



УДК 552.08+552.11+552.321.1(470.1)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.39>

Петрогеохимия гранитов Бадьяюского массива (Приполярный Урал)

Ю. В. Денисова*

Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

Аннотация. Исследуется северная часть Приполярного Урала как наиболее древняя периферическая часть Уральского пояса с магматическими образованиями различных возрастов. Рассматриваются позднерифейско-вендские гранитоиды сальнерско-маньхембовского интрузивного комплекса, к которым относится Бадьяюский гранитный массив, а также их петрографические и петрогеохимические особенности. Анализ породообразующих минералов, представляющих собой типичный набор для гранитов, с помощью поляризационного микроскопа позволил определить характерные структуры породы, выявить наличие плагиоклазов и биотитов двух генераций, обнаружить частичное замещение кварца гранулированной разновидностью. Устанавливается, что исследованная порода характеризуется повышенным содержанием кремнезема, главных щелочных металлов, весьма высокой глиноземистостью. Сведения ICP-MS метода и их нормализация по отношению к хондриту С.С. Сан и гипотетическому плагиограниту СОХ показали, что породы сформировались из расплавов корового типа, насыщенных редкоземельными, а также отдельными литофильными элементами (рубидием, барием). Приводятся диагностические диаграммы Дж. А. Пирса, Д. Папу, Н. Б. Харриса, согласно которым формирование изученного массива происходило в условиях внутриплитовой геодинамической обстановки.

Ключевые слова: гранит, петрогеохимия, геодинамические условия образования, Бадьяюский массив, Приполярный Урал.

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента».

Для цитирования: Денисова Ю. В. Петрогеохимия гранитов Бадьяюского массива (Приполярный Урал) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 45. С. 39–54. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.39>

Original article

Petrogeochemistry of Granites of the Badiayu Massif (the Subpolar Urals)

Yu. V. Denisova*

Institute of Geology named after academician N. P. Yuskin Komi SC UB RAS, Syktывkar, Russian Federation

Abstract. Magmatic formations of various ages are developed within the northern part of the Circumpolar Urals, the oldest peripheral part of the Ural belt. Including the Late-Riphean-Vendian gran-

© Денисова Ю. В., 2023

* Полные сведения об авторе см. на последней странице статьи.
For complete information about the author, see the last page of the article.

itoids of the salner-mankhambov intrusive complex, which includes the Badiayu granite massif. The conducted research allowed us to identify a number of petrographic and petrogeochemical features of the granites under consideration. The analysis of rock-forming minerals, which are a typical set for granites, with the help of a polarization microscope allowed us to determine the characteristic structures of the rock, to identify the presence of plagioclases and biotites of two generations, to detect partial substitution of quartz with a granular variety. The data of the silicate method allowed us to establish that the studied rock is characterized by an increased content of silica, the main alkali metals, and a very high alumina content. ICP-MS method data and their normalization with respect to S. S. San chondrite and the hypothetical plagiogranite COX showed that the rocks were formed from crustal-type melts saturated with rare-earth, as well as individual lithophilic elements (rubidium, barium). According to the diagnostic diagrams of J. A. Pierce, D. Papu, N. B. Harris, the formation of the studied massif occurred in the conditions of an intraplate geodynamic situation.

Keywords: granite, petrogeochemistry, geodynamic conditions of formation, the Badiayu massif, the Subpolar Urals.

For citation: Denisova Yu.V. Petrogeochemis of Granites of the Badiayu Massif (the Subpolar Urals). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 45, pp. 39-54. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.39> (in Russian)

Введение

В геологическом отношении Приполярный Урал входит в состав Центрально-Уральского поднятия, являющегося наиболее крупной и основной антиклинальной структурой Урала. Осевая часть этого антиклинория сложена осадочными, метаморфическими и магматическими породами докембрия и нижнего палеозоя. Ляпинский антиклинорий, являясь крупным докембрийским блоком этой части, содержит в своем составе не только породы эффузивной и субвулканической фаций, но и породы интрузивной фации, объединяемые в сальнеро-маньхамбовский гранитоидный комплекс, представителем которого является Бадьяюский гранитный массив [Гранитоиды севера Урала ... , 2022].

В северной части рассмотренного антиклинория, начиная от верховья рек Малая и Большая Бадьяю и до реки Селемью, отмечается пластообразное гранитное тело длиной не более 10 км при ширине до 1 км. Массив (рис. 1), названный по пересекающим его рекам, вытянут согласно простиранию вмещающих пород, являющихся верхнерифейскими отложениями мороинской свиты (сланцы-кварцевые сланцы, порфириты, известковые сланцы с прослоями и линзами мраморов), подвергшиеся в процессе внедрения интрузии контактовому метаморфизму средне-низкотемпературного типа. Ранние исследования химического состава гранитов Бадьяюского массива, проведенные М. В. Фишманом и Б. А. Голдиным [Фишман, Голдин, 1963], ограничиваются данными силикатного анализа по двум пробам породы. Л. В. Махлаев, анализируя химический состав гранитоидов севера Центрально-Уральского поднятия с помощью генетической схемы Б. Чаппела, в своей монографии [Махлаев, 1996] представил лишь общие диапазоны главных элементов для бадьяюских гранитов. Кроме того, возможность применения ICP-MS анализа при изучении рассмотренных пород позволяет получить геохимическую характеристику гранитов массива и выявить некоторые особенности распределения редких элементов.

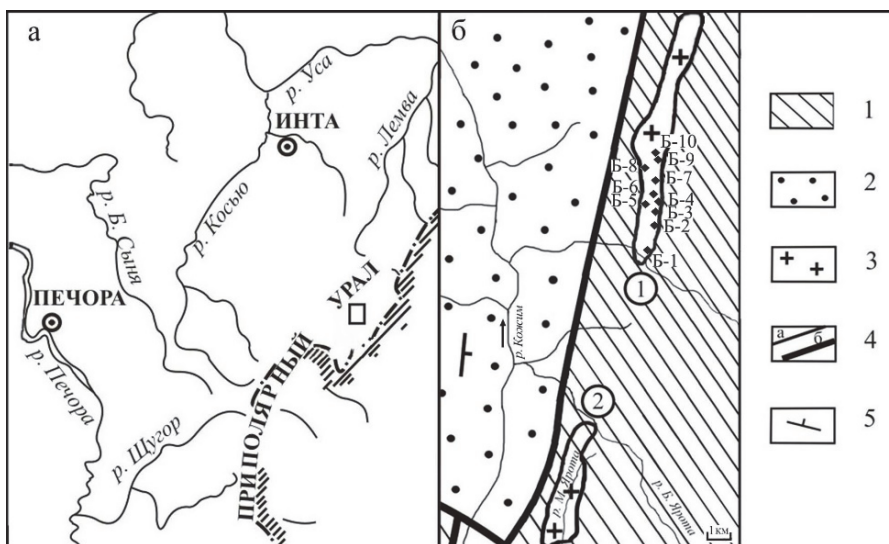


Рис. 1. Карта района исследований (а). Геологическое строение рассмотренного района (б).

