



УДК 552.331
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.49>

Геология и геохимия щелочно-сиенитовых массивов Сыдо-Ербинской впадины (Минусинский прогиб)

Е. П. Душкин*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Изучаются особенности химического состава щелочно-сиенитовых массивов, расположенных в обрамлении Сыдо-Ербинской впадины Минусинского прогиба. Сравниваются геохимические данные щелочных нефелиновых сиенитов (фойяитов) и нефелиновых сиенитов (тенсбергитов), отобранных в пределах таких массивов, как Сайбарский, Буровский, г. Высокой, г. Косматой, с целью выявления влияния гранит-диоритовых комплексов на их состав. Для достижения поставленной цели предполагается изучить геологические и петрографические особенности строения массивов, а также провести анализ химического состава пород по геохимическим данным, представленным в виде содержаний петрогенных и редких элементов.

Ключевые слова: Минусинский прогиб, Сыдо-Ербинская впадина, позднеордовикский магматизм, щелочные нефелиновые сиениты, редкие элементы.

Благодарности. Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых (№ НИР 091-21-330).

Для цитирования: Душкин Е. П. Геология и геохимия щелочно-сиенитовых массивов Сыдо-Ербинской впадины (Минусинский прогиб) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 41. С. 49–62. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.49>

Original article

Geology and Geochemistry of Alkaline Syenite Arrays of the Sydo-Erba Depression (Minusinsk Trough)

E. P. Dushkin*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. This research work is devoted to the study of the chemical composition of the alkaline-syenite massifs of the Sydo-Erba depression based on the available geological and geochemical data. For about 100 years, the massifs have attracted the attention of various scientists not only from the practical point of view, as possible sources of aluminum raw materials, but also as objects for research, in particular, to determine the shape of the bodies of nepheline syenites occurring in them and models of the formation of alkaline magmas. The studied intrusions are composed mainly of syenites and alkaline syenites, as well as a few bodies of nepheline syenites. The paper will present and compare the geochemical data of alkaline nepheline syenites (foyaite) and nepheline syenites (tensbergite), which compose such massifs as Saibarsky, Burovsky, Vysokoy, Kosmatoy, in order to identify the influence of granite-diorite complexes on their composition. To achieve this goal, it is supposed to study the geological and petrographic features of the structure of the massifs, as well as to analyze the chemical composition of rocks of geochemical data presented in the form of contents of petrogenic and rare elements.

Keywords: Minusinsk Trough, Sydo-Erba depression, Late Ordovician magmatism, alkaline nepheline syenites, trace elements.

For citation: Dushkin E.P. Geology and Geochemistry of Alkaline Syenite Arrays of the Sydo-Erba Depression (Minusinsk Trough). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 41, pp. 49-62. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.49> (in Russian)

Введение

Исследуемые щелочно-сиенитовые массивы расположены в горном обрамлении Сыдо-Ербинской впадины. Они сложены широким спектром пород, различающихся по суммарной щелочности и содержанию SiO_2 . К ним относятся щелочные сиениты, сиениты, в меньшей степени граносиениты и немногочисленные тела нефелиновых сиенитов. В числе первых, кто обнаружил изучаемые интрузии, были А. Г. Вологдин [1925] и Я. С. Эдельштейн [1932]. На протяжении всего времени массивы привлекали внимание ученых не только с практической стороны – как возможные источники алюминиевого сырья и редких литофильных элементов (Nb, Ta, Zr, Hf, Th, U, Be, Li, Rb), но и в качестве объектов для исследований. Наибольшее внимание уделялось изучению форм тел щелочных нефелиновых сиенитов, при этом Г. М. Саранчина [1940] относила их к дайкам, а Э. Е. Федоров [1948] считал их ксенолитами в сиенитах. Помимо этого, было предложено немалое количество различных моделей происхождения и эволюции слагающих их пород [Когарко, 1977], которые были основаны на различных источниках вещества. В связи с этим модели разделились на несколько типов: «модели фракционирования» [Fox, 1977; Mantle derivation of ... , 1990; Isotopic evidence for ... , 1993], «модели смешения» [The Pikes Peak ... , 1975; Dorais, 1990; Geochemical and isotopic studies ... , 1995], «модели ассимиляции» [Wyllie, 1974], «метасоматические модели» [Strauss, Truter, 1950; Tilley, 1958]. Изучение моделей образования магм актуально и по сей день. Так, одна из последних работ по данной теме, вышедшая в 2021 г., была посвящена обсуждению эволюции сиенитовых магм Сайбарского массива [Evolution of Syenite ... , 2021].

