

УДК: 551.71/.72:552.322.1(234.82)
DOI 10.19110/1994-5655-2020-1-88-95

Т.А. ВОВЧИНА, А.А. СОБОЛЕВА

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb (SIMS) ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНА ИЗ ПОЗДНЕРИФЕЙСКИХ ПЛАГИОГРАНИТ-ПОРФИРОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПАЙ-ХОЯ

*Институт геологии им. акад. Н.П. Юшкина
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар*

ta_kaneva@mail.ru, aa_soboleva@mail.ru

T.A. VOVCHINA, A.A. SOBOLEVA

RESULTS OF U-Pb (SIMS) DATING OF ZIRCON FROM LATE RIPHEAN PLAGIOGRANITE-PORPHYRIES OF NORTHWESTERN PAY-KHOY

*N.P.Yushkin Institute of Geology,
Federal Research Centre Komi Science Centre,
Ural Branch, RAS,
Syktывkar*

Аннотация

Приводятся первые результаты U-Pb датирования цирконов из плагиогранит-порфиров, входящих в состав сокольнинских субвулканических образований северо-западного Пай-Хоя (Амдерминский район). Установлено, что их возраст определяется как позднерифейский на основании расположения тела в поле развития нижней под-свиты сокольнинской свиты и U-Pb возраста цирконов – 633 ± 14 млн лет. Полученный возраст полностью согласуется с результатами датирования детритовых цирконов из вулканомиктовых песчаников нижней части сокольнинской свиты.

Ключевые слова:

плагиогранит-порфир, Пай-Хой, цирконы, U-Pb метод, поздний рифей

Abstract

The first results of U-Pb (SIMS) dating of zircons from plagiogranite-porphyrries, which compose a subvolcanic body and are similar in chemical composition to effusive volcanic rocks of the Sokolninsk Formation of the northwestern Pay-Khoy (Amderma region) are reported. It was established that their age is determined as Late Riphean based on the location of the body in the area of outcrops to the surface of the lower part of the Sokolninsk Formation and U-Pb age of zircons is 633 ± 14 Ma. The obtained U-Pb age is completely consistent with the dating of detrital zircons from volcanomictic sandstones of the lower part of the Sokolninsk Formation. The assumed comagmatic nature of the subvolcanic and effusive volcanic rocks of the Sokolninsk Formation makes it possible to reasonably state that the age of this suite (at least its lower part) is the Late Riphean.

Keywords:

plagiogranite-porphyry, Pay-Khoy, zircons, U-Pb method, Late Riphean

Введение

Позднедокембрийские комплексы на северо-западном Пай-Хое развиты в пределах Амдерминского блока, представляющего собой выступ докембрийского фундамента. В составе блока, впервые охарактеризованного в 1938 г. Е.А. Кузнецовым, при дальнейшем изучении были выделены свиты. В современной интерпретации их три – амдерминская, морозовская и сокольнинская. Возраст свит и соотношения между ними остаются предметом дискуссии на протяжении более полувека, начиная с работ А.М. Ивановой по составлению Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 в 1957 г. ввиду отсутствия стратиграфических взаимоотношений. Полученные в начале 1980-х гг. определения онколитов и строматолитов из карбонатных пород амдерминской и морозовской свит и микрофоссилий из отложений сокольнинской свиты [1] не позволили решить эту проблему, так

как они давали только диапазон возрастов от позднего рифея до венда.

Изотопное датирование пород Амдерминского блока не проводилось. В 2013–2016 гг. были получены новые данные по строению и геохронологии этого района в рамках геологического доизучения территории Пай-Хоя (ГДП-200, ЗАО «Поляргео», г. Санкт-Петербург совместно с сотрудниками лаборатории петрографии Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). В частности, применение метода

хемотратиграфического датирования с использованием величины отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (SIS-корреляция) для карбонатных отложений амдерминской свиты позволило заключить, что отложения свиты накапливались в позднем рифее-венде в интервале 650–580 млн лет [2]. На основании результатов U-Pb датирования детритовых цирконов из низов сокольнинской свиты сделан вывод о том, что накопление вулканогенно-терригенных отложений свиты началось не ранее конца позднего рифея [3].

Перспективы определения изотопного возраста морозовской и сокольнинской свит связаны с возможностью датирования магматических пород, входящих в состав этих свит или слагающих комагматические им субвулканические тела. Нами предпринята попытка определения возраста нижней части сокольнинской свиты, используя метод U-Pb датирования цирконов из плагиогранит-порфиров, относящихся к сокольнинским субвулканическим образованиям.

Геологическое строение района

В геологическом строении северо-западной части Пай-Хоя значительную роль играют островодужные образования поздне-рифейско-вендского возраста, которые находятся в ядре антиклинальной структуры Амдерминского блока. Амдерминский блок представляет собой горст-антиклинорий (рис. 1), северо-восточное крыло которого сложено карбонатными отложениями амдерминской свиты, а юго-западное – вулканогенно-осадочными и терригенными породами морозовской и сокольнинской свит. Внутреннее строение докембрийского комплекса, выходящего на поверхность в пределах этого блока, осложнено крупным субмеридиональным надвигом, проходящим в его восточной части. По надвигу отложения, распространенные в осевой и юго-западной частях Ам-