Схема по [Пыстин, Пыстина, 2008]:

- 1 – слюдяно-кварцевые сланцы, порфириты, прослой мраморов и кварцитов;
- 2 – терригенно- карбонатные отложения; 3 – граниты; 4 – геологические границы: а – стратиграфические и магматические, б – тектонические; 5 – элементы залегания плоскостных структур. Массивы: 1 – Бадьяюский; 2 – Яротский. Точки отбора образцов и проб: Б-*n*, где *n* = (1, 10)

Целью представленной работы является выявление принадлежности породы к петрохимическому ряду по общей щелочности, реконструкция состава субстрата, определение геодинамической остановки формирования гранитов Бадьяюского массива на основе распределения петрогенных и редких элементов.

Методы исследования

Петрографическое и петрогеохимическое изучение гранитов Бадьяюского массива (Приполярный Урал) проводилось на базе штучных проб, общее количество которых составило 10 единиц, каждая из которых представляла собой пробу весом в 10 кг. Исследование порообразующих минералов (плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца и слюды) проводилось в шлифах под поляризационным микроскопом БиОптик СР-400. Акцессорные и рудные минералы изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 (ЦКП «Наука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, аналитик А. С. Шуйский). Для выявления содержаний основных элементов использован силикатный метод, для определения концентраций редких и рассеянных элементов применен ICP- MS метод (ЦКП «Наука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, аналитики О. В. Кокшарова, Г. В. Игнатъев).

Петрографические особенности гранитов Бадьяюского массива

Породы Бадьяюского массива представляют собой розово-серые граниты (рис. 2, *a*) с повышенным содержанием натрово-калиевого полевого шпата (60 %, иногда до 65 %). Среди породообразующих минералов также отмечаются плагиоклаз (15 %), кварц (20 %), слюда (биотит и/или мусковит) (5 %). В породе наблюдаются эпидот, хлорит, цоизит.

Повсеместное проявление катаклаза и последующая перекристаллизация определяют основные виды структур гранитов рассмотренного массива. Первичной структурой гранитов является преимущественно среднезернистая, местами до крупнозернистой. В редких случаях можно встретить участки мелкозернистого гранита. По форме кристаллов породообразующих минералов отмечается аллотриоморфная, характеризующаяся ксеноморфностью форм всех породообразующих минералов, реже гипидиоморфная, обусловленная различной степенью идиоморфизма минералов, структуры. Текстура массивная, указывающая на формирование породы в условиях спокойной кристаллизации [Махлаев, 1996; Фишман, Голдин, 1963].

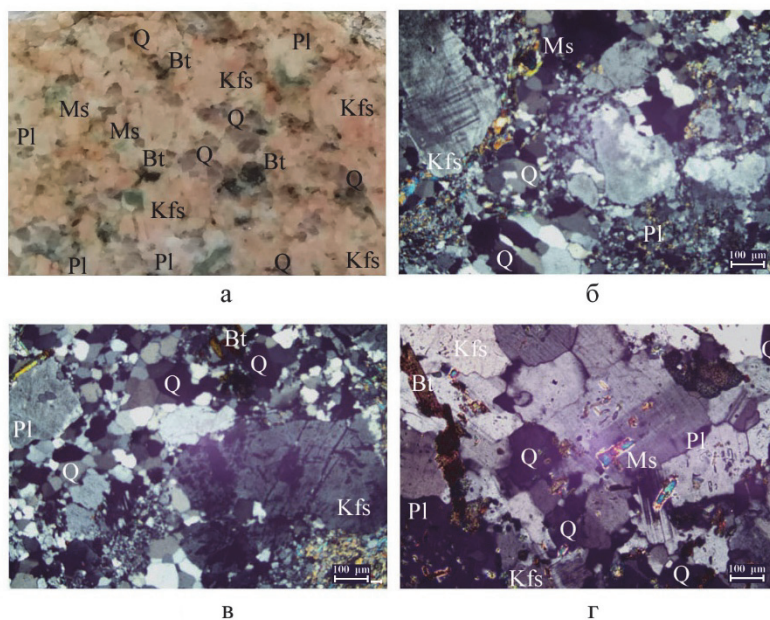


Рис. 2. Аншлиф (*a*) и шлифы (*б-г* – с анализатором) гранитов Бадьяюского массива. Породообразующие минералы (сокращение по ФГУП «ВСЕГЕИ»): Pl – плагиоклаз; Kfs – щелочной полевой шпат, Q – кварц; Bt – биотит; Ms – мусковит

Щелочной полевой шпат отмечается в виде округлых зерен размером 2–5 мм и представлен микроклином с характерной микроклиновой решеткой, отмечаемой на растровых изображениях (рис. 2, *б-г*). Обычно этот минерал оптически однородный, реже встречается микроклин, пронизанный пертито-

выми вростками альбита. В полевом шпате также встречаются включения кислого плагиоклаза в виде идиоморфных зерен. Плагиоклаз образует как вкрапленники, так и идиоморфные удлиненные зерна с отчетливо выраженной зональностью. Изучение минерала выявило наличие двух генераций. Первый тип плагиоклаза, относящийся к магматической стадии образования, наблюдается в виде идиоморфных зерен олигоклаза, частично пелитизированных, реже в виде гипидиоморфных образований, сформировавшихся за счет слияния пертитовых жилок олигоклаза. Этот вид сильно серицитизирован и пелитизирован, иногда раздроблен. Плагиоклаз метасоматической генезиса (вторая генерация) представлен альбитом и олигоклазом, которые обычно развиваются по трещинам плагиоклаза более раннего происхождения или, что происходит реже, замещают его. Наблюдаемые проявления аутометасоматоза (альбитизация в калиевом полевоом шпате, серитизация в плагиоклазе) указывают на воздействие среднетемпературных гидротермальных растворов. Кварц в гранитах Бадьяюского массива встречается в виде округлых ксеноморфных зерен (до 3 мм) (рис. 2, б, з), а также в виде полигональных мозаичных ксенобластов (рис. 2, в). Подобный вид гранулитового кварца указывает на воздействие катаклаза, вероятно, в виде динамометаморфизма. Для минерала характерны слабая трещиноватость и волнистое погасание. Слюды также являются породообразующим минералом изученных пород и представлены биотитом и мусковитом. Чешуйки болотно-зеленого цвета до 0,5 мм отнесены к ранней (магматической) разновидности биотита. Коричневый биотит, отмечаемый в пределах участков дробления и перекристаллизации, представляет более поздний вид слюды. Мусковит встречается преимущественно в плагиоклазе первой генерации, где отмечается в виде скоплений чешуек светло-зеленого цвета до 0,5 мм.

