 293 | 5 | 3.4 | * |
| 7 | PRB09 | 79 | 92 | 1.2 | 0.1929 | 0.0025 | 13.8630 | 0.1533 | 0.5218 | 0.0042 | 0.08 | 2707 | 18 | 2740 | 10 | 2767 | 27 | 2732 | 19 | 2.2 | |
| 8 | PRB11 | 261 | 393 | 1.5 | 0.0590 | 0.0009 | 0.6951 | 0.0098 | 0.0855 | 0.0007 | 0.04 | 529 | 4 | 536 | 6 | 568 | 6 | 531 | 7 | 1.3 | |
| 9 | PRB12 | 26 | 51 | 1.9 | 0.0551 | 0.0023 | 0.3515 | 0.0140 | 0.0464 | 0.0005 | 0.03 | 292 | 3 | 306 | 10 | 414 | 8 | 293 | 6 | 4.7 | * |
| 10 | PRB13 | 576 | 1981 | 3.4 | 0.0541 | 0.0008 | 0.3406 | 0.0043 | 0.0457 | 0.0004 | 0.05 | 288 | 2 | 298 | 3 | 375 | 4 | 291 | 4 | 3.3 | * |
| 11 | PRB15 | 236 | 480 | 2.0 | 0.0552 | 0.0009 | 0.5218 | 0.0075 | 0.0686 | 0.0006 | 0.06 | 428 | 3 | 426 | 5 | 420 | 5 | 427 | 6 | -0.4 | |
| 12 | PRB17 | 299 | 1082 | 3.6 | 0.0566 | 0.0009 | 0.4995 | 0.0068 | 0.0641 | 0.0005 | 0.05 | 400 | 3 | 411 | 5 | 474 | 6 | 404 | 5 | 2.7 | |
| 13 | PRB22 | 192 | 438 | 2.3 | 0.0549 | 0.0009 | 0.5510 | 0.0084 | 0.0728 | 0.0006 | 0.06 | 453 | 4 | 446 | 6 | 410 | 6 | 451 | 6 | -1.6 | |
| 14 | PRB23 | 408 | 602 | 1.5 | 0.0596 | 0.0010 | 0.6144 | 0.0092 | 0.0749 | 0.0006 | 0.06 | 465 | 4 | 486 | 6 | 588 | 6 | 471 | 6 | 4.5 | |
| 15 | PRB25 | 246 | 1392 | 5.7 | 0.0537 | 0.0008 | 0.4268 | 0.0060 | 0.0577 | 0.0005 | 0.08 | 362 | 3 | 361 | 4 | 359 | 6 | 361 | 5 | -0.2 | |
| 16 | PRB27 | 99 | 180 | 1.8 | 0.0536 | 0.0018 | 0.3459 | 0.0114 | 0.0468 | 0.0005 | 0.04 | 295 | 3 | 302 | 9 | 355 | 8 | 296 | 6 | 2.2 | * |
| 17 | PRB29 | 296 | 694 | 2.3 | 0.0555 | 0.0010 | 0.5649 | 0.0092 | 0.0739 | 0.0006 | 0.08 | 460 | 4 | 455 | 6 | 432 | 7 | 458 | 7 | -1.0 | |
| 18 | PRB30 | 437 | 1373 | 3.1 | 0.0546 | 0.0009 | 0.4378 | 0.0065 | 0.0583 | 0.0005 | 0.10 | 365 | 3 | 369 | 5 | 394 | 6 | 366 | 5 | 1.0 | |
| 19 | PRB32 | 182 | 327 | 1.8 | 0.0531 | 0.0010 | 0.5395 | 0.0095 | 0.0737 | 0.0006 | 0.10 | 458 | 4 | 438 | 6 | 334 | 7 | 453 | 7 | -4.4 | |
| 20 | PRB33 | 204 | 345 | 1.7 | 0.0549 | 0.0011 | 0.5525 | 0.0102 | 0.0731 | 0.0006 | 0.09 | 455 | 4 | 447 | 7 | 406 | 7 | 453 | 7 | -1.8 | |
| 21 | PRB36 | 139 | 243 | 1.7 | 0.0572 | 0.0012 | 0.5230 | 0.0105 | 0.0664 | 0.0006 | 0.08 | 414 | 4 | 427 | 7 | 498 | 8 | 417 | 7 | 3.1 | |
| 22 | PRB37 | 142 | 717 | 5.1 | 0.0524 | 0.0011 | 0.3409 | 0.0067 | 0.0472 | 0.0004 | 0.09 | 297 | 3 | 298 | 5 | 304 | 6 | 298 | 5 | 0.1 | * |
| 23 | PRB38 | 99 | 220 | 2.2 | 0.0554 | 0.0014 | 0.3563 | 0.0086 | 0.0467 | 0.0005 | 0.07 | 294 | 3 | 309 | 6 | 428 | 6 | 296 | 5 | 5.2 | * |
| 24 | PRB39 | 171 | 374 | 2.2 | 0.0546 | 0.0017 | 0.3501 | 0.0105 | 0.0465 | 0.0005 | 0.05 | 293 | 3 | 305 | 8 | 397 | 8 | 294 | 6 | 4.0 | * |

