

УДК 550.93:552.32(470.1)

ГРАНИТОИДЫ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ЗОНЫ ФУНДАМЕНТА ПЕЧОРСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ: СОСТАВ И U-Pb ВОЗРАСТ

В.Л. Андреичев¹, А.А. Соболева¹, Е.Г. Довжикова², Ю.Л. Ронкин³, Э.Л. Миллер⁴, М.А. Кобл⁴

¹Институт геологии им. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, Россия

²Ухтинский государственный технический университет, 169300, Ухта, ул. Первомайская, 13, Россия

³Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

⁴Stanford University, 450 Serra Mall, Stanford, CA 94305, USA

Рассмотрены U-Pb (SIMS, SHRIMP-RG) возрасты цирконов и геохимические характеристики гранитоидов, вскрытых двумя скважинами на глубине около 4.5 км в Большеземельской зоне — северо-восточном блоке фундамента Печорской синеклизы. Граниты в скв. 26-Восточная Харьяга с возрастом 558 ± 6 млн лет близки по составу и возрасту к синколлизонным гранитам чаркаюского гранит-гранодиоритового комплекса (555—544 млн лет) Припечорской разломной (сутурной) зоны. Существенно калиевые гранодиориты и граносиениты из скв. 2-Веяк с возрастом 607 ± 6 млн лет имеют геохимические черты внутриплитных гранитоидов и коррелируются с гранитами (602—595 млн лет) юго-восточной части Ижемской зоны фундамента, представляющей собой погруженную часть северо-восточной пассивной окраины палеоконтинента Балтика.

Печорская синеклиза, Большеземельская зона, фундамент, граниты, циркон, U-Pb возраст

GRANITOIDS IN THE BOLSHEZEMELSKAYA ZONE OF THE PECHORA BASIN BASEMENT: COMPOSITION AND U-Pb AGE

V.L. Andreichev, A.A. Soboleva, E.G. Dovzhikova, Yu.L. Ronkin, E.L. Miller, M.A. Coble

We present the U-Pb (secondary-ion mass spectrometry, SHRIMP-RG) zircon ages and geochemical characteristics of granitoids penetrated by two boreholes at a depth of about 4.5 km in the Bolshezemel zone—the northeasternmost block of the Pechora Basin basement. The age of zircon from granites from the 26-East Khar'yaga borehole is 558 ± 6 Ma. These granites are similar in composition and age to syncollisional granites of the Charkayu granite–granodiorite complex of the Pripechora fault (suture) zone (555—544 Ma). Dating of zircon from granodiorite from the 2-Veyak borehole yielded an age of 607 ± 6 Ma. Potassium-rich granodiorites and granosyenites from this borehole have geochemical features of within-plate granites and are correlated with granites (602—595 Ma) of the southeastern part of the Izhma crustal block of the basement, which is supposed to be a submerged part of the northeastern passive margin of the Baltica paleocontinent.

Pechora Basin, Bolshezemel crustal block, basement, granites, zircon, U-Pb age

ВВЕДЕНИЕ

В геологической эволюции Печорской синеклизы одним из дискуссионных моментов является возраст интрузивных пород фундамента. Длительное время он основывался на небольшом количестве K-Ar возрастных определений [Акимова, 1980; Фишман и др., 1981]. Их диапазон достаточно велик (810—354 млн лет), но преобладающая часть, приуроченная к интервалу 600—500 млн лет, служила основанием считать породы венд-кембрийскими. Последующие геохронологические исследования были связаны с Pb-Pb датированием единичных зерен циркона методом ступенчатого испарения свинца (Pb-evaporation) из семи проб гранитов и диоритов [Gee et al., 2000]. В шести пробах возраст цирконов варьирует в узком интервале 567—551 млн лет, а в одной пробе цирконы показали возраст 618 млн лет.

При датировании цирконов по отношению радиогенных изотопов свинца отсутствует контроль конкордантности, поэтому для подтверждения Pb-Pb возрастов необходим U-Pb анализ. Кроме того, из-за низких содержаний радиогенного ^{207}Pb в относительно молодых (<1 млрд лет) цирконах потенциально более надежны $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрасты [Борисова и др., 1995]. Исходя из этих представлений, для получения непротиворечивой картины хронологии интрузивного магматизма фундамента Печорской синеклизы был предпринят по имеющемуся в нашем распоряжении керновому материалу U-Pb анализ цирконов методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS).

© Андреичев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г., Ронкин Ю.Л., Миллер Э.Л., Кобл М.А., 2023

✉ e-mail: aa_soboleva@mail.ru

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ ФУНДАМЕНТА ПЕЧОРСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Печорская синеклиза является самой крупной тектонической структурой в составе Печорской (Тимано-Печорской) плиты и располагается между Тиманом и Предуральским краевым прогибом (рис. 1). Неоднородный верхнедокембрийский фундамент синеклизы, называемый тиманидами, повсеместно перекрыт осадочным чехлом, сформированным ордовикско-кайнозойскими платформенными неметаморфизованными осадочными и вулканогенными образованиями мощностью 1—7 км, поэтому источниками информации о геологическом строении фундамента служили геофизические данные и керн более чем 200 скважин разных категорий глубиной до 5 км [Белякова и др., 2008]. Поскольку бурение производилось на нефть и газ, то в большинстве скважин проходка по породам фундамента составляла первые десятки, реже сотни метров.

В фундаменте Печорской плиты выделяют два мегаблока: Тиманский, состоящий из Тимана на юго-западе и Ижемской зоны на северо-востоке, и Большеземельский, в пределах которого расположены Печорская (ЮЗ) и Большеземельская (СВ) зоны [Белякова, 1983; Дедеев, Запорожцева, 1985; Белякова и др., 2008]. Вместе Ижемский, Печорский и Большеземельский блоки составляют фундамент Печорской синеклизы (см. рис. 1). Границей между Тиманским и Большеземельским мегаблоками является система Припечорского и Илыч-Чикшинского глубинных разломов, которые протягиваются в северо-западном направлении от Урала до Печорского моря и, как считается, представляют собой структуру, простирающуюся до верхней части мантии [Костюченко, 1994; Оловянишников и др., 1996]. Эти разломы, не выраженные на поверхности, зафиксированы по положительной магнитной аномалии, именуемой Припечорской [Гафаров, 1970].

Геофизическими работами и по материалам бурения установлено отчетливое различие фундамента Тиманского и Большеземельского мегаблоков, а также разделяющей их Припечорско-Илыч-Чикшинской зоны разломов.

Тиманский мегаблок слагают преимущественно терригенные и в меньшей степени карбонатные отложения, локально обнаженные в пределах отдельных кулисообразно расположенных горстообразных, удлинённых поднятий Тимана. В Ижемской зоне (см. рис. 1) вскрытые скважинами рифейские сланцы, с резким несогласием перекрываемые палеозойским осадочным чехлом, вполне сопоставляются по составу протолита со сланцами Тимана. Магматические породы представлены преимущественно гранитоидами, отдельными скважинами вскрыты монзониты, сиениты и диориты. Степень метаморфизма вмещающих их пород увеличивается с запада на восток и достигает условий биотит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации.

В Припечорско-Илыч-Чикшинской зоне разломов, а также в Печорской зоне (см. рис. 1) фундамент сложен последовательно дифференцированными вулканогенными породами базальт-андезит-дацит-риолитовой известково-щелочной серии и их туфами с прослоями филлитовидных сланцев, выделяемыми в возейскую свиту (> 300 м), условно относимую к верхам рифея—нижнему венду [Белякова, 1983]. Ультраосновные породы предполагаются лишь по гравимагнитным аномалиям, а породы основного, среднего и кислого составов устанавливаются по результатам бурения.