Акцессорные минералы представлены преимущественно цирконом, апатитом, титанитом. Реже встречается гранат, алланит, флюорит, рутил и др. Циркон наблюдается чаще всего в виде бесцветных полупрозрачных коротко- и длиннопризматических кристаллов размером 0,05–0,25 мм (реже до 0,9 мм) при коэффициенте удлинения 1,0–2,0 (отдельные зерна – до 3,0). Апатит – полупрозрачные молочные кристаллы таблитчатого облика размером 0,2–0,4 мм при коэффициенте удлинения 1,5. Титанит представляет собой полупрозрачные бесцветные или молочно-белые кристаллы (0,1–0,4 мм) пинакоидальной формы. Из рудных минералов отмечаются пирит, молибденит, ильменит, магнетит. Пирит образует кристаллы кубического габитуса желто-коричневого цвета с металлическим блеском. Размер кристаллов составляет 0,2–0,3 мм. Молибденит присутствует в качестве серых чешуек неправильной формы. Блеск металлический. Размер чешуек 0,15–0,30 мм. Ильменит отличается неправильной формой зерен, их железно-черным цветом, металлическим блеском, раковистым изломом. Размер зерен 0,3–0,8 мм. Магнетит представляет собой изометричные кристаллы размером 0,2–0,4 мм с сильно корродированными гранями, окрашен в черный цвет с металлическим блеском, на некоторых из них наблюдается буроватая пленка.

Петрогеохимические особенности гранитов Бадьяюского массива

Петрохимические особенности гранитов были определены на основании содержания главных элементов (табл. 1). Проведенный анализ показал, что изученные породы представляют собой лейкограниты (содержание кремнезема находится в пределах 73–78 масс. %, содержание главных щелочных металлов не выходит за рамки диапазона 6–9 масс. %). TAS-диаграмма для плутонических горных пород [Шарпенюк, Костин, Кухаренко, 2013] (рис. 3) подтверждает, что породы Бадьяюского массива являются преимущественно лейкогранитами, в отдельных случаях умеренно-щелочными лейкогранитами.

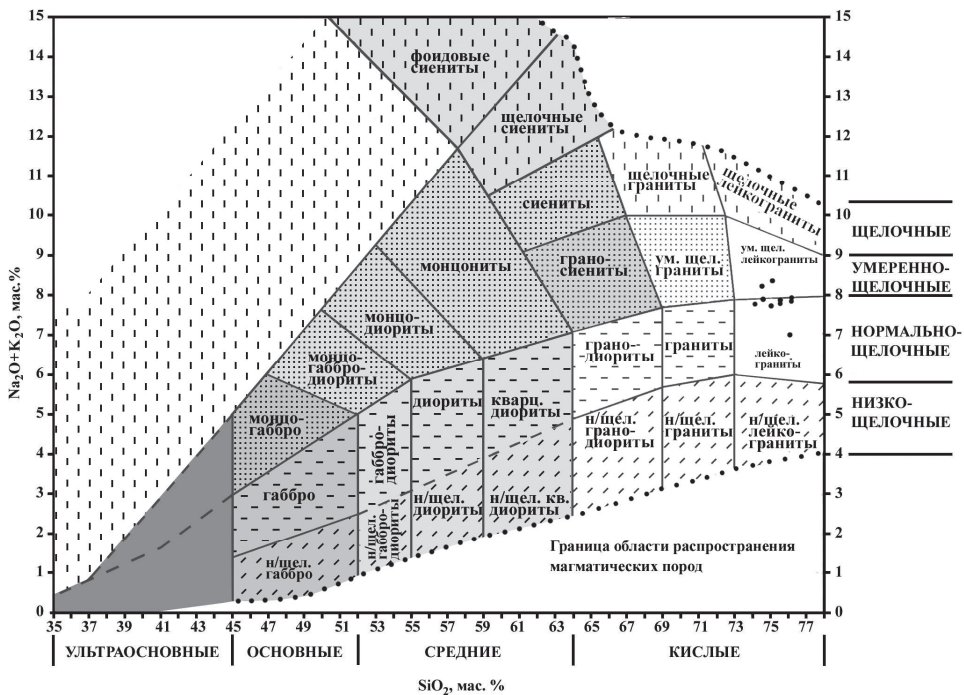


Рис. 3. TAS-диаграмма [Шарпенюк, Костин, Кухаренко, 2013] для пород Бадьяюского массива

По количеству оксида калия, содержание которого составляет от 4 масс. %, породы являются высококалиевыми разновидностями. Отношение оксидов натрия и калия составляет более 0,25 масс. %, что дает возможность говорить о калиево-натриевом типе породы. Если, согласно Б. Чаппелу и А. Уайту [Chappel, Whitte, 1974], значения K_2O/Na_2O , не превышающие 0,6, указывают на наличие осадочных пород в составе материнского расплава, то в случае гранитов Бадьяюского массива, минимальное значение этого индикаторного отношения в которых составляет 1,27, позволяет говорить об отсутствии в гранитообразующем субстрате даже следов осадочных пород. Коэффициент глиноземистости ($al' = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$), отражающий относительные количества цветных и лейкократовых минералов, находится в

пределах от 2 до 10, чем определяет породу как весьма высокоглиноземистую. Максимальное значение $al' = 9,11$ указывает на наибольшее подкисление расплава при формировании породы в точке отбора пробы Б-10. Агпитовый индекс ($K_a = (K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$) находится в довольно узком диапазоне (0,60–0,69), колебание значений в котором составляет 0,09. Кроме того, K_a не превышает единицы, что говорит о том, что все количество натрия и калия в процессе формирования гранитов было сконцентрировано в полевых шпатах. Такие небольшие вариации характерны и для коэффициента железистости ($K_f = FeO / (FeO + MgO)$), который для гранитов Бадьяюского массива в среднем равен 0,79. Для изученных гранитов повышенная железистость указывает на выделение безводных силикатов на заключительной стадии гранитогенеза [Ефремова, Стафеев, 1985; Денисова, 2020; Денисова, 2021; Доордовикские гранитоиды ... , 2005; Clemens, Holloway, White, 1986; Creaser, Price, Wonrmald, 1991].

