

Геохимическая характеристика пород и изотопное датирование циркона из дайки андезитов рудянской толщи (D₂rd) Восточной зоны Среднего Урала

Василий Станиславович ЧЕРВЯКОВСКИЙ^{1*},
Евгений Александрович СЛОБОДЧИКОВ²
Мария Владимировна ЧЕРВЯКОВСКАЯ¹
Надежда Николаевна ФАРРАХОВА¹
Елена Николаевна ВОЛЧЕК^{1**}

¹Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Аннотация

Актуальность. Субвулканические образования рудянской толщи среднего девона (D₂rd) в пределах Восточной зоны Среднего Урала имеют широкое распространение. Они представлены разнообразными по составу малыми телами, силлами и дайками, образующими с коагматичными вулканогенными породами базальт-андезит-дацитовый комплекс, формирование которого связано с вулканической деятельностью, происходившей в среднем девоне в обстановке, близкой к современным островным дугам. Их геохимическая характеристика и изотопное датирование весьма актуальны для уточнения состава, объема и палеогеодинамической обстановки формирования вулкаников. Многочисленные субвулканические тела базальтов, андезибазальтов, андезитов, дацитов и риолитов рудянской толщи наблюдаются в разрезах по берегам р. Пышмы. В статье приводятся новые данные по геохимии андезитов дайки из расположенного здесь массива вулканических пород Дивий Камень и возрасту циркона из них.

Методы. Химические анализы вулкаников выполнялись в центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) рентгеноспектральным флуоресцентным методом и методом ICP-MS. Цирконы изучались на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390L фирмы Jeol и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100. Данные по изотопам U и Pb, а также элементам-примесям в зернах циркона получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на квадрупольном ИСП-МС NexION 300S с приставкой для лазерной абляции LA NWR 213.

Цель исследований – получение новых данных по геохимическому составу и возрасту андезитов дайки в разрезе по р. Пышме.

Результаты. Дайка андезитов пересекает среднеобломочные неслоистые туфы и наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфирирового дацита. Андезиты представляют собой порфирировые породы с 20–30 % вкрапленников измененного плагиоклаза. Они умеренно калиевые, высокоглиноземистые, низкотитанистые. По сравнению со средними океаническими толеитами (N-MORB) они обогащены Rb, K, Ba, Sr, Th и обеднены Y, Ti, Zr, Hf. На нормализованной многокомпонентной диаграмме проявлен Ta-Nb минимум. Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) для зерен циркона показывают увеличение содержания от легких к тяжелым РЗЭ, положительную Ce и отрицательную Eu аномалию. Впервые методом LA-ICP-MS проведено геохронологическое исследование цирконов из андезитов. Выявлено 4 возрастные группы цирконов, млн лет: 390–387; 369–362; 337–345; 327–329.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о том, что андезиты формировались в надсубдукционной обстановке, а магматическому этапу становления пород, отвечают верхнедевонские разновидности цирконов. Ранне-среднекаменноугольные датировки могут быть связаны с тепловым воздействием, возникшим при внедрении более поздней дайки долеритов.

Ключевые слова: Восточная зона Урала, рудянская толща, массив Дивий Камень, дайка, андезит, геохимическая характеристика, циркон, изотопный возраст.

Введение

Образования рудянской толщи (D₂rd) на востоке Среднего Урала слагают разрезы локальных тектонических блоков. Они представлены различными соотношениями эффузивных, пирокластических и осадочных пород, возраст которых принят среднедевонским на осно-

вании находок верхнеэфельско-раннеживетской фауны в известняках и кремнистых отложениях. Ранее их относили к базальт-андезит-дацит-липаритовой формации, базальт-дацитовой толще, а также к базальт-андезит-риолитовому комплексу [1–3].

✉ v.chervyakovskiy@mail.ru

**volchek@igg.uran.ru

кообломочные литокристаллокластические туфы андезитобазальтового состава; 12 – мелкообломочные литокристаллокластические туфы андезитобазальтового состава с редкими крупными обломками; 13 – туфолавы и лавобрекчии андезитобазальтового состава; 14 – туфы и туфолавы; 15 – андезиты; 16 – разрывные нарушения, надвиги; 17 – разрывные нарушения: установленные (а), предполагаемые (б); 18 – установленные геологические границы; 19 – предполагаемые геологические границы; 20 – элементы залегания слоистости; 21 – зоны закалывания; 22 – номера даек, упоминаемые в тексте

Figure 1. Section of the volcanogenic part of the strata: diagrams: а – geological structure of the territory of the Pyshma river basin (compiled from [4] with additions by the authors); 1 – albitized and chloritized aphyric basalts (D_2); 2 – lavas and basalt tufts (D_2); 3 – lavas and tufts of basalts, andesites, dacites and rhyolites (D_2ef); 4 – clayey-siliceous shales (D_2gv); 5 – shales and siltstones (D_3f); 6 – clay shales, siltstones, sandstones (а), trachybasalts, trachyrhyolites and their tufts, tuff sandstones, tuff gravestones and tuff conglomerates at the base (б) (C_1bk); 7 – clayey shales, siltstones, sandstones with interlayers of conglomerates, gravelites and coals (C_1eg+br); 8 – layered and massive limestones with interlayers of shales and marls (C_1is); intrusive formations: 9 – gabbro-diorites ($v\delta S_2r$); 10 – vein plagiogranites ($p\gamma S_2r$); subvolcanic formations: 11 – basaltic andesites ($\alpha\beta D_2$); 12 – andesites (αD_2); 13 – rhyolites and rhyodacites (λD_2); 14 – vents of the central (а) and fissure (б) types (αD_2); 15 – gabbro-dolerite and dolerite dikes (βC_1); 16 – reef limestones; 17 – sandstones and siltstones; 18 – discontinuity faults: established (а), suspected (б); 19 – rock shear zones; 20 – location of the Diviy Kamen massif; б – geological structure of the Diviy Kamen rock; scale 1: 500 (compiled by the authors): 1 – alluvial deposits; 2 – dolerite dike; 3 – subvolcanic body of rhyolites; 4 – andesite dike; 5 – subvolcanic dacite body; 6 – subvolcanic body of andesites; 7 – agglomerate tufts of the vent facies; 8 – heteroclastic lithocrystalline tufts; 9 – clastolavas of andesite-basaltic and andesite composition; 10 – medium-fine clastic lithocrystalline tufts of andesite-basaltic composition; 11 – fine-clastic lithocrystalline-clastic tufts of andesite-basaltic composition; 12 – fine-clastic lithocrystalline-clastic tufts of andesite-basaltic composition with rare large fragments; 13 – tuff lavas and lava-breccias of andesite-basaltic composition; 14 – tufts and tuff lavas; 15 – andesites; 16 – faults, thrusts; 17 – discontinuity faults: established (а), suspected (б); 18 – established geological boundaries; 19 – estimated geological boundaries; 20 – elements of bedding; 21 – hardening zones; 22 – numbers of dikes mentioned in the text