В Большеземельской зоне дислоцированные вулканогенные породы возейской свиты слагают нижний ярус доордовикского разреза, а верхний представлен породами сандивейской свиты (~500 м), считающейся молассой [Белякова, 1982]. Эта свита сложена красноцветными и сероцветными ритмично-слоистыми терригенными и туфотерригенными отложениями, среди которых значительную роль играют туффиты и вулканиты кислого состава. Вулканогенно-обломочные породы перекрываются горизонтально лежащими фаунистически охарактеризованными отложениями ордовика. Под этим несогласием на основании крупных положительных гравимагнитных аномалий предполагается широкое распространение основных и ультраосновных пород [Костюченко, 1994], а бурением вскрыты гранитоиды, габбро и долериты. Метаморфические преобразования пород Большеземельского мегаблока отвечают преимущественно мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации.

Общее строение фундамента Печорской синеклизы, наблюдаемый спектр магматических пород фундамента Тиманского мегаблока с составами, типичными для внутриплитной геодинамической обстановки, послужили основанием интерпретировать этот мегаблок как северо-восточную (в современных координатах) пассивную континентальную окраину Восточно-Европейского континента [Гецен, 1991]. Пассивная окраина простиралась в северо-восточном направлении до Припечорско-Илыч-Чикшинской зоны разломов (см. рис. 1), вдоль которой функционировала предполагаемая зона субдукции и связанная с ней островодужная система, занимавшая юго-западную часть Большеземельского мегаблока (Печорскую зону) [Белякова, Степаненко, 1991; Белякова, Довжикова, 2006; Белякова и др., 2008]. Предполагается, что в позднем докембрии Большеземельская зона представляла собой океанический бассейн [Костюченко, 1994], в пределах которого располагались разновеликие фрагменты ранне(?)докембрийской континентальной коры. Самый крупный из них носит название Хорейверского микрокон-

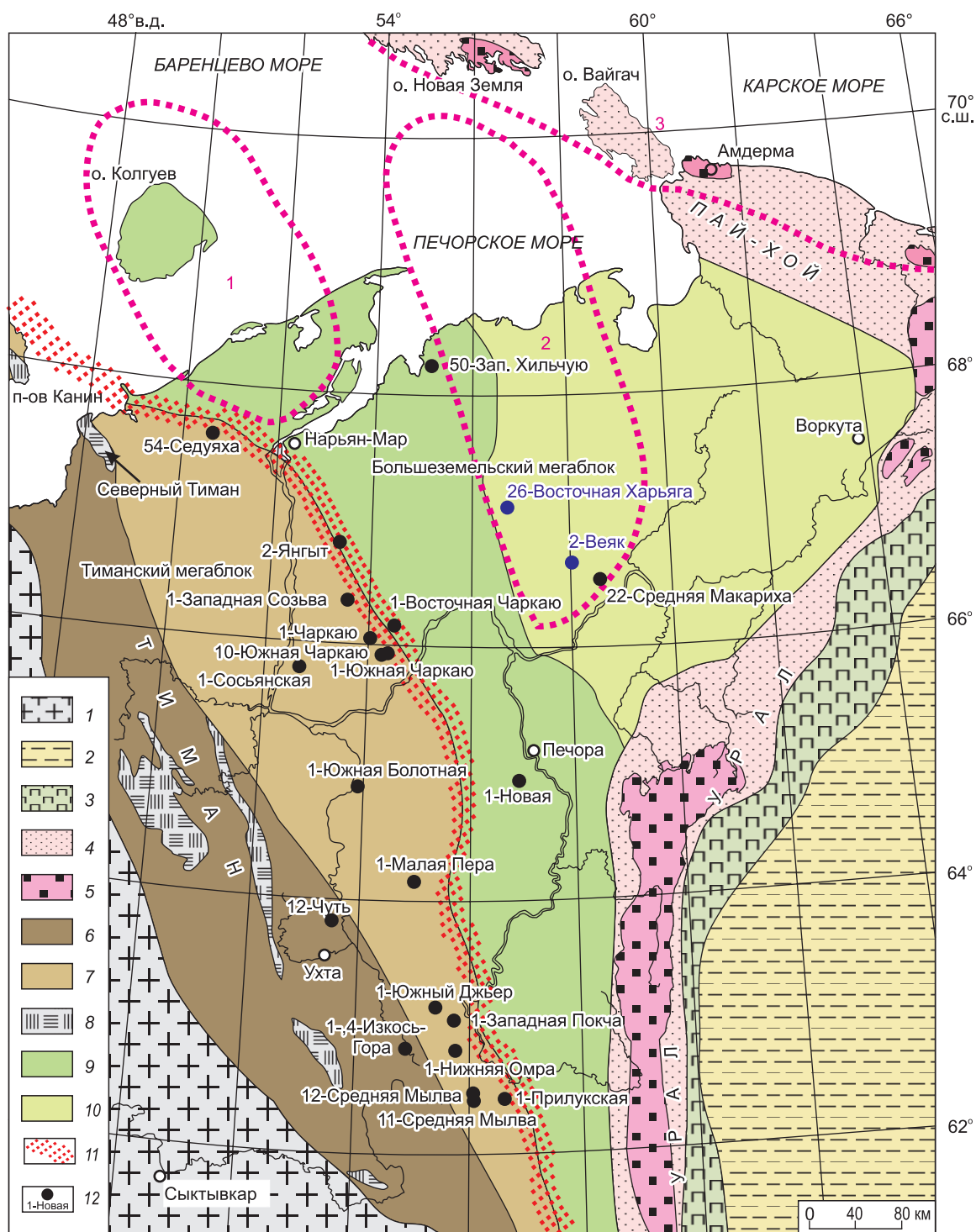


Рис. 1. Тектоническое строение фундамента Печорской синеклизы и ее обрамления, по [Тимано-Печорский..., 2000; Белякова и др., 2008].

1 — Восточно-Европейский кратон; 2 — Западно-Сибирская плита; 3—5 — Урал: 3 — Восточно-Уральская палеозойская мегазона; 4 — Западно-Уральская палеозойская мегазона, палеозойские комплексы Пай-Хоя, о-вов Вайгач, Новая Земля; 5 — Центрально-Уральская позднедокембрийская мегазона, верхнедокембрийские комплексы Пай-Хоя, о-вов Вайгач, Новая Земля; 6—11 — фундамент Печорской плиты: 6 — Тиман; 7 — Ижемская зона; 8 — выходы на поверхность комплексов фундамента; 9 — Печорская зона; 10 — Большеземельская зона; 11 — Припечорско-Илыч-Чикшинская зона разломов (северо-западная часть — Припечорский разлом, юго-восточная часть — Илыч-Чикшинский разлом); 12 — скважины, вскрывшие гранитоиды. Розовые пунктирные линии и цифры — раннедокембрийские(?) микроконтиненты: 1 — Колгуевский, 2 — Хорейверский, 3 — Ямало-Новоземельский [Оловянишников, 2007]. Синим выделены скважины, из которых отобраны образцы для датирования циркона.

тинента, и предположение о его существовании основано на геофизических данных по центральной части Большеземельской зоны [Гецен, 1987, 1991; Берлянд, 1989; Белякова и др., 2008]. Начало дискуссии о существовании в Большеземельской тундре погребенной жесткой глыбы кристаллического фундамента дорифейской консолидации, повлиявшей на простираание уральских и пайхойских структур, было положено А.П. Карпинским [1919]. Это предположение имеет достаточно много сторонников, но местонахождение блока и его размеры пока не подтверждаются результатами бурения, возможно, по причине отсутствия скважин достаточной глубины. С начала XXI в. широко обсуждаются представления [Kuznetsov et al., 2007] о том, что Припечорско-Ильч-Чикшинская зона разломов является сутурой, по которой в конце неопротерозоя—кембрия приведены в соприкосновение в ходе континентальной коллизии комплексы пассивной окраины Балтики и активной окраины Арктиды, в составе которой могли присутствовать магматические комплексы, сформированные в различных геодинамических обстановках — островодужные, преддуговые, задугового спрединга и аккреционные. В строении этой окраины могли участвовать также аккрецированные докембрийские террейны, такие как Хорейверский микроконтинент.