С учетом многообразия исследований, связанных с Сайбарским массивом и моделями образования магм, основанных на слагающих его породах, была поставлена цель сравнить между собой химические составы пород Сайбарского массива с другими интрузиями сайбарской группы, а также выявить степень влияния на их состав рядом расположенных гранит-диоритовых комплексов.

Методика исследования

Анализ содержания петрогенных и редких элементов проводился в Институте геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН. Содержание петрогенных элементов определялось рентгенофлуоресцентным методом (РФА) на многоканальном спектрометре СРМ-25 согласно методике [Афонин, Гуничева, Пискунова, 1984]. Для выявления содержания редких элементов использовался метод ICP-MS, проводимый на масс-спектрометре с высоким разрешением ELEMENT-2 Finnigan MAT в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А. П. Виноградова СО

РАН. Пробоподготовка образцов сиенитов и фойяитов осуществлялась сплавлением с метабора́том лития. Для устранения возможного матричного эффекта и учета нестабильности спектров (РФА) был использован внутренний стандарт Rh. Для калибровки расчетов содержания элементов в пробе применялись многоэлементные сертифицированные растворы CLMS-1, -2, -4 и SPEX (США). Контроль правильности результатов анализа выполнялся с использованием стандартного образца STM-1. Химический состав пород приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав пород массивов

Состав	Сайбарский									Высокий	
	МСК 1/1	МСК 1/2	МСК 1/3	СБР 1/1	СБР 1/2	СБР 1/7	СБР 3/1	СБР 4/4	СБР 4/8	ВСК 1/2	ВСК 1/4
SiO ₂	57,62	61,64	56,94	56,09	53,91	64,02	63,86	65,21	58,1	61,51	59,94
TiO ₂	1,25	1,03	0,86	0,63	0,83	0,70	1,11	0,73	0,74	0,47	0,38
Al ₂ O ₃	15,57	17,79	18,12	17,36	15,93	17,17	16,53	16,8	19,40	19,43	19,17
Fe ₂ O ₃	7,22	5,73	5,13	8,55	11,27	6,57	5,34	4,39	3,52	5,92	5,19
MnO	0,30	0,27	0,25	0,2	0,26	0,28	0,25	0,2	0,26	0,14	0,16
MgO	1,28	0,11	0,53	0,46	0,42	0,37	0,48	0,07	0,77	0,27	0,51
CaO	1,86	0,2	2,3	1,21	1,19	0,25	0,48	0,50	1,33	0,28	1,47
Na ₂ O	8,83	7,89	7,69	8,89	9,93	5,71	6,66	6,87	9,05	5,1	6
K ₂ O	4,22	4,89	5,13	4,76	4,0	4,25	4,97	4,48	4,90	5,05	5,19
P ₂ O ₅	0,14	0,06	0,04	0,02	0,04	0,07	0,1	0,18	0,13	0,16	0,1