Примечание. Звездочкой отмечены возрасты, используемые в расчетах. Rho – коэффициент корреляции между ошибками отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U–²⁰⁶Pb/²³⁸U, CA – конкордантный возраст [Ludwig, 2008], D – дискордантность.

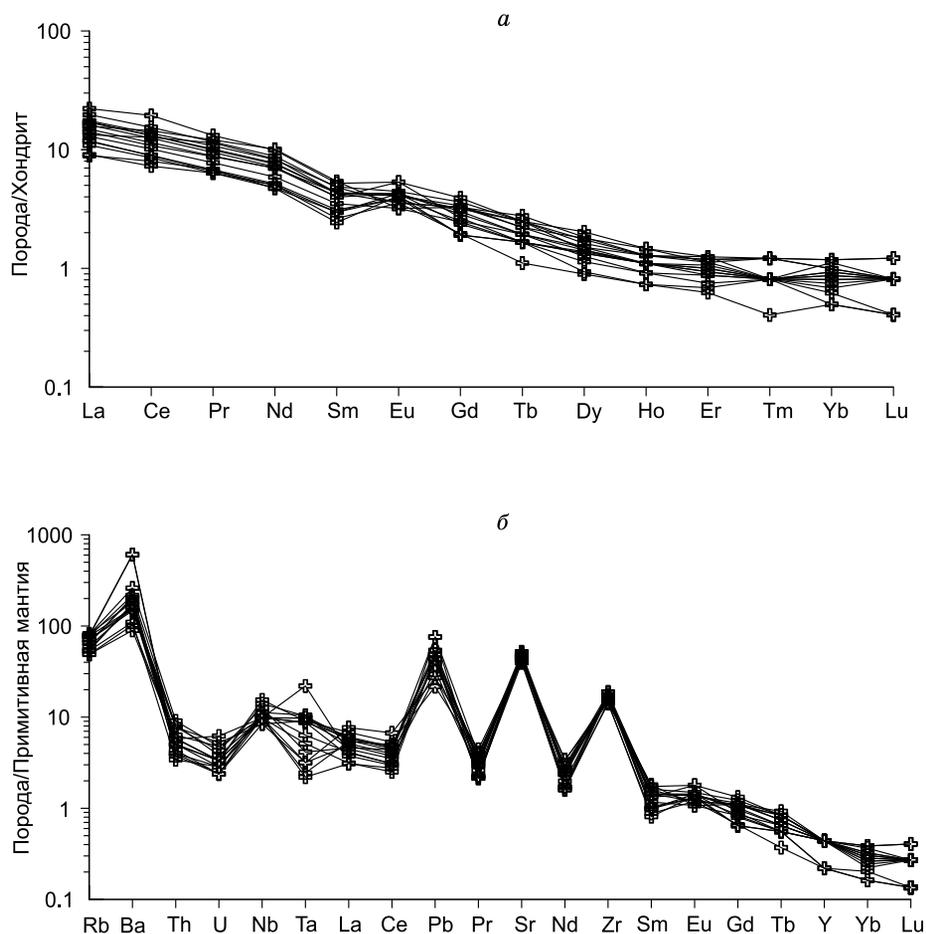


Рис. 5. График распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) (а) и спайдер-диаграмма (б) для плагиогранитов массива горы Змеиная Зея-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