В докембрийской истории геологического развития Печорской синеклизы одной из самых больших проблем является возраст гранитоидов, вскрытых скважинами во всех зонах фундамента (см. рис. 1). В последние годы нами было проведено U-Pb датирование цирконов, используя масс-спектрометрию вторичных ионов из гранитоидов ряда скважин в Ижемской и Припечорской зонах. Установлено, что почти все гранитные массивы имеют эдиакарский возраст. Из них два гранитных массива, вскрытых скважинами 1-Нижняя Омра (602 ± 2 млн лет) и 1-Прилукская (595 ± 14 млн лет) в Ижемской зоне [Андреичев и др., 2014б], имеют наибольшие возрасты. (Все приводимые в тексте погрешности соответствуют 2σ .) Более молодые массивы имеют более широкое распространение, в их числе гранитное тело скв. 11-Малая Пера (557 ± 1 млн лет) [Андреичев и др., 2014б] и гранитоиды чаркаюского комплекса с близкими цирконовыми датировками (555—544 млн лет), вскрытые скважинами 1-Чаркаю, 1-Восточная Чаркаю, 1-Южная Чаркаю [Андреичев и др., 2017] и 54-Седуха [Андреичев и др., 2014а] в зоне Припечорского разлома (см. рис. 1). Эти позднеэдиакарские граниты считаются синорогенными и связаны с завершающими стадиями тиманского тектогенеза [Андреичев и др., 2017]. Гранитоиды в Большеземельской зоне встречаются значительно реже, они вскрыты лишь несколькими скважинами. В нашем сообщении представлены геохимические данные и первые результаты U-Pb (SIMS) датирования цирконов из этих пород.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концентрации петрогенных элементов, представленных в виде оксидов (табл. 1), определены методом традиционного химического анализа в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) по методикам, описанным в [Унифицированные методы..., 1979]. Определения содержаний элементов-примесей (табл. 2) выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в Институте геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург) и во ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург), процедуры опубликованы в [Ронкин и др., 2005] и на <https://vsegei.ru/ru/activity/labanalytics/lab/lab-operations/masspec.php>.

U-Pb датирование циркона из гранитов скважин 26-Восточная Харьяга и 2-Веяк с использованием масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) было выполнено на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США, согласно стандартным процедурам [Ireland, Gibson, 1998; Coble et al., 2018]. Католюминесцентные изображения цирконов были получены в той же лаборатории на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащенный католюминесцентным детектором. Обработка полученных аналитических данных проведена с помощью программы SQUID-2 [Ludwig, 2009]. При построении диаграмм с конкордией в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ использовалась программа ISOPLOT/Ex [Ludwig, 2012]. Отношения Pb/U нормированы на значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0668$ в стандартном цирконе TEMORA, что соответствует возрасту 416.75 млн лет [Black et al., 2003]. Концентрации микроэлементов стандартизированы по циркону MAD-559 [Coble et al., 2018].

ГРАНИТЫ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ЗОНЫ — СОСТАВ И ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большеземельская зона занимает самую северо-восточную часть Печорской синеклизы, примыкающую к Уралу и Пай-Хою (см. рис. 1). Гранитоиды вскрыты скважинами 26-Восточная Харьяга, 2-Веяк и 22-Средняя Макариха. В скважине 26-Восточная Харьяга гранитоиды подстилают ордовикские осадочные породы, а в скважинах 2-Веяк и 22-Средняя Макариха установлены амфиболитизированные габбро. По гравиметрическим данным предполагается, что на глубине может находиться значительный объем основных и ультраосновных пород [Костюченко, 1994].

Таблица 1.

Содержание петрогенных оксидов в гранитах, мас. %

Компонент	Скв. 26-Восточная Харьяга								
	4408.7—4416.3 м		4416.3—4423.9 м	4423.9—4431.9 м		4431.9—4441.1 м		4441.1—4449.2 м	
	26	26/1	27/1	28/1	28/2	29/1	29/3	30/1	30/3
SiO ₂	72.50	73.88	77.90	75.94	75.02	75.74	76.96	75.26	76.48
TiO ₂	0.19	0.20	0.10	0.10	0.16	0.20	0.20	0.16	0.16
Al ₂ O ₃	12.94	12.48	12.45	12.68	12.32	12.29	12.61	12.45	12.63
Fe ₂ O ₃	1.74*	0.20	0.54	0.78	0.74	0.82	0.72	0.62	0.72
FeO	—	0.72	0.50	0.43	0.50	0.43	0.43	0.43	0.43
MnO	0.06	0.09	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03
MgO	0.64	0.95	0.77	0.78	0.87	0.77	0.77	0.86	0.58
CaO	0.57	1.40	0.56	0.56	0.42	0.28	0.42	0.70	0.48
Na ₂ O	0.31	1.28	1.24	2.25	0.78	0.95	2.48	1.78	2.19
K ₂ O	8.87	6.24	4.56	4.80	7.39	7.20	4.46	5.62	5.23
P ₂ O ₅	0.11	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
П.п.п.	1.89	2.47	1.10	1.16	1.20	0.77	0.79	1.77	0.95
Сумма	99.82	99.96	99.83	99.56	99.49	99.55	99.92	99.74	99.90

Компонент	Скв. 2-Веяк									
	4388—4395 м					4500—4507 м		4526—4533 м		
	31	31/1	31/3	31/4	31/5	32/1	32/2	33/1	33/2	33/10
SiO ₂	63.73	68.76	68.32	67.50	68.02	66.76	66.54	68.20	68.18	68.05
TiO ₂	0.91	0.40	0.60	0.60	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60
Al ₂ O ₃	12.47	13.37	13.24	14.01	13.11	13.24	13.24	13.11	13.10	12.23
Fe ₂ O ₃	6.90*	1.65	1.80	1.65	0.85	0.81	0.65	0.28	0.96	0.20
FeO	—	2.30	2.88	3.02	3.74	5.76	5.18	4.61	4.18	4.32
MnO	0.08	0.02	0.03	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.04	0.06
MgO	1.93	1.20	1.37	1.27	2.07	2.37	2.27	1.98	2.18	1.47
CaO	3.26	2.24	2.38	3.78	1.68	0.98	1.12	1.68	1.26	2.38
Na ₂ O	3.53	2.60	2.60	5.02	2.44	2.27	2.21	2.27	2.78	2.60
K ₂ O	4.14	5.86	5.38	1.08	4.32	3.98	4.80	4.18	3.98	4.32
P ₂ O ₅	0.25	0.20	0.18	0.20	0.21	0.22	0.20	0.21	0.19	0.17
П.п.п.	2.61	0.71	0.80	1.21	2.17	2.59	2.49	2.24	2.16	3.38
Сумма	99.81	99.31	99.58	99.40	99.47	99.84	99.53	99.60	99.81	99.78

Примечание. Образцы 26 и 31 из [Pease et al., 2004], остальные из [Белякова и др., 2008]. Анализы, в которых все железо представлено в виде Fe₂O₃, отмечены звездочкой.

Гранитоиды в скважинах 26-Восточная Харьяга и 2-Веяк подразделяются на два типа.