Наиболее информативный разрез вулканогенной части толщи находится в бассейне р. Пышмы на отрезке от устья р. Рефт до устья р. Шаты. Именно по расположенному на данной территории поселку Рудянский толща получила свое название. Здесь наблюдается сложное чередование лав и туфов андезитов, андезитобазальтов, базальтов, дацитов, риолитов, туфоконгломератов, туфогравелитов, туфопесчаников, туффитов (рис. 1, а). Преобладающими в разрезе являются слоистые туфы базальтов, андезитобазальтов и андезитов размерностью от агломератовых до мелкообломочных. Агломератовые туфы содержат включения сплюснутых и шаровидных бомб [1, 4]. Соответствующие им лавы менее распространены, местами они имеют подушечное строение. Пирокластические образования дацитового, риодацитового и риолитового состава, представленные мелкообломочными, лапиллиевыми и бомбовыми туфами, распространены ограниченно. Порфирные лавы кислого состава образуют экструзии и небольшие потоки с лавобрекчиями в краевых частях [1]. На представленной схеме геологического строения лавы и туфы не разделялись (рис. 1, а).

Характерным для геологического строения этого участка является наличие большого количества субвулканических тел, экструзий, силлов, даек, представленных базальтами, андезитобазальтами, андезитами, дацитами и риолитами. Значительная часть таких интрузивных тел приурочена к тектоническим нарушениям субмеридионального и субширотного направлений. Иногда они имеют в плане хорошо выраженные кольцевые формы [4].

В пределах развития вулканогенной толщи при проведении геолого-съёмочных работ выделялась Рудянская вулканотектоническая структура и четыре осложняющих ее вулканических жерловины [4]. Более поздними исследованиями в районе течения р. Пышмы и ее притоков были реконструированы палеозойские вулканические постройки центрального типа, среди которых стратовулкан Дивий Камень.

Стоит отметить, что изучение геологического строения этой территории имеет длительную историю, неразрывно связанную с историей Уральского государственного горного университета и именами

преподавателей геологических специальностей, так как здесь находится учебный геологический полигон для студентов вуза.

Изотопные датировки и геохимические характеристики для вулканогенных образований рудянской толщи, способствующие уточнению схемы расчленения вулканических и палеогеодинамической обстановки их формирования, имеются в небольшом количестве [5, 6]. Нами были получены новые геохимические данные для андезитов дайки в скальном массиве Дивий Камень ($56^{\circ}58'21''$ с. ш., $61^{\circ}56'32''$ в. д.) и определен возраст цирконов из этих образований.

Методы исследования

Химические анализы вулканических образований выполнялись в центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) рентгеноспектральным флуоресцентным методом и методом ICP-MS. Цирконы изучались на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390L фирмы Jeol и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100. Данные по изотопам U и Pb, а также элементам-примесям в зернах циркона получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на квадрупольном ICP-MS NexION 300S с приставкой для лазерной абляции LA NWR 213. Используемое оборудование размещено в помещении класса чистоты 7 ИСО. Процедура измерения Pb/U изотопных отношений и алгоритм расчета возраста приведены в работе [7]. Параметры приставки для лазерной абляции следующие: диаметр кратера – 25 мкм, частота повторения импульсов – 10 Гц, плотность энергии – 12,5–13,5 Дж/см². Результаты обрабатывались в программе GLITTER V4.4. Корректировка присутствия общего свинца проведена в программе ComPbCorr [8]. Построение конкордии выполнено в макросе для Excel Isoplot v.4.15. В качестве первичного стандарта, измеренного методом «взятия в вилку» через 10 измерений, использовали циркон GJ (в качестве вторичных – цирконы 91500 и Plesovice). U–Pb возраст для стандартов GJ и Plesovice составляет 601 ± 2 (1 σ) и 338 ± 2 (1 σ) млн лет соответственно в рамках данной измерительной сессии.

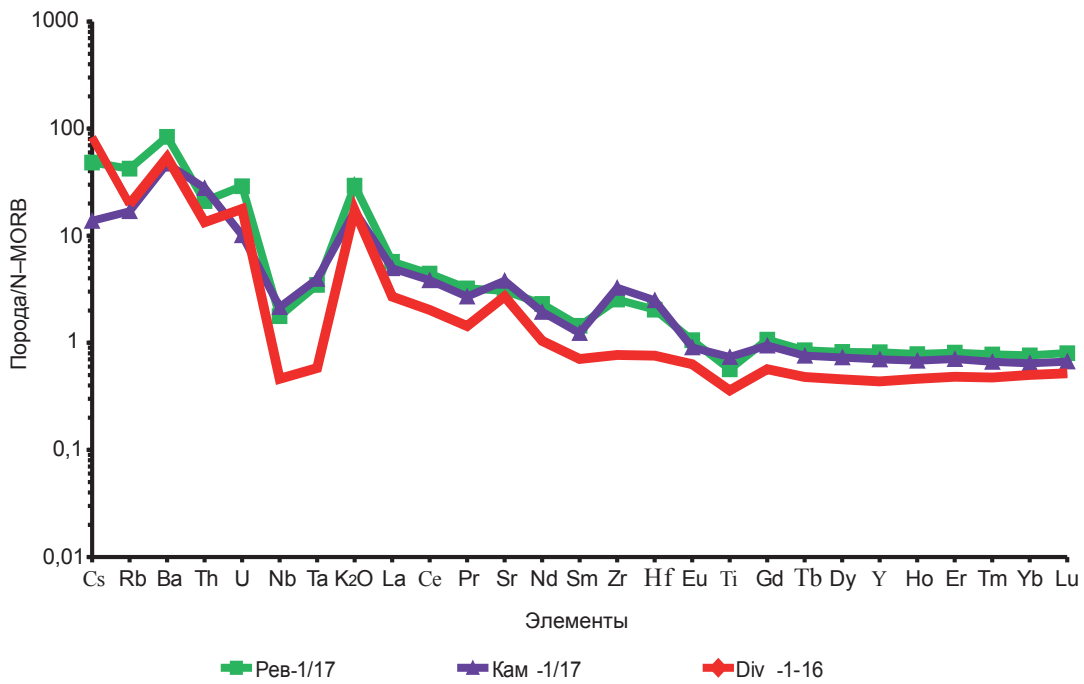


Рисунок 2. Спектры распределения редких элементов в андезите скалы Дивий Камень (Div-1-16) и раннекаменноугольных вулканитах р. Исеть (Кам-1/16, Рев-1/16) Восточной зоны Среднего Урала. Содержания элементов, нормированы к N–MORB [10]
Figure 2. Distribution spectra of trace elements in the andesite of the Diviy Kamen rock (Div-1-16) and Early Carboniferous volcanics of the river Iset (Kam-1/16, Rev-1/16) of the Eastern zone of the Middle Urals. Element contents normalized to N–MORB [10]