Состав хондрита, по [McDonough, Sun, 1995], состав примитивной мантии, по [Sun, McDonough, 1989].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно проведенным исследованиям выявлено, что по химическому составу плагиограниты массива горы Змеиная соответствуют высококремнистым и высокоглиноземистым адакитам. Для определения их вероятных источников и обстановок формирования был проведен анализ положения фигуративных точек состава пород на диаграммах, основанных на содержании микро- и макрокомпонентов. Низкие концентрации Nb (6—11 г/т), Y (1—2 г/т) и Ce (4.46—11.91 г/т) и низкие значения соотношений $(K_2O + Na_2O)/CaO$ (3.43—7.56) и FeO^*/MgO (2.55—4.46), согласно [Whalen et al., 1987] (рис. 9, а, б), сближают их с гранитоидами *I*-, *S*-типов. Подобный вывод следует из диаграммы $Fe_2O_3 \cdot 5 - (Na_2O + K_2O) - ((CaO + MgO) \cdot 5)$ [Гребенников, 2014] (см. рис. 9, в). В свою очередь, по содержанию $Ba = 626—4237$ г/т, $Sr = 832—1097$ г/т, $Na_2O = 4.91—7.22$ мас. % и значениям величины $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O) < 1.1$ (мол. кол.) плагиограниты массива горы Змеиная соответствуют гранитам *I*-типа.

Положение фигуративных точек состава исследуемых плагиогранитов на диаграммах $Eu—Yb$ [Туркина, 2000] и $(La/Yb)_n—Sr/Y$ [Moуen, 2011] позволяет предполагать, что образование исходных для них магм связано с частичным плавлением метабазитов в условиях высоких давлений (рис. 10, а, б). Плавление при таких высоких значениях давления может происходить как на мантийных глубинах, так и в нижних частях континентальной коры, утолщенной в результате аккреционно-коллизийных процессов [Barnes et al., 1996; Whalen et al., 2002].

Для распознавания обстановок формирования адакитов и адакитовых гранитоидов сравнительно недавно С.Д. Великославинский с соавторами [2018] предложен показатель DF3. В плагиогранитах массива горы Змеиная величина DF3 варьирует от 0.75 до 1.46 (см. рис. 10, в), соответствуя коллизийным и постколлизийным адакитам и адакитовым гранитоидам. Лишь в двух образцах отмечаются отрица-

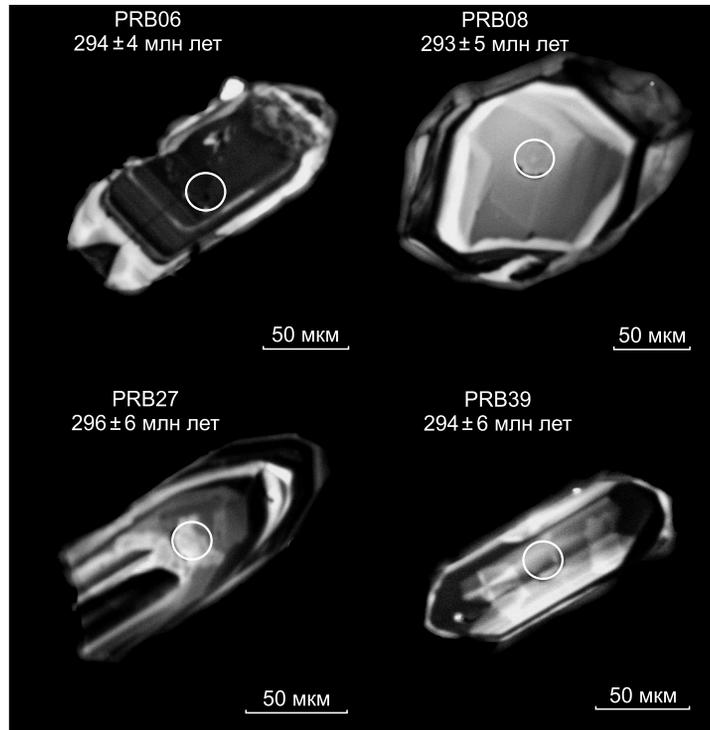


Рис. 6. Микрофотографии раннепермских кристаллов циркона из плагиогранита (обр. Z-84) массива горы Змеиная Зея-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна, выполненные в режиме катодолуминесценции.

тельные значения $DF3$ (-0.46 ; -0.48), попадающие в зону перекрытия островодужных, а также коллизионных и постколлизионных образований.

Согласно U-Pb геохронологическим исследованиям, установлено, что возраст плагиогранитов массива горы Змеиная Нора-Сухотинского террейна составляет 295 ± 4 млн лет, что по стратиграфической шкале соответствует ранней перми. Близкие по возрасту породы ранее были выявлены на территории Китая. В пределах блока Синъян (Xing'an) (см. рис. 1, врезка б) установлены раннепермские щелочно-полевошпатовые граниты с возрастом 296 ± 2 млн лет [Ji et al., 2018] и сиенограниты с возрастом 292 ± 0.9 млн лет [Sun et al., 2020], а на территории блока Сунляо-Хилинхот (Songliao-Xilinhot) — риолиты с возрастом 295 ± 2 и 293 ± 2 млн лет [Li et al., 2014], сформированные в постколлизионной обстановке.