п.п.п	1,96	0,54	2,85	1,88	2,48	0,65	0,71	0,93	2,18	1,33	1,95
Сумма	100,3	100,15	99,84	100,06	100,26	100,04	100,47	100,36	100,38	99,66	100,04
K.A.	1,23	1,03	1,0	1,14	1,3	0,82	0,99	0,96	1,04	0,71	0,81
Rb	174,7	130,58	189,87	338,60	319,61	124,70	152,66	150,83	195,00	312,43	260,68
Ba	531,7	196,28	361,93	158,61	124,61	390,44	406,68	390,32	221,77	321,63	320,54
Sr	232,4	72,24	990,72	169,4	97,74	65,11	83,64	102,60	182,41	63,58	161,81
Zr	940,1	1256,76	779,35	1053,4	1533,2	996,10	1181,5	880,44	735,04	2572,8	1460,6
Nb	82,57	73,96	44,6	22,85	56,62	64,08	91,26	105,10	59,05	229,34	125,00
Hf	18,84	26,48	16,12	26,73	40,12	23,51	26,04	20,51	15,27	49,66	28,23
Ta	2,82	3,08	1,33	0,86	1,74	3,80	6,01	5,28	2,34	12,16	7,44
Y	123,7	71,31	59,41	14,15	41,78	47,08	59,41	138,01	52,61	111,39	78,85
Th	20,74	26,59	25,04	14,40	29,37	8,89	22,17	55,91	20,96	88,88	58,40
U	7,27	6,02	7,04	4,38	13,95	5,12	4,73	9,35	8,86	39,13	25,83
Pb	44,13	42,07	48,61	22,14	47,17	23,72	42,93	30,76	35,74	61,21	55,7
La	223,2	78,64	102,98	39,63	112,34	58,09	87,74	182,97	98,31	96,16	107,02
Ce	495,1	155,34	194,10	65,51	195,34	136,76	197,07	336,47	162,53	247,25	210,32
Pr	54,18	15,41	19,99	6,23	17,15	15,86	23,32	32,15	15,76	20,79	21,06
Nd	185,9	51,04	66,73	19,02	49,94	54,92	81,43	99,9	49,55	70,91	69,4
Sm	31,56	8,99	11,35	2,90	7,78	9,11	13,37	17,1	7,34	14,61	12,23
Eu	5,53	1,59	1,95	0,50	1,36	1,58	2,35	3,15	1,19	1,25	1,08
Gd	27,3	8,23	9,38	2,29	7,82	7,50	11,59	17,4	6,80	13,7	10,48
Tb	3,85	1,5	1,49	0,34	1,12	1,26	1,84	2,79	0,93	2,48	1,8
Dy	24,57	9,88	10,25	2,27	6,74	8,36	11,19	19,47	6,41	16,76	12,05
Ho	4,68	2,24	2,08	0,53	1,41	1,83	2,37	4,55	1,55	3,87	2,62
Er	13,8	7,93	6,52	1,97	4,92	5,95	7,95	15,4	5,39	13,23	8,92
Tm	1,98	1,33	0,99	0,41	0,94	1,03	1,28	2,57	0,97	2,15	1,42
Yb	13,12	10,36	7,14	4,25	8,71	7,68	9,79	17,95	7,26	15,66	10,38
Lu	1,97	1,71	1,19	0,98	1,71	1,3	1,61	2,78	1,24	2,28	1,52
SiO ₂	58,88	57,64	56,21	59,84	60,73	53,83	55,19	59,18	61,02	61,33	64,95
TiO ₂	0,46	0,46	0,43	0,2	0,13	0,66	0,63	0,58	1,06	1,02	0,71
Al ₂ O ₃	18,7	18,14	20,25	22,40	23,77	17,68	18,20	19,79	18,15	18,16	17,00
Fe ₂ O ₃	6,02	6,22	3,91	3,21	1,88	6,42	5,73	3,72	5,1	4,73	4,17
MnO	0,23	0,21	0,23	0,01	0,08	0,43	0,31	0,27	0,1	0,17	0,12

