УДК 551.72; 551.24.056

ПЕТРОГЕНЕЗИС, U–Pb-BO3PACT И Lu–Hf-СИСТЕМАТИКА ПОРОД ГАРЕВСКОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРО-ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: СВИДЕТЕЛЬСТВА ГРЕНВИЛЬСКИХ СОБЫТИЙ НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА

© 2022 г. И. И. Лиханов^{1,*}, академик РАН В. В. Ревердатто¹, П. С. Козлов², К. А. Савко³, А. А. Крылов¹

Поступило 20.07.2022 г. После доработки 29.08.2022 г. Принято к публикации 01.09.2022 г.

Впервые показано, что биотитовые плагиогнейсы Гаревского метаморфического комплекса Северо-Енисейского кряжа имеют геохимические характеристики адакитов *C*-типа с островодужной природой источников расплава. Изотопный состав Hf в цирконах из этих пород указывает на участие в образовании расплава нескольких источников, включающих ювенильные мантийные и более древние коровые протолиты с модельными возрастами $T_{\rm Hf}(DM)^c = 1838-1916$ и 1965–2357 млн лет соответственно. По результатам U–Pb-датирования цирконов установлены новые импульсы неопротерозойской эндогенной активности на западной окраине Сибирского кратона (913 ± 11 и 915 ± 36 млн лет для адакитоподобных гранитов и 932 ± 26 млн лет для лейкогранитов), коррелирующие с гренвильскими тектоническими событиями. Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о тесных пространственно-временных связях между ними и их вхождении в состав древнего суперконтинента Родиния.

Ключевые слова: адакитоподобные породы, геохимия, обстановки формирования, U–Pb-возраст и Lu–Hf-изотопная систематика цирконов, Северо-Енисейский кряж

DOI: 10.31857/S2686739722601442

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой аккреционно-коллизионный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов континентальных окраин, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации Родинии. Этот суперконтинент возник на рубеже мезо-неопротерозоя в результате гренвильского орогенеза. Образованный в ходе этих событий гренвильский пояс, который протягивался по периферии большинства палеоконтинентов, служит опорным для любых палеореконструкций периода формирования этого суперконтинента. Гренвильская складчатость фиксировала закрытие позднемезопротерозойского океана, а ее заключительные деформации, связанные с процессами континентальной коллизии мезопротерозойских блоков, имели возраст 1.2— 0.9 млрд лет [1].

С другой стороны, на основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1.8 и 0.75 млрд лет назад, известных как скучный миллиард (boring billion), в ряде работ сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже мезопротерозойских, в том числе гренвильских коллизионных событий (например, [2]). Это приводит к противоречивой трактовке ключевых вопросов геологической эволюции региона.

Мы считаем, что проблемы оценки геохронологических рубежей в истории суперконтинента Родиния во многом еще далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимиче-

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² развитериноург, 1 оссия

³Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

^{*}E-mail: likh@igm.nsc.ru

ских данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли.

Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей статье, где на примере пород гаревского метаморфического комплекса (ГМК) приведены геохронологические доказательства ранненеопротерозойских событий в эволюции докембрийских комплексов Енисейского кряжа. Такие исследования важны не только для понимания процессов, сформировавших тектонический облик региона, но и для решения широко дискутируемого вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния.

В разрезе складчатых структур Центрального блока наиболее древним является ГМК, в составе которого выделены немтихинская и малогаревская метаморфические толщи. Они надстраиваются тейским комплексом, в результате чего малогаревская толща перекрывается нижнепротерозойскими отложениями свиты хребта Карпинского тейской серии. В тектоническом отношении ГМК располагается в пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ), разделяющей Центральный кратонный блок и Исаковский островодужный террейн [3].

В строении этого комплекса принимают участие серые биотитовые плагиогнейсы немтихинской толщи с возрастом 1360-1380 млн лет, обнаженные в бассейне р. Чапа и ее правого притока р. Колоромо. Эти оценки связываются с завершающим этапом мезопротерозойского рифтогенеза вдоль западной окраины Сибирского кратона [4]. Выше по разрезу эти породы сменяются порфиробластическими плагиогнейсами, биотитовыми плагиогнейсами и гранат-двуслюдяными кристаллическими сланцами с широким развитием лейкогранитов, пегматитов, рапакивиподобных гранитов, продуктов ультраметаморфизма (мигматитов) и подчиненным количеством амфиболитов и метатерригенно-карбонатных пород (гранат-кианитовых гнейсов, кварцитов, кальцифиров, мраморов) малогаревской толщи.

В развитии ГМК были выделены три основных этапа, различающихся термодинамическими режимами, величинами метаморфических градиентов и возрастами [5]. На первом этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений And–Sil-типа с гренвильским возрастом ~1050–950 млн лет при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте dT/dH == 25–35°C/км [6]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому (798–802 млн лет) коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ку–Sil-типа с локальным повышением давления вблизи надвигов [7]. Заключительный этап сопровождался синэксгумационным динамометаморфизмом (785–776 млн лет) с $dT/dH \le 15^{\circ}$ С/км [8]. Эти стадии развития коллизионного орогена в регионе маркируются дайковыми роями бимодальных ассоциаций анорогенных гранитоидов и внутриплитных базитов рифтогенной природы с возрастами внедрения 797–792 млн лет, связанными с неопротерозойскими процессами растяжения коры вдоль западной окраины Сибирского кратона и началом распада суперконтинента Родиния [9].

В западной части ГМК исследованы биотитовые плагиогнейсы, метаморфизованные в условиях And–Sil-типа (т.н. 12 и 14), в береговых обнажениях р. Енисей ниже устья р. Гаревки и р. Вятки и порфиробластические лейкогранитогнейсы (т.н. 63–2) в нижнем течении р. Тис, приуроченные к линейным зонам смятия вдоль ПРСЗ. Они расположены в тектоническом шве на сочленении палеоокеанического и палеоконтинентального блоков Енисейского кряжа (рис. 1).

Здесь биотитовые плагиогнейсы слагают пластовые тела (мощностью от 20 см до 3–5 м) с субгоризонтальным и слабонаклонным залеганием с ярко проявленной поздней синколлизионной микроклинизацией, сопровождаемой зонами мелко- и крупно-очковых гнейсов по плагиогнейсам, и кварц-микроклиновыми пегматитами. В пределах пластов они представляют собой однородные по минеральному составу серые и темно-серые мелко-среднезернистые массивные породы лепидогранобластовой структуры, существенно биотит-плагиоклаз-кварц-калишпатового состава с примесью минералов группы эпидота.

Ортоклазовые порфиробластические гранитогнейсы образуют неоднородные по составу и структурно-текстурным особенностям тела субмеридионального простирания видимой мощностью не менее 150–200 м в мелкозернистых амфиболитах и кварцитах малогаревской толщи. Характерно неравномерное распределение порфиробластов ортоклаза (размер от 1 до 2 см). Участками ортоклазовые гранитогнейсы интенсивно бластомилонитизированы с образованием зон тектонитов северо-западного простирания мощностью от 20–30 см до 3–4 м.