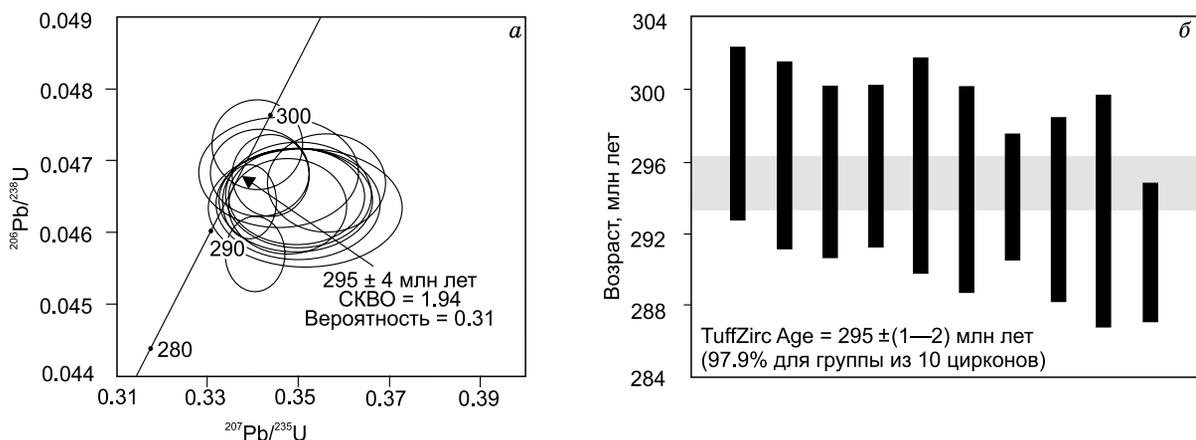


Рис. 7. Диаграммы с конкордией (а) и TuffZircAge (б) для раннепермских цирконов из плагиогранита (обр. Z-84) массива горы Змеиная Зея-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

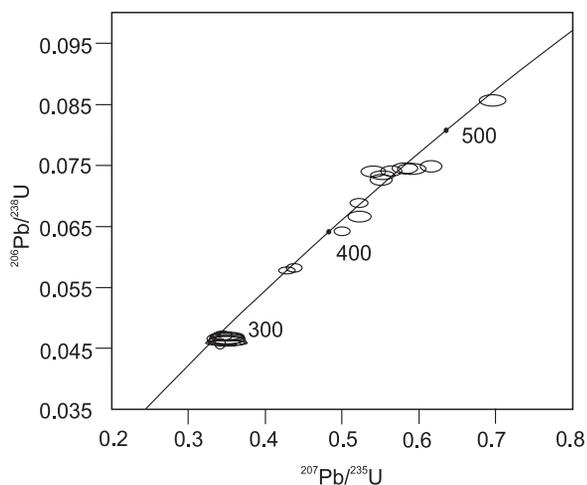


Рис. 8. Диаграмма с конкордией для палеозойских цирконов из плагиигранита (обр. Z-84) массива горы Змеиная Зeya-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

новке. Сравнивая химический состав плагиигранитов массива горы Змеиная с раннепермскими образованиями перечисленных структур, стоит отметить для первых более высокие содержания $(CaO + Na_2O)$ и Sr, высокие значения Sr/Y и Zr/Sm при более низких концентрациях K_2O , Nb и Y (см. рис. 4, 9). Кроме того, в пределах блоков Синъян и Сунляо-Хилинхот выявлены позднекаменноугольные гранитоиды и дациты адакитового состава с датировками от 310 до 321 млн лет, отражающие этап коллизии и амальгамации этих двух микроконтинентальных блоков [Li et al., 2014; Ji