Окончание табл. 1

Состав	Высокий		Буровский						Косматый		
	ВСК 2/1	ВСК 3/1	БРВ 1/4	БРВ 1/5	БРВ 2/2	БРВ 3/2	БРВ 3/3	БРВ 3/5	КОС 1/2	КОС 1/5	КОС 2/1
MgO	0,55	0,57	1,16	0,13	0,26	2,80	2,14	0,26	1,14	1,09	0,36
CaO	0,57	1,65	2,07	0,12	0,09	3,90	3,50	0,34	2,07	1,95	0,54
Na ₂ O	3,90	7,17	8,17	7,12	4,26	9,35	9,09	8,41	7,65	7,15	6,75
K ₂ O	8,62	5,0	4,96	5,01	6,65	4,02	4,10	5,49	2,85	3,83	5,24
P ₂ O ₅	0,14	0,18	0,11	0,02	0,05	0,20	0,19	0,02	0,28	0,27	0,09
п,п,п	2,45	3,01	1,93	1,86	1,83	1,12	1,29	2,36	0,47	0,88	0,38
Сумма	100,51	100,25	99,42	99,90	99,72	100,41	100,37	100,42	99,90	100,59	100,31
К.А.	0,84	0,95	0,93	0,77	0,6	1,12	1,07	1,0	0,86	0,88	0,99
Rb	271,89	357,31	116,05	120,15	94,76	70,12	90,04	172,22	32,88	55,46	124,6
Ba	559,96	519,56	296,68	141,14	340,14	268,22	304,75	124,68	1055,3	1279,8	81,66
Sr	261,09	201,65	275,78	39,03	46,62	108,87	245,53	74,45	444,12	311,07	28,91
Zr	1760,6	1905,3	434,3	150,96	259,14	366,78	600,61	357,01	427,53	503,26	1660,9
Nb	149,62	166,53	34,34	24,55	16,97	23,12	48,38	33,55	38,50	43,20	111,5
Hf	35,23	43,46	7,86	2,63	4,80	8,49	13,04	6,73	9,57	10,57	39,41
Ta	8,82	8,94	1,95	1,35	1,09	1,21	2,37	1,36	2,05	2,28	7,22
Y	88,08	94,87	29,54	7,04	5,34	35,59	57,14	33,93	33,94	35,89	59,19
Th	63,08	80,54	6,62	6,12	5,04	7,64	15,71	15,43	7,51	8,76	32,81
U	25,83	21,74	3,41	6,08	2,55	3,25	8,72	2,89	3,19	2,90	9,83
Pb	58,33	76,04	15,56	9,76	19,74	5,55	29,34	64,11	17,32	29,75	28,97
La	158,41	137,20	74,46	14,17	6,90	82,86	98,98	48,08	52,33	60,95	73,64
Ce	320,32	251,83	146,98	24,02	16,25	160,16	196,62	89,71	113,26	122,97	205,53
Pr	30,08	25,69	15,39	2,26	1,84	17,48	20,86	8,64	13,04	13,68	15,58
Nd	101,28	81,67	50,18	6,69	6,91	57,83	66,71	25,71	48,38	49,61	51,55
Sm	17,32	14,28	7,79	0,98	1,39	8,58	10,57	4,21	8,56	8,36	8,90
Eu	1,60	1,20	1,43	0,22	0,29	1,46	1,91	0,82	2,14	2,30	1,00
Gd	15,83	13,30	6,55	1,23	1,18	7,39	9,29	4,12	7,63	8,01	8,28
Tb	2,44	2,11	0,95	0,15	0,22	0,95	1,32	0,68	1,10	1,11	1,38
Dy	15,66	14,43	5,79	1,20	1,5	6,15	9,17	4,90	6,56	6,55	9,79
Ho	3,26	3,31	1,17	0,27	0,35	1,26	1,93	1,11	1,30	1,32	2,27
Er	10,86	11,15	3,74	0,92	1,26	3,84	6,28	3,81	4,07	4,16	7,7
Tm	1,72	1,90	0,62	0,17	0,24	0,69	1,09	0,64	0,56	0,64	1,31
Yb	12,77	13,46	4,99	1,22	1,74	5,32	7,77	4,39	4,26	4,27	9,81
Lu	2,0	2,15	0,91	0,20	0,28	1,01	1,31	0,69	0,62	0,67	1,63

Примечание. Окислы в мас. %, элементы в г/т. К. А. – коэффициент апгаитности ((Na₂O+K₂O)/Al₂O₃).

Краткие геологические и петрографические сведения

В горном обрамлении Сыдо-Ербинской впадины, являющейся частью Минусинского межгорного прогиба (рис. 1), выделяются два типа интрузивных комплекса – лугагский и сайбарский. Объединение в несколько групп обусловлено близким территориальным расположением массивов, различными показателями щелочности слагающих их пород, а также сходством петрографических характеристик. В состав изучаемого в данной работе сайбарского комплекса, помимо Сайбарского, Буровского, Косматого и Высокого массивов, также входят Александровский, Верхнеубейский, Троицкий, Малотелекский, Байтакский, Бесь-Тыглинский и Сидоровский. Интрузии залегают в раннедевонских вулканических комплексах, прорывая кембрийские терригенно-осадочные толщи, которые представлены известняками, окварцован-

ными известняками и песчаниками. Ранее всем массивам приписывали девонский возраст [Косоруков, 1981], но по полученным в 2005 г. результатам U-Pb-датирования цирконов сиенитов [Разнообразие кембро-ордовикских ... , 2005] Сайбарского массива был установлен возраст, равный 457 ± 10 млн лет, что соответствует позднему ордовику.