Биотитовые плагиогнейсы малогаревской толщи представляют собой перглиноземистые (ASI = = 1.03-1.47) высококалиевые (K₂O > 5 мас. %) и железистые (FeO*/(FeO* + MgO) = 0.78-0.85) породы известково-щелочной серии. По сравнению с другими разновидностями пород ГМК они отличаются низкими концентрациями Y, Nb, Ta, HREE и повышенными содержаниями Sr [10] (табл. 1).

Они имеют фракционированное распределение $P3\Im ((La/Yb)_n = 24-48)$ и повышенные значе-

ЛИХАНОВ и др.



Рис. 1. Схема геологического строения правобережья р. Енисей в пределах гаревского метаморфического комплекса Енисейского кряжа с местами отбора продатированных образцов.

ния отношений Sr/Y = 33–37, LREE/HREE = 14– 24, что отвечает характеристикам обогащенных калием адакитов *C*-типа, согласно [11]. Такие породы были описаны в Китае, и, как подтверждают экспериментальные данные, они могли формироваться при высокотемпературном плавлении пород подобно тоналит-трондьемит-гранодиоритовой ассоциации. На дискриминационных диаграммах Y–Sr/Y [12] и (Yb)_n–(La/Yb)_n [13] точки составов биотитовых плагиогнейсов гаревского комплекса располагаются в полях адакитов (рис. 2).

На дискриминационных диаграммах Rb–Hf– Та [14], Rb–Y+Nb и Nb–Y [15] фигуративные точки основных разновидностей гранитоидов ГМК преимущественно попадают в поле внутриплитных гранитов, тогда как адакитоподобные породы расположены в области островодужных гранитов (рис. 3 б, г, д). Все это указывает на различные по составу источники для пород ГМК и, возможно, на разные условия дифференциации. Об этом также свидетельствуют и различные значения индикаторного отношения Y/Nb, величина которого отражает состав источника. Общим свойством для всех разновидностей высококалиевых гранитов ГМК является их происхождение из магм, отделенных от континентальной или андерплейтовой коры, за исключением адакитоподобных пород, что проиллюстрировано диаграммой Nb–Y–Zr (рис. 3 в).

Генетические представления об образовании адакитоподобных пород достаточно выдержаны. Существует три наиболее вероятных механизма образования адакитовых расплавов [16]: (1) плавление базальтов субдуцировавшей океанической литосферы; (2) плавление метабазальтов в подошве мощной континентальной коры; (3) плавление пород мантийного клина, метасоматизиро-

Компонент	4	12	14	57	63-2	2	43
SiO ₂	68.65	65.82	70.74	72.34	81.97	70.24	70.29
TiO ₂	0.72	0.62	0.35	0.22	0.41	0.56	0.45
Al ₂ O ₃	13.40	14.04	16.88	14.28	6.75	14.85	14.16
Fe ₂ O ₃	5.55	6.99	2.15	2.26	3.36	4.30	5.01
MnO	0.07	0.13	0.03	0.05	0.04	0.09	0.07
MgO	1.13	1.09	0.54	0.41	0.63	1.20	0.48
CaO	2.17	1.76	1.40	1.47	3.41	0.47	1.49
Na ₂ O	1.92	2.87	2.06	3.23	1.75	2.09	2.48
K ₂ O	4.83	5.26	5.11	4.52	1.08	4.96	5.24
P_2O_5	0.19	0.14	0.11	0.05	0.19	0.15	0.14
ППП	1.31	0.74	0.40	1.18	0.35	1.15	0.13
Сумма	99.93	99.51	99.78	100.0	99.95	100.1	99.94
Rb	143	107	22	210	160	210	140
Sr	131	224	390	120	174	82	45
Y	24	6	12	21	12	45	69
Zr	169	173	172	164	145	168	249
Nb	13	9	11	18	14	17.3	46
Cs	2.67	1.33	0.36	6.2	1.71	4.2	12
Ba	752	737	544	572	787	540	725
La	33.32	81.34	66.49	27	30.07	42	89
Ce	103.51	129.00	124.94	57	58.57	107	168
Pr	8.54	14.19	15.46	6.9	8.20	11.5	20
Nd	28.53	45.25	47.33	26	27.75	42	73
Sm	5.58	5.70	7.71	5.6	5.80	8.9	14
Eu	0.95	1.27	0.94	0.92	0.59	1.32	1.4
Gd	7.02	5.27	7.71	4.5	7.10	9.3	14
Tb	0.96	0.61	1.00	0.76	0.96	1.38	2.2
Dy	5.83	2.52	4.62	3.8	5.20	8.0	13
Но	1.25	0.50	0.79	0.77	0.96	1.57	2.5
Er	3.58	1.33	2.17	2.0	2.72	4.8	7.4
Tm	0.55	0.18	0.29	0.33	0.40	0.73	1.1
Yb	3.35	1.14	1.83	2.2	2.68	4.3	7.5
Lu	0.49	0.17	0.28	0.31	0.40	0.58	1.1
Hf	10.77	9.25	6.22	4.68	8.04	7.0	12.7
Та	1.83	0.66	1.04	1.36	2.75	1.44	3.6
Th	33.86	31.82	15.23	16.0	35.04	24	35
U	3.79	2.03	4.72	2.7	6.00	4.2	4.8
V	43	45	37	32	21	38	18

Таблица 1. Содержания главных (мас. %), редких элементов (г/т) и их индикаторные элементные отношения в основных разновидностях пород ГМК

Компонент	4	12	14	57	63-2	2	43	
Со	4	2	1	4.2	0	11.0	3.6	
Ni	12	12	10	13	4	5	12	
ASI	1.09	1.03	1.47	1.11	0.66	1.54	1.14	
La/Yb _n	6.71	47.92	24.45	8.27	7.57	6.59	8.00	
Gd/Yb_n	1.69	3.71	3.39	1.65	2.14	1.75	1.51	
Eu/Eu*	0.46	0.69	0.37	0.54	0.28	0.44	0.30	
LREE/HREE	7.83	23.62	14.06	8.35	6.42	6.94	7.49	
Sr/Y	5.45	37.33	32.50	5.71	14.50	1.82	0.65	
Yb _n	16.02	5.48	8.27	10.53	12.82	20.57	35.89	
		1			1		1	

Таблица 1. Окончание

Примечание: $f = (FeO + 0.9 \times Fe_2O_3)/(FeO + 0.9 \times Fe_2O_3 + MgO)$; ASI (мол. кол-ва) = $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$; LREE (La–Eu), HREE (Gd–Lu); Eu/Eu^{*} = Eu_n/(Sm_n + Gd_n) × 0.5. Номера образцов соответствуют названиям пород, где порфиробластические гранитогнейсы (обр. 2), бластомилонитизированные порфиробластические плагиогранитогнейсы (обр. 4), рапакивиподобные граниты (обр. 43), мигматиты (обр. 57), адакитоподобные граниты (обр. 12 и 14), порфиробластические ортоклазовые лейкогранитогнейсы (обр. 63-2).