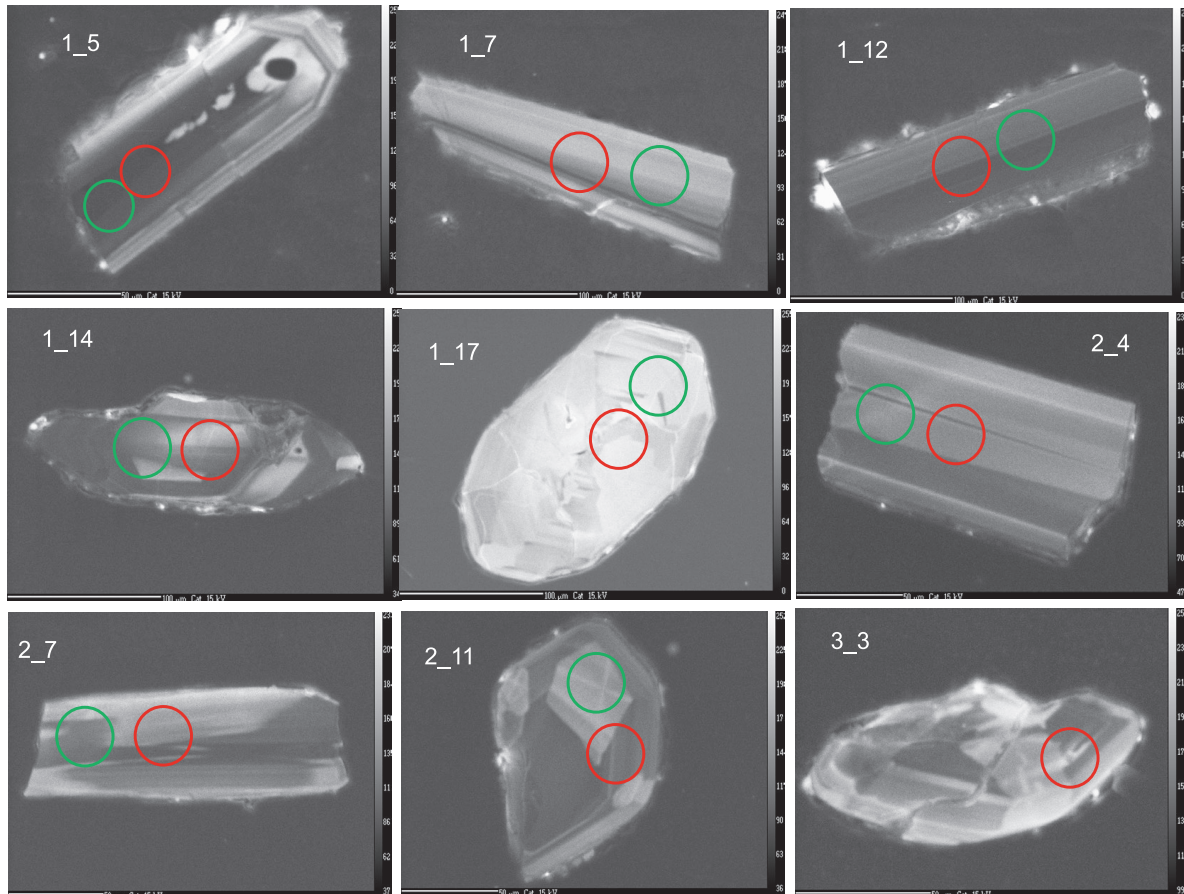


Рисунок 3. Катодолуминесцентные изображения цирконов из андезитов с аналитическими кратерами. Зеленый цвет кружка – РЭЭ, красный – возраст
Figure 3. Cathodoluminescence images of zircons from andesites with analytical craters. Green circle – REE, red – age

Выделение монофракции циркона выполнялось по стандартной схеме, включающей прежде всего дробление горной породы до < 0,25 мм и отмывку полученной пробы. Немагнитная фракция разделена в тяжелой жидкости (бромформ). Концентрат для выделения зерен цирконов под бинокулярным микроскопом получен с помощью электромагнитной сепарации. Для дальнейшего исследования зерна цирконов были помещены в оксидную шашку.

Петрогеохимическая характеристика пород и результаты датирования цирконов из андезитов массива Дивий Камень. Массив вулканических пород Дивий Камень расположен на левом склоне долины р. Пышмы, в месте ее резкого изгиба и смены направления течения с широтного на меридиональное (рис. 1, а). Массив является основным реликтом стратовулкана, относимого к этно-везувианскому типу вулканов с преобладающей эксплозивной стадией извержения. Это подтверждается широким развитием вулканогенно-обломочных пород и незначительным распространением в разрезе эффузивных фаций.

Скальный массив имеет отвесные склоны и сглаженную вершинную поверхность. С севера выходы пород срезаются субширотной долиной небольшого ручья, проходящего по разлому. С юга обнажение пересекается логом также субширотной ориентировки с редкими небольшими осыпями на крутых склонах. Здесь наблюдаются

небольшие выходы коренных пород. Длина скального массива составляет около 230 м при максимальной высоте 40 м. Его центральная часть на протяжении ≈ 170 м имеет крутой склон, труднодоступный для наблюдения. В его северной части (северо-западный угол карты) наблюдается переслаивание крупно-, средне- и мелкообломочных туфов, имеющих юго-восточное падение (рис. 1, б).

Слоистую толщу туфов протыкает неск, сложенный андезитобазальтовыми агломератовыми туфами с крупными обломками плагиофировых андезитов и порфировых дацитов. Неск дугой, выпуклой к юго-западу, окаймляет вершину обнажения. В поперечном сечении он имеет овальную форму с длинной осью, ориентированной в северо-северо-восточном направлении и размер в ширину около 60 м.

К северо-западу от неск и у его южной окраины закартированы две дайки андезитового состава. Дайка I мелкопорфирового андезита мощностью 1 м расположена западнее северного закругления неск (рис. 1, б), она имеет субвертикальное залегание при северо-восточном простирании. Дайка пересекает среднеобломочные неслоистые туфы, наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфирового дацита и имеет четкие эндоконтактные зоны закалывания. Массивная порода дайки серо-зеленого цвета содержит небольшое количество пор вдоль контактов и обладает мелкопорфировой структурой. Во вкрапленниках развит плагиоклаз.