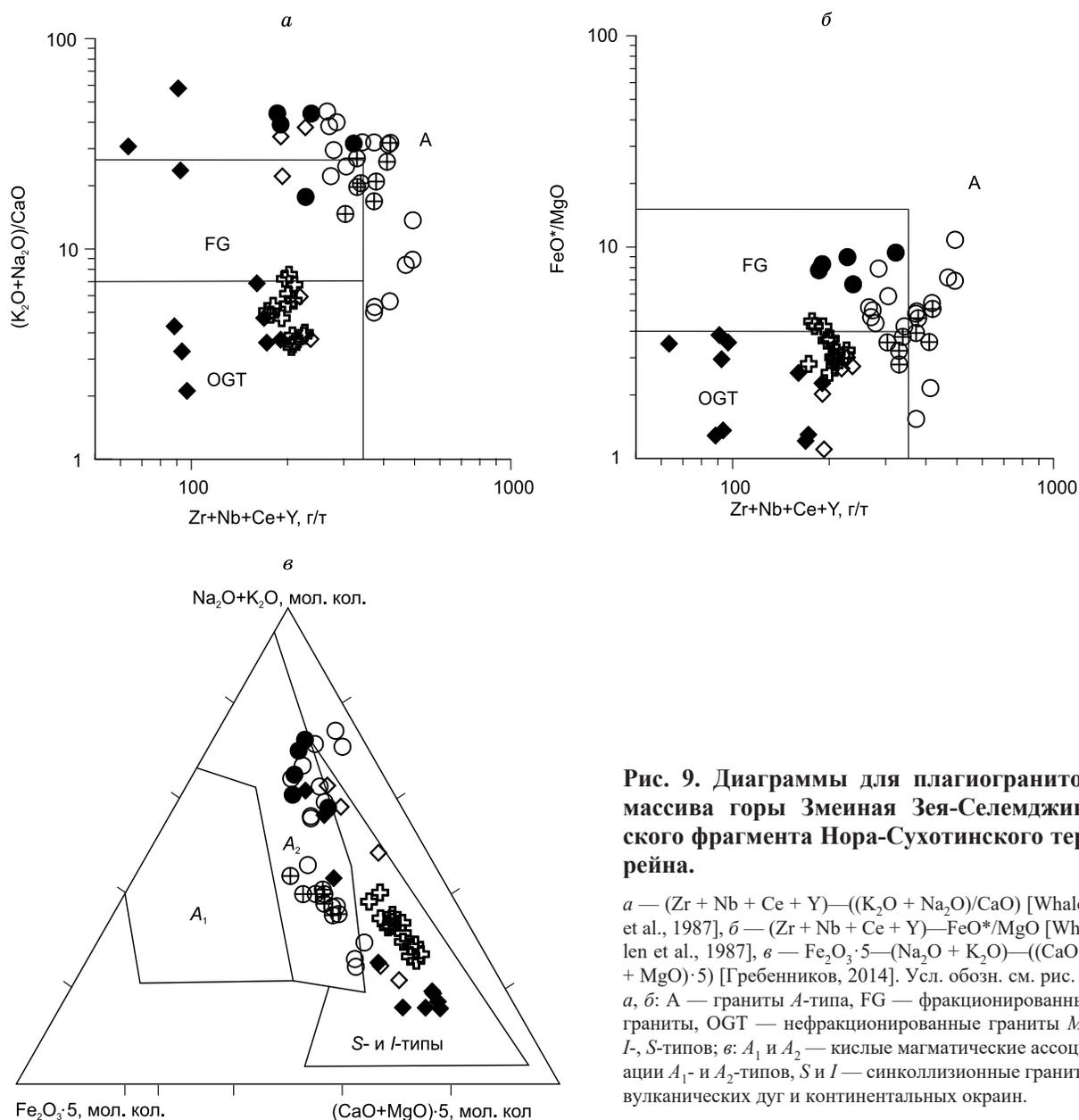


Рис. 9. Диаграммы для плагиигранитов массива горы Змеиная Зeya-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

a — $(Zr + Nb + Ce + Y) - ((K_2O + Na_2O)/CaO)$ [Whalen et al., 1987], *б* — $(Zr + Nb + Ce + Y) - FeO^*/MgO$ [Whalen et al., 1987], *в* — $Fe_2O_3 \cdot 5 - (Na_2O + K_2O) - ((CaO + MgO) \cdot 5)$ [Гребенников, 2014]. Усл. обозн. см. рис. 4. *a, б*: А — граниты А-типа, FG — фракционированные граниты, OGT — нефракционированные граниты *M*-, *I*-, *S*-типов; *в*: *A*₁ и *A*₂ — кислые магматические ассоциации *A*₁- и *A*₂-типов, *S* и *I* — синколлизонные граниты вулканических дуг и континентальных окраин.