Граниты первого типа вскрыты скв. 26-Восточная Харьяга на глубине 4409—4449 м (наибольшая глубина отвечает забою скважины). Это розовые средне- и крупнозернистые породы, состоящие из табличек плагиоклаза (30—35 об. %) и ксеноморфных зерен калиевого полевого шпата (30—35 об. %), а также кварца (20—25 об. %), биотита и мусковита. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, турмалином и гранатом. Вторичные изменения выражаются в серицитизации и карбонатизации плагиоклаза, замещении биотита хлоритом и титанитом, граната — хлоритом. Породы содержат 72.5—77.9 мас. % SiO₂ (см. табл. 1) и классифицируются как граниты и лейкограниты. Высокие содержания (мкг/г) Ba (691—694) при умеренных концентрациях Rb (80—135), Nb (8—11), Th (9), U (1—2), низких Sr (39—57), Zr (26—90); высокие значения K/Rb (497—545) при низких Rb/Sr (1.39—3.43) и Rb/Ba (0.12—0.20) (см. табл. 2) позволяют относить эти граниты к лейкократовому подтипу I-гранитов согласно классификации Б. Чаппела и А. Уайта [Whalen et al., 1987]. Граниты характеризуются умеренными суммарными содержаниями редких земель (69—193 мкг/г), обогащением легкими РЗЭ относительно тяжелых (La_N/Yb_N — 10.7—11.1) и небольшим дефицитом Eu (Eu_N/Eu_N* — 0.7) (рис. 2, а). Они обогащены крупноионными литофильными элементами (K, Rb, Ba, Th), обеднены высокотоксичными элементами

Таблица 2. Содержание элементов-примесей в гранитах Большеземельской зоны, г/т

Компонент	26-Вост. Харьяга		2-Веяк		Компонент	26-Вост. Харьяга		2-Веяк	
	26а	30	31b	33		26а	30	31b	33
Li	—	16.92	—	21.18	Ce	81.12	29.00	118.24	84.18
Be	1.77	1.16	1.45	1.79	Pr	8.49	3.37	14.56	10.81
Sc	—	3.76	—	10.70	Nd	31.00	12.73	56.40	46.05
V	10.91	9.75	61.29	37.81	Sm	6.40	2.75	12.67	10.92
Cr	34.37	1.81	53.94	8.76	Eu	1.36	0.58	1.99	1.71
Co	2.21	1.08	9.30	6.63	Gd	5.52	2.32	10.74	11.45
Ni	18.09	1.46	20.89	4.60	Tb	0.84	0.29	1.84	1.84
Cu	8.20	17.15	18.33	9.93	Dy	4.78	1.57	11.21	11.40
Zn	12.56	8.85	69.04	47.27	Ho	1.02	0.29	2.30	2.32
Ga	14.38	11.58	20.96	14.26	Er	2.71	0.82	6.02	6.53
Ge	—	1.46	—	0.88	Tm	0.41	0.13	0.95	0.95
Rb	135.16	79.90	132.89	63.81	Yb	2.89	0.85	6.43	5.69
Sr	39.46	57.43	75.35	495.06	Lu	0.44	0.13	0.94	0.81
Y	32.84	5.37	64.02	39.95	Hf	2.94	1.33	10.55	2.48
Zr	90.04	26.66	406.69	52.00	Ta	1.20	0.91	1.27	1.01
Nb	11.30	8.19	14.69	10.73	W	—	0.42	—	0.99
Mo	—	0.13	—	6.47	Tl	—	0.50	—	0.43
Ag	—	0.59	—	0.85	Pb	—	8.92	—	8.93
Cd	—	0.01	—	0.02	Bi	—	0.04	—	0.19
Sn	—	1.28	—	3.76	Th	8.91	8.88	17.00	16.50
Sb	—	0.13	—	0.12	U	1.31	1.64	2.94	2.23
Te	—	0.01	—	0.01	K/Rb	545	496	259	398
Cs	—	4.77	—	2.38	Rb/Sr	3.43	1.39	1.76	0.13
Ba	690.79	693.86	571.00	558.59	Rb/Ba	0.20	0.12	0.23	0.11
La	45.94	14.02	50.65	36.55	Ga/Al	2.10	1.61	3.17	2.01

Примечание. Образцы 26а и 31b из [Pease et al., 2004]. Прочерк — определение элемента не производилось.

ми (Zr, Hf, HREE) и не проявляют Ta и Nb аномалий по сравнению с модельным составом гранита СОХ [Pearce et al., 1984] (см. рис. 2, б). Эти граниты очень близки по составу к гранитам из скважин 1-Чаркаю, 1-Южная Чаркаю и 1-Восточная Чаркаю в Припечорской разломной зоне, которые интерпретируются как орогенные граниты тиманид [Белякова, Довжикова, 2006]. На дискриминационной диаграмме Дж. Пирса в координатах Rb—(Y + Nb) [Pearce et al., 1996] точки составов гранитов, вскрытых скв. 26-Восточная Харьяга, попадают в поле островодужных гранитов и область перекрытия с постколлизийными образованиями (см. рис. 2, в).

Ко второму типу относятся гранитоиды в скв. 2-Веяк (4300—4533 м), прорывающие амфиболитизированные долериты. Эти красно-серые среднезернистые породы состоят из калиевого полевого шпата (35—50 об. %), плагиоклаза (20—35 об. %), кварца (20 об. %), клинопироксена (до 10 об. %), зеленой роговой обманки или зеленого биотита (до 5 об. %). Акцессорные минералы весьма распространены и представлены титанитом, апатитом, цирконом и магнетитом. Вторичные изменения выражены в сосюритизации плагиоклаза, пелитизации калиевого полевого шпата и замещении клинопироксена хлоритом, а биотита — хлоритом и гидроксидами железа. Породы содержат 63.7—68.8 мас. % SiO₂, до 5.9 мас. % K₂O (см. табл. 2) и являются гранодиоритами и граносиенитами. Высокие содержания Ba (мкг/г) (558—571), V (38—61), Ni (5—20), Sr (75—495) при умеренных концентрациях Rb (64—133), Nb (11—15), Th (17), U (2—3); относительно высокие значения K/Rb (259—398) при низких Rb/Ba (0.11—0.23) (см. табл. 2) формально позволяют классифицировать эти породы как гранитоиды I-типа. Однако они отличаются от типичных I-гранитов (и гранитов из скв. 26-Восточная Харьяга) более высокими содержаниями K₂O, TiO₂ (0.40—0.91 мас. %), Y (40—64 мкг/г), Zr (52—407 мкг/г). Суммарные концентрации РЗЭ и высокочarged элементов в этих породах выше, чем в гранитах скв. 26-Восточная Харьяга (231—295 мкг/г), а обогащение легкими РЗЭ относительно тяжелых — ниже из-за более высоких содержаний в них тяжелых РЗЭ (La_N/Yb_N — 4.3—5.3) (см. рис. 2). На диаграмме Дж. Пирса [Pearce et al.,