ванных адакитовым расплавом. Вопрос о магматических источниках этих пород часто является дискуссионным. Объединяет эти модели то, что первичные адакитовые магмы (1 и 2 модели), либо метасоматизирующий агент (3 модель) образуются за счет плавления пород основного состава в условиях стабильности эклогитовых парагенезисов. Магматическими источниками обогащенных калием адакитов могут быть, как вновь образованный в основании нижней коры материал базитового слоя, так и породы, близкие по составу с ТТГ-ассоциацией. Тем не менее адакитоподобные магмы в дуговых обстановках часто также интерпретируются как расплавы, производные из коровых источников (океанических или континентальных), которые взаимодействовали с мантийным клином или взаимодействовали с примитивными дуговыми мафитовыми магмами. Так, образование установленных на Енисейском кряже гранитоидов с адакитовыми характеристиками тейского комплекса с возрастом 880-860 млн лет, отнесенных к обогащенному калием типу, связывается с плавлением материала в основании континентальной коры. вследствие ее экстремального утолщения на заключительной стадии коллизионного процесса [2]. На Южно-Енисейском кряже поздненеопротерозойские адакиты с возрастом 576-546 млн лет Зимовейнинского массива образовались в обстановке трансформного скольжения литосферных плит после прекращения субдукции как из корового, так и мантийнокорового источников [2]. Геохимические особенности адакитоподобных биотитовых плагиогнейсов западной части ГМК указывают на вероятную



Рис. 2. Дискриминационные диаграммы Y–Sr/Y [12] (а) и (Yb)_n–(La/Yb)_n [13] (б) для адакитов и БАДР (породы базальт-андезит-дацит-риолитовых ассоциаций вулканических дуг).



Рис. 3. Дискриминационные диаграммы для главных породных ассоциаций ГМК: (a) FeO*/MgO-Zr + Nb + Ce + Y и (6) Rb-Hf-3Ta; (b) Nb–Y–Zr/4; (г) Rb-Y + Nb; (e) Nb–Y, обзор которых приведён в тексте. Поля составов гранитоидов: (a) A – A-типа, FG – фракционированные, OGT – нефракционированные М-, I- и S- типов; (b) гранитоиды, источниками которых являлись породы по своему составу подобные базальтам океанических островов (A₁) или породы континентальной коры (A₂); (б, г, д) post-COLG – постколлизионные, syn-COLG – коллизионные, VAG – острово-дужные, WPG – внутриплитные и ORG – океанских хребтов.

островодужную природу их протолита (рис. 3). Однако при этом не вполне аргументировано, насколько субдукционные адакиты идентичны их коллизионным/постколлизионным аналогам,



Рис. 4. Дискриминантная диаграмма [17], разделяющие адакиты островных дуг с коллизионными и постколлизионными адакитами и адакитовыми гранитоидами.

поскольку четкие геохимические критерии, позволяющие разделить их, практически отсутствуют. Так, использование дискриминантной функции DF₃ [17] в отношении изученных плагиогнейсов показывает, что фигуративные точки их составов попадают как в область адакитов островных дуг, так и в область перекрытия полей состава коллизионными/постколлизионными адакитами (рис. 4), что требует разработки дополнительных диагностических критериев. При этом очевидно, что адакитоподобные породы из зоны конвергеншии Исаковского террейна с окраиной Сибирского кратона и другие разновидности пород ГМК в палеоконтинентальном секторе Енисейского кряжа имеют различную геохимическую специфику.

Были проведены изотопно-геохронологические исследования адакитоподобных гранитов (обр. 12 и 14) и порфиробластических ортоклазовых лейкогранитогнейсов (обр. 63-2).

Цирконы из обр. 14 и 12 представлены субидиоморфными полупрозрачными и трещиноватыми удлиненными кристаллами призматического облика коричневого цвета длиной от 100 до 500 мкм с $K_y = 1-5$. По результатам U–Pb-датирования для



Рис. 5. U–Pb-диаграммы с конкордией и дискордией для цирконов из адакитоподобных гранитоидов (а–б) и лейко-гранитогнейсов (в).

9 цирконов обр. 14 получен конкордантный возраст 913 \pm 11 млн лет, содержание Th/U = 0.02–0.20. Средневзвешенный ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-возраст равен 941 \pm 13 млн лет, СКВО = 2.3. Для 15 цирконов обр. 12 построена дискордия с верхним пересечением 915 \pm 36 млн лет, Th/U = 0.01–0.21 (табл. 2, рис. 5).

Цирконы из обр. 63-2 представлены субидиоморфными до овальных полупрозрачными кристаллами коричневого цвета длиной до 150 мкм с $K_y = 1-2$. Часть цирконов зональна с четко выраженными ядрами с осцилляторной зональностью и каймами. Для 15 цирконов обр. 63-2 построена дискордия с верхним пересечением 932 ± 26 млн лет, Th/U = 0.01-0.36 (рис. 5).

Существенная дополнительная информация о возрасте корообразующих событий в пределах этого региона и источниках расплава для адакитоподобных гранитов (обр. 12 и 14) получена при Lu-Hf-изотопных исследованиях. Изотопный состав Hf был определен в цирконах из этих образцов и анализировался в тех же точках, где измерялся U-Pb-изотопный возраст. В отличие от U-Рb-изотопной системы, которая во всех зернах циркона имеет весьма близкий возраст, Lu-Нf-изотопная система в тех же зернах демонстрирует более широкие вариации изотопного состава гафния при расчете на возраст ε Hf(t) от +0.1 до -10. Модельные возрасты T_{Hf}(DM)^с, рассчитанные по двухстадийной модели, варьируют от 1719 до 2421 млн лет (табл. 3). Среди них преобладают модельные возрасты, предполагающие довольно длительную коровую предысторию их протолитов. Наиболее радиогенным составом Hf отличаются цирконы адакитоподобных гранитов εHf(t) от +0.9 до −0.5, что может указывать на происхождение пород из мантийного источника, обедненного несовместимыми редкими элементами. Им соответствуют палеопротерозойские

модельные возрасты $T_{Hf}(DM)^c = 1838-1916$ млн лет. Часть ядер цирконов отличается менее радиогенным составом Hf от -2.2 до -10, что может указывать на их формирование из коровых пород. В них установлены более древние модельные возрасты $T_{Hf}(DM)^c = 1965-2357$ млн лет (табл. 3).

Результаты U-Рb-датирования адакитоподобных гранитов (913 ± 11 и 915 ± 36 млн лет) и порфиробластических ортоклазовых лейкогранитогнейсов (932 ± 26 млн лет) могут быть рассмотрены в качестве возрастных аналогов процессов гренвильской складчатости и, возможно, синхронных субдукционных процессов, связанных с ранними этапами эволюции Палеоазиатского океана. В пределах палеоконтинентального сектора Северо-Енисейского кряжа в качестве эквивалентов гренвиллид рассматриваются гранитогнейсовые купола [18] и метапелиты низких/умеренных давлений Гаревского и Тейского комплексов [19]. Эти возрастные оценки также совпадают с временем начального регионального метаморфизма основных магматических пород Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса в правобережье р. Ангары. Выявленный этап хорошо коррелирует с фазами орогенеза ряда комплексов в гренвильском (Лаврентия) и в свеконорвежском складчатых поясах (Балтика) [1].