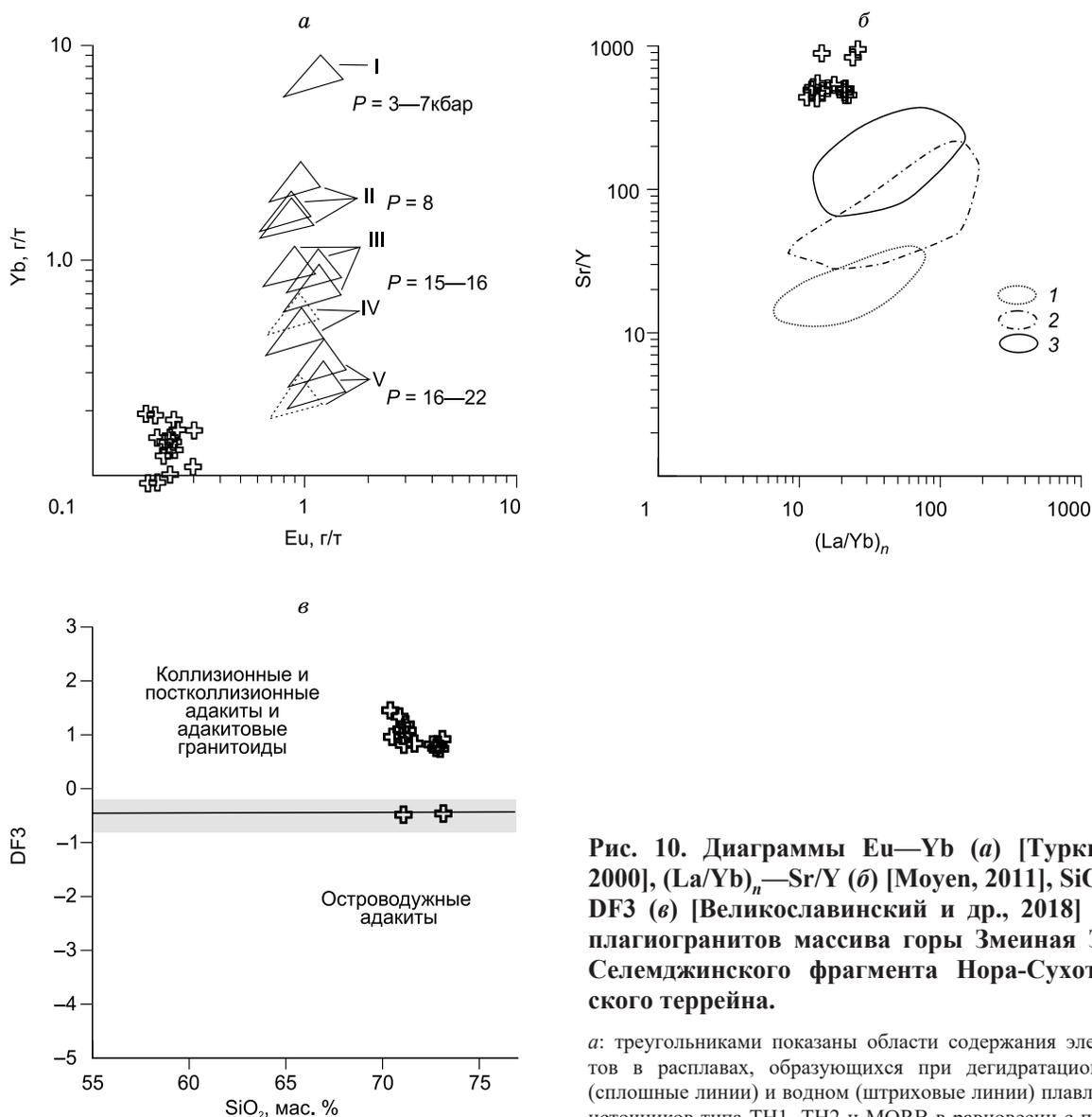


Рис. 10. Диаграммы Eu—Yb (а) [Туркина, 2000], $(La/Yb)_n$ —Sr/Y (б) [Moyen, 2011], SiO_2 —DF3 (в) [Великославинский и др., 2018] для плагиогранитов массива горы Змеиная Зее-Селемджинского фрагмента Нора-Сухотинского террейна.