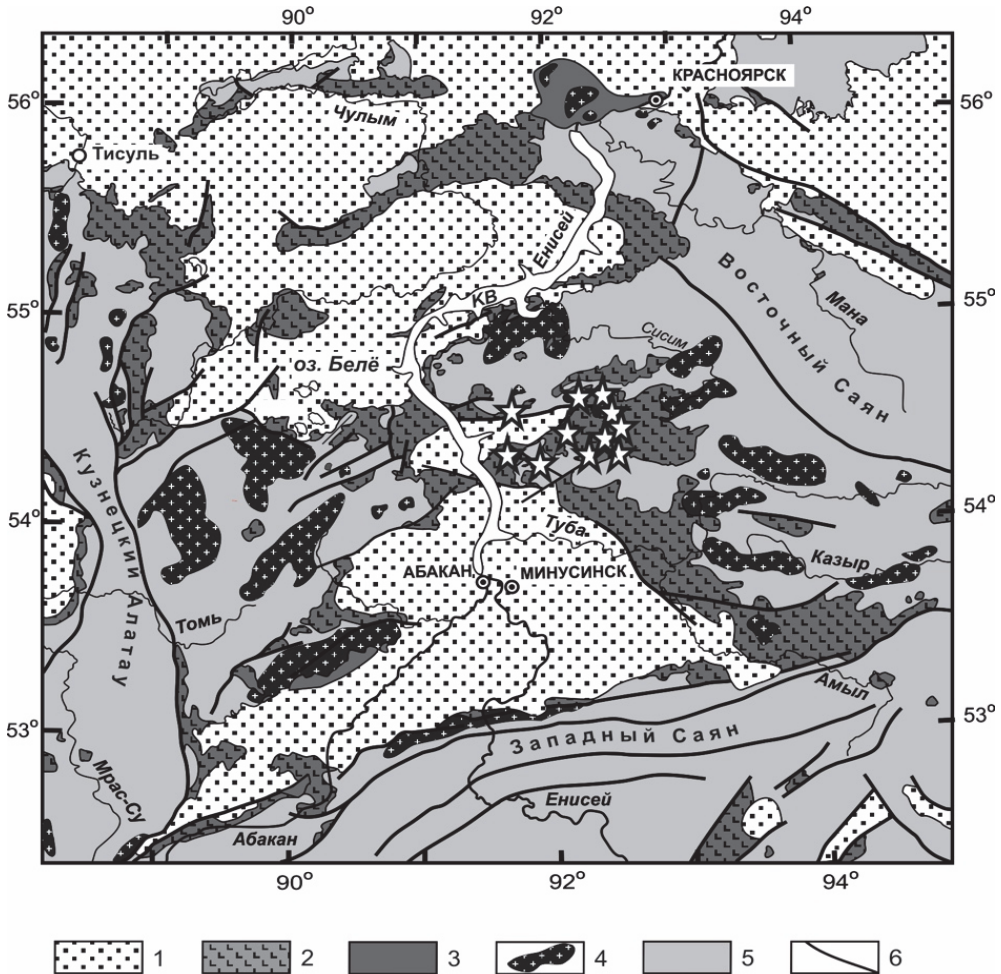


Рис. 1. Схема размещения палеозойских магматических комплексов в северной части Алтае-Саянской складчатой области. Составлена по материалам [Перфилова, Махлаев, Сидорас, 2004; Руднев, 2013]

1 – осадочные отложения (D_{2gv-C}); 2 – раннедевонские магматические комплексы; 3–5 – позднеордовикские магматические комплексы: 3 – вулканические ареалы, 4 – сиенит-граносиенит-гранитные массивы, 5 – допозднеордовикские нерасчлененные геологические комплексы; 6 – тектонические нарушения. КВ – Красноярское водохранилище. Звездочками (вне масштаба) показаны сиенит-граносиенит-гранитные массивы сайбарской группы

Сайбарский массив (рис. 2, *а*) расположен к югу от впадины, в плане имеет вытянутые в субмеридиональном направлении очертания и занимает площадь около 40 км². Благодаря большому количеству разновидностей щелочных пород, находящихся в нем, его принято считать эталонным, в связи с этим группа и называется сайбарской. В его строении принимают участие сиениты, щелочные сиениты, щелочные нефелиновые сиениты, а также приуроченные к зонам эндоконтакта субщелочные граниты. Нефелиновые сиениты расположены в северной и центральной частях интрузии. Помимо этого, в северо-восточной части имеется контакт с гранит-диоритовым комплексом.

Буровский массив (рис. 2, *б*) находится в северном крыле Сыдо-Ербинской впадины. Он вытянут в субширотном направлении и является самым крупным из рассматриваемых массивов, его площадь составляет около 75 км². Подобно Сайбарской интрузии, его слагают сиениты и щелочные сиениты. Тела нефелиновых сиенитов проявляются в виде трех полей, находящихся в юго-восточной и центральной областях массива. В южной части между сиенитами и вмещающим вулканическим комплексом протягивается полоса граносиенитов. Контакт с гранитным комплексом, расположенным севернее массива, отсутствует.