Таблица 1

Содержание петрогенных элементов в гранитах Бадьяюского массива

Компонент, мас. %	Номер пробы										Среднее
	Б-1	Б-2	Б-3	Б-4	Б-5	Б-6	Б-7	Б-8	Б-9	Б-10	
SiO ₂	74,12	74,92	75,42	75,89	75,82	75,45	74,42	75,89	74,97	74,51	75,14
TiO ₂	0,28	0,35	0,33	0,31	0,22	0,11	0,18	0,21	0,41	0,35	0,28
Al ₂ O ₃	13,05	11,27	11,72	11,92	11,05	11,56	12,48	11,78	12,88	13,12	12,08
FeO	2,07	1,90	0,95	1,00	1,82	0,88	0,67	1,01	1,25	0,74	1,23
Fe ₂ O ₃	0,63	1,32	0,89	0,77	0,55	0,92	1,01	1,12	0,62	0,59	0,84
MnO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,02
MgO	0,18	0,28	0,31	0,22	0,28	0,35	0,26	0,22	0,19	0,11	0,24
CaO	0,43	1,04	1,02	0,49	0,59	0,58	1,02	0,31	0,49	0,36	0,63
Na ₂ O	3,05	2,54	3,37	3,50	2,96	2,89	3,33	2,94	3,52	3,02	3,11
K ₂ O	4,81	5,26	4,57	4,44	4,12	4,91	5,02	4,89	4,88	5,01	4,79
P ₂ O ₅	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
ппп	0,53	0,82	0,82	0,72	1,20	0,81	1,21	1,29	0,97	1,05	0,94
∑	99,21	99,76	99,45	99,30	98,67	98,49	99,64	99,71	100,21	98,91	–
H ₂ O ⁻	0,12	0,11	0,10	0,13	0,11	0,18	0,17	0,11	0,09	0,12	0,12
CO ₂	0,10	0,09	0,08	0,11	0,05	0,02	0,03	0,11	0,12	0,09	0,08
K ₂ O/Na ₂ O	1,58	2,07	1,36	1,27	1,39	1,70	1,51	1,66	1,39	1,66	1,56
K ₂ O+Na ₂ O	7,86	7,80	7,94	7,94	7,08	7,80	8,35	7,83	8,40	8,03	7,90
K _a	0,60	0,69	0,68	0,67	0,61	0,60	0,65	0,64	0,65	0,61	0,66
al'	4,53	3,22	5,45	5,99	4,64	6,07	6,31	5,23	6,25	9,11	5,55
K _f	0,78	0,83	0,74	0,78	0,82	0,72	0,74	0,84	0,77	0,84	0,79

Анализ содержаний редких элементов (табл. 2), а также данных нормирования по относительно хондрита по С. С. Сан [Sun, 1982], по гипотетическому плагиограниту COX [Pearce, Harris, Tindle, 1984], по примитивной мантии по У. Ф. Макдоноу, С.С. Сан [McDonough, Sun, 1995] (табл. 3) позволил выявить геохимические характеристики изученных гранитов.

Таблица 2

Содержание редких элементов в гранитах Бадьяюского массива

Элемент, г/т	Номер пробы					Среднее
	Б-1	Б-4	Б-6	Б-9	Б-10	
Rb	89,23	90,56	88,59	82,96	78,66	86,00
Ba	377,15	359,48	289,56	333,99	389,78	349,99
Th	4,12	5,22	4,99	4,75	5,13	4,84
Ta	1,49	2,02	1,89	2,03	1,88	1,86
Nb	20,22	18,03	31,56	27,31	30,33	25,49
Hf	4,66	4,92	4,12	5,11	4,89	4,74
Zr	101,15	107,89	101,22	108,87	111,36	106,10
Y	35,69	32,05	39,88	39,16	40,23	37,40
U	2,01	1,69	1,72	1,68	1,61	1,74
Sr	65,23	61,28	51,88	52,98	59,34	58,14
La	14,08	15,03	18,66	17,99	13,89	15,93
Ce	33,89	33,12	40,25	30,12	27,84	33,04
Pr	3,89	3,99	4,87	3,41	2,97	3,83
Nd	15,15	15,78	16,99	14,56	11,88	14,87
Sm	3,59	3,31	3,99	4,25	3,47	3,72
Eu	0,61	0,78	0,62	0,49	0,49	0,60
Gd	3,51	3,37	3,72	2,92	2,49	3,20
Tb	0,69	0,61	0,81	0,61	0,49	0,64
Dy	3,13	3,48	3,99	3,89	3,01	3,50
Ho	0,85	0,76	0,81	0,85	0,67	0,79
Er	2,91	2,14	2,35	2,35	2,22	2,39
Tm	0,47	0,34	0,37	0,32	0,33	0,37
Yb	4,29	4,87	3,32	3,09	4,77	4,07
Lu	0,31	0,33	0,35	0,36	0,49	0,37
La/Yb	3,28	3,08	5,62	5,83	2,91	4,14
Eu/Eu*	0,17	0,23	0,13	0,11	0,13	0,15
Th/U	2,05	3,09	2,90	2,83	3,19	2,78
Y/Nb	13,57	8,93	16,70	13,45	16,13	13,69

Таблица 3

Нормирование средних редких элементов по С. С. Сан [Sun, 1982], по Дж. А. Пирсу [Pearce, Harris, Tindle, 1984], по У. Ф. Макдоноу, С. С. Сан [McDonough, Sun, 1995]

Элемент, г/т	Среднее	Хондрит [Sun, 1982]	Плагиигранит COX [Pearce, Harris, Tindle, 1984]	Примитивная мантия [McDonough, Sun, 1995]	Нормализованные средние данные		
					по [Sun, 1982]	по [Pearce, Harris, Tindle, 1984]	по [McDonough, Sun, 1995]
Rb	86,00	–	4,0	0,635	–	21,50	135,43
Ba	349,99	–	50,0	6,989	–	7,00	50,08
Th	4,84	–	0,8	0,085	–	6,05	56,96
Ta	1,86	–	0,7	0,041	–	2,66	45,41
Nb	25,49	–	10,0	0,713	–	2,55	35,75
Hf	4,74	–	9,0	0,309	–	0,53	15,34
Zr	106,10	–	340,0	11,2	–	0,31	9,47
Y	37,40	–	70,0	4,55	–	0,53	8,22
U	1,74	–	–	0,021	–	–	82,95
Sr	57,8	–	–	21,1	–	–	2,76
La	15,93	0,24	–	0,687	66,38	–	23,19