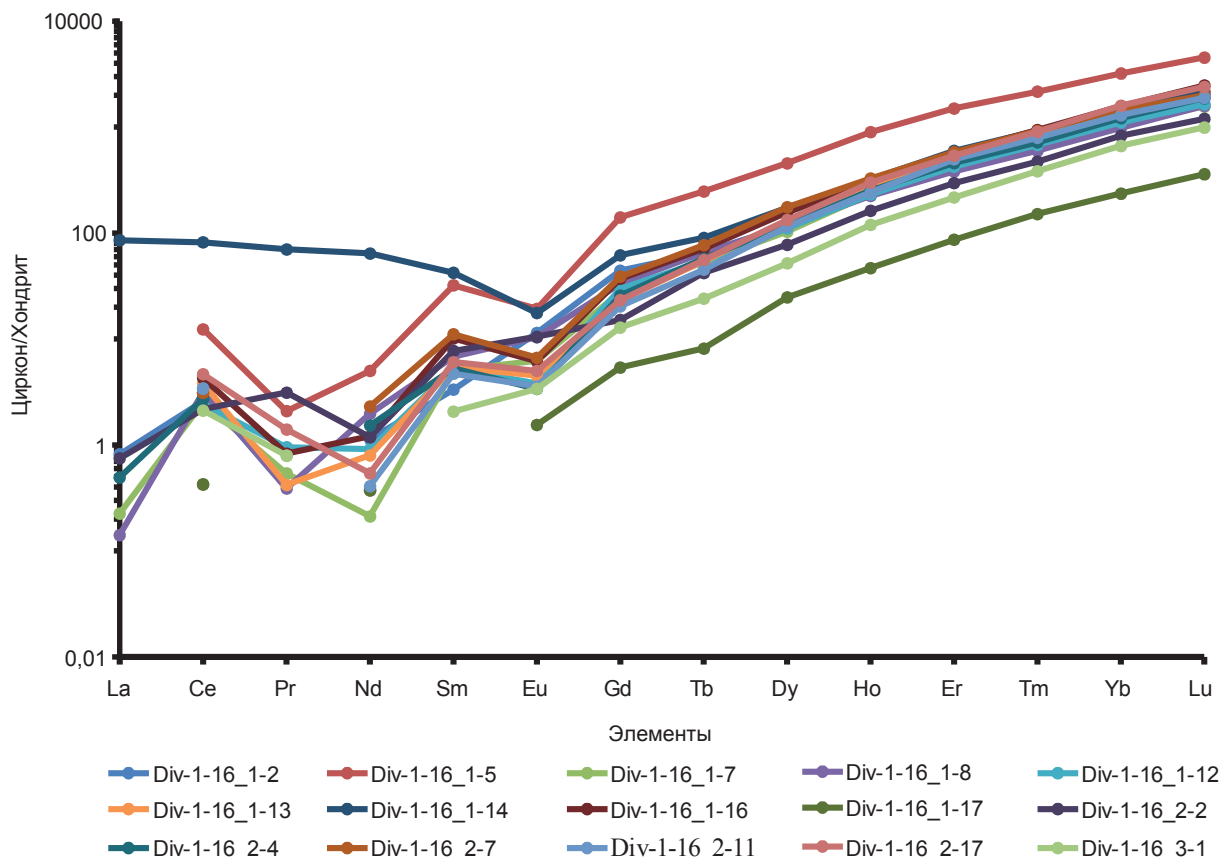


Рисунок 4. Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконах из андезитов скалы Дивий Камень. Нормировано к хондриту по [10]. Номера цирконов на рисунке соответствуют номерам в табл. 1

Figure 4. Distribution spectra of rare earth elements in zircons from andesites of the Diviy Kamen rock. Normalized to chondrite according to [10]. The zircon numbers in the figure correspond to the numbers in table 1

Дайка 2 мелкопорфирового андезита, рассекающая в верхней части склона южную оконечность некка, имеет прямую форму и вертикальное залегание. В нижней части склона дайка резко изгибается, используя контакт туфов, а затем рассекает последние по трещине, азимут падения $265 \angle 80^\circ$.

Породы дайки 1 по петрохимическому составу соответствуют андезитам нормальной щелочности ($\text{SiO}_2 = 59,3$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4,6$ мас. %). Они высокоглиноземистые ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 14,67$ мас. %), низкотитанистые ($\text{TiO}_2 - 0,44$ мас. %). По содержанию K_2O являются умеренно калиевыми (1,04). Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) составляет 42 г/т, величина $\text{La}_n/\text{Yb}_n - 2,95$. Дефицит европия не проявлен ($\text{Eu}_n/\text{Eu}_n^* = 1$). Особенности распределения элементов-примесей в вулканите заключаются в преобладании крупноионных элементов (Rb, Ba, Th, K) над высокозарядными (Zr, Hf и тяжелыми РЗЭ). Сопоставление изученных андезитов с аналогичными по составу образованиями раннекаменноугольного возраста, формирование которых связывается с режимом активной континентальной окраины, показало, что содержания K_2O , РЗЭ и элементов с высоким ионным потенциалом (Ta, Nb, Zr, Hf, Y, Yb) в них ниже, чем в раннекаменноугольных андезитах [9]. На нормализованной по отношению к N-MORB многокомпонентной диаграмме в исследованной породе наблюдается положительная аномалия по Sr, практически отсутствует аномалия по Zr-Hf, вырисовывается отчетливый Ta-Nb минимум, более глубокий, чем в андезитах раннего карбона (рис. 2). Отношение Th/Yb и Ta/Yb в андезитах составляет соответственно 1,05 и 0,05. Такие геохимические характеристики, а также низкое содержание титана свойственны надсубдукционным островодужным образованиям. Однако по сравнению с ними изученные породы имеют более высокое значение отношения Zr/Y (4,67) и содержание Zr, что характерно для пород, развитых вблизи континентальных окраин.

Из отобранной пробы (Div-1-16) было выделено 30 цирконов. Это мелкие (50–100 мкм) прозрачные зерна, желтоватого цвета. Среди них есть удлиненные и изометричные, а также обломки. Удлиненные кристаллы тригональные, в них наблюдается полосчатая зональность, что хорошо видно на CL-изображениях (рис. 3).

Полученные геохимические данные по цирконам показали, что большая их часть представлена неизменными кристаллами. По характеру распределения РЗЭ они соответствуют цирконам магматического генезиса (табл. 1) [11]. В спектрах РЗЭ отмечается преобладание тяжелых редкоземельных элементов над легкими, положительная Ce и отрицательная Eu аномалии ($\text{Lu/La}_n = 1601-11283$, $\text{Ce/Ce}^* - 13-24$, $\text{Eu/Eu}^* - 0,3-0,9$ (рис. 4). Содержание Ca