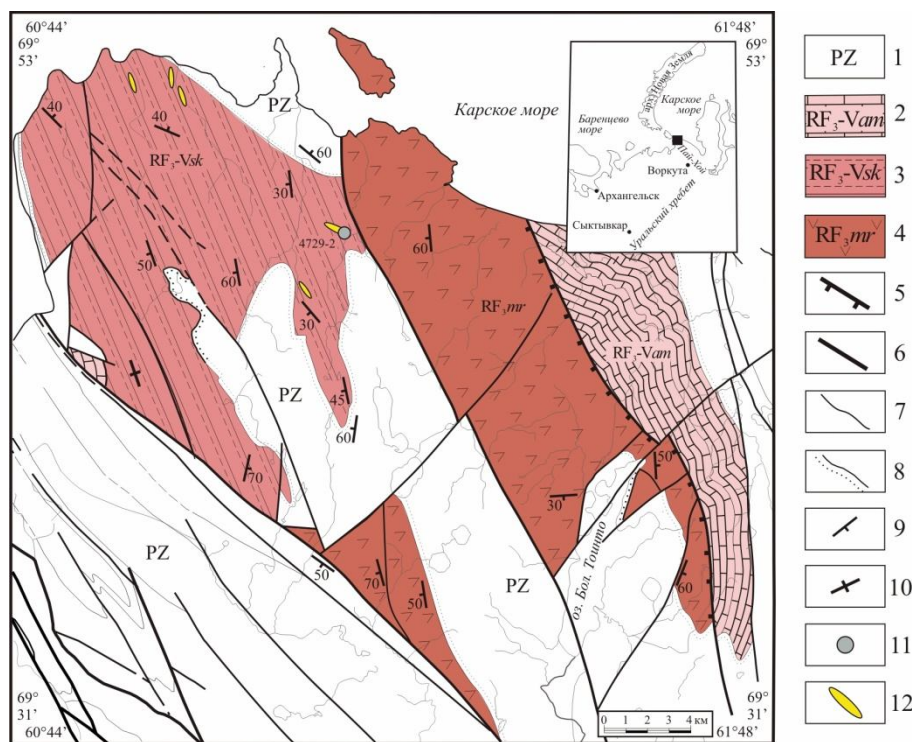


Рис. 1. Схема геологического строения Амдерминского блока, северо-западный Пай-Хой. Составлена по материалам ГДП-200 ЗАО «Поляргео», 2015 г., с изменениями.

Условные обозначения: 1 – палеозойские отложения; 2 – амдерминская свита (RF₃-Vam): кристаллические, микрофитолитовые известняки, редкие линзы кремней, тонкокристаллические углеродистые известняки; 3 – сокольнинская свита (RF₃-Vsk): песчаники, алевролиты, гравелиты, кремнистые сланцы, туфопесчаники, базальты, андезиты, риодациты, риолиты и их туфы, субвулканические образования; 4 – морозовская свита (RF₃mr): сланцы глинистые, кремнистые и углеродистые, известняки, доломиты, сланцы по кислым туфам, базальты, андезибазальты, андезиты, риодациты, их туфы, туфопесчаники, субвулканические образования; 5 – надвиги; 6 – разрывные нарушения; 7–8 – границы стратиграфических подразделений: 7 – согласные, 8 – несогласные; 9–10 – структурные элементы: 9 – наклонное залегание, 10 – вертикальное залегание; 11 – точка отбора пробы 4729-2; 12 – субвулканические тела сокольнинской свиты.

Fig. 1. Schematic geological structure of Amderma block, northwestern Pay-Khoy, compiled on the basis of materials of additional geological study, scale 1:200 000, Polyargeo Company, 2015, modified.

Legend: 1 – Paleozoic sediments; 2 – Amderma Formation (RF₃-Vam): crystalline, microphytolithic limestones, rare chert lenses, fine-grained crystalline carbonaceous limestones; 3 – Sokolninsk Formation (RF₃-Vsk): sandstones, siltstones, gravelites, chert shales, tuffaceous sandstones, basalts, andesites, rhyodacites, rhyolites and their tuffs, subvolcanic rocks; 4 – Morozovsk Formation (RF₃mr): shales, cherts and carbonaceous shales, limestones, dolomites, schistose felsic tuffs, basalts, andesites, andesibasalts, rhyodacites, their tuffs, tuffaceous sandstones, subvolcanic rocks; 5 – thrusts; 6–8 – geological boundaries: 7 – between units with conformable bedding, 8 – unconformity; 9–10 – structural units: 9 – inclined bedding, 10 – vertical bedding; 11 – sample point of 4729-2; 12 – subvolcanic bodies of Sokolninsk Formation.

дерминского блока, надвинуты на породы, слагающие его северо-восточную часть. Стратиграфических переходов между породами картируемых подразделений не выявлено, все три свиты имеют между собой тектонические контакты. На основании результатов датирования детритовых цирконов из вулканомиктовых песчаников нижней подсвиты сокольнинской свиты установлено, что ее отложения могли накапливаться не раньше конца позднего рифея, поскольку возраст самых молодых зерен детритовых цирконов – 634 млн лет [3].

Небольшие позднепротерозойские интрузивные магматические тела локализованы в полях распространения морозовской и сокольнинской свит. Среди них выделяются морозовские субвулканические образования основного состава и сокольнинские субвулканические образования кислого состава.

Объект исследования

Объектом исследования являются плагиогранит-порфиры, слагающие небольшие субсогласные тела в поле развития сокольнинской свиты и относящиеся к сокольнинским субвулканическим образованиям (Зархидзе Д. В. и др. Геологическое доизучение масштаба 1:200 000 листов R-41-XX, XXI (Амдерминская площадь). Сыктывкар: ЗАО «МИРЕКО», 2014). Интрузивные контакты этих тел со стратифицированными вулканогенно-осадочными отложениями нижней подсвиты сокольнинской свиты очень редко можно наблюдать в плоских коренных выходах и глыбах элювиальных развалов. Обычно контакты интрузий не обнажены.