Окончание табл. 3

Элемент, г/т	Среднее	Хондрит [Sun, 1982]	Плагиогранит COX [Pearce, Harris, Tindle, 1984]	Примитивная мантия [McDonough, Sun, 1995]	Нормализованные средние данные		
					по [Sun, 1982]	по [Pearce, Harris, Tindle, 1984]	по [McDonough, Sun, 1995]
Ce	33,04	0,61	35,0	1,775	54,17	0,94	18,62
Pr	3,83	0,09	–	0,276	42,51	–	13,86
Nd	14,87	0,46	–	1,354	32,33	–	10,98
Sm	3,72	0,15	9,0	0,444	24,81	0,41	8,38
Eu	0,60	0,06	–	0,168	9,97	–	3,56
Gd	3,20	0,21	–	0,596	15,25	–	5,37
Tb	0,64	0,04	–	0,108	16,05	–	5,94
Dy	3,50	0,25	–	0,737	14,00	–	4,75
Ho	0,79	0,06	–	0,0566	13,13	–	13,92
Er	2,39	0,17	–	0,1655	14,08	–	14,47
Tm	0,37	0,03	–	0,0255	12,20	–	14,35
Yb	4,07	0,17	80,0	0,170	23,93	0,54	23,93
Lu	0,37	0,03	–	0,0254	12,27	–	14,49

Рассмотренные породы обогащены относительно хондрита редкоземельными элементами, преимущественно легкой группы (особо выделяются La, Ce, Nd). Это подтверждается маркером La/Yb, сравнение которого с показателем, характерным для хондрита по С. С. Сан, выявляет превышение в 2 раза. Наименьшее преобладание легкой группы элементов над тяжелой отмечается для пробы Б-10. Индикаторное отношение La/Yb (Б-10) отклоняется от среднего значения на 29,71 % (табл. 4). Рассматривая отклонения от среднего содержания REE в гранитах Бадьяюского массива поэлементно, видим, что в расплаве, сформировавшем породу в точке отбора Б-10, также сохраняется повышенное относительно хондрита преобладание легких элементов над тяжелыми (в 2,54 раза).

Таблица 4

Отклонение содержаний редкоземельных элементов от их среднего содержания по Бадьяюскому массиву для точки отбора Б-10

Элемент	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	La/Yb	La/Yb по Sun
Содержание элемента REE, г/т	13,89	27,84	2,97	11,88	3,47	0,49	2,91	–
Среднее REE, г/т	15,93	33,04	3,83	14,87	3,72	0,6	4,14	1,41
Отклонение от среднего, %	-12,81	-15,74	-22,45	-20,11	-6,72	-18,33	-29,71	206,38
Элемент	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Содержание элемента REE, г/т	2,49	0,49	3,01	0,67	2,22	0,33	4,77	0,49
Среднее REE, г/т	3,2	0,64	3,5	0,79	2,39	0,37	4,07	0,37
Отклонение от среднего, %	-22,19	-23,44	-14,00	-15,19	-7,11	-10,81	17,20	32,43

Примечание: Отклонение от среднего = $\frac{\text{Содержание элемента REE, г/т}}{\text{Среднее REE, г/т}} \cdot 100\% - 100\%$.

Однако сравнение со средними содержаниями по массиву показывает, что расплав в этой точке был менее насыщен всеми REE (особенно Pr, Nd, Eu, Gd, Tb), за исключением Yb и Lu. Вероятно, повышенное содержание иттербия и лютеция в гранитном расплаве возникло за счет точечного воздействия флюида, ранее растворившего минералы тяжелых лантаноидов, такие, как фосфатный монацит (пералюминиевые граниты, сиениты и гранитные пегматиты, кварцевые жилы и карбонатиты), ксенотим-(Yb) (гранитные пегматиты) и др. [Балашов, 1976].

В изученных гранитах также отмечаются пониженные содержания европия. Дефицит этого элемента представляет собой характерную особенность фракционной кристаллизации с участием полевых шпатов, которая в меньшей степени проявлена в точке отбора Б-4. Подобное может быть связано с уменьшением давления, снизившего скорость выделения полевых шпатов. Кроме того, согласно выполненному неравенству $Eu/Eu^* < 0,95$, можно утверждать, что источник гранитного расплава находился в верхней континентальной коре [Ni, Hughes, Mariano, 1995]. Торий-урановое отношение указывает степень проявления процессов метасоматоза, которая рассматривается как высокая при $Th/U < 1$ [Рихванов, Соболев, Лященко, 2002]. Для магматических характеристический диапазон этого индикаторного отношения составляет 2,5–5. В нашем случае для гранитов Бадьяуского массива наиболее сильное воздействие процессов метасоматоза наблюдается в точке отбора пробы Б-1 ($Th/U < 2,5$). Для проб Б-6 и Б-9 маркерное отношение не превышает 2,9, что очень близко к нижней границе Th/U -диапазона для плутонических пород, что может свидетельствовать о точечных воздействиях метасоматоза на изученный гранит. Иттрий-ниобиевое отношение при превышении равного 1,2 значения указывает на коровое происхождение породы. Y/Nb [Cullers, Medaris, Haskin, 1973] для гранитов Бадьяуского массива в среднем составляет 13,69, это подтверждает ранее сделанный вывод, что рассмотренные породы являются коровыми.

Нормализация содержаний редкоземельных элементов относительно хондрита по С. С. Сан показала, что граниты обогащены REE элементами в 9–66 раз, наибольшее повышение концентрации наблюдается у лантана и элементов цериевой группы. Графическое представление данных наглядно демонстрирует высокие содержания всех редкоземельных элементов, преобладание LREE и наличие дефицита европия (рис. 3, а). Положительная аномалия иттербия, отмечаемая на диаграмме, является маркером глубинности источника материнского расплава [Карбонатитовый комплекс ... , 2016].

На основе нормированных данных для редких элементов по гипотетическому плагиограниту СОХ можно утверждать, что граниты также обогащены крупноионными элементами (Rb, Ba) и имеют повышенное содержание высокозарядных элементов (Th, Ta, Nb) (табл. 3). Нормирование содержаний микроэлементов для бадьяуских лейкогранитов по примитивной мантии выявило повышенные содержания Rb, Ba, Th, Ta, Nb и U. Спайдерграмма 3.б демонстрирует наибольшее обогащение гранитов рубидием и ураном на фоне дефицита Y, Sr, Eu.