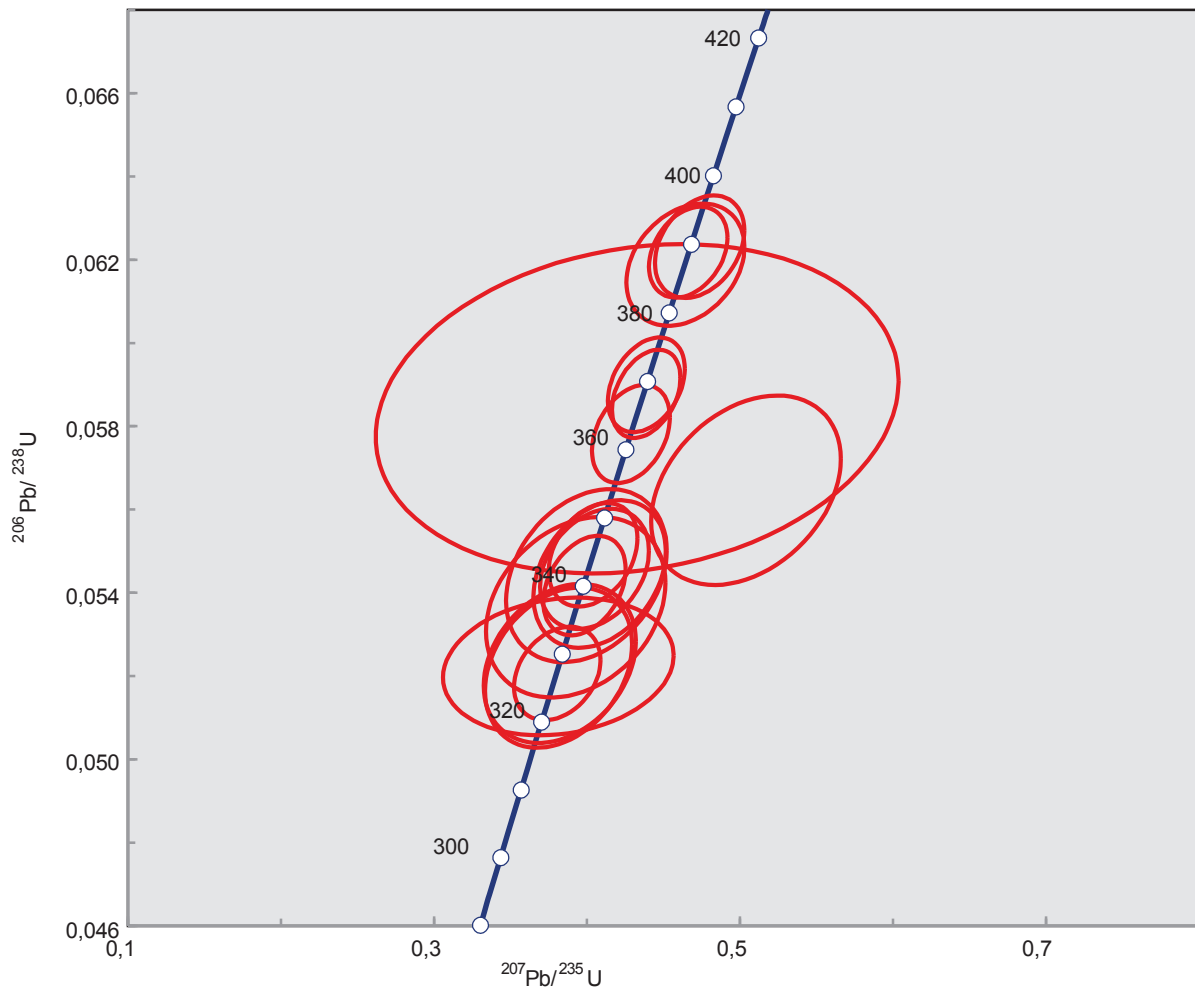


Рисунок 5. Диаграмма с конкордией $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ для зерен цирконов из андезитов скалы Дивий Камень
 Figure 5. Diagram with concordia $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ for zircon grains from andesites of the Diviy Kamen rock

Таблица 1. Содержание микроэлементов в цирконах из андезитов, г/т
Table 1. Content of microelements in zircons from andesites, g/t

Эле- мент	Номера точек измерений														
	Div-1- 16_1-2	Div-1- 16_1-5	Div-1- 16_1-7	Div-1- 16_1-8	Div-1- 16_1- 12	Div-1- 16_1- 13	Div-1- 16_1- 14	Div-1- 16_1- 16	Div-1- 16_1- 17	Div-1- 16_2-2	Div-1- 16_2-4	Div-1- 16_2-7	Div-1- 16_2- 11	Div-1- 16_2-17	Div-1- 16_3-1
La	0,58	< ПО	0,16	0,1	< ПО	< ПО	60,67	< ПО	< ПО	0,53	0,35	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
Ce	4,76	22,68	4,62	5,8	4,44	6,96	150,32	7,85	0,78	4	4,99	5,72	6,24	8,54	3,88
Pr	< ПО	0,58	0,15	0,108	0,265	0,117	19,54	0,231	< ПО	0,87	< ПО	< ПО	< ПО	0,39	0,221
Nd	1,55	6,83	0,29	2,7	1,25	1,09	87,83	1,65	0,51	1,62	2,09	3,15	0,56	0,74	< ПО
Sm	1,48	14,26	2,25	3,03	2,34	2,4	18,76	4,51	< ПО	3,43	2,34	4,93	2,09	2,69	0,92
Eu	1,92	3,24	1,05	1,75	0,64	0,76	2,96	1,04	0,26	1,77	0,57	1,12	0,6	0,84	0,57
Gd	26,35	83,86	16,4	19,8	17,73	13,93	36,74	22,11	3,21	9,01	15,33	23,11	12,16	13,86	7,65
Tb	7,03	26,68	5,72	7,05	5,87	5,88	9,74	7,7	0,88	4,55	6,21	8,32	4,87	6,02	2,6
Dy	86,41	336,45	76,04	85,8	81,55	94,43	127,62	115,35	18,24	57,27	87,76	129,41	84,76	97,95	38,28
Ho	42,45	146,33	38,23	36,57	37,8	44,56	52,42	49,01	7,63	26,51	41,12	53,46	39,41	48,8	19,47
Er	226,83	720,17	187,45	182,9	202,66	248,55	286,44	271,2	41,53	142,13	219,67	278,82	238,36	257,85	103,99
Tm	49,49	160,28	44,63	44,31	50,48	62,51	68,72	69,61	11,22	35	53,18	68,03	58,79	67,02	28,4
Yb	590,3	1542,24	514,41	473,5	532,03	691,74	730,83	755,61	113,54	398,19	586,03	696,39	624,81	766,92	319,71
Lu	143,12	337,09	116,35	117,93	121,95	159,16	157,38	183,03	26,65	88,71	138,92	147,9	140,08	177,45	73,63
Ca	1681,41	< ПО	775,01	< ПО	< ПО	< ПО	36882	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	1392,72	< ПО
Ti	51	7,55	4,94	< ПО	7,69	< ПО	14,22	< ПО	6,6	8,02	20,8	< ПО	9,89	12,37	< ПО
Sr	6,5	< ПО	< ПО	0,37	< ПО	< ПО	36,91	< ПО	< ПО	1,92	< ПО	0,68	0,91	5,52	< ПО
Y	1464	4627	1259	1214	1316	1544	1802	1722	293	910	1398	1763	1359	1680	646
Zr	620 161	625 299	656 096	617 931	608 227	566 131	595 876	544 055	555 890	542 678	577 393	611 268	539 134	604 784	532 612
Nb	< ПО	1,7	0,46	< ПО	0,6	0,92	< ПО	1,27	< ПО	2,21	< ПО	0,68	1,49	1,92	< ПО
Ta181	< ПО	0,368	0,57	0,232	0,249	0,226	< ПО	0,331	< ПО	1,07	< ПО	< ПО	0,354	0,22	0,27

Примечание: < ПО – значение ниже предела обнаружения.