Синхронность магматической и деформационно-метаморфической активности, а также схожая последовательность однотипных тектонотермальных событий на арктической окраине Родинии, подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в это время, что согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями положения суперконтинентов [20].

Новые доказательства гренвильских коллизионных событий в пределах западной окраины Сибирского кратона и имеющиеся палеоконтинен-

Partner <	I			(I	/											
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$					206-	207		Изотопные отношения ¹					Возраст, млн лет			
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Точка U, Th,		$\frac{^{232}\text{Th}}{^{229}}$	$^{200}\text{Pb}_{c},$	²⁰⁶ Pb*,	²⁰⁷ D b		²⁰⁷ Pb*		²⁰⁶ Pb*		Rho	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Ph	D,	
Image: constraint of the state interval of		ppm	ppm	²³⁸ U	%	ррш	$\frac{10}{206}$ Ph	± %	²³⁵ II	± %	²³⁸ II	± %		$\frac{10}{238}$	$\frac{10}{206}$ Ph	70
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $																
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	21							16	0 1307	15	0.9	792 ± 11	812 + 14	3		
$ \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.230 \\ 1.4 \\ 1.4 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.$	3.1	2630	315	0.02	0.23	330	0.07004	0.00	1.175	1.0	0.1307	1.5	0.9	772 ± 11 879 ± 12	912 ± 14 930 ± 12	6
1 1002 104 0.06 0.27 255 0.07057 0.87 1.598 1.7 0.1643 1.5 0.9 981 ± 14 945 ± 18 -4 6.1 2319 99 0.04 0.03 274 0.06831 0.77 1.297 1.7 0.1377 1.5 0.9 832 ± 12 878 ± 16 6 6.2 1555 26 0.02 0.03 167 0.06646 10 1.148 1.8 0.1253 1.5 0.9 1042 ± 14 962 ± 10 -8 8.1 1583 18 0.01 0.10 200 0.07103 0.91 1.44 1.5 0.9 1021 ± 14 912 ± 12 -10 11.1 2898 76 0.03 0.16 315 0.06561 0.86 1.144 1.7 0.1265 1.5 0.9 768 ± 11 794 ± 18 3 12.1 1444 2.7 0.026 880 0.07217 0.43 1.679 1.5	4.1	8326	1547	0.12	0.02	1330	0.07074	0.29	1.818	1.5	0.1864	1.5	1.0	1102 ± 15	950 ± 6	-14
	5.1	1802	104	0.06	0.27	255	0.07057	0.87	1.598	1.7	0.1643	1.5	0.9	981 ± 14	945 ± 18	_4
	6.1	2319	99	0.04	0.03	274	0.06831	0.77	1.297	1.7	0.1377	1.5	0.9	832 ± 12	878 ± 16	6
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	6.2	1555	26	0.02	0.03	167	0.06646	10	1.148	1.8	0.1253	1.5	0.8	761 ± 11	821 ± 21	8
8.1 1583 18 0.01 0.01 200 0.07103 0.91 1.44 1.8 0.1471 1.5 0.9 885 ± 12 958 ± 19 8 9.1 1964 75 0.04 0.25 204 0.06531 1 1.086 1.8 0.12016 1.5 0.9 1021 ± 14 917 ± 12 -10 11.1 2898 76 0.03 0.16 315 0.06561 0.86 1.44 1.7 0.1265 1.5 0.9 1021 ± 14 917 ± 12 -10 11.1 2898 76 0.03 0.16 315 0.06661 0.84 1.74 1.7507 1.5 0.9 905 ± 13 983 ± 16 4 13.1 503 1048 0.20 0.08 817 0.06694 0.45 1.659 1.6 0.1726 1.5 0.9 915 ± 2 918 ± 15 0 1.41 1.44 1.7 0.1867 1.5 0.9 938 ± 20 936 ± 29	7.1	4015	630	0.16	0.03	606	0.07116	0.5	1.722	1.6	0.1755	1.5	0.9	1042 ± 14	962 ± 10	-8
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	8.1	1583	18	0.01	0.10	200	0.07103	0.91	1.44	1.8	0.1471	1.5	0.9	885 ± 12	958 ± 19	8
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	9.1	1964	75	0.04	0.25	204	0.06531	1	1.086	1.8	0.1206	1.5	0.8	734 ± 10	784 ± 21	7
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	10.1	4572	311	0.07	0.53	677	0.06962	0.6	1.647	1.6	0.1716	1.5	0.9	1021 ± 14	917 ± 12	-10
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	11.1	2898	76	0.03	0.16	315	0.06561	0.86	1.144	1.7	0.1265	1.5	0.9	768 ± 11	794 ± 18	3
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	12.1	1454	27	0.02	0.44	172	0.07049	1.2	1.331	1.9	0.1369	1.5	0.8	827 ± 12	943 ± 24	14
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	13.1	6069	1231	0.21	0.02	880	0.07217	0.43	1.679	1.5	0.1687	1.5	1.0	1005 ± 14	991 ± 9	-1
15.1 5503 1048 0.20 0.08 817 0.06968 0.45 1.659 1.6 0.1726 1.5 1.0 1027 ± 14 919 ± 9 -11 IA II 1938 32 0.02 0.19 254 0.06964 0.74 1.464 2.5 0.1524 2.3 0.9 915 ± 20 918 ± 15 0 3.1 5609 1146 0.21 0.35 758 0.07048 0.95 1.523 2.7 0.1567 2.5 0.9 938 ± 22 942 ± 20 0 4.1 1754 31 0.02 0.09 221 0.06904 0.57 1.46 2.6 0.1534 2.5 1.0 920 ± 21 900 ± 12 -2 7.2 1322 154 0.12 0.12 0.70 0.767 0.76 1.459 2.5 0.148 2.3 1.0 904 ± 20 932 ± 14 3 9.1 1757 55 0.33 0.66 253 0.0716 0.67 1.522 2.4 0.151 0.31	14.1	2330	178	0.08	0.05	302	0.07034	0.77	1.462	1.7	0.1507	1.5	0.9	905 ± 13	938 ± 16	4
1 1938 32 0.02 0.19 254 0.06964 0.74 1.464 2.5 0.1524 2.3 0.9 915 ± 20 918 ± 15 0 2.1 1866 166 0.09 1.00 241 0.07027 1.4 1.441 2.7 0.1487 2.3 0.8 894 ± 20 936 ± 29 5 3.1 5609 1146 0.21 0.35 758 0.07048 0.951 1.523 2.7 0.1567 2.5 0.9 938 ± 22 942 ± 20 0 4.1 1754 31 0.02 0.09 221 0.06994 0.57 1.46 2.6 0.1534 2.5 1.0 920 ± 21 900 ± 12 -2 7.2 1322 154 0.12 0.12 170 0.07067 0.76 1.459 2.3 1.0 98 ± 20 957 ± 14 -4 8.1 2831 240 0.09 2.4 0.1674 2.3 1.0 98 ± 20	15.1	5503	1048	0.20	0.08	817	0.06968	0.45	1.659	1.6	0.1726	1.5	1.0	1027 ± 14	919 ± 9	-11
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	14															
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1.1	1938	32	0.02	0.19	254	0.06964	0.74	1.464	2.5	0.1524	2.3	0.9	915 ± 20	918 ± 15	0
3.1560911460.210.357580.070480.951.5232.70.15672.50.9 938 ± 22 942 ± 20 04.11754310.020.092210.069380.721.3982.40.14622.30.9 880 ± 19 910 ± 15 35.121131120.050.032790.069040.571.462.60.15342.51.0 920 ± 21 900 ± 12 -2 7.213221540.120.121700.070670.761.4592.50.14982.30.9 900 ± 20 948 ± 16 -4 8.128312400.090.443690.070120.71.4622.40.15122.31.0 998 ± 22 957 ± 14 -4 1.12083410.020.052760.071690.61.5222.40.16742.31.0 998 ± 22 957 ± 14 -4 1.12083410.090.062760.071850.751.6870.80.1750.310.61040 ± 3 991 ± 9 -5 2.119351420.080.062850.071350.751.6870.80.1750.40.51020 ± 4 967 ± 15 -5 3.132172780.090.054590.71450.771.6350.80.16600.350.4 990 ± 3 970 ± 16 -2	2.1	1866	166	0.09	1.00	241	0.07027	1.4	1.441	2.7	0.1487	2.3	0.8	894 ± 20	936 ± 29	5