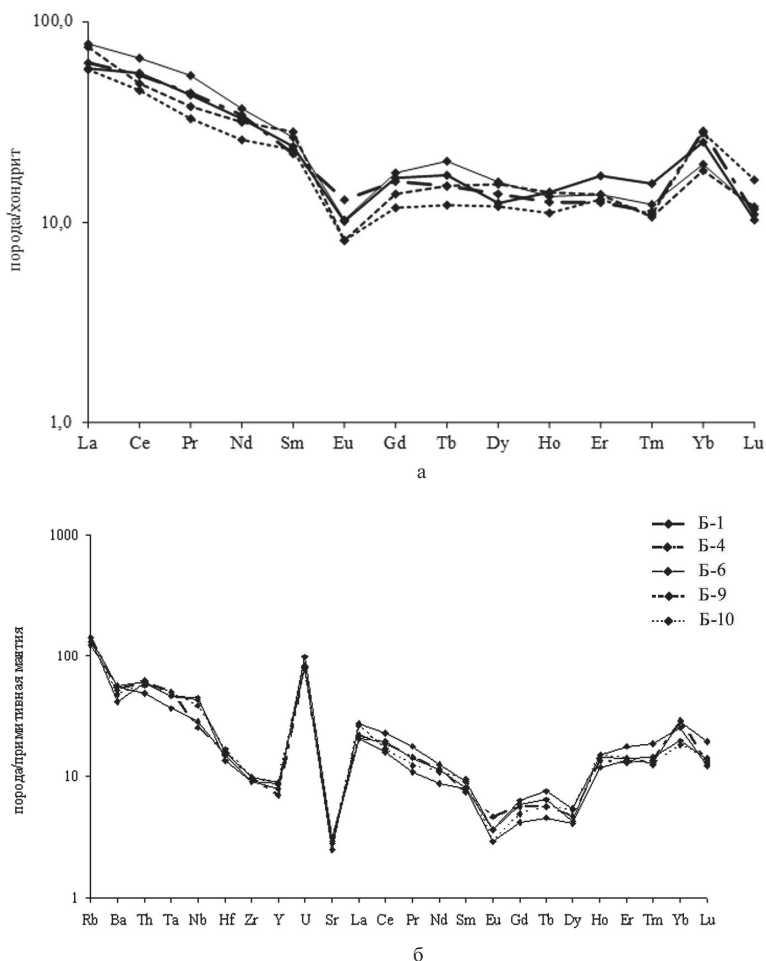


Рис. 4. Содержания редких элементов в гранитах Бадьяюского массива, нормированные относительно хондрита (а) [Sun, 1982], по примитивной мантии (б) [McDonough, Sun, 1995].

Геодинамические условия образования Бадьяюского гранитного массива

На сегодняшний день существуют различные петрогенетические диаграммы, позволяющие на основе содержаний главных и редких элементов породы определить геодинамическую обстановку формирования гранитов. Наиболее информативными в данном случае являются содержания породообразующих элементов, так как потери при наложенных процессах минимальны. Диаграмма Д. Папу [Papu, Piccoli, Piccoli, 1989], основанная на балансе кремнезема и глинозема и являющаяся частным случаем вариационных диаграмм А. Харкера, показывает не только обратную взаимосвязь между содержаниями SiO_2 и Al_2O_3 , но и относит изученную породу к гранитам континентальных рифтов или внутриплитовым образованиям (рис. 6, а). Это

подтверждает предположения Б. А. Голдина и его коллег [Голдин, Калинин, Пучков, 1999], что граниты Бадьяюского массива сформировались на завершающей стадии рифтогенного магматизма на севере Урала, а также допущение Л. В. Махлаева [1996] о становлении массива при внутриплитной геодинамической обстановке.

Распределение концентрации Rb, Ta и Hf на диаграмме Н. Б. Харриса [Harris, Pearce, Tindle, 1986] (рис. 5, б) частично подтверждает предыдущий вывод: большая часть точек рассматриваемых составов сконцентрирована или находится на границе между областями постколлизии и внутриплитных пород. Подобное смещение точек составов в сторону постколлизии может объясняться колебанием содержания рубидия в калийсодержащих минералах (микроклина, ортоклаза) за счет частичного замещения их альбитом [Ефремова, Стафеев, 1985]. Это предположение можно подтвердить положением точек составов для точки Б-1, ранее для которой с помощью Th/U было выявлено воздействие метасоматоза. Как видим на рис. 5, а, в случае диаграммы Д. Папу Б-1 наиболее близко (относительно других точек составов) находится к границе коллизионных и внутриплитных гранитов. На диаграмме Н. Б. Харриса (рис. 5, б) местоположение Б-1 смещено в сторону постколлизии гранитов.

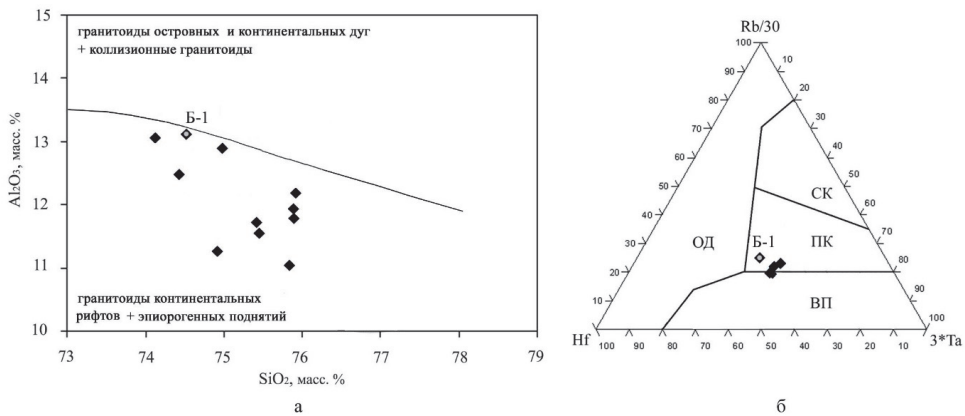


Рис. 5. Диаграммы Д. Папу [Papu, Piccoli, Piccoli, 1989] (а) и Н. Б. Харриса Харриса [Harris, Pearce, Tindle, 1986] (б) для гранитов Бадьяюского массива. Поля на диаграмме: СК – синколлизийные граниты; ВП – внутриплитовые граниты, ОД – островодужные граниты, ПК – постколлизийные граниты

Данные по концентрациям Rb, Ta, Nb, Yb и Y на диагностических диаграммах Дж. А. Пирса также располагаются преимущественно в области, отвечающей внутриплитовому магматизму (рис. 6). Наибольшие смещения точек составов отмечаются для графиков, содержащих рубидий (рис. 6, а, в). Это подтверждает, что изменение содержания этого элемента за счет аккумуляции плагиоклаза [Pearce, Harris, Tindle, 1984], в частности, увеличения количества постмагматического типа минерала, не было разовым (только для

Б-1). Позднее Дж. А. Пирс [Pearce, 1996] доработал диаграмму Rb-Y+Nb, добавив поле постколлизийных гранитов. Но все же новая область скорее указывает на неопределенность геодинамической обстановки, вероятно, вызванная сильным влиянием различных постмагматических процессов.