Проба 4729-2 (69.771° с.ш., 61.198° в.д.) отобрана из коренного выхода плагиогранит-порфиров видимой мощностью около 10 м, расположенного по берегам и в русле небольшого ручья, впадающего справа в левый приток р. Яркозаяха. Субвулканическое тело залегает в поле развития сокольнинской свиты, но его контакты не обнажаются, они перекрыты элювиально-делювиальными развалами и четвертичными отложениями. Западнее и восточнее тела развиты элювиально-делювиальные развалы и фрагментарные выходы долеритов. Плагиогранит-порфиры имеют толстоплитчатую, переходящую в параллелепипедальную, отдельность (рис. 2). Плоскости плитчатой отдельности падают на запад (Аз пд 280°) под углом 60°, что примерно соответствует залеганию сокольнинской свиты в этом районе.

Аналитические методы

Концентрации петрогенных элементов, представленных в виде оксидов, устанавливались методом классического химического анализа в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г.Сыктывкар) в соответствии с процедурами, описанными в работе [4]. Содержания микроэлементов определены с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) во ВСЕГЕИ (г.Санкт-Петербург) по методике, опубликованной на сайте <https://vsegei.ru/ru/activity/labanalytics/lab/laboperations/masspec.php>.



Рис. 2. Выходы плагиогранит-порфиров.
Fig. 2. Outcrops of plagiogranite-porphires.

Проба весом около 5 кг обработана в ИГ Коми НЦ УрО РАН. Она раздроблена вручную в чугунной ступе, для работы отделена фракция с размером зерна менее 0,25 мм, которая промыта в проточной воде и высушена, после чего разделена на магнитную и немагнитную фракции. Из немагнитной части при помощи бромформы выделена тяжелая фракция, из которой под бинокулярным микроскопом вручную отобраны цирконы. Полученная монофракция циркона интегрировалась в эпосидную шашку.

U-Pb датирование зерен циркона с использованием вторичной ионной масс-спектрометрии проводилось на ионном микрозонде SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США, в соответствии с процедурами, описанными в работах [5, 6]. Катодолюминесцентные изображения цирконов были получены на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600. Обработка аналитических данных проводилась с помощью программы SQUID-2 [7]. При построении графиков с конкордией в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ использовалась программа ISOPLLOT / Ex [8].

Петрографическая характеристика

Породы зеленовато-серые, порфировидные, массивные. Порфировидные выделения, составляющие 2–3 об %, представлены преимущественно идиоформными и гипидиоморфными широкими табличками (0,5–2 мм) умеренно соскритизированного плагиоклаза (An_{28-37}) (рис. 3, А). Первичный, до соскритизации, состав плагиоклаза, вероятно, был более основным. Отмечается небольшое количество вкрапленников кварца размером 0,25–0,50 мм. Основная масса на 70–80% сложена перекристаллизованными сферолитами размером 0,40–0,85 мм, в составе которых, наряду с плагиоклазом, возможно, присутствует и кварц. Участками в них сохранилось радиально-лучистое погасание. Сквозь сферолиты прорастают и развиты в интерстициях между ними мелкие, до 0,05 мм, лейсты альбита (рис. 3, Б). В промежутках между сферолитами встречаются ксеноморфные выделения кварца размером 0,1–0,3 мм (5–7 % от объема породы) и отдельные псевдоморфозы темно-оливково-зелено-

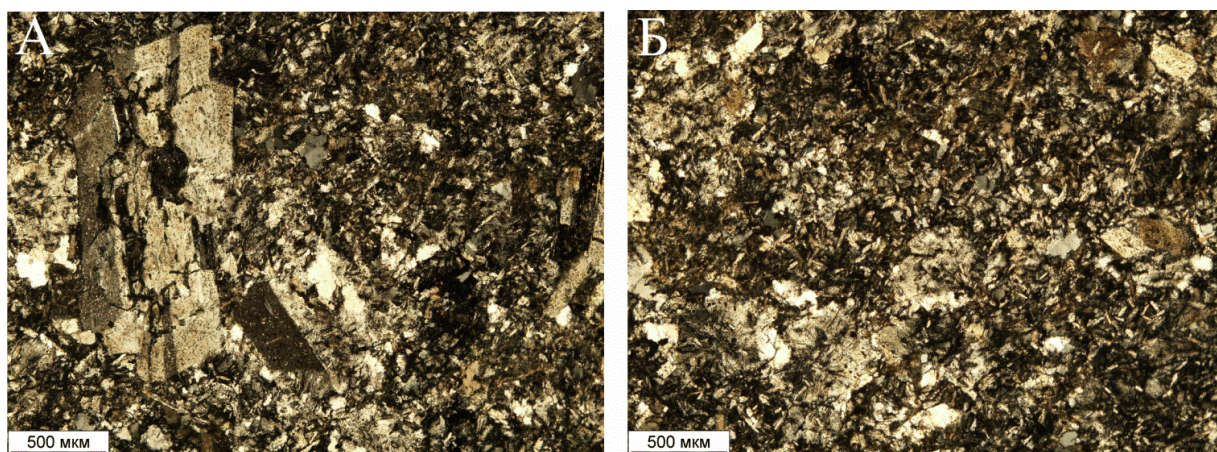


Рис. 3. Плагиигранит-порфир, обр. 4729-2, с анализатором.
Fig. 3. Plagiogranite-porphyry, sample 4729-2, cross-polarized.