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3.1	5609	1146	0.21	0.35	758	0.07048	0.95	1.523	2.7	0.1567	2.5	0.9	938 ± 22	942 ± 20	0
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4.1	1754	31	0.02	0.09	221	0.06938	0.72	1.398	2.4	0.1462	2.3	0.9	880 ± 19	910 ± 15	3
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5.1	2113	112	0.05	0.03	279	0.06904	0.57	1.46	2.6	0.1534	2.5	1.0	920 ± 21	900 ± 12	-2
8.128312400.090.443690.070120.71.4622.40.15122.31.0 908 ± 20 932 ± 14 39.11757550.030.062530.070990.671.6392.40.16742.31.0 998 ± 22 957 ± 14 -411.12083410.020.052760.071690.61.5222.40.1542.31.0 923 ± 20 977 ± 12 663-21.151589490.190.062850.071350.751.6870.80.17150.40.51020 ± 4 967 ± 15 -53.132172780.090.054590.071450.771.6350.80.16600.350.4 990 ± 3 970 ± 16 -24.130481820.060.093970.069540.591.4530.70.15160.350.5 910 ± 3 915 ± 12 15.144275400.130.056380.071200.4451.7760.60.17830.320.61000 ± 3 969 ± 10 -36.1541410130.190.158300.072240.451.7760.60.17830.320.61058 ± 3 993 ± 9 -67.128402940.110.084120.071510.611.6620.70.16850.370.51	7.2	1322	154	0.12	0.12	170	0.07067	0.76	1.459	2.5	0.1498	2.3	0.9	900 ± 20	948 ± 16	-4
9.11757550.030.062530.070990.671.6392.40.16742.31.0998 \pm 22957 \pm 14-411.12083410.020.052760.071690.61.5222.40.1542.31.0998 \pm 22957 \pm 14-463-21.151589490.190.067760.072180.421.7420.50.17510.310.61040 \pm 3991 \pm 9-52.119351420.080.062850.071350.751.6870.80.17150.40.51020 \pm 4967 \pm 15-53.132172780.090.054590.071450.771.6350.80.16600.350.4990 \pm 3970 \pm 16-24.130481820.060.093970.069540.591.4530.70.15160.350.5910 \pm 3915 \pm 1215.144275400.130.056380.071400.471.6520.60.16780.330.61000 \pm 3969 \pm 10-36.1541410130.190.158300.072240.451.7760.60.17830.320.61058 \pm 3993 \pm 9-67.128402940.110.084120.071510.611.6620.70.16850.370.5 <th< td=""><td>8.1</td><td>2831</td><td>240</td><td>0.09</td><td>0.44</td><td>369</td><td>0.07012</td><td>0.7</td><td>1.462</td><td>2.4</td><td>0.1512</td><td>2.3</td><td>1.0</td><td>908 ± 20</td><td>932 ± 14</td><td>3</td></th<>	8.1	2831	240	0.09	0.44	369	0.07012	0.7	1.462	2.4	0.1512	2.3	1.0	908 ± 20	932 ± 14	3
11.1 2083 41 0.02 0.05 276 0.07169 0.6 1.522 2.4 0.154 2.3 1.0 923 \pm 20 977 \pm 12 6 63-2 1.1 5158 949 0.19 0.06 776 0.07218 0.42 1.742 0.5 0.1751 0.31 0.6 1040 \pm 3 991 \pm 9 -5 2.1 1935 142 0.08 0.06 285 0.07135 0.75 1.687 0.8 0.1715 0.4 0.5 1020 \pm 4 967 \pm 15 -5 3.1 3217 278 0.09 0.05 459 0.07145 0.77 1.635 0.8 0.160 0.35 0.4 990 \pm 3 970 \pm 16 -2 4.1 3048 182 0.06 0.09 397 0.06954 0.59 1.453 0.7 0.1516 0.35 0.5 910 \pm 3 915 \pm 12 1 5.1 4427 540 0.13 0.05 638 0.07140 0.47 1.652 0.6 0.1678 0	9.1	1757	55	0.03	0.06	253	0.07099	0.67	1.639	2.4	0.1674	2.3	1.0	998 ± 22	957 ± 14	-4
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	11.1	2083	41	0.02	0.05	276	0.07169	0.6	1.522	2.4	0.154	2.3	1.0	923 ± 20	977 ± 12	6
1.151389490.190.067760.072180.421.7420.30.17150.310.6 1040 ± 3 991 ± 9 -52.119351420.080.062850.071350.751.6870.80.17150.40.5 1020 ± 4 967 ± 15 -53.132172780.090.054590.071450.771.6350.80.16600.350.4990 ± 3 970 ± 16 -24.130481820.060.093970.069540.591.4530.70.15160.350.5910 ± 3 915 ± 12 15.144275400.130.056380.071400.471.6520.60.16780.330.61000 ± 3 969 ± 10 -36.1541410130.190.158300.072240.451.7760.60.17830.320.61058 ± 3 993 ± 9 -67.128402940.110.084120.071510.611.6620.70.16850.370.51004 ± 3 972 ± 13 -38.120617150.363.822720.068102.91.3872.90.14790.460.2889 ± 4 870 ± 59 -29.132763500.110.054980.071130.541.7340.60.17680.350.51049 ± 3 961 ± 11 -8 </td <td>1 1</td> <td>5150</td> <td>0.40</td> <td>0.10</td> <td></td> <td>77(</td> <td>0.07219</td> <td>0.40</td> <td>5-Z</td> <td>0.5</td> <td>0 1751</td> <td>0.21</td> <td></td> <td>1040 1 2</td> <td>001 0</td> <td>5</td>	1 1	5150	0.40	0.10		77(0.07219	0.40	5-Z	0.5	0 1751	0.21		1040 1 2	001 0	5
2.119331420.080.062830.071330.731.0870.80.17130.40.510204907113-33.132172780.090.054590.071450.771.6350.80.16600.350.4990 ± 3 970 ± 16 -24.130481820.060.093970.069540.591.4530.70.15160.350.5910 ± 3 915 ± 12 15.144275400.130.056380.071400.471.6520.60.16780.330.61000 ± 3 969 ± 10 -36.1541410130.190.158300.072240.451.7760.60.17830.320.61058 ± 3 993 ± 9 -67.128402940.110.084120.071510.611.6620.70.16850.370.51004 ± 3 972 ± 13 -38.120617150.363.822720.068102.91.3872.90.14790.460.2889 ± 4 870 ± 59 -29.132763500.110.054980.071130.541.7340.60.17680.350.51049 ± 3 961 ± 11 -810.150017150.150.017420.07177 <t< td=""><td>1.1</td><td>1025</td><td>949 140</td><td>0.19</td><td>0.06</td><td>285</td><td>0.07218</td><td>0.42</td><td>1.742</td><td>0.5</td><td>0.1731</td><td>0.51</td><td>0.0</td><td>1040 ± 3 1020 ± 4</td><td>991 ± 9 067 ± 15</td><td>-5</td></t<>	1.1	1025	949 140	0.19	0.06	285	0.07218	0.42	1.742	0.5	0.1731	0.51	0.0	1040 ± 3 1020 ± 4	991 ± 9 067 ± 15	-5