в них колеблется в пределах 775–1681 г/т, Sr – 0,35–6,5 г/т. Кристалл Div-1-14 имеет повышенное содержание легких редких земель по сравнению с остальными зернами ($(Lu/La)_n = 24,8$, $Ce/Ce^* = 1,9$, $Eu/Eu^* = 0,3$), что свидетельствует об изменении этого циркона [12]. Содержание Ca в нем составляет 36882 г/т, Sr – 36,91 г/т. в остальных зернах циркона – 775–1681 г/т (Ca), 0,68–6,5 г/т (Sr). Циркон Div-1-2 можно считать частично измененным, для него характерно более низкое отношение Sm_n/La_n (4,06), чем в магматических разностях (10,32–48,32), и более высокое, чем в зерне Div-1-14 (0,49). По соотношению U/Yb и Y все цирконы соответствуют цирконам континентальной коры [13].

Результаты датирования цирконов приведены в табл. 2 и на рис. 5. Полученные возрасты ($^{206}Pb/^{238}U$) лежат в интервале от 390 до 327 млн лет. На диаграмме $^{206}Pb/^{238}U-^{207}Pb/^{235}U$ точки анализов располагаются на конкордии и образуют четыре возрастные группы (рис. 5). Наиболее древние датировки (390–387 млн лет) имеют 3 призматических кристалла с отчетливым зональным строением. Среди них есть измененный (Div-1-14). Полученное по ним конкордантное значение возраста составляет $388,7 \pm 2,9$ млн лет при СКВО = 0,035. Цир-

коны этого возраста содержат умеренные концентрации урана (U = 190–480 г/т) и тория (Th = 59–197) при Th/U = 0,31–0,41. Другую группу образуют 4 кристалла, возраст которых определяется интервалом от 369 до 362 млн лет. Средневзвешенный $^{206}Pb/^{238}U-^{207}Pb/^{235}U$ возраст по 4 точкам составил $366,8 \pm 2,6$ млн лет при СКВО = 0,0061. Содержание U и Th в них более высокое и составляет 311–742 г/т и 123–428 г/т соответственно, отношение Th/U = 0,38–0,58. Самой многочисленной является группа циркона с возрастными 337–345 млн лет. Вычисленный по ним возраст составил $341,8 \pm 2,5$ млн лет при СКВО = 0,037. Содержание урана и тория в них ниже, чем у первых двух групп, и колеблется в узких пределах (U = 194–246, Th = 60–98, Th/U = 0,27–0,40). Конкордантное значение возраста, полученное для еще одной группы цирконов по 4 точкам, составляет $327,8 \pm 3,1$ млн лет при СКВО = 0,00077.

Обсуждение. Прежде чем интерпретировать результаты датирования цирконов, полученные U–Pb методом, обратимся к геологическим данным. В обнажении Дивий Камень присутствуют субвулканические тела порфировых дацитов и афировых риолитов. Дациты прижерлового тела содержат обломки андезитов, андезибазальтов

Таблица 2. U–Pb изотопные данные для цирконов из андезитов
Table 2. U–Pb isotope data for zircons from andesites

Зерна и кратеры	Изотопные отношения						RHO	Возраст, млн лет				Концентрации, г/т			Th/U		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s	²⁰⁸ Pb/ ²³⁸ U	1s		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s	²⁰⁸ Pb/ ²³⁸ U	1s	Pb ₂₀₆		U ₂₃₈	Th ²³²
Div-1-16_1-2	0,05304	0,00437	0,38242	0,03280	0,05230	0,00126	0,28	331	176	329	24	329	8	65,01	280,92	104,64	0,37
Div-1-16_1-3	0,05329	0,00443	0,39972	0,03470	0,05441	0,00137	0,29	341	178	341	25	342	8	59,28	246,32	98,39	0,40
Div-1-16_1-5	0,05380	0,00198	0,42882	0,01682	0,05781	0,00078	0,34	363	79	362	12	362	5	189,85	742,61	428,07	0,58
Div-1-16_1-7	0,05338	0,00240	0,40408	0,01911	0,05491	0,00082	0,32	345	97	345	14	345	5	51,52	212,23	72,79	0,34
Div-1-16_1-8	0,05416	0,00170	0,43887	0,01471	0,05878	0,00070	0,36	378	67	369	10	368	4	80,93	311,56	122,88	0,39
Div-1-16_1-12	0,05515	0,00213	0,47373	0,01928	0,06231	0,00081	0,32	418	82	394	13	390	5	52,47	190,60	59,16	0,31
Div-1-16_1-13	0,05396	0,00192	0,43892	0,01662	0,05899	0,00075	0,34	369	76	369	12	369	5	82,06	315,09	120,54	0,38
Div-1-16_1-14	0,05444	0,00286	0,46444	0,02544	0,06188	0,00097	0,29	389	112	387	18	387	6	59,65	218,46	94,67	0,43
Div-1-16_1-16	0,05439	0,00188	0,46633	0,01697	0,06218	0,00072	0,32	387	74	389	12	389	4	132,02	481,29	197,33	0,41
Div-1-16_1-17	0,05375	0,01379	0,43295	0,11278	0,05842	0,00261	0,17	361	455	365	80	366	16	12,74	49,46	2,76	0,06
Div-1-16_2-1	0,05304	0,00250	0,38072	0,01871	0,05206	0,00074	0,29	331	101	328	14	327	5	139,39	607,49	252,08	0,41
Div-1-16_2-2	0,05296	0,00682	0,38142	0,04974	0,05223	0,00109	0,16	327	268	328	37	328	7	32,30	140,37	42,46	0,30
Div-1-16_2-4	0,05309	0,00503	0,39275	0,03868	0,05365	0,00143	0,27	333	201	336	28	337	9	47,62	202,14	59,51	0,29
Div-1-16_2-7	0,05384	0,00297	0,40509	0,02346	0,05457	0,00095	0,30	364	119	345	17	343	6	58,99	246,33	96,19	0,39
Div-1-16_2-11	0,05335	0,00225	0,39851	0,01775	0,05417	0,00079	0,33	344	91	341	13	340	5	46,21	194,5	60,82	0,31
Div-1-16_2-17	0,05438	0,00362	0,40833	0,02856	0,05445	0,00117	0,31	387	143	348	21	342	7	53,62	224,7	60,83	0,27
Div-1-16_3-1	0,05300	0,00422	0,38152	0,03177	0,05220	0,00127	0,29	329	170	328	23	328	8	45,12	197,34	50,15	0,25
Div-1-16_3-3	0,06474	0,00497	0,50407	0,04097	0,05646	0,00150	0,33	766	155	414	28	354	9	69,89	282,77	98,93	0,35

RHO – коэффициент корреляции отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²³⁸U.
Th/U – отношение концентраций элементов.
1s – погрешность 1σ.