го хлорита и рудного минерала по темноцветному минералу размером 0,8–1,2 мм. По форме сечений можно предположить, что это был амфибол. В основной массе, кроме того, присутствуют лейкоксенизированный рудный минерал и метаморфические минералы – чешуйки хлорита, вытянутые зерна клиноцоизита, карбонат. Акцессорные минералы представлены апатитом, образующим призматические зерна размером до 0,1 мм внутри вкрапленников плагиоклаза и иглы в основной массе, и цирконом.

Особенности химического состава плагиигранит-порфиров

По петрохимической классификации породы определяются как плагииграниты и характеризуются невысоким содержанием SiO_2 (70,22 %), TiO_2 (0,50%), K_2O (1,81%) и повышенными Al_2O_3 (16,31%), CaO (1,14%), MgO (1,52%), Na_2O (5,01%). Породы относятся к нормальному петрохимическому ряду ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6,82\%$) и имеют натриевый тип щелочности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2,7$).

Плагиигранит-порфирам свойственны невысокие в целом содержания элементов-примесей, и в частности редких земель (сумма REE – 93 г/т), слабое обогащение LREE относительно HREE ($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 3,3$), практически отсутствие дефицита европия ($\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^* = 0,8$) и явное преобладание крупноионных элементов над высокозарядными в спектре распределения элементов-примесей, нормированных к составу NMORB. Породы имеют черты гранитоидов, сформированных в надсубдукционных условиях, и на диаграммах, используемых для реконструкции геодинамической обстановки формирования гранитоидов, попадают в поля островодужных образований.

Плагиигранит-порфиры этого и подобных тел, залегающих в поле развития сокольниковской свиты, близки по составу к эффузивным породам кислого состава, входящим в состав этой свиты [9] и, вероятно, связаны с ними генетически.

Результаты изучения и датирования зерен циркона

Из образца 4729-2 было выделено небольшое количество очень мелких (30–160 мкм) зерен циркона и их обломков. Преобладают мелкие кристаллы бипирамидально-призматического, гиацитного габитуса со слегка сглаженными вершинами и ребрами. Зерна прозрачные и полупрозрачные, бесцветные и слегка розоватые, с чуть шероховатыми гранями. Намного реже встречаются темно- и светло-розовые прозрачные и полупрозрачные кристаллы неправильной формы.

На катодолуминесцентных изображениях в большинстве проанализированных зерен циркона видна осцилляционная зональность роста (рис. 4).

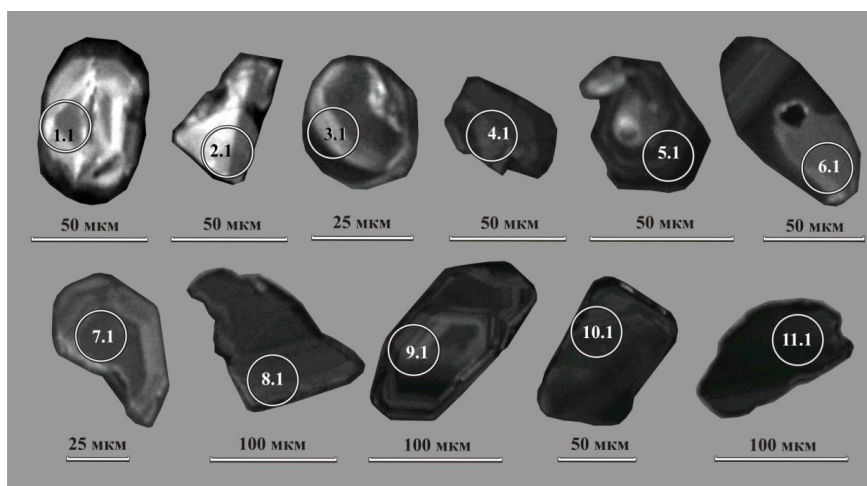


Рис. 4. Катодолуминесцентные изображения цирконов из плагиигранит-порфиров (обр. 4729-2) с номерами датированных зерен и аналитических кратеров.

Fig. 4. Cathodoluminescent images of zircons from plagiogranite-porphyries (sample 4729-2) with numbers of dated grains and analytical craters.

В некоторых зернах (3.1, 5.1, 6.1) можно предположить наличие унаследованных ядер.

Содержания редкоземельных элементов в исследованных зернах циркона заметно варьируют (табл. 1).

Таблица 1
Содержания элементов-примесей
в цирконах (мкг/г), обр. 4729-2

Table 1
Content of impurity elements in zircons (ppm),
sample 4729-2

Зерно	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Hf	Fe
1.1	1220	5,74	20	1,89	3,20	0,72	26,40	144	201	367	6896	7
2.1	1640	0,04	4,10	0,95	3,10	0,89	33,40	157	291	512	7431	2,3
3.1	633	0,01	40,70	0,99	3,10	0,77	18,90	58	112	-	-	7,70
4.1	661	2,02	39,80	5,16	5,80	1,95	21,80	7	118	-	-	140,10
5.1	1873	4,29	132	8,85	6,30	2,54	66,50	147	325	762	10785	61,30
6.1	584	0,02	10,70	0,42	1,30	0,15	12,40	58	106	200	9841	44,50
7.1	976	0,05	31,90	1,23	3	0,85	22,20	90	167	350	7972	0,40
8.1	272	0,02	16,50	0,86	2,60	0,08	16	33	41	60	12165	1,80
9.1	544	20,09	64,40	4,73	2,50	0,89	12,60	50	93	186	8131	52,30
10.1	987	0,06	12,80	2,64	5,50	0,47	35,40	110	165	258	8849	7,30
11.1	614	0,01	27,10	0,44	1,30	0,99	12,10	53	106	258	7889	1

Примечание. Прочерк – содержания элемента меньше предела обнаружения.