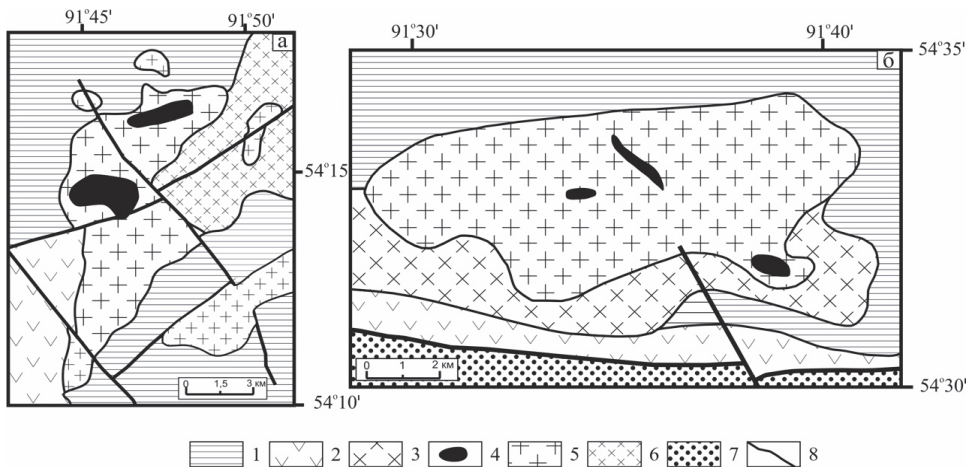


Рис. 2. Схема геологического строения:

- а* – Сайбарского массива, *б* – Буровского массива. Составлена по материалам [Саранчина, 1940; Федоров, 1948; Лучицкий, 1960; Федосеев, Поляков, 1974; Косоруков, 1981]
- 1 – допозднеордовикские терригенно-осадочные отложения, 2 – палеозойские вулканические комплексы, 3 – мелкозернистые сиениты и кварцевые сиениты, 4 – поля щелочных нефелиновых сиенитов, 5 – щелочные сиениты, 6 – раннепалеозойские граниты и диориты, 7 – терригенно-осадочные отложения (D₂-C₁), 8 – тектонические нарушения

Массив г. Косматой (рис. 3, *а*) находится северо-восточнее Буровской интрузии, как и предыдущие породы, сложен аналогичными породами, но без четкого выделения границ расположения щелочных нефелиновых сиенитов. Занимаемая им площадь составляет 21 км². Имеет контакт с гранит-диоритовым комплексом.

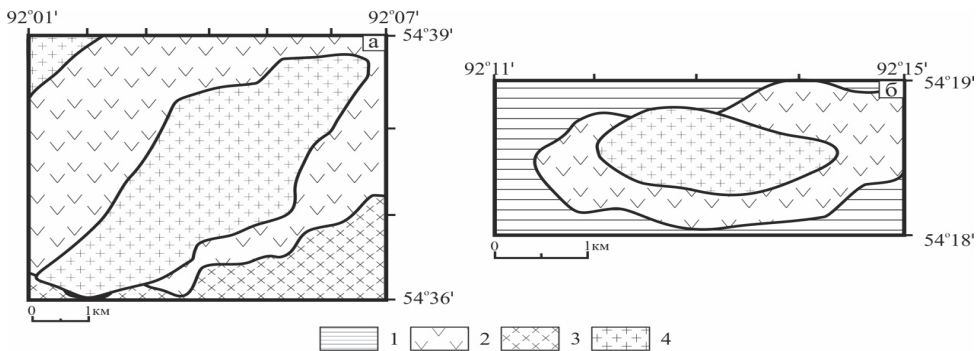


Рис. 3. Схема геологического строения: *а* – массива г. Косматой, *б* – массива г. Высокой.

Составлена по материалам [Лучицкий, 1960; Косоруков, 1981]

- 1 – допозднеордовикские терригенно-осадочные отложения, 2 – палеозойские вулканические комплексы, 3 – раннепалеозойские граниты и диориты, 4 – щелочные сиениты и щелочные нефелиновые сиениты

Высокогорный массив (рис 3, *б*) наиболее удален от Сыдо-Ербинской впадины и расположен рядом с Байтакским хребтом, приурочен к г. Высокой. Занимает площадь около 3 км². Особенности встречающихся в пределах интрузии пород аналогичны особенностям пород, слагающих Косматый массив. Вблизи массива гранитные комплексы отсутствуют.