а: треугольниками показаны области содержания элементов в расплавах, образующихся при дегидратационном (сплошные линии) и водном (штриховые линии) плавлении источников типа TH1, TH2 и MORB в равновесии с пятью типами респитов: I — Pl + Crx + Орх, II — Hb + Pl ± Crx ±

± Орх, III, IV — Hb + Crx + Pl + Gar, V — Crx + Gar ± Hb. Pl — плагиоклаз, Crx — клинопироксен, Орх — ортопироксен, Hb — амфибол, Gar — гранат. б: поля ТТГ ассоциаций, сформированных за счет плавления исходных для них магм на различных глубинах: 1 — 10—12 кбар, 2 — ~15 кбар, 3 — 20 кбар и более. в: $DF3 = -1.69324 \cdot TiO_2 - 0.25537 \cdot Al_2O_3 - 0.21269 \cdot FeO^* + 0.06076 \cdot MgO - 0.09796 \cdot CaO + 0.47377 \cdot Na_2O + 0.29270 \cdot K_2O + 3.57821 \cdot P_2O_5 + 0.00431 \cdot Rb + 0.00036 \cdot Sr + 0.03119 \cdot Y + 0.00006 \cdot Zr + 0.01088 \cdot Nb - 0.00048 \cdot Ba + 0.01366 \cdot La + 0.0004 \cdot Ce + 0.02319 \cdot Nd - 0.18584 \cdot Sm + 1.29135 \cdot Eu - 0.62229 \cdot Gd + 0.3819 \cdot Dy + 2.06583 \cdot Er - 2.62769 \cdot Yb + 1.6464$. Содержания петрогенных элементов приведены в мас. %, малых элементов — в г/г.

et al., 2018]. Сопоставление плагиогранитов массива горы Змеиная с позднекаменноугольными гранитоидами блока Синъян и дацитами блока Сунляо-Хилинхот по химическому составу показывает их значительное сходство (см. рис. 4, 9). Эти данные в совокупности с присутствием в терригенных отложениях раннепермского возраста континентальной флоры в пределах Приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна [Сорокин, 1975; Петрук, Волкова, 2012] позволяют предполагать, что исследованные нами плагиограниты, по-видимому, были сформированы в результате коллизионных событий, сопровождавших закрытие палеоокеана.

ВЫВОДЫ

Геохимические особенности плагиогранитов массива горы Змеиная позволяют классифицировать их как высокоглиноземистые и высококремнистые адакиты. Формирование исходных для них магм происходило за счет плавления метабазитового источника на больших глубинах.

Согласно результатам геохронологических исследований установлено, что плагиограниты массива горы Змеиная имеют раннепермский (295 ± 4 млн лет), а не ордовикский возраст, как предполагалось ранее.

Формирование плагиогранитов массива горы Змеиная, согласно геохимическому составу пород и региональным геологическим данным, происходило в результате коллизионных процессов на заключительном этапе развития Нора-Сухотинского террейна.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам А.И. Ханчуку и А.М. Ларину за ценные советы и рекомендации. Авторы благодарят сотрудников ЦКП «Амурский центр минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН» (Е.Н. Воропаеву, О.Г. Медведеву, В.И. Рождествовину, Е.С. Сапожник, Е.В. Ушакову), ИТиГ ДВО РАН (В.Е. Зазулину, Е.М. Голубеву, А.В. Штареву), а также персонал ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) за проведение аналитических исследований.

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

ЛИТЕРАТУРА

Васькин А.Ф. Государственная геологическая карта СССР. М-б 1:200 000. Амуро-Зейская серия. Лист М-52-III (Свободный) / Ред. В.К. Путинцев. Л., ВСЕГЕИ, 1986.

Великославинский С.Д., Котов А.Б., Крылов Д.П., Ларин А.М. Геодинамическая типизация адакитовых гранитоидов по геохимическим данным // *Петрология*, 2018, т. 26, № 3, с. 255—264, doi: 10.7868/S0869590318030032.

Гребенников А.В. Гранитоиды А-типа: проблемы диагностики, формирования и систематики // *Геология и геофизика*, 2014, т. 55 (9), с. 1356—1373, doi: 10.15372/GiG20140903.

Мартынюк М.В., Рямов С.А., Кондратьева В.А. Объяснительная записка к схеме корреляции магматических комплексов Хабаровского края и Амурской области. Хабаровск, ПГО «Дальгеология», 1990, 215 с.

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., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // *Тихоокеанская геология*, 2003, т. 22, № 6, с. 7—41.

Петрук Н.Н., Волкова Ю.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000. Третье поколение. Дальневосточная серия. Лист М-52 (Благовещенск) / Ред. А.С. Вольский. СПб, ВСЕГЕИ, 2012.

Сережников А.Н., Волкова Ю.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000. Третье поколение. Дальневосточная серия. Лист N-52 (Зея) / Ред. А.С. Вольский. СПб, ВСЕГЕИ, 2007.