Было произведено 11 анализов U-Pb изотопной системы 11 зерен циркона из плагиигранит-порфиоров обр. 4729-2. Возраст цирконов, рассчитанный по величине отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, варьирует в широком диапазоне от 218 до 1932 млн лет (табл. 2, рис. 5).

Наиболее древние раннерифейские-позднекарельские датировки 1404–1932 млн лет, полученные в зернах 3.1, 4.1, 6.1, 8.1, 10.1, вероятнее всего, характеризуют возраст унаследованных цирконов субстрата. В зернах 3.1 и 6.1 аналитические кратеры расположены в пределах предположительно детритовых ядер. Для зерна 4.1, содержащего в сохранившемся фрагменте ядерной части крупное, темное в катодных лучах включение (рис. 4), характерно высокое содержание железа (140 г/т), что может свидетельствовать о его частичном разрушении и изменении, вероятно, при метамиктизации. С этим предположением согласуются повышенное содержание в анализе La (рис. 6, А; табл. 1) и не-

высокие значения $\text{Ce}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}^*$ (рис. 6, Б), что свойственно цирконам гидротермального генезиса [10, 11].

Самые молодые датировки 218 ± 6 и 280 ± 3 млн лет (зерна 7.1 и 9.1) отражают, как мы полагаем, нарушения U-Pb изотопной системы при наложенных процессах. Для зерна 9.1 характерно повышенное содержание La (рис. 6, А; табл. 1) и низкие значения $\text{Sm}_\text{N}/\text{La}_\text{N}$ и $\text{Ce}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}^*$, свойственные для гидротермальных цирконов (рис. 6, Б), что позволяет предположить его вторичное изменение или, с меньшей долей вероятности, более позднее формирование. Для обоих зерен установлены значительные расхождения между возрастными, полученными по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (табл. 2).

Зерно 1 с возрастом 576 ± 16 млн лет имеет сложное внутреннее строение. Оно содержит остроугольные, более темные в катодных лучах участки, являющиеся реликтами ядра (возможно, нарушенного). Повышенное содержание La (рис. 6, А; табл. 1) и относительно низкие значения $\text{Sm}_\text{N}/\text{La}_\text{N}$ и $\text{Ce}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}^*$ (рис. 6, Б) так же, как и в предыдущем случае, можно рассматривать как свидетельства вторичного преобразования циркона. Аналитический кратер захватывает такой темный участок и окружающие более светлые зоны роста, поэтому полученный возраст может быть «смешанным» и должен быть исключен из рассмотрения.

Мы предполагаем, что время кристаллизации плагиигранит-порфиоров может быть определено по возрастам трех зерен (2.1, 5.1, 11.1), образующих интервал 626–635 млн лет. Распределение в них редкоземельных элементов соответствует распределению РЗЭ, типичному для магматических цирконов: характерно обогащение тяжелыми РЗЭ ($\text{Yb}_\text{N}/\text{Gd}_\text{N} - 19-27$), высокая положительная Ce аномалия ($\text{Ce}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}^* - 12-235$) и отрицательная Eu аномалия ($\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^* - 0,17-0,51$). Конкордантный возраст, рассчитанный для этих трех точек, составляет 633 ± 14 млн лет (рис. 5, а, врезка), что соответствует концу позднего рифея.

Дискordia, проведенная через шесть точек (2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 8.1, 11.1), имеет верхнее пересечение с конкордией в 1909 ± 41 млн лет и нижнее пе-

Таблица 2

Результаты U-Pb изотопных исследований цирконов, обр. 4729-2

Table 2

Results of U-Pb dating of zircons, sample 4729-2

Зерно, кратер	$^{206}\text{Pb}_\text{c}$, %	Содержания, мкг/г			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Изотопные отношения $\pm 1\sigma$			Rho	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$		D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
1.1	0,39	7,3	91	35	0,40	$0,0935 \pm 3,1$	$0,751 \pm 9,0$	$0,0583 \pm 8,5$	0,34	576 ± 17	539 ± 186	-7
2.1	0,57	3,6	40	19	0,48	$0,1036 \pm 1,9$	$0,827 \pm 12,2$	$0,0579 \pm 12,1$	0,15	635 ± 11	526 ± 265	-22
3.1	0,02	47,7	164	60	0,38	$0,3391 \pm 1,1$	$6,024 \pm 3,8$	$0,1288 \pm 3,6$	0,28	1883 ± 17	2081 ± 64	+11
4.1	0,05	42,9	175	92	0,54	$0,2849 \pm 2,6$	$4,327 \pm 2,9$	$0,1101 \pm 1,3$	0,89	1616 ± 37	1801 ± 24	+12
5.1	0,24	34,9	398	391	1,02	$0,1020 \pm 2,4$	$0,880 \pm 3,1$	$0,0626 \pm 2,0$	0,77	626 ± 14	692 ± 42	+10
6.1	0,04	25,5	122	45	0,38	$0,2433 \pm 1,0$	$3,037 \pm 1,7$	$0,0905 \pm 1,3$	0,61	1404 ± 13	1436 ± 25	+3
7.1	0,00	4,6	122	101	0,86	$0,0443 \pm 1,0$	$0,343 \pm 7,0$	$0,0561 \pm 6,9$	0,15	280 ± 3	457 ± 153	+40
8.1	0,12	15,8	53	116	2,27	$0,3495 \pm 1,3$	$5,742 \pm 2,1$	$0,1191 \pm 1,6$	0,63	1932 ± 22	1943 ± 29	+1
9.1	1,11	4,9	166	93	0,58	$0,0343 \pm 3,0$	$0,272 \pm 9,7$	$0,0574 \pm 9,3$	0,31	218 ± 6	506 ± 204	+58
10.1	0,00	47,2	164	96	0,60	$0,3347 \pm 2,1$	$5,379 \pm 2,6$	$0,1166 \pm 1,5$	0,82	1861 ± 35	1903 ± 27	+3
11.1	0,00	20,3	232	127	0,57	$0,1020 \pm 2,0$	$0,882 \pm 2,7$	$0,0627 \pm 1,9$	0,73	626 ± 12	697 ± 40	+11