и туфов. Было установлено, что субвулканические тела афировых риолитов широко развиты в эффузивно-пирокластической толще на участке от р. Рефт до скалы Дивий Камень и часто соседствуют с субвулканическими телами порфириновых дацитов. Кроме того, в этой же полосе также часто встречаются лавовые потоки афировых риолитов, переслаивающиеся со среднедевонскими туфами и лавами андезитобазальтового состава. Такие потоки можно наблюдать в долине руч. Рудянка у северо-восточной окраины с. Рудянское, в карьере на левобережье руч. Рудянка у юго-восточной окраины с. Рудянское. Лавовый поток афировых риолитов, подстилающий пачку крупнообломочных туфов, обнажается в левом склоне долины р. Пышмы, а также в верховьях руч. Сухая речка. По структуре, текстуре и вещественному составу афировые риолиты субвулканических тел идентичны излившимся афировым риолитам [5], а значит, являются комагматами. Это позволяет считать субвулканические тела афировых риолитов среднедевонскими.

По характеру пересечения субвулканических тел, сложенных афировыми риолитами и порфириновыми дацитами, закартированными в обнажении Дивий Камень, понятно, что риолиты моложе дацитов. Но их возрастное различие не выходит за пределы интервала накопления среднедевонской толщи. Это объясняется тем, что среднедевонская слоистая толща, вмещающая потоки афировых риолитов, «проткнута» некком вулкана Дивий Камень и прорвана субвулканическим телом порфиринового дацита. Значит, некк и дацит моложе этой среднедевонской туфо-лавовой толщи. Из этого следует, что туфо-лавовая толща, некк и субвулканические тела порфиринового дацита и афирового риолита имеют один и тот же среднедевонский возраст. Это подтверждается результатами определения абсолютного возраста порфиринового дацита по содержащимся в нем цирконам [6].

Изученная дайка андезитов пересекает среднеобломочные неслоистые туфы и наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфиринового дацита, по минеральному составу и структуре аналогичного породам части обломков агломератового туфа, слагающего некк. Судя по месту расположения и составу пород, поток излился из этого же самого жерла, по которому позже извергался разнообломочный пирокластический материал, превратившийся в агломератовые туфы, т. е. возраст лавового потока среднедевонский. Центральный фрагмент этого потока и пересекается дайкой.

Вторая дайка плагиофирового андезита, рассекающая в верхней части склона южную оконечность некка, имеет в этом месте прямолинейную форму при вертикальном залегании и также северо-восточное простирание. Эта дайка обрывается дайкой долерита, возраст которой, по некоторым данным, считается послесреднедевонским [4].

Судя по соотношению даек андезита с лавовым потоком порфиринового дацита и некком, с одной стороны, и с дайкой долерита, с другой, относительный возраст даек укладывается в довольно широкий диапазон: послесреднедевонский–досреднекаменноугольный. С учетом геологических и геохимических данных цирконы возрастного интервала 369–362 млн лет можно считать соответствующими магматическому этапу становления андезитов.

Цирконы с возрастом от 345 до 337 млн лет и от 327 до 329 млн лет могут быть связаны с тепловым воздействием, возникшим при внедрении более поздней дайки долеритов.

В геологической истории развития среднеуральской части Восточной зоны эти временные интервалы соответствуют периоду возникновения и существования активной континентальной окраины [14]. Вулканические образования этого этапа представлены андезит-базальтовыми ассоциациями фаменского возраста и визейским бекленищевским базальт-андезит-дацит-риолитовым комплексом и характеризуются типичным известково-щелочным химизмом [9, 15].

Заключение

Геохимические особенности андезитов дайки из массива Дивий Камень рудянской толщи в разрезе по р. Пышме свидетельствуют, что вулканические породы формировались в надсубдукционной геодинамической обстановке. Большинство зерен циркона из андезитов относится к магматическому типу. Впервые U–Pb методом (LA–ICP–MS) получены возрастные датировки цирконов. Эти датировки совпадают с периодами вулканической активности в регионе и не противоречат геологическим данным. Возраст цирконов в андезитах, установленный в интервале 369–362 млн лет ($T_{cp} = 366,8 \pm 2,6$ млн лет), близок времени их образования. Несмотря на не крупный масштаб изученного тела, результаты исследования позволяют полагать, что среди субвулканических пород, включенных в состав рудянской толщи среднего девона, в бассейне р. Пышмы присутствуют более молодые образования. Поэтому продолжение изотопно-геохронологических исследований вулкаников в этом районе представляется весьма актуальной проблемой.

Исследования выполнены в рамках темы № АААА-А19-119072990020-6 государственного задания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротеев В. А., Дианова Т. В., Кабанова Л. Я. Среднепалеозойский вулканизм Восточной зоны Урала. Л.: Наука, 1979. 129 с.
2. Коровко А. В., Кузовков Г. Н., Бурнатная Л. Н., Мананкова Г. П., Пуртов В. А., Брусницин В. Д., Ведерников В. В. Информационный отчет по прогнозно-поисковым работам на золото на Алапаевской площади: отчет Исетской ГСП за 2000–2002 гг. Екатеринбург: ТГФ, 2002. Кн. 1. 282 с.
3. Казаков И. И., Стороженко Е. В., Харитонов И. Н., Стефановский В. В. Отчет о результатах работ по объекту ГДП-200 листа О-41-XX (Алапаевская площадь) за 2014–2016 гг. (Государственный контракт № 1/14 от 20 февраля 2014 г.). Екатеринбург: УГСЭ, 2016. Кн. 1. 306 с. ТФГИ по УрФО.
4. Плюснин К. П., Плюснина А. А. Отчет по теме «Опытно-методические работы по созданию производственного учебного полигона по крупномасштабному геологическому картированию (Сухоложский участок)». Екатеринбург: УГСЭ, 1994. ТФГИ по УрФО.

5. Волчек Е. Н., Нечеухин В. М. Петрогеохимические особенности вулканогенных пород Сухоложской зоны (восточный сегмент Среднего Урала) и их значение для геодинамических реконструкций // Литосфера. 2012. № 3. С. 146–150.
6. Коротеев В. А., Червяковский В. С., Зайцева М. В., Волчек Е. Н., Нечеухин В. М. Первое определение изотопного возраста андезит-дацитового комплекса Восточной зоны Среднего Урала // Докл. АН. 2019. Т. 487(2). С. 174–178.
7. Зайцева М. В., Пупышев А. А., Шапова Ю. В., Вотяков С. Л. U–Pb датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S и приставки для лазерной абляции NWR 213 // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 4. С. 294–306. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
8. Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb // Chemical Geology. 2002. Vol. 192. issue 1–2. P. 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
9. Червяковский В. С., Слободчиков Е. А., Червяковская М. В., Волчек Е. Н. Особенности геологического строения и первые результаты изотопного датирования вулканических пород в бассейне р. Исеть, Восточно-Уральская мегазона // Известия УГГУ. 2021. Вып. 1 (61). С. 55–64. <https://10.21440/2307-2091-2021-1-55-64>
10. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. Magmatism in the Oceanic Basins. 1989. Vol. 42. P. 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
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. Vol. 69. issue 3. P. 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
12. Балашов Ю. А., Скублов С. Г. Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов // Геохимия. 2011. № 6. С. 622–633. <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
13. Bouvier A.-S., Ushikubo T., Kita N. T., Cavosie A. J., Kozdon R., Valley J. W. Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: insights from Archean TTGs and sanukitoids // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2012. Vol. 163. P. 745–768. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0697-1>
14. Пучков В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
15. Смирнов В. Н., Коровко А. В. Палеозойский вулканизм восточной зоны Среднего Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: сборник науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 395–420.