3.1 3217 278 0.07 0.03 439 0.07143 0.77 1.033 0.38 0.1000 0.33 0.4 990 ± 3 970 ± 3 970 ± 10 -22 4.1 3048 182 0.06 0.09 397 0.06954 0.59 1.453 0.7 0.1516 0.35 0.5 910 ± 3 915 ± 12 1 5.1 4427 540 0.13 0.05 638 0.07140 0.47 1.652 0.6 0.1678 0.33 0.6 1000 ± 3 969 ± 10 -3 6.1 5414 1013 0.19 0.15 830 0.07224 0.45 1.776 0.6 0.1783 0.32 0.6 1000 ± 3 969 ± 10 -3 6.1 5414 1013 0.19 0.15 830 0.07224 0.45 1.776 0.6 0.1783 0.32 0.6 1058 ± 3 993 ± 9 -6 7.1 2840 294 0.11 0.08 412 0.07151 0.61 1.662 0.7 0.1685 0.37 0.5 1004 ± 3 972 ± 13 -3 8.1 2061 715 0.36 3.82 272 0.06810 2.9 1.387 2.9 0.1479 0.46 0.2 889 ± 4 870 ± 59 -2 9.1 3276 350 0.11 0.05 498 0.07113 0.54 1.734 0.6 0.1728 0.32 0.6 1027 ± 3 979 ± 9 -5 <td< td=""><td>2.1</td><td>3217</td><td>142 278</td><td>0.08</td><td>0.00</td><td>203 450</td><td>0.07135</td><td>0.75</td><td>1.007</td><td>0.8</td><td>0.1/13</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>1020 ± 4 000 ± 3</td><td>907 ± 13 070 ± 16</td><td>-3</td></td<>	2.1	3217	142 278	0.08	0.00	203 450	0.07135	0.75	1.007	0.8	0.1/13	0.4	0.5	1020 ± 4 000 ± 3	907 ± 13 070 ± 16	-3
4.1 3043 182 0.00 0.09 397 0.00934 0.39 1.433 0.7 0.1310 0.33 0.6 1000 ± 3 969 ± 10 -3 5.1 4427 540 0.13 0.05 638 0.07140 0.47 1.652 0.6 0.1678 0.33 0.6 1000 ± 3 969 ± 10 -3 6.1 5414 1013 0.19 0.15 830 0.07224 0.45 1.776 0.6 0.1783 0.32 0.6 1058 ± 3 993 ± 9 -6 7.1 2840 294 0.11 0.08 412 0.07151 0.61 1.662 0.7 0.1685 0.37 0.5 1004 ± 3 972 ± 13 -3 8.1 2061 715 0.36 3.82 272 0.06810 2.9 1.387 2.9 0.1479 0.46 0.2 889 ± 4 870 ± 59 -2 9.1 3276 350 0.11 0.05 498 0.07113 0.54 1.734 0.6 0.1768 0.35 0.5 1049 ± 3 961 ± 11 -8 10.1 5001 715 0.15 0.01 742 0.07177 0.44 1.710 0.6 0.1728 0.32 0.6 1027 ± 3 979 ± 9 -5 11.1 1727 19 0.01 0.06 232 0.06994 0.8 1.509 0.9 0.1565 0.43 0.5 937 ± 4 927 ± 16 -1	3.1 4.1	3048	182	0.09	0.03	307	0.07143	0.77	1.055	0.8	0.1000	0.35	0.4	990 ± 3 910 ± 3	970 ± 10 015 ± 12	-2
3.1 4427 546 6.15 6.05 6.33 6.07146 0.47 1.052 6.6 6.1673 6.53 6.6 1000 ± 3 905 ± 16 -35 6.1 5414 1013 0.19 0.15 830 0.07224 0.45 1.776 0.6 0.1783 0.32 0.6 1058 ± 3 993 ± 9 -6 7.1 2840 294 0.11 0.08 412 0.07151 0.61 1.662 0.7 0.1685 0.37 0.5 1004 ± 3 972 ± 13 -3 8.1 2061 715 0.36 3.82 272 0.06810 2.9 1.387 2.9 0.1479 0.46 0.2 889 ± 4 870 ± 59 -2 9.1 3276 350 0.11 0.05 498 0.07113 0.54 1.734 0.6 0.1768 0.35 0.5 1049 ± 3 961 ± 11 -8 10.1 5001 715 0.15 0.01 742 0.07177 0.44 1.710 0.6 0.1728 0.32 0.6 1027 ± 3 979 ± 9 -5 11.1 1727 19 0.01 0.06 232 0.06994 0.8 1.509 0.9 0.1565 0.43 0.5 937 ± 4 927 ± 16 -1 12.1 4978 769 0.16 0.02 778 0.07160 0.41 1.795 0.5 0.1819 0.32 0.6 1077 ± 3 975 ± 8 -10 <t< td=""><td>5 1</td><td>4427</td><td>540</td><td>0.00</td><td>0.05</td><td>638</td><td>0.00934</td><td>0.39</td><td>1.455</td><td>0.7</td><td>0.1510</td><td>0.33</td><td>0.5</td><td>910 ± 3 1000 ± 3</td><td>913 ± 12 969 ± 10</td><td>_3</td></t<>	5 1	4427	540	0.00	0.05	638	0.00934	0.39	1.455	0.7	0.1510	0.33	0.5	910 ± 3 1000 ± 3	913 ± 12 969 ± 10	_3
0.11 0.113 0.113 0.113 0.113 0.013 0.01224 0.113 0.113 0.01223 0.0133 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.01433 0.0233 0.01433 0.0233 0.01433 0.0233 0.01433 0.0233 0.01433 0.01333 0.01333 0.014333 0.014333 0.014333 0.013333 0.013333 0.0133333 0.0133333 0.01333333 0.013333333 0.01333333333 0.0133333333 0.013333333333 $0.0133333333333333333333333333333333333$	5.1 6.1	5414	1013	0.15	0.05	830	0.07140	0.47	1.052	0.0	0.1078	0.33	0.0	1000 ± 3 1058 ± 3	909 ± 10 993 + 9	-5 -6
1.1 2516 251 0.11 0.03 112 0.07151 0.01 1.002 0.17 0.1615 0.05 1.03125 0.1225 0.12215 1.03125 0.12215 1.03125 0.12215 1.03125 0.12215 1.03125 0.12215 1.03125 0.12215 1.03125 0.12215 0.12215 0.12215 0.1225 0.12215 0.12315 0.1616 0.02 0.12117 0.068111 0.10516 0.17710 0.141110 0.066 0.177210 0.141100 0.05205 0.11100 0.12215 0.11100 0.066222 0.0021717 0.14411570 0.16005 0.12215 0.122155 0.111010 0.0051607 0.12210000 0.05107221000 0.07160005 0.1111075 0.16100	0.1 7 1	2840	294	0.15	0.15	412	0.07224	0.45	1.770	0.0	0.1705	0.32	0.0	1000 ± 3 1004 ± 3	972 ± 13	_3
9.132763500.110.054980.071130.541.7340.60.17680.350.51049 ± 3 961 ± 11 -810.150017150.150.017420.071770.441.7100.60.17280.320.61027 ± 3 979 ± 9 -511.11727190.010.062320.069940.81.5090.90.15650.430.5937 ± 4 927 ± 16 -112.149787690.160.027780.071600.411.7950.50.18190.320.61077 ± 3 975 ± 8 -1013.121552310.110.103080.071670.71.6420.80.16610.390.5991 ± 4 977 ± 14 -114.121201000.050.072870.069870.721.5150.80.15730.40.5942 ± 3 924 ± 15 -212.2738914540.200.0211400.072400.361.79790.50.18010.30.61068 ± 3 997 ± 7 -7	8.1	2061	715	0.11	3.82	272	0.07131	2.9	1.387	2.9	0.1005	0.37	0.2	889 ± 4	972 ± 19 870 ± 59	-2
10.150.07150.150.017420.071770.441.7100.60.17280.320.61027 \pm 3979 \pm 9-511.11727190.010.062320.069940.81.5090.90.15650.430.5937 \pm 4927 \pm 16-112.149787690.160.027780.071600.411.7950.50.18190.320.61077 \pm 3975 \pm 8-1013.121552310.110.103080.071670.71.6420.80.16610.390.5991 \pm 4977 \pm 14-114.121201000.050.072870.069870.721.5150.80.15730.40.5942 \pm 3924 \pm 15-212.2738914540.200.0211400.072400.361.79790.50.18010.30.61068 \pm 3997 \pm 7-7	9.1	3276	350	0.20	0.05	498	0.07113	0.54	1.734	0.6	0.1768	0.35	0.5	1049 ± 3	961 ± 11	_8
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	10.1	5001	715	0.15	0.01	742	0.07177	0.44	1.710	0.6	0.1728	0.32	0.6	10.19 ± 3 1027 ± 3	979 ± 9	-5
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	11.1	1727	19	0.01	0.06	232	0.06994	0.8	1.509	0.9	0.1565	0.43	0.5	937 ± 4	927 ± 16	-1
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	12.1	4978	769	0.16	0.02	778	0.07160	0.41	1.795	0.5	0.1819	0.32	0.6	1077 ± 3	975 ± 8	-10
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	13.1	2155	231	0.11	0.10	308	0.07167	0.7	1.642	0.8	0.1661	0.39	0.5	991 ± 4	977 ± 14	-1
12.2 7389 1454 0.20 0.02 1140 0.07240 0.36 1.7979 0.5 0.1801 0.3 0.6 1068 \pm 3 997 \pm 7 -7	14.1	2120	100	0.05	0.07	287	0.06987	0.72	1.515	0.8	0.1573	0.4	0.5	942 ± 3	924 ± 15	-2
	12.2	7389	1454	0.20	0.02	1140	0.07240	0.36	1.7979	0.5	0.1801	0.3	0.6	1068 ± 3	997 ± 7	-7