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0,39%. $^{206}\text{Pb}_\text{c}$ и $^{206}\text{Pb}^*$ – обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D – дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

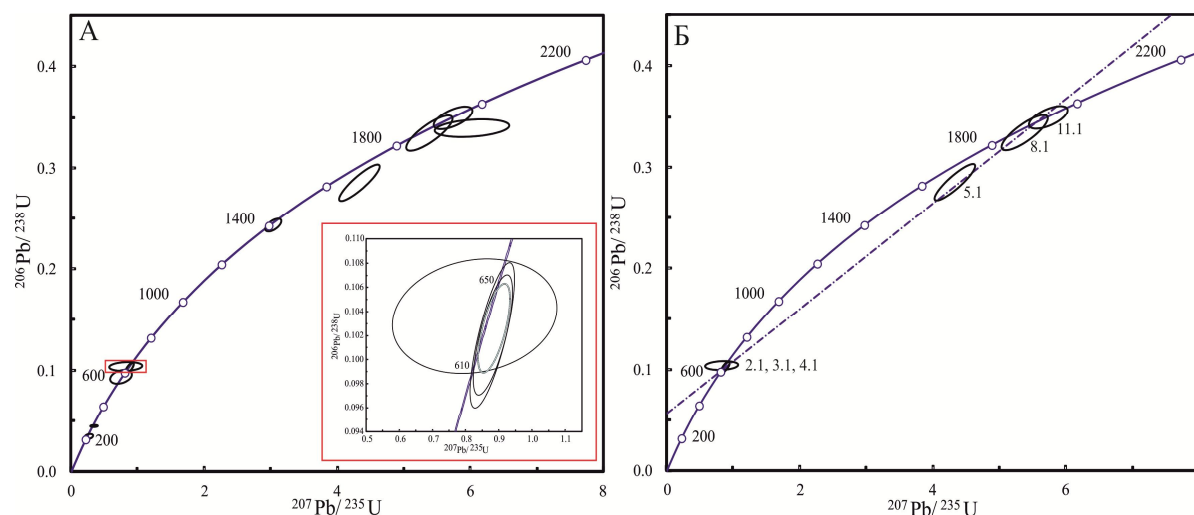


Рис. 5. А – Диаграмма с конкордией для цирконов из плагиогранит-порфириров (обр. 4729-2). Координаты точек – центры эллипсов погрешностей (2σ). На врезке – средний конкордантный возраст, рассчитанный для трех зерен – 633 ± 14 млн лет (2σ , СКВО = 4,5); Б – Дискordia, проведенная через точки 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 8.1, 11.1 с верхним пересечением в 1909 ± 41 млн лет и нижним пересечением в 611 ± 41 млн лет (СКВО = 0,78).

Fig. 5. А – Concordia diagram for zircons from plagiogranite-porphyrries (sample 4729-2). The coordinates of the points are the centers of the error ellipses (2σ). The inset shows the average concordant age (blue ellipse) calculated for 3 grains – 633 ± 14 Ma (2σ , MSWD = 4,5); Б – Discordia for points 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 8.1, 11.1 with an upper intersection of 1909 ± 41 Ma and a lower intersection of 611 ± 41 Ma (MSWD = 0,78).

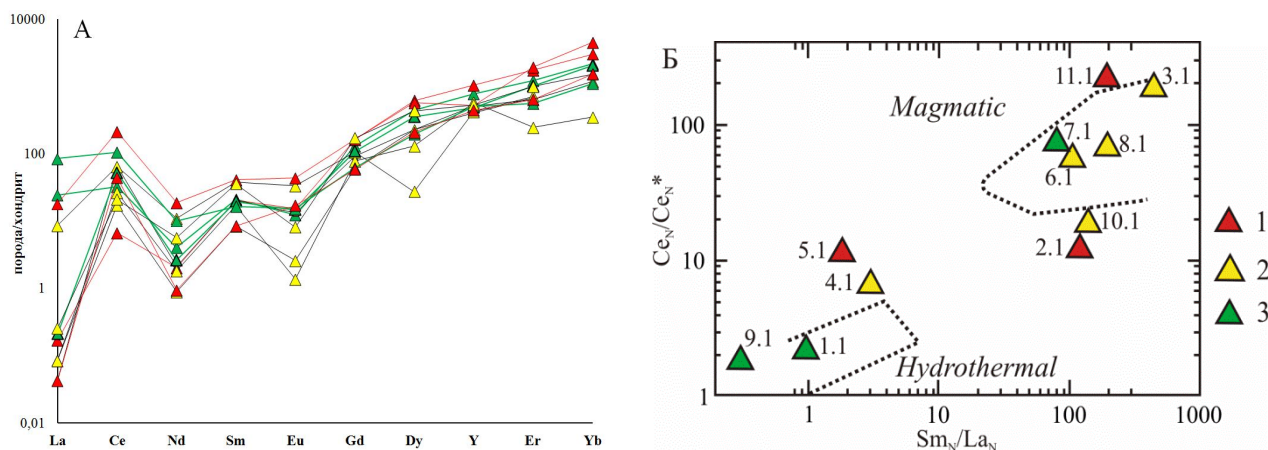


Рис. 6. А – График распределения РЗЭ в цирконах из плагиогранит-порфириров. Содержания РЗЭ нормированы к составу хондрита CI [12]; Б – Дискриминационная диаграмма $Sm_N/La_N-Ce_N/Ce_N^*$ для цирконов. Пунктиром нанесены поля состава магматических и гидротермальных (метасоматических) цирконов по [11]. Условные обозначения: зерна цирконов: 1 – позднерифейского возраста; 2 – раннерифейско-позднекарельского возраста; 3 – омоложенные.