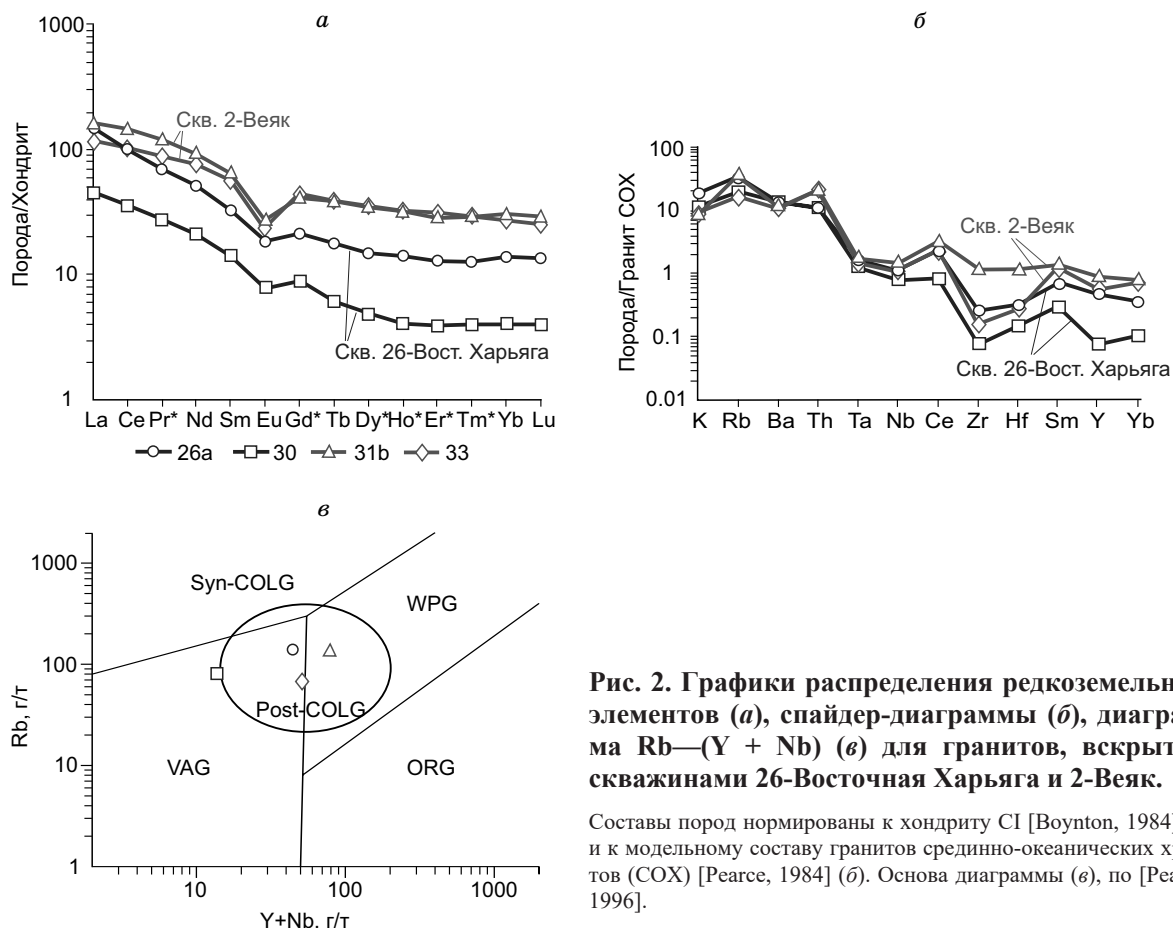


Рис. 2. Графики распределения редкоземельных элементов (а), спайдер-диаграммы (б), диаграмма Rb—(Y + Nb) (в) для гранитов, вскрытых скважинами 26-Восточная Харьяга и 2-Веяк.

Составы пород нормированы к хондриту CI [Boynnton, 1984] (а) и к модельному составу гранитов срединно-океанических хребтов (COX) [Pearce, 1984] (б). Основа диаграммы (в), по [Pearce, 1996].

1996] составы рассматриваемых гранитоидов расположены в поле внутриплитных гранитов и на границе этого поля с областью составов островодужных гранитоидов, попадая в область перекрытия этих полей с составами постколлизийных образований (см. рис. 2, в).

Граниты Большеземельской зоны различаются не только по составу, но и по возрасту. Первые данные были получены при Pb-Pb датировании единичных зерен циркона методом ступенчатого испарения свинца (Kober technique) [Gee et al., 2000]. В скважине 2-Веяк средневзвешенный возраст по 25 ступеням испарения в четырех зернах составил 618 ± 6 млн лет. В скважине 26-Восточная Харьяга анализировались шесть зерен, но лишь в двух зернах по восьми ступеням испарения получен возраст 567 ± 36 млн лет. Остальные зерна с возрастом от 647 до 1447 млн лет считаются унаследованными [Gee et al., 2000].

Эти результаты нашли подтверждение при Rb-Sr датировании [Андреичев, Литвиненко, 2007]. Изохронный возраст гранитов из скв. 2-Веяк по изотопному составу валовых проб (5 анализов) составил 615 ± 7 млн лет ($I_{Sr} = 0.70622 \pm 0.00015$, СКВО = 0.24). Возраст гранитов из скв. 26-Восточная Харьяга (5 валовых проб + 2 пробы КППШ) равен 561 ± 12 млн лет ($I_{Sr} = 0.70457 \pm 0.00078$, СКВО = 1.0).

Для подтверждения возраста, полученного по двум изотопным системам, нами проведено U-Pb (SIMS) датирование отдельных зерен циркона из гранитов скважин 26-Восточная Харьяга и 2-Веяк, используя SIMS.

U-Pb ВОЗРАСТ ЦИРКОНА

Зерна циркона из гранитов, вскрытых скв. 26-Восточная Харьяга (обр. 30, гл. 4441—4449 м), представляют собой субидиоморфные, бипирамидально-призматические кристаллы с наиболее развитыми гранями пирамиды (111) и призмы (100). Зерна циркона светло-желтые, светло-желтовато-розовые, прозрачные и полупрозрачные со слегка шероховатыми поверхностями граней. Длина зерен 0.15—0.20 мм при коэффициенте удлинения 1.5—4.0. Цирконы содержат многочисленные мелкие включения, которые в проходящем свете имеют коричневатый-красный цвет. Реже наблюдаются светло-розовые прозрачные зерна копьевидного облика размером 0.1—0.2 мм с коэффициентом удлинения около 4. Катодолюминесцентные изображения (рис. 3) демонстрируют наличие во всех зернах циркона хорошо проявленной осцилляционной зональности с достаточно широкими четкими зонами роста и отсутствие