Таблица 2. U—Pb-изотопные данные цирконов из адакитоподобных гранитов (обр. 12 и 14) и ортоклазовых лейкогранитогнейсов (обр. 63-2)

Примечание: ошибки приведены на уровне 16. Pb_c и Pb* – обыкновенный и радиогенный свинец. Ошибка калибровки стандарта 0.3–0.57%.¹ – Поправка на обыкновенный свинец проведена по измеренному ²⁰⁴Pb. *D*, % – дискордантность. *Rho* – коэффициент корреляции отношений ²⁰⁷Pb*/²³⁵U и ²⁰⁶Pb*/²³⁸U.

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 507 № 2 2022

	1						, ,	1					
Точка	Возраст, млн л.	176Yb/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	JH ⁷⁷ /JH ⁸⁷¹	±2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hfi	e _{Hf} (t)	±2σ	T _{DM} C
12													
5.1	981	0.070120	0.001782	0.001939	0.000079	0.282111	0.000079	1.467371	0.000201	0.282075	-3.0	2.8	2069
9.1	734	0.088927	0.002461	0.002149	0.000047	0.282061	0.000047	1.467236	0.000093	0.282031	10.0	1.6	2357
11.1	768	0.088193	0.002471	0.002283	0.000038	0.282327	0.000038	1.467256	0.000118	0.282294	0.1	1.3	1719
13.1	1005	0.090386	0.001425	0.002157	0.000028	0.282186	0.000028	1.467213	0.000061	0.282145	-0.1	1.0	1908
14.1	905	0.116953	0.005039	0.002656	0.000057	0.282064	0.000057	1.467143	0.000121	0.282019	-7.0	1.9	2304
	14 I I I I I I I I I I I I I I I I I I I										1		
1.1	915	0.075892	0.002170	0.001887	0.000059	0.282226	0.000059	1.467148	0.000131	0.282194	-0.2	2.0	1838
4.1	794	0.054000	0.001084	0.001411	0.000039	0.282247	0.000039	1.467301	0.000142	0.282226	-1.8	1.4	1838
4.2	880	0.069739	0.002717	0.001736	0.000028	0.282091	0.000028	1.467234	0.000060	0.282062	-5.7	1.0	2163
5.1	920	0.121001	0.007263	0.003384	0.000067	0.282163	0.000067	1.467275	0.000190	0.282105	-3.3	2.4	2085
6.1	838	0.073954	0.001859	0.001698	0.000054	0.282171	0.000054	1.467190	0.000144	0.282144	-4.0	1.8	2024
7.2	1011	0.104443	0.000558	0.002496	0.000037	0.282201	0.000037	1.467342	0.000076	0.282153	0.9	1.3	1853
8.1	908	0.111502	0.001375	0.002628	0.000028	0.282181	0.000028	1.467242	0.000056	0.282137	-2.4	1.0	2000
9.1	998	0.067254	0.001223	0.001822	0.000041	0.282168	0.000041	1.467259	0.000094	0.282134	-0.5	1.4	1916
11.1	923	0.068060	0.005419	0.001728	0.000068	0.282163	0.000068	1.467409	0.000123	0.282133	-2.2	2.3	1965