Fig. 6. А – Distribution chart of REE in zircons from plagiogranite-porphyrries. REE contents are normalized to the composition of CI chondrite [12]; Б – $Sm_N/La_N-Ce_N/Ce_N^*$ discrimination diagram for zircons. The compositional fields of magmatic and hydrothermal (metasomatic) zircons are shown by dotted lines, according to [11]. Legend: zircon grains: 1 – of Late Riphean age; 2 – of Early Riphean–Late Karelian age; 3 – rejuvenated.

рассечение в 611 ± 41 млн лет (рис. 5, б). Три точки с древними возрастами (3.1, 5.1, 8.1) компактно расположены вблизи верхнего пересечения, а точки с позднерифейскими возрастами (2.1, 5.1, 11.1) лежат на конкордии вблизи нижнего пересечения. Верхнее пересечение близко к возрастам части древних цирконов, а нижнее – соответствует в пределах погрешности времени образования зерен с возрастными 626–635 млн лет, косвенно подтверждая наше предположение, что кристаллизация плагиогранит-порфириров происходила в позднем рифее.

Содержание Ti в рассмотренных зернах циркона варьирует от 2,8 до 22,8 г/т (табл. 3), что, по-видимому, связано с гетерогенностью цирконов и наложенными изменениями. Низкие концентрации Ti (6,0–7,9 г/т) характерны для зерен 7.1 и 9.1 с самыми молодыми возрастами и зерна 1.1 с нарушенной ядерной частью. Температура их формирования, оцененная по содержанию Ti в цирконе [13], составляет $760\text{--}789^\circ\text{C}$ (при $a_{SiO_2}=1$ и $a_{TiO_2}=0,7$). Содержание Ti в зернах, для которых получены древние раннерифейские-позднекарельские датировки,

изменяется от 7,9 до 22,8 г/т, что соответствует температуре 793–914°C. Два из трех зерен поздне-рифейского возраста, которые, как мы полагаем, образовались при формировании плагиогранит-порфиров, содержат 9,4–9,5 г/т Ti, что позволяет оценить температуру их кристаллизации в 811–812°C. Одно зерно по каким-то причинам имеет аномально низкое содержание Ti – 2,8 г/т, что отвечает температуре 696°C (табл. 3). Полученные температуры хорошо согласуются с известными расчетными данными для цирконов из магматических пород [13, 14]. Однако, как предполагается в целом для этой методики [14], могут быть несколько заниженными по отношению к температуре кристаллизации соответствующих магматических расплавов.

Таблица 3
*Содержание титана в цирконах (мкг/г)
из плагиогранит-порфиров (обр. 4729-2)
и рассчитанные температуры
их кристаллизации (°C)*

Table 3
*Titanium content in zircons (ppm) from
plagiogranite-porphyrates (sample 4729-2)
and calculated temperatures
of their crystallization (°C)*

Зерно	Ti ⁴⁸	T°(Ti ⁴⁸)
1.1	5,7	760
2.1	9,5	812
3.1	16,0	871
4.1	11,8	836
5.1	9,4	811
6.1	7,9	793
7.1	6,0	766
8.1	22,8	914
9.1	7,9	789
10.1	12,4	841
11.1	2,8	696

Выводы

Проведенное исследование позволяет определить возраст плагиогранит-порфиров, относящихся к сокольнинским субвулканическим образованиям, как позднерифейский на основании расположения тел в поле развития нижней подсвиты сокольнинской свиты и U-Pb возраста цирконов – 633±14 млн лет. Полученный возраст полностью согласуется с результатами датирования детритовых цирконов из вулканомитовых песчаников нижней части сокольнинской свиты. Предполагаемая комагматичность субвулканических тел и покровных образований сокольнинской свиты позволяет обоснованно утверждать, что возраст этой свиты (по крайней мере ее нижней части) является поздне-рифейским. Учитывая надсубдукционные геохимические характеристики магматических пород сокольнинской свиты, можно сделать вывод о том, что в состав Амдерминского блока северо-западного Пай-Хоя входят породы, образовавшиеся в позднем рифе на активной континентальной окраине или входившие в состав островной дуги.

Авторы выражают благодарность Д.В. Зархидзе и Е.В.Стариковой (ВСЕГЕИ) за возможность

сбора полевого материала, М.А.Коблу (Стэнфордский университет, США), оказавшему помощь в датировании цирконов и В.А. Капитановой (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) за содействие в оформлении статьи.

Работа осуществлялась в рамках темы НИР «Литосфера северо-востока Европейской платформы и севера Урала: вещественно-структурная эволюция, корреляция геологических событий, геодинамика, геохронология». ГР № АААА-А17-117121270035-0.