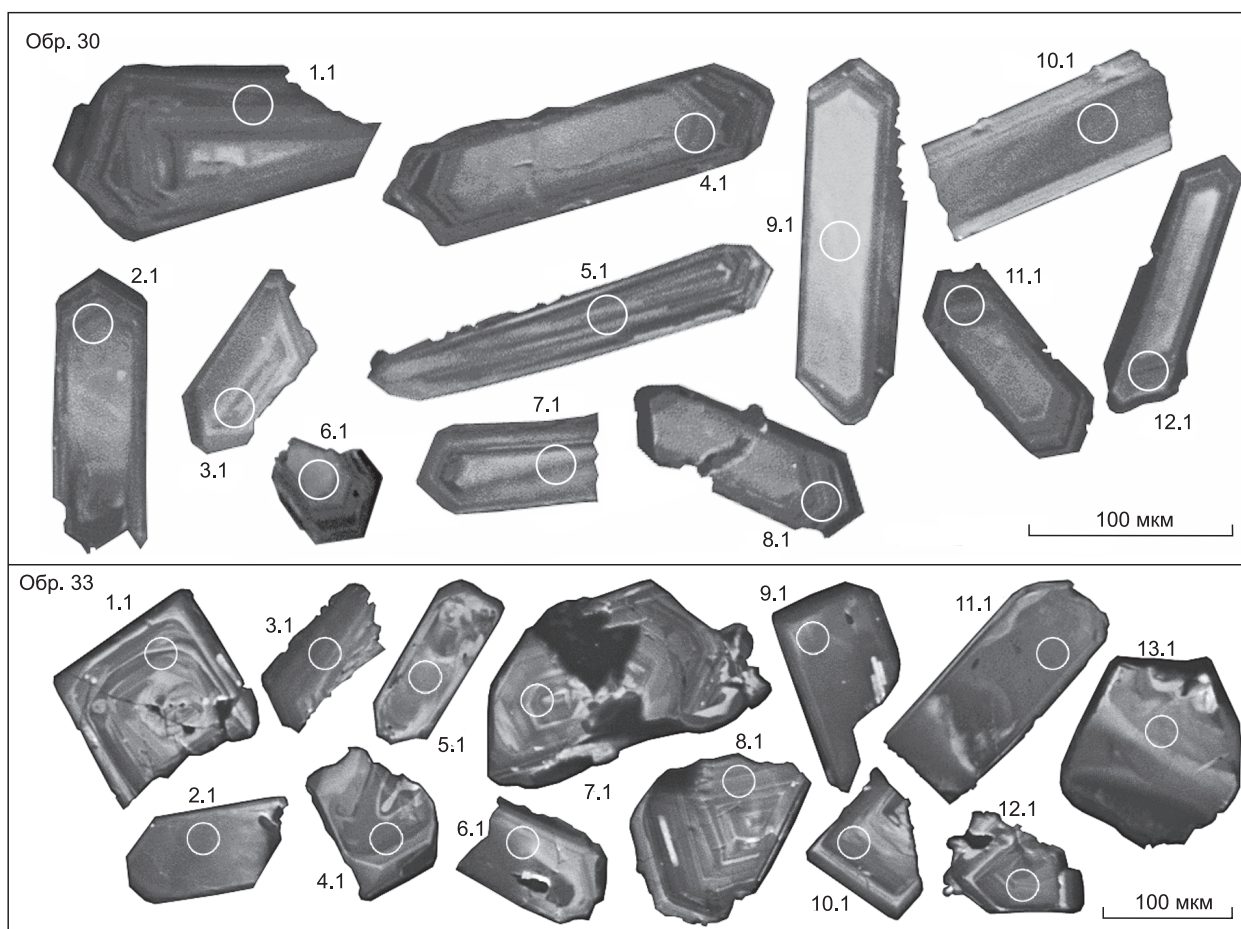


Рис. 3. Катодолюминесцентные изображения зерен циркона из гранитов с номерами датированных зерен и аналитических кратеров.

Обр. 30 из лейкогранитов скв. 26-Восточная Харьяга (гл. 4441.1—4449.2 м), обр. 33 из гранитов скв. 2-Веяк (гл. 4526—4533 м).

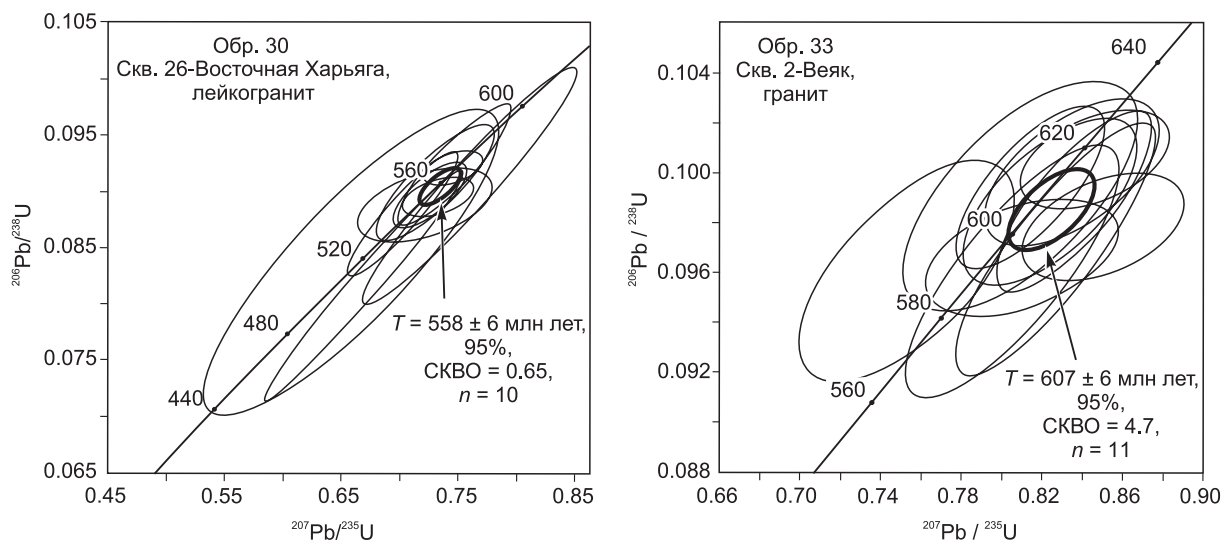


Рис. 4. Диаграммы с конкордией для цирконов из обр. 30 (скв. 26-Восточная Харьяга) и 33 (скв. 2-Веяк).

Координаты точек — центры эллипсов погрешностей (2σ). Жирным выделены эллипсы, по которым рассчитан конкордантный возраст.

Таблица 3. Результаты U-Pb изотопных исследований цирконов из гранитоидов Большеземельской зоны

Зерно, точка	$^{206}\text{Pb}_c$, %	Содержание, мкг/г			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Изотопные отношения $\pm\%$ (1 σ)			Rho	Возраст, млн лет $\pm\%$ 1 σ		D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
Скв. 26-Восточная Харьяга, обр. 30, гл. 4441.1—4449.2 м												
2.1	0.11	30.5	465	327	0.73	0.0763 ± 2.4	0.61 ± 2.8	0.0580 ± 1.4	0.9	474 ± 11	530 ± 30	12
7.1	4.12	21.3	307	236	0.79	0.0808 ± 1.3	0.73 ± 17.3	0.0652 ± 17.3	0.1	501 ± 6	779 ± 363	55
11.1	Н.п.о.	28.9	413	270	0.67	0.0817 ± 5.1	0.67 ± 5.2	0.0595 ± 0.9	1.0	506 ± 25	585 ± 21	16
12.1	0.49	22.7	316	234	0.76	0.0837 ± 6.6	0.66 ± 7.8	0.0571 ± 4.1	0.9	518 ± 33	494 ± 90	−5
10.1	Н.п.о.	19.1	253	242	0.99	0.0880 ± 2.5	0.70 ± 2.7	0.0579 ± 1.0	0.9	544 ± 13	526 ± 23	−3
1.1	0.51	35.4	464	501	1.12	0.0887 ± 1.5	0.72 ± 3.2	0.0590 ± 2.9	0.5	548 ± 8	567 ± 62	4
3.1	Н.п.о.	18.3	239	203	0.88	0.0894 ± 0.8	0.73 ± 1.7	0.0594 ± 1.5	0.5	552 ± 4	581 ± 33	5
6.1	0.06	29.6	384	267	0.72	0.0896 ± 1.3	0.73 ± 1.8	0.0588 ± 1.2	0.7	553 ± 7	560 ± 27	1
9.1	Н.п.о.	14.2	183	104	0.59	0.0906 ± 4.8	0.76 ± 5.0	0.0609 ± 1.4	1.0	559 ± 26	636 ± 31	14
8.1	»	38.7	497	368	0.77	0.0908 ± 2.4	0.73 ± 2.8	0.0584 ± 1.5	0.8	560 ± 13	544 ± 32	−3
4.1	0.08	34.4	435	319	0.76	0.0921 ± 0.7	0.75 ± 1.4	0.0588 ± 1.2	0.5	568 ± 4	560 ± 27	−1
5.1	»	27.6	348	424	1.26	0.0925 ± 2.4	0.75 ± 2.7	0.0587 ± 1.2	0.9	570 ± 13	554 ± 26	−3
Скв. 2-Веяк, обр. 33, гл. 4526—4533 м												
9.1	0.47	13.0	162	116	0.74	0.0933 ± 2.0	0.77 ± 3.4	0.0602 ± 2.7	0.6	575 ± 11	610 ± 59	6
6.1	0.56	8.6	108	68	0.66	0.0936 ± 1.6	0.81 ± 4.1	0.0629 ± 3.7	0.4	577 ± 9	704 ± 79	22
3.1	Н.п.о.	17.7	215	180	0.87	0.0960 ± 2.2	0.81 ± 2.7	0.0608 ± 1.6	0.8	591 ± 12	632 ± 35	7
2.1	0.21	16.3	197	150	0.78	0.0960 ± 1.9	0.75 ± 2.9	0.0569 ± 2.2	0.6	591 ± 11	486 ± 49	−18
10.1	0.08	10.4	125	57	0.47	0.0965 ± 1.0	0.81 ± 2.4	0.0608 ± 2.2	0.4	594 ± 6	632 ± 47	6
11.1	Н.п.о.	20.7	249	171	0.71	0.0969 ± 2.1	0.83 ± 2.5	0.0619 ± 1.2	0.9	596 ± 12	669 ± 27	12
5.1	0.05	15.7	187	166	0.92	0.0979 ± 0.9	0.85 ± 1.9	0.0631 ± 1.7	0.5	602 ± 5	710 ± 37	18
4.1	Н.п.о.	30.6	360	196	0.56	0.0989 ± 1.5	0.84 ± 1.9	0.0613 ± 1.2	0.8	608 ± 9	650 ± 25	7
7.1	0.05	16.9	199	133	0.69	0.0989 ± 1.4	0.82 ± 2.1	0.0605 ± 1.6	0.7	608 ± 8	620 ± 35	2
13.1	0.14	11.0	130	59	0.47	0.0991 ± 1.9	0.81 ± 2.9	0.0592 ± 2.2	0.6	609 ± 11	575 ± 48	−6
12.1	0.06	25.8	303	167	0.57	0.0994 ± 1.3	0.81 ± 1.8	0.0594 ± 1.3	0.7	611 ± 8	582 ± 28	−5
8.1	0.10	17.3	201	145	0.74	0.0999 ± 1.2	0.84 ± 2.1	0.0606 ± 1.8	0.6	614 ± 7	625 ± 38	2
1.1	Н.п.о.	15.5	180	82	0.47	0.1004 ± 0.8	0.85 ± 1.8	0.0611 ± 1.6	0.5	617 ± 5	642 ± 34	4