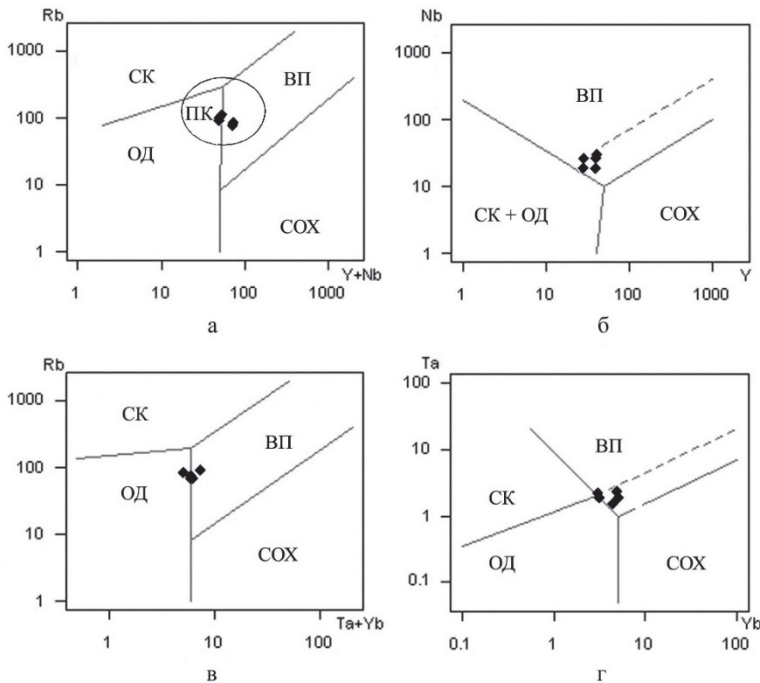


Рис. 6. Диаграммы Дж. А. Пирса [Pearce, Harris, Tindle, 1984; Pearce, 1996] для гранитов Бадьяюского массива. СК – синколлизийные граниты; ПК – постколлизийные граниты, VP – внутриплитовые граниты, OD – островодужные граниты, COX – граниты срединно-океанических хребтов

Заключение

Изучение петрогеохимических особенностей породы Бадьяюского массива, представленной массивным розово-серым среднезернистым гранитом с повышенным содержанием микроклина, позволило выявить следующие особенности гранитного магматизма. Согласно распределению главных элементов, исследованные высокоглиноземистые лейкограниты, относящиеся к высоко-калиевой разновидности и калиево-натриевого типу породы, сформировались из материнских расплавов корового характера.

Анализ редких элементов показал, что кислые расплавы, источник которых располагался в верхней континентальной коре, были обогащены преимущественно LREE. В процессе охлаждения расплава на ранней магматической стадии начинают образовываться полевые шпаты, концентрируя в себе натрий и калий, заключительная стадия характеризуется образованием безводных силикатов.

В процессе своего становления изученный массив подвергался локальному воздействию Lu-Уб-насыщенного флюида, проявившим себя в центральной части массива. Также в северной оконечности гранитного тела отмечается частичное воздействие метасоматических процессов, наблюдаемое в виде альбитизации породообразующих минералов, повлиявшее на содержание рубидия в рассматриваемых гранитах. С учетом колебаний содержания этого рассеянного элемента было установлено, что породы Бадьянского гранитного массива являются внутриплитными гранитами.

Список литературы

- Балашов Ю. А.* Геохимия редкоземельных элементов. М. : Наука, 1976. 267 с.
- Голдин Б. А., Калинин Е. П., Пучков В. Н.* Магматические формации западного склона севера Урала и их минерогения. Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1999. 213 с.
- Гранитоиды севера Урала: геохронология, эволюция, источники / О. В. Удуратина [и др.]. Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2022. 120 с.
- Денисова Ю. В.* Петрохимические особенности гранито-гнейсов Николайшорского массива (Приполярный Урал) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2021. № 3. С. 32–40. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-3-32-40>.
- Денисова Ю. В.* Петрохимия гранитов Яротского массива (Приполярный Урал): новые данные // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2020. № 1. С. 80–87. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-80-87>
- Доордовикские гранитоиды Тимано- Уральского региона и эволюция протиуралид – тиманид. / Н. Б. Кузнецов, А. А. Соболева, О. В. Удуратина, М. В. Герцева. Сыктывкар : Геопринт, 2005. 100 с.
- Ефремова С. В., Стафеев К. Г.* Петрохимические методы исследования горных пород. М. : Недра, 1985. 512 с.
- Карбонатитовый комплекс необычных горных пород и минерализаций в Восточном Таймыре / В. И. Силаев [и др.] // Проблемы минералогии петрографии и металлогении. 2016. № 19. С. 119–136.
- Махлаев Л. В.* Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург : УрО РАН, 1996. 189 с.
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И.* Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25–38.
- Рихванов Л. П., Соболев И. С., Лященко Н. Г.* Радиогеохимические методы поисков месторождений нефти и газа // Прикладная геохимия. 2002. № 3. С. 383–394.
- Фишман М. В., Голдин Б. А.* Гранитоиды центральной части Приполярного Урала. М. ; Л. : АН СССР, 1963. 105 с.
- Шарпенко Л. Н., Костин А. Е., Кухаренко Е. А.* TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 40–50.
- Chappel B. W., Whitte A- J. R.* Two contrasting granite types // *Pacif. Geol.* 1974. Vol. 8. P. 173–174.
- Clemens J. D., Holloway J. R., White A- J. R.* Origin of an A- type granite: experimental constraints // *Am. Mineralogist.* 1986. Vol. 71. P. 317–324.
- Creaser R. A., Price R. C., Wornmald R. J.* A- type granites revisited: assessment of a residual-source model // *Geology.* 1991. Vol. 19. P. 163–166.
- Cullers R. L., Medaris L. G., Haskin L. A.* Experimental studies of the distribution of rare earths as trace elements among silicate minerals and liquids and water // *Geochim Cosmochim Acta.* 1973. Vol. 37. P. 1499–1512.
- Harris N. B., Pearce J. A., Tindle A. G.* Geochemical characteristics of collision-zone magmatism // *Geol. Soc. Sp. Publ.* 1986. Vol. 19. P. 67–81.