Статья поступила в редакцию 15 августа 2023 года

Geochemical characteristic of rocks and isotope dating of zircon from the andesite dyke of the rudyanskaya sequence (D_2rd) of the Middle Urals Eastern zone

Vasiliy Stanislavovich CHERVYAKOVSKIY^{1*}
Evgeniy Aleksandrovich SLOBODCHIKOV²
Mariya Vladimirovna CHERVYAKOVSKAYA¹
Nadezhda Nikolaevna FARRAKHOVA¹
Elena Nikolaevna VOLCHEK^{1**}

¹The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. In the basin of the r. Pishma subvolcanic formations, localized in the fields of spreading of the Middle Devonian Rudyanskaya sequence, are presented by different on composition small bodies, sills and dykes, forming with volcanogenic rocks of the Rudyanskaya sequence a basalt-andesite-rhyolite complex, the formation of which is associated with volcanic activity, that took place in Middle Devonian in the environments close to the modern island arcs. Their isotope dating and geochemical characteristic are rather relevant for specification of the composition, volume and paleogeodynamic environment of the vulcanite formation. In the paper new data are presented on geochemistry of andesites of the dyke from the Diviy Kamen rock, considered as part of the Rudyanskaya sequence, as well as the age of zircon from them.

Methods. Chemical analyses of vulcanites have been performed in the Centre of collective usage “Geoanalyst” of the Institute of Geology and Geochemistry of the UB of RAS (Ekaterinburg) by X-ray fluorescent method and ICP–MS method. Zircons were studied with scanning electron microscope JSM-6390L of the Jeol firm and with electrone-probe microanalyser Cameca SX100. The data on the U and Pb isotopes, as well as on elements-impurities in zircon grains were obtained by mass-spectrometry method with inductively coupled plasma with laser ablation (LA–ICP–MS) at the quadrupole ISP–MS NexION 300S with the attachment for laser ablation LA NWR 213.

Purpose of researches. Getting new data on geochemical composition and age of the andesites of dyke in the section along the r. Pishma.

Results. The andesite dyke intersects medium clastic unstratified tuffs and dipply occurring fragment of the lava flow of porphyry dacite. Andesites present themselves porphyry rocks with 20–30% of plagioclase phenocrysts. At the normalized many-component diagram the Ta–Nb minimum is displayed. For zircon grains are characteristic differentiated spectra, demonstrating the growth of compositions from light to heavy REE, positive Ce and negative Eu anomalies, typical of the zircon of magmatic genesis. For the first time geochronological study of zircons from andesites has been made by method of LA–ICP–MS. 4 age groups of zircons, Ma: 390–387, 369–362, 337–345, 327–329 were revealed.

Conclusions. The data obtained testify that andesites were formed under suprasubduction environments, and magmatic stage of rock formation corresponds to the upper Devonian varieties of zircons. Early Carboniferous datings can be associated with the thermal impact caused by the intrusion of a later dolerite dyke.

Keywords: Eastern zone of the Urals, Rudyanskaya sequence, andesite, dyke, geochemical characteristic, zircon, isotope age.

The research was carried out within the framework of topic No. AAAA-A19-119072990020-6 of the state assignment of the IGG, UB RAS. Retrofitting and comprehensive development of the CUC “Geoanalyst” of the IGG, UB RAS is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-680.

REFERENCES

1. Koroteev V. A., Dianova T. V., Kabanova L. Ya. 1979, Middle Paleozoic volcanism of the Eastern zone of the Urals. Leningrad, 129 p. (*In Russ.*)
2. Korovko A. V., Kuzovkov G. N., Burnatnaya L. N., Manankova G. P., Purtov V. A., Brusnitsin V. D., Vedernikov V. V. 2002, Information report on forecasting and prospecting work for gold on Alapaevskaya Square: report of the Isetskaya GSP for 2000–2002. Yekaterinburg, book 1, 282 p. (*In Russ.*)

*v.chervyakovskiy@mail.ru

**volchek@igg.uran.ru

3. Kazakov I. I., Storozhenko E. V., Kharitonov I. N., Stefanovsky V. V. 2016, Report on the results of work on the GDP-200 object, sheet O-41-XX (Alapaevskaya area) for 2014–2016. Ekaterinburg, book 1, 306 p. (*In Russ.*)
4. Plyusnin K. P., Plyusnina A. A. 1994, Report on the topic “experimental and methodological work on the creation of an industrial training ground for large-scale geological mapping (Sukholozhsky site).” Ekaterinburg. (*In Russ.*)
5. Volchek E. N., Necheukhin V. M. 2012, Petrogeochemical features of volcanic rocks of the Suholozhskaya site (Eastern segment of the Middle Urals) and their significance for geodynamic reconstructions. *Litosfera* [Lithosphere], no. 3, pp. 146–150. (*In Russ.*)
6. Koroteev V. A., Chervyakovsky V. S., Zaitseva M. V., Volchek E. N., Necheukhin V. M. 2019, First determination of the isotopic age of the andesite-dacite complex of the Eastern zone of the Middle Urals. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 487 (2), pp. 174–178. (*In Russ.*)
7. Zaitseva M. V., Pupyshev A. A., Shchapova Yu. V., Votyakov S. L. 2016, U–Pb dating of zircons using a quadrupole mass spectrometer with inductively coupled plasma NexION 300S and an attachment for laser ablation NWR 213. *Analitika i kontrol'* [Analytics and control], vol. 20, no. 4, pp. 294–306. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
8. Andersen T. 2002, Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, vol. 192, issue 1–2, pp. 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
9. Chervyakovsky V. S., Slobodchikov E. A., Chervyakovskaya M. V., Volchek E. N. 2021, Features of the geological structure and the first results of isotope dating of volcanic rocks in the Iset river basin, East Ural megazone. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (61), pp. 55–64. (*In Russ.*) <https://10.21440/2307-2091-2021-1-55-64>
10. Sun S. S., McDonough W. F. 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society*. London, vol. 42, pp. 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
11. Hoskin P. W. O. 2005, Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 69, issue 3, pp. 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
12. Balashov Yu. A., Skublov S. G. 2011, Contrast of geochemistry of magmatic and secondary zircons. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 6, pp. 622–633. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
13. Bouvier A.-S., Ushikubo T., Kita N. T., Cavosie A. J., Kozdon R., Valley J. W. 2012, Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: insights from Archean TTGs and sanukitoids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 163, pp. 745–768. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0697-1>
14. Puchkov V. N. 2000, Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals, 146 p. (*In Russ.*)
15. Smirnov V. N., Korovko A. V. 2007, Paleozoic volcanism of the eastern zone of the Middle Urals. Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation: collection of science. Ekaterinburg, pp. 395–420. (*In Russ.*)

The article was received on August 15, 2023