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта 0.5 %. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец. Н.п.о. — ниже предела определения (≤ 0.04). Изотопные отношения и $^{206}\text{Pb}^*$ скорректированы по измеренному ^{204}Pb . Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. D — дискордантность: $D = 100 \cdot (\text{возраст } ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / (\text{возраст } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - 1)$.

унаследованных ядер. Проанализировано 12 зерен (табл. 3). Изотопные данные по 10 зернам, в которых возрастные значения по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ варьируют в интервале 570—506 млн лет (U — 183—497 мкг/г, Th — 104—501 мкг/г, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ — 0.59—1.26), образуют кластер с конкордантным средне-взвешенным возрастом 558 ± 6 млн лет (95 %-й уровень достоверности, СКВО = 0.65). Из-за высокого содержания обыкновенного свинца аналитические данные для точки 7.1 (501 млн лет) исключены из рассмотрения и не нанесены на график (рис. 4). Это зерно, вероятно, молодое из-за вторичных изменений и/или потери Pb. Высокое содержание в нем железа (460 г/т) может быть указывает на метамиктность, что облегчает потери свинца. Нет веских оснований исключать возраст 474 млн лет цирконового зерна 2.1 из расчета среднего конкордантного возраста, за исключением необычно низкого содержания Hf в этом зерне — 8815 г/т по сравнению с 10270—12067 г/т в других зернах. Однако он был исключен из рассмотрения, поскольку не согласуется с установленными геологическими соотношениями (т. е. границы не секут ордовикские осадочные породы, а несогласно перекрываются ордовикскими отложениями).

Зерна циркона из гранитов, вскрытых скв. 2-Веяк (обр. 33, гл. 4526—4533 м) — субидiomорфные, бипирамидально-призматические кристаллы с преобладанием граней пирамиды (111) и призмы (110). Это розовые, светло-розовые полупрозрачные кристаллы с гладкими или слегка шероховатыми гранями. Их размер колеблется в пределах 0.10—0.25 мм, чаще встречаются зерна длиной около 0.15 мм. Коэффициент удлинения изменяется от 1.5 до 4.0. Кристаллы содержат множество мелких включений, имеющих в проходящем свете черный или красно-коричневый цвет. На катодолуминесцентных изо-

бражениях (см. рис. 3) видна четкая грубая, иногда прерывистая, осцилляционная зональность. Было проанализировано 13 зерен (см. табл. 3). В 11 зернах ($U = 125\text{—}360$ мкг/г, $Th = 59\text{—}196$ мкг/г, $^{232}Th/^{238}U = 0.47\text{—}0.92$) по отношению $^{206}Pb/^{238}U$ получены индивидуальные возрасты в интервале 591—617 млн лет, конкордантный средневзвешенный возраст (см. рис. 4) составляет 607 ± 6 млн лет (95 %, СКВО = 4.7). Если принять во внимание два самых молодых зерна (575 и 577 млн лет), то средневзвешенный возраст всех 13 зерен составляет 604 ± 8 млн лет (95 %, СКВО = 2.7).

ВЫВОДЫ

Новые геохимические данные и U-Pb датировки циркона из гранитоидов Большеземельской зоны в совокупности с полученными ранее Pb-Pb и Rb-Sr данными указывают на проявление в пределах этого корового блока в эдиакарии двух эпизодов магматизма, сопровождавшихся формированием двух типов гранитоидов. Высококалийевые гранитоиды с возрастом 607 ± 6 млн лет в скв. 2-Веяк имеют черты внутриплитных образований и по возрасту коррелируются с некоторыми гранитами Ижемской зоны (602—595 млн лет) [Андреичев и др., 20146], а также с интрузивными породами, выходящими на поверхность на Северном Тимане: габбро-долеритами (617 ± 6 млн лет), оливин-керсутитовыми габбро (614 ± 2 млн лет), сиенитами (613 ± 7 , 602 ± 5 и 598 ± 17 млн лет) [Larionov et al., 2004; Андреичев и др., 2021] и гранитами (614 ± 11 и 613 ± 6 млн лет) [Andreichev et al., 2020]. Магма, породившая эти гранитоиды, должна была эволюционировать или формироваться в зрелой континентальной коре, на что, в частности, указывает высокорadioгенный изотопный состав стронция. Предположительно на глубине в Большеземельской зоне мог существовать блок докембрийской континентальной коры, как это предполагается по геофизическим данным для Хорейверского микроконтинента.

Более молодые граниты с возрастом 558 ± 6 млн лет в скв. 26-Восточная Харьяга коррелируются с позднеэдиакарскими синорогенными гранитами тиманид (555—544 млн лет), вскрытыми скважинами в Припечорской разломной зоне [Андреичев и др., 2017].

Надежность выделения в Большеземельской зоне фундамента Печорской синеклизы двух этапов эдиакарского гранитоидного магматизма подтверждается хорошей сходимостью полученных U-Pb возрастов гранитов с предшествующими результатами геохронологических исследований. U-Pb возраст гранитов из скв. 2-Веяк 607 ± 6 млн лет сопоставим с Pb-Pb (618 ± 6 млн лет) [Gee et al., 2000] и Rb-Sr (615 ± 7 млн лет) [Андреичев, Литвиненко, 2007] возрастaми, установленными для гранитоидов из этой же скважины. Датировка 558 ± 6 млн лет, полученная U-Pb методом для гранитов из скв. 26-Восточная Харьяга, соответствует Pb-Pb (567 ± 36 млн лет) [Gee et al., 2000] и Rb-Sr (561 ± 12 млн лет) [Андреичев, Литвиненко, 2007] возрастaм гранитов из этой же скважины.