Породы, слагающие интрузии, можно разделить на две группы. Первая, представленная щелочными сиенитами (тенсбергитами по [Магматические горные породы, 1983]) и сиенитами, является доминирующей в массивах и занимает порядка 90 % всей их площади. Для тенсбергитов характерна порфировидная структура с гипидиоморфнозернистой структурой основной массы. Фенокристаллы занимают около 50 % объема породы и представлены преимущественно пелитизированным и в различной степени альбитизированным ортоклазом. Помимо этого, встречаются фенокристаллы альбита, щелочных пироксенов (например, эгирин-авгита), амфиболов, представленных арфведсонитом и рибекитом, а также мелкозернистый калиево-натриевый полевой шпат. Сиениты в основном крупнозернистые с порфировидной структурой. Характеризуются присутствием вместо эгирин-авгита щелочного амфибола. Среди аксессуарных минералов в породах данной группы встречаются титанит, апатит, циркон, реже монацит. К рудным минералам можно отнести магнетит и титаномагнетит, который обычно окружен тонкими оторочками лейкоксена [Перфилова, Воронцов, Лобастов, 2018].

Ко второй группе относятся щелочные нефелиновые сиениты (фойяиты по [Магматические горные породы, 1983]), которые в пределах исследуемых массивов образуют ряд обособленных тел, залегающих во вмещающих щелочных сиенитах. Щелочные нефелиновые сиениты характеризуются непостоянством петрографических признаков, выраженным постепенным переходом от равномернозернистой до порфировидной структуры. Породы сложены интенсивно альбитизированным калиево-натриевым полевым шпатом, нефелином и эгирином или эгирин-авгитом, иногда присутствуют рибекит и арфведсо-

нит. Сам же нефелин представляет собой кристаллы четырех- и шестиугольной формы, при этом он часто замещается слюдистыми агрегатами и цеолитами. Нефелин хорошо заметен в макроскопическом плане. Его размеры в среднем достигают 5×7 мм, содержание может варьироваться в широких пределах от 7 до 35 %. После его выщелачивания на поверхности фойяитов часто возникают многочисленные остаточные мелкие каверны. Эгирин, образуя минералы сноповидной и войлокоподобной формы, обычно замещается арфведсонитом. Основная масса породы имеет трахитоидную, а также гипидиоморфнозернистую структуры.

Геохимическая характеристика

Для оценки вариаций составов пород представленных интрузий были использованы спайдер-диаграммы и несколько бинарных диаграмм. На классификационной TAS-диаграмме (рис. 4, а) точки составов расположились в пределах трех полей: фойдовые сиениты, щелочные сиениты и сиениты. В первом поле лежат щелочные нефелиновые сиениты с характерным для них повышенным содержанием суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ от 12,17 до 13,95 мас. %), и пониженным содержанием кремнезема (53,83–59,18 мас. %) относительно сиенитов и щелочных сиенитов (SiO_2 от 59,84 до 65,21 мас. % при $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ от 9,95 до 12,78 мас. %).

В данное поле не попали образцы, отобранные с массива г. Косматой, хотя они и проявляют химические свойства, характерные для фойяитов, выраженные в виде высокого показателя коэффициента агпаитности (К. А.), приближенного к 1 (см. рис. 4, б), а также превалирования щелочей над глиноземом (см. рис. 4, в). На образцах с Сайбарского и Буровского массивов (см. рис. 4, в) виден постепенный переход от агпаитовых (пересыщенных щелочами) к плюмазитовым (пересыщенных глиноземом) породам.

В связи с обогащением щелочных минералов, таких как альбит, калиево-натриевый полевошпат и т. п., для всех групп характерен высокой показатель модифицированного щелочно-известковистого индекса (МАИ), что позволяет отнести образцы к щелочному типу пород (см. рис. 4, г).

На графиках нормированного распределения элементов (рис. 5) спектры редкоземельных элементов (РЗЭ), нормализованных как на хондрит, так и на примитивную мантию, имеют сходные очертания для всех пород исследуемых интрузий. Формы спектров фойяитовых образцов проявляют характерную для данной группы пород дифференциацию тяжелых (HREE) и в меньшей степени средних (MREE) РЗЭ. Сходные закономерности выявляются и в группе сиенитов и щелочных сиенитов. При этом заметно выделяются спектры образцов, отобранных из Буровского массива. Скорее всего, это связано с высокой степенью дифференциации высокощелочного магматического расплава. Также заметно сходство в составах обеих групп пород с теми же проявляющимися положительными и отрицательными аномалиями таких элементов, как Rb, Ba, Th, U, K, Nb, Ta, La, Ce, Pb, P, Eu, Ti. Стоит также отметить близкие по своей форме очертания спектра всех пород, слагающих интрузии, с составом верхней континентальной коры, что может быть связано с коровой контаминацией.