Литература

1. Терешко В.В. Новые данные по стратиграфии верхнепротерозойских отложений северо-западного Пай-Хоя // Стратиграфия и палеогеография фанерозоя европейского Северо-Востока СССР / Труды X Геол. конф. Коми АССР. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО АН СССР, 1987. С. 9–12.
2. Кузнецов А.Б., Старикова Е.В., Маслов А.В., Константинова Г.В. Sr-изотопная хемостратиграфия докембрийских карбонатных пород Амдерминского поднятия, Пай-Хой // Доклады АН. 2016. Т.469. № 4. С. 447–451.
3. Канева Т.А., Удоротина О.В., Старикова Е.В., Хубанов В.Б. Оценка нижнего возрастного предела неопротерозойской сокольнинской свиты северо-западного Пай-Хоя на основе U-Pb датирования детритных цирконов // Бюлл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отд. геол. М.: Изд-во МГУ, 2015. Т.90. Вып. 6. С. 3–10.
4. Унифицированные методы анализа силикатных горных пород с применением комплексонометрии. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт минерального сырья, 1979. 33 с.
5. Ireland T.R. Ion microprobe mass-spectrometry: Techniques and applications in cosmochemistry, and geochronology / M. Hyman, M. Rowe (Eds.)// Advances in analytical geochemistry. JAI Press. 1995. Vol. 2. P. 1–118.
6. Coble M.A., Vazquez J., Barth A.P., Wooden J. et al. Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis // Geostandards and Geoanalytical Research 42. 2018. P.481–497.
7. Ludwig K.R. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // Berkeley Geochronology Centre Special Publication 5. 2009. 110 p.
8. Ludwig K.R. Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publication 5. 2012. 75 p.
9. Канева Т.А. Петрогенезис и геодинамика позднедокембрийских вулканитов северо-западного Пай-Хоя // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2016. №12. С. 3–15.
10. Rubin J.N., Henry C.D., Price J.G. Hydrothermal zircons and zircon overgrowths, Sierra Blanca Peaks, Texas // American Mineralogist. 1989. Vol. 74. P. 865–869.
11. Hoskin P.W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Ha-

dean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. № 69. P. 637–648.

12. *McDonough W. F., Sun S. S.* The Composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. P. 223–253.
13. *Watson E.B., Wark D.A. and Thomas J.B.* Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006. 151(4). P. 413–433.
14. *Fu B., Page F.Z., Cavosie A.J., Fournelle J. et al.* Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations // *Contrib. Miner. Petrol.* 2008. 156. P. 197–215.

References

1. *Tereshko V.V.* Novye dannye po stratigrafii verhneproterozoiskih otlozhenii severo-zapadnogo Pay-Khoya [New data on the stratigraphy of the Upper Proterozoic sediments of the northwestern Pay-Khoy] // *Stratigrafiya i paleogeografiya fanerozoia evropeiskogo severo-vostoka SSSR* / Trudy X geol. konf. Komi ASSR [Stratigraphy and paleogeography of the Phanerozoic of the European northwest of the USSR / Transact. of X geol. conf. of the Komi USSR]. Syktyvkar: Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, USSR Ac. Sci., 1987. P. 9–12.
2. *Kuznetsov A.B., Starikova E.V., Maslov A.V., Konstantinova G.V.* Sr-izotopnaya hemostratigrafiya dokembriyskih karbonatnykh porod Amdermingskogo podnatiya, Pay-Khoy [Sr Isotopic chemostratigraphy of Precambrian carbonate rocks in the Amderma Uplift, Pay-Khoy] // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 246. № 4. P. 447–451.
3. *Kaneva T.A., Udoratina O.V., Starikova E.V., Khubanov V.B.* Ocenka nizhnego vozrastnogo predela neoproterozoiskoi sokolninskoi svity severo-zapadnogo Pay-Khoya na osnove U-Pb datirovaniya detritnykh cirkonov [Evaluation of the lower age limit of Neoproterozoic Sokolninsk Suite in northwestern Pay-Khoy based on detrital zircons U-Pb dating] // *Bull. of Moscow society of naturalists. Geology series*. Moscow: Moscow State Univ. Publ., 2015. Vol.90. Issue 6. P. 3–10.
4. *Unificirovannye metody analiza silikatnykh gornykh porod s primeneniem kompleksnometrii* [Unified methods of analysis of silicate rocks using complexometry]. Moscow: All-Union research Institute of mineral raw materials, 1979. 33 p.
5. *Ireland T.R.* Ion microprobe mass-spectrometry: Techniques and applications in cosmochemistry, and geochronology / M. Hyman, M. Rowe (eds.) *Advances in analytical geochemistry*. JAI Press. 1995. Vol. 2. P. 1–118.
6. *Coble M.A., Vazquez J., Barth A.P., Wooden J. et al.* Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis // *Geostandards and Geoanalytical Research* 42. 2018. P. 481–497.
7. *Ludwig K.R.* SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // *Berkeley Geochronology Centre Special Publication* 5. 2009. 110 p.
8. *Ludwig K.R.* Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel // *Berkeley Geochronology Center Special Publication* 5. 2012. 75 p.
9. *Kaneva T.A.* Petrogenezis i geodinamika pozdnedokembriyskih vulkanitov severo-zapadnogo Pay-Khoya [Petrogenesis and geodynamics of the Late Precambrian volcanic rocks of the northwestern Pay-Khoy] // *Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS*. Syktyvkar: Geoprint, 2016. №12. P. 3–15.
10. *Rubin J.N., Henry C.D., Price J.G.* Hydrothermal zircons and zircon overgrowths, Sierra Blanca Peaks, Texas // *American Mineralogist*. 1989. Vol. 74, P. 865–869.
11. *Hoskin P.W.O.* Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. № 69. P. 637–648.
12. *McDonough W.F., Sun S.S.* The Composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. P. 223–253.
13. *Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B.* Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006. 151(4). P. 413–433.
14. *Fu B., Page F.Z., Cavosie A.J., Fournelle J. et al.* Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations // *Contrib. Miner. Petrol.* 2008. 156. P. 197–215.

Статья поступила в редакцию 13.01.2020.