Смирнов Ю.В., Сорокин А.А. Геохимические и изотопно-геохимические Sm—Nd-особенности метавулканитов, диабазов и метагабброидов северо-восточного фланга Южно-Монгольско—Хинганского орогенного пояса // *ДАН*, 2017, т. 474, № 2, с. 220—225, doi: 10.7868/S0869565217140171.

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 // *ДАН*, 2012, т. 445, № 1, с. 55—60, doi: 10.1134/S1028334X12070094.

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 // *Тихоокеанская геология*, 2016, т. 35, № 2, с. 49—57, doi: 10.1134/S1819714016020068.

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 // *Тихоокеанская геология*, 2021, т. 40, № 1, с. 65—76, doi: 10.1134/S1819714021010073.

Сорокин А.А., Кудряшов Н.М., Ли Цзиньи. U-Pb геохронология гранитоидов октябрьского комплекса Мамынского террейна (Приамурье) // *Тихоокеанская геология*, 2004, т. 23, № 5, с. 54—67.

Сорокин А.П. Государственная геологическая карта СССР. М-б 1:200 000. Амуро-Зейская серия. Лист М-52-I (Устье р. Беря) / Ред. В.В. Шиханов. М., Аэрогеология, 1975.

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

Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения востока России: в 2 кн. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, 572 с.

Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ₃—MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 241—258, doi: 10.15372/GIG20160113.

Barker F. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin // Trondhjemites, dacites, and related rocks / Ed. F. Barker. Amsterdam, Elsevier, 1979, p. 1—12.

Barnes C.G., Petersen S.W., Kistler R.W., Murray R., Kays M.A. Source and tectonic implications of tonalite-trondhjemite magmatism in the Klamath Mountains // Contrib. Mineral. Petrol., 1996, v. 123, p. 40—60, doi: 10.1007/S004100050142.

Castillo P.R. Adakite petrogenesis // Lithos, 2012, v. 134—135, p. 304—316, doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.013.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Rock-forming minerals. London, Longman, 1963, 435 p.

Drummond M.S., Defant M.J., Kepezhinskas P.K. Petrogenesis of slab derived tonalite-dacite adakite magmas // Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1996, v. 87, p. 205—215.

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 (11), p. 2033—2048, doi: 10.1093/petrology/42.11.2033.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS // Laser ablation ICP-MS in the Earth sciences: current practices and outstanding issues / Ed. P.J. Sylvester. Mineral. Assoc. Canada Short Course Ser., 2008, v. 40, p. 204—207.

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, doi: 10.1016/j.lithos.2018.10.014.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lamere J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Wool 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, 254 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, doi: 10.1016/j.lithos.2014.07.008.

Li Z.Z., Qin K.Z., Li G.M., Jin L.Y., Song G.X. 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 // J. Asian Earth Sci., 2018, v. 165, p. 96—113, doi: 10.1016/j.jseae.2018.06.020.

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 // GSA Bull., 1989, v. 101, p. 635—643, doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2).

Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution // Lithos, 2005, v. 79, p. 1—24, doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.048.

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chem. Geol., 1995, v. 120, p. 223—253, doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Moyen J.F. The composite Archaean grey gneisses: Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth // Lithos, 2011, v. 123, p. 21—36, doi: 10.1016/j.lithos.2010.09.015.

O'Connor J.T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // USGS Prof. Pap., 1965, 525-B, p. 79—84.

Sorokin A.A., Kudryashov N.M., Kotov A.B., Kovach V.P. Age and tectonic setting of the early Paleozoic magmatism of the Mamyn Terrane, Central Asian Orogenic Belt, Russia // J. Asian Earth Sci., 2017, v. 144, p. 22—39, doi: 10.1016/j.jseae.2017.01.017.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. London Spec. Publ., 1989, v. 42, p. 313—345, doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

Sun Y.G., Li B.L., Sun F.Y., Ding Q.F., Qian Y., Li L., 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, doi: 10.1139/cjes-2019-0200.

Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1987, v. 95, p. 407—419, doi: 10.1007/BF00402202.

Whalen J.B., Percival J.A., McNicoll V.J., Longstaffe F.J. A mainly crustal origin for tonalitic granitoid rocks, Superior Province, Canada: Implications for late Archean tectonomagmatic processes // *J. Petrol.*, 2002, v. 43 (8), p. 1551—1570, doi: 10.1093/petrology/43.8.1551.

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, doi: 10.1016/j.gr.2019.11.006.