- McDonough W. F., Sun S. S. The Composition of the Earth // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 120. P. 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Ni Y.-X., Hughes J. M., Mariano A. N. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures Yb (PO₄) // *American Mineralogist*. 1995. Vol. 80. P. 21–26.
- Papu D., Piccoli M., Piccoli P. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Amer.* 1989. Bull. 396. Vol. 101. P. 635–643.
- Pearce J. A. Sources and settings of granitic rocks // *Episodes*. 1996. Vol. 19, N 4. P. 120–125.
- Pearce J. A., Harris V. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. // *J. Petrol.* 1984. Vol. 25. P. 956–983.
- Sun S. S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1982. Vol. 46. P. 179–192.

References

- Balashov Yu.A. *Geohimiya redkozemelnykh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 267 p. (in Russian)
- Goldin B.A., Kalinin E.P., Puchkov V.N. *Magmatichekie formacii zapadnogo sklona severa Urala i ih minerageniya*. [Magmatic formations of the western slope of the northern Urals and their mineralogy]. Syktyvkar, Komi NC UrO RAN Publ., 1999, 213 p. (in Russian)
- Udoratina O.V., Kulikova K.V., Shujskij A.S. [et al.]. *Granitoidy severa Urala: geohronologiya, evolyuciya, istochniki*. [Granitoids of the North of the Urals: geochronology, evolution, sources]. Syktyvkar, IG Komi NC UrO RAN Publ., 2022, 120 p.
- Denisova Yu.V. Petrohimicheskie osobennosti granito-gnejsov Nikolajshorskogo massiva (Pripolyarnyj Ural). [Petrochemical features of granite-gneisses of the Nikolaishor massif (the Subpolar Urals)]. *Izvestiya Komi NC UrO RAN* [Izvestia Komi Scientific Center Ural Branch RAS], 2021, no. 3, pp. 32-40. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-3-32-40>
- Denisova Yu. V. Petrohimiya granitov Yarotskogo massiva (Pripolyarnyj Ural): novye dannye. [Petrochemistry of the Yarot massif granites (the Subpolar Urals): new data]. *Izvestiya Komi NC UrO RAN* [Izvestia Komi Scientific Center Ural Branch RAS], 2020, no. 1, pp. 80-87. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-80-87>
- Kuznecov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gerceva M.V. *Doordovikskie granitoidy Timano-Uralskogo regiona i evolyuciya protiuralid - timanid*. [Pre-Ordovician granitoids of the Timan-Ural region and evolution of proturalids -timanids]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2005, 100 p. (in Russian)
- Efremova S.V., Stafeev K.G. *PeREEohimicheskie metody issledovaniya gornyh porod*. [Petrochemical methods of rock research]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 512 p. (in Russian)
- Silaev V.I. et al. Karbonatitovyj kompleks neobychnyh gornyh porod i mineralizacij v Vostochnom Tajmyre. [Carbonatite complex of unusual rocks and mineralization in the Eastern Taimyr]. *Problemy mineralogii petrografii i metallogenii*, [Problems of mineralogy peREEography and metallogeny], 2016, no. 19, pp. 119-136. (in Russian)
- Mahlaev L.V. *Granitoidy severa CenREEalno-Uralskogo podnyatiya (Polyarnyj i Pripolyarnyj Ural)*. [Granitoids of the north of the CenREEal Ural Uplift (the Polar and the Subpolar Urals)]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1996, 189 p. (in Russian)
- Pystin A.M., Pystina Yu.I. *Metamorfizm i granitooobrazovanie v proterozojsko-rannepaleozojskoj istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoj kory*. [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Urals segment of the Earth's crust]. *Litosfera* [Lithosphere], 2008, no. 11, pp. 25-38. (in Russian)
- Rihvanov L.P., Sobolev I.S., Lyashchenko N.G. Radiogeohimicheskie metody poiskov mestorozhdenij nefiti i gaza. [Radiogeochemical methods of prospecting for oil and gas deposits]. *Prikladnaya geohimiya* [Applied geochemistry], 2002, no. 3, pp. 383-394. (in Russian)
- Fishman M.V., Goldin B.A. *Granitoidy cenreealnoj chasti Pripolyarnogo Urala*. [Granitoids of the central part of the Subpolar Urals]. Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1963, 105 p. (in Russian)
- Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kuharenko E.A. TAS-diagramma summa shchelochej – kremnezem dlya himicheskoj klassifikacii i diagnostiki plutonicheskikh porod [TAS-sum of alkalis –

silica diagram for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2013, no. 56, pp. 40-50. (in Russian)

Chappel B.W., Whitte A-J. R. Two contrasting granite types. *Pacif. Geol.*, 1974, vol. 8, pp. 173-174.

Clemens J.D., Holloway J.R., White A-J. R. Origin of an A- type granite: experimental constraints. *Am. Mineralogist*, 1986, vol. 71, pp. 317-324.

Creaser R.A., Price R.C., Wornald R.J.A- type granites revisited: assessment of a residual-source model. *Geology*, 1991, vol. 19, pp. 163-166.

Cullers R.L., Medaris L.G., Haskin L.A. Experimental studies of the distribution of rare earths as trace elements among silicate minerals and liquids and water. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, vol. 37, pp. 1499-1512.

Harris N.B., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 1986, vol. 19, pp. 67-81.

McDonough W.F., Sun S.S. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Ni Y.-X., Hughes J.M., Mariano A.N. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures Yb (PO₄). *American Mineralogist*, 1995, vol. 80, pp. 21-26.

Papu D., Piccoli M., Piccoli P. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer.*, 1989, bull. 396, vol. 101. pp. 635-643.

Pearce J.A. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 1996, vol. 19, N 4. pp. 120-125.

Pearce J.A., Harris V.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 1984, vol. 25. pp. 956-983.

Sun S. S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, vol. 46. pp. 179-192.

Сведения об авторе

Денисова Юлия Вячеславовна

младший научный сотрудник

Институт геологии им. академика

Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН

Россия, 167982, г. Сыктывкар,

ул. Первомайская, 54

e-mail: yulden777@yandex.ru

Information about the author

Denisova Yulia Vjacheslavovna

Junior Research Scientist

Institute of Geology Named After

Academician N. P. Yuskin Komi SC UB RAS

54, Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982,

Russian Federation

e-mail: yulden777@yandex.ru

Код научной специальности: 1.6.3

Статья поступила в редакцию **01.03.2023**; одобрена после рецензирования **28.08.2023**; принята к публикации **11.09.2023**

The article was submitted **March, 01, 2023**; approved after reviewing **August, 28, 2023**; accepted for publication **September, 11, 2023**