Таблица 3. Lu-Hf-изотопный состав циркона из адакитоподобных гранитов

Примечание: первичное отношение изотопов гафния $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_i$ рассчитано с использованием константы распада ${}^{176}\text{Lu}$ $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$; 2 σ два стандартных отклонения; $e_{\text{Hf}}(t)$ рассчитано с использованием значений ${}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf} = 0.0332$ и ${}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf} = 0.6282772$; T_{DM}^{C} – модельный возраст источника, рассчитанный по двухстадийной модели с использованием ${}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf} = 0.015$, основанной на выплавлении магмы из средней континентальной коры, образованной из деплетированной мантии.

тальные реконструкции позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, и именно ранние предположения об отсутствии на Енисейском кряже эндогенной активности и гренвильских коллизионных событий. Северным продолжением Гренвильского пояса, протягивающегося на расстоянии более 10000 км от западной Австралии до Свеконорвежского орогена Балтики, могли быть гренвиллиды западной окраины Сибирского кратона, свидетельства присутствия которых приведены в данной статье.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-77-20018) с дополнительной поддержкой полевых работ по госзаданиям ИГМ СО РАН и ИГГ УрО РАН (АААА-А18-118052590032-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова С.В., Писаревский С.А., Ли Ч.Х. Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17. № 3. С. 29–45.

- Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., Казанский А.Ю., Кадильников П.И., Романова И.В., Вингейт М.Т.Д., Ларионов А.Н., Родионов Н.В. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского кряжа и формирование западной окраины Сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. 2017. Т. 57. № 1. С. 63–90.
- Likhanov I.I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. V. 304–307. P. 468–488.
- 4. Попов Н.В., Лиханов И.И., Ножкин А.Д. Мезопротерозойский гранитоидный магматизм в заангарской части Енисейского кряжа: результаты U-Pb исследований // ДАН. 2010. Т. 431. № 4. С. 509– 515.
- Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In Ferrero S., Lanari P., Gonsalves P. and Grosch E.G. (Eds.) Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts // Geol. Soc. London Spec. Publ. 2019. V. 478. P. 89–115.
- 6. Лиханов И.И., Козлов П.С., Попов Н.В., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е. Коллизионный метамор-

физм как результат надвигов в заангарской части Енисейского кряжа // ДАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 235–239.

- Коробейников С.Н., Полянский О.П., Лиханов И.И., Свердлова В.Г., Ревердатто В.В. Математическое моделирование надвига как причины формирования андалузит-кианитовой метаморфической зональности в Енисейском кряже // ДАН. 2006. Т. 408. № 4. С. 512–516.
- Likhanov I.I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian Res. 2017. V. 300. P. 315– 331.
- 9. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В. Неопротерозойский дайковый пояс Заангарья Енисейского кряжа как индикатор процессов растяжения и распада Родинии // ДАН. 2013. Т. 450. № 6. С. 685–690.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Геохимия, возраст и особенности петрогенезиса пород гаревского метаморфического комплекса Енисейского кряжа // Геохимия. 2014. Т. 52. № 1. С. 3–25.
- Xiao L., Clemens J.D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints // Lithos. 2007. V. 95. P. 399–414.
- Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. V. 347. P. 662–665.

- 13. *Martin H*. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. 1999. V. 46. P. 411–429.
- Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In Coward M.P., Ries A.C. (Eds.) Collisions tectonics // Geol. Soc. London Spec. Publ. 1986. V. 19. P. 67–81.
- 15. *Pearce J.A.* Sources and settings of granitic rocks // Episodes. 1996. V. 4. P. 120–125.
- 16. *Гусев А.И.* Петрология адакитовых гранитоидов. М.: Академия естествознания, 2014. 151 с.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Крылов Д.П., Ларин А.М. Геодинамическая типизация адакитовых гранитоидов по геохимическим данным // Петрология. 2018. Т. 3. С. 255–264.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Лиханов И.И., Дмитриева Н.В. Позднепалеопротерозойские вулканические ассоциации на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 312–332.
- Likhanov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. 2019. V. 328. P. 128–145.
- Johansson Å. From Rodinia to Gondwana with the 'SAMBA' model—A distant view from Baltica towards Amazonia and beyond // Precambrian Research. 2014. V. 244. P. 226–235.

PETROGENESIS, U-Pb AGE, AND Lu-Hf SYSTEMATICS OF ROCKS FROM THE GAREVKA COMPLEX OF THE NORTHERN YENISEI RIDGE: EVIDENCE OF GRENVILLE EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON

I. I. Likhanov^{a,#}, Academician of the RAS V. V. Reverdatto^a, P. S. Kozlov^b, K. A. Savko^c, and A. A. Krylov^a

 ^aSobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
^bZavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

Zavariisky Institute of Geology and Geochemistry, Oral Branch of the Russian Academy of Sciences Yekaterinburg, Russian Federation

^cVoronezh State University, Voronezh, Russian Federation

[#]E-mail: likh@igm.nsc.ru

It is shown for the first time that biotite plagiogneisses from the Garevka complex of the North Yenisei Ridge have geochemical characteristics of C-type adakites with island-arc melt sources. The Hf isotopic composition in zircons indicates the participation of several sources in the formation of the granite melt, including juvenile mantle and older crustal rock protoliths with model ages $T_{Hf}(DM)^c = 1838-1916$ Ma and 1965–2357 Ma, respectively. Based on the results of U-Pb dating of zircons, new pulses of Neoproterozoic endogenous activity at the western margin of the Siberian craton (913 ± 11 and 915 ± 36 Ma for adakite-like granites and 932 ± 26 Ma for leucogranites) were determined, correlating with the Grenville tectonic events. These Grenville episodes of regional crustal evolution are correlated with the synchronous successions and similar style of rocks along the Arctic margin of Rodinia and supports the spatial proximity of Siberia and North Atlantic cratons (Laurentia and Baltica), which is consistent with the proposed Neoproterozoic paleogeographic reconstructions of the Rodinia.

Keywords: adakite-like rocks, geochemistry, formation settings, U-Pb dating and Lu-Hf zircon isotope systematics, Yenisei Ridge