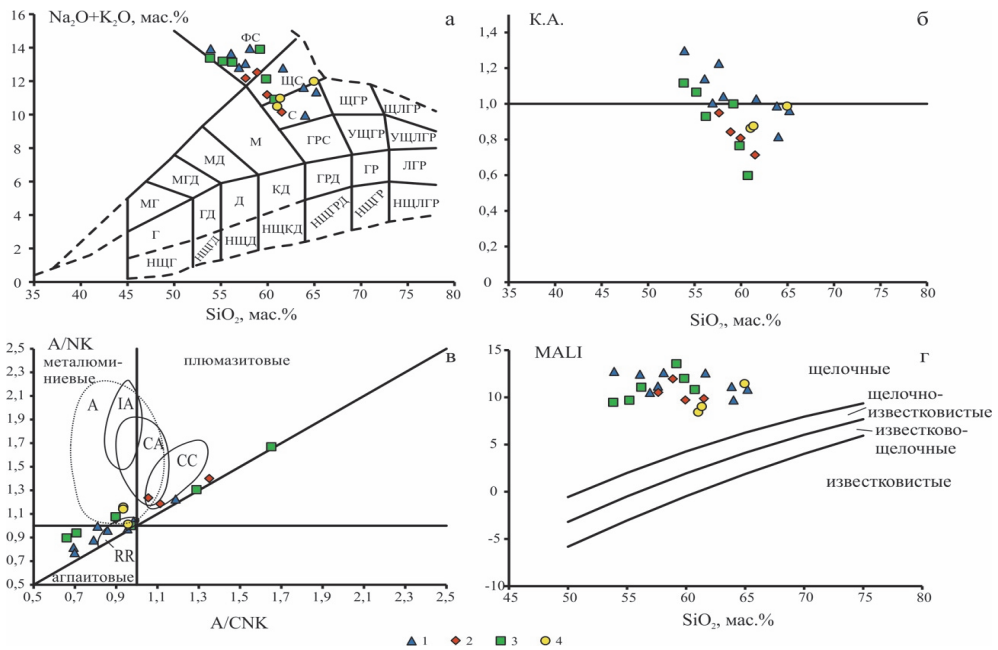


Рис. 4. а – классификационная диаграмма TAS; б – диаграмма соотношения коэффициента агпайтности (К. А.) относительно SiO₂; в – диаграмма соотношения A/NK относительно A/CNK [Shand, 1943]; г – диаграмма соотношения MALI относительно SiO₂ [A Geochemical Classification for ... , 2001; Frost, Frost, 2008].

1 – Сайбарский массив, 2 – массив г. Высокой, 3 – Буровский массив, 4 – массив г. Косматой. МГ – монцогаббро, Г – габбро, НЩГ – низкощелочное габбро, МГД – монцогаббродиориты, ГД – габбродиориты, НЩГД – низкощелочные габбродиориты, МД – монцидиориты, Д – диориты, НЩД – низкощелочные диориты, М – монцониты, КД – кварцевые диориты, НЩКД – низкощелочные кварцевые диориты, ФС – фойдовые сиениты, ШС – щелочные сиениты, С – сиениты, ГРС – граносиениты, ГРД – гранодиориты, НЩГРД – низкощелочные гранодиориты, ШГР – щел. граниты, УЩГР – умеренно щелочные граниты, ГР – граниты, НЩГР – низкощелочные граниты, ШЛГР – щел. лейкограниты, УЩЛГР – умеренно щелочные лейкограниты, ЛГР – лейкограниты, НЩЛГР – низкощелочные лейкограниты. A/NK = Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O+K₂O) (молярные значения), MALI (modified alkali-lime index) = Na₂O + K₂O – CaO (мас. %). Сплошные линии разделяют поля агпайтовых, нормальных и плюмазитовых пород. IA – островная дуга, СА – континентальная дуга, СС – континентальная коллизия, RR – связанный с рифтом, А – анорогенные граниты взяты из [Maniari, Piccoli, 