Исследование выполнено по теме «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» Института геологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр» УрО РАН при частичной финансовой поддержке Национального научного фонда США (грант № 0948673).

ЛИТЕРАТУРА

- Акимов Г.Н. Геохронология докембрия Тимана // Советская геология, 1980, № 12, с. 71—85.
- Андреичев В.Л., Литвиненко А.Ф. Изотопная геохронология гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы. Сыктывкар, Геопринт, 2007, 68 с.
- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г. Первые U-Pb-данные о возрасте гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы // ДАН, 2014а, т. 458, № 5, с. 559—566, doi: 10.7868/S0869565214290192.
- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Миллер Э.Л., Кобл М.А. Возраст гранитоидного магматизма фундамента Ижемской зоны Печорской синеклизы: первые U-Pb данные // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVI геологического съезда Республики Коми, т. II, Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014б, с. 101—103.
- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г., Миллер Э.Л., Кобл М.А., Ларионов А.Н., Вакуленко О.В., Сергеев С.А. Возраст гранитоидов Припечорской разломной зоны фундамента Печорской синеклизы: первые U-Pb (SIMS) данные // ДАН, 2017, т. 474, № 3, с. 321—326.
- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Удоратина О.В., Ронкин Ю.Л. Цирконология сиенитов Северного Тимана // Вестник геонаук, 2021, № 6 (318), с. 16—27, doi: 10.19110/geov.2021.6.2.
- Белякова Л.Т. Байкальская вулканогенная моласса севера Урала и Большеземельской тундры // Советская геология, 1982, № 10, с. 68—78.

Белякова Л.Т. Строение фундамента Ижма-Печорской впадины и Большеземельского мегаблока // Верхний докембрий севера европейской части СССР. Сыктывкар, 1983, с. 72—75. Деп. в ВИНТИ, № 1155-84.

Белякова Л.Т., Степаненко В.И. Магматизм и геодинамика байкалитид фундамента Печорской синеклизы // Изв. АН СССР, сер. геол., 1991, № 12, с. 106—117.

Белякова Л.Т., Довжикова Е.Г. Новые данные по составу и возрасту фундамента Тимано-Печорской плиты // Структура и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. М., ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006, с. 510—520.

Белякова Л.Т., Богацкий В.И., Богданов Б.П., Довжикова Е.Г., Ласкин В.М. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Ухта, ГУП РК ТП НИЦ, 2008, 288 с.

Берлянд Н.Г. Тимано-Печорская плита // Геологическое строение и минералогия СССР, т. 10, кн. 1. Л., Недра, 1989, с. 45—46.

Борисова Е.Ю., Бибикова Е.В., Доброженецкая Л.Ф., Макаров В.А. Геохронологическое изучение циркона гранитоидов Кокчетавского алмазоносного района // ДАН, 1995, т. 343, № 6, с. 801—805.

Гафаров Р.А. О глубинном строении фундамента в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала // Изв. АН СССР, сер. геол., 1970, № 8, с. 3—14.

Гецен В.Г. Тектоника Тимана. Л., Наука, 1987, 144 с.

Гецен В.Г. Геодинамическая реконструкция развития северо-востока европейской части СССР для позднепротерозойского этапа // Геотектоника, 1991, № 5, с. 26—37.

Дедеев В.А., Запорожцева И.В. Земная кора европейского северо-востока СССР. Л., Наука, 1985, 98 с.

Карпинский А.П. К тектонике Европейской России // Изв. Акад. наук, 1919, т. 13, № 12—15, сер. 6, с. 573—590.

Костюченко С.Л. Структура и тектоническая модель земной коры Тимано-Печорского бассейна по результатам комплексного геолого-геофизического изучения // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М., КМК, 1994, с. 121—133.

Оловянишников В.Г. Атлас геологических и геодинамических карт Канино-Тиманского кряжа и фундамента Печорской плиты. Сыктывкар, Геопринт, 2007, 28 с.

Оловянишников В.Г., Бушуев А.С., Дохсаньянц Э.П. Строение зоны сочленения Русской и Печорской плит по геолого-геофизическим данным // ДАН, 1996, т. 351, № 4, с. 209—231.

Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Голик С.В., Журавлев Д.З., Попова О.Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element 2 // Ежегодник-2004. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2005, с. 423—433.

Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических) / Под ред. Богацкого В.И., Ларионовой З.В. Ухта, Изд-во ТП НИЦ, 2000.

Унифицированные методы анализа силикатных горных пород с применением комплексометрии. М., ВИМС, 1979, 33 с.

Фишман М.В., Андреичев В.Л., Естафьева А.Д. Каталог определений возраста горных пород СССР радиологическими методами (северо-восток европейской части СССР, север Урала, Пай-Хой, Новая Земля). Сыктывкар, 1981, 181 с. Деп. в ВИНТИ, № 531-82.

Andreichiev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L., Coble M.A., Miller E.L. Granites of the Northern Timan — probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup // Geodyn. Tectonophys., 2020, v. 11 (2), p. 10—28, doi: 10.5800/GT-2020-11-2-0470.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // Chem. Geol., 2003, v. 200, p. 155—170, doi: 10.1016/S0009-2541(03)00165-7.

Boynton W.V. Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies // Rare earth element geochemistry / Ed. P. Henderson. Amsterdam, 1984, p. 63—114, doi: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3.

Coble M.A., Vazquez J., Barth A.P., Wooden J., Burns D., Kylander-Clark A., Jackson S., Venari C.E. Trace element characterization of MAD-559 zircon reference material for ion microprobe analysis // Geostand. Geoanal. Res., 2018, v. 42, p. 481—497, doi: 10.1111/ggr.12238.

Gee D.G., Beliakova L., Pease V., Larionov A., Dovshikova L. New, single zircon (Pb-evaporation) ages from Vendian intrusions in the basement beneath the Pechora Basin, northeastern Baltica // Polarforschung, 2000, v. 68, p. 161—170, doi: 10.2312/polarforschung.68.161.

Ireland T.R., Gibson G.M. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand // J. Metamorph. Geol., 1998, v. 16, p. 149—167, doi: 10.1111/j.1525-1314.1998.00112.x.

Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Hertseva M.V., Andreichev V.L. Pre-Ordovician tectonic evolution and volcano-plutonic associations of the Timanides and northern Pre-Uralides, northeast part of the East European Craton // *Gondwana Res.*, 2007, v. 12, p. 305—323, doi: 10.1016/j.gr.2006.10.021.

Larionov A.N., Andreichev V.L., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: Ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite // *The Neoproterozoic Timanide orogen of Eastern Baltica* / Eds. D.G. Gee, V. Pease. *Geol. Soc. London Mem.*, 2004, v. 30, p. 69—74, doi: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.

Ludwig K.R. SQUID 2 — A user's manual, rev. 12 April 2009. Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ., 2009, v. 5, 110 p.

Ludwig K.R. Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel. Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ., 2012, v. 5, 75 p.

Pearce J.A. Sources and settings of granitic rocks // *Episodes*, 1996, v. 19, p. 120—125, doi: 10.18814/epiiugs/1996/v19i4/005.

Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *J. Petrol.*, 1984, v. 25, p. 956—983, doi: 10.1093/petrology/25.4.956.

Pease V., Dovzhikova E., Beliakova L., Gee D.G. Late Neoproterozoic granitoid magmatism in the basement to the Pechora Basin, NW Russia: geochemical constraints indicate westward subduction beneath NE Baltica // *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica* / Eds. D.G. Gee, V. Pease. *Geol. Soc. London Mem.*, 2004, v. 30, p. 75—85, doi: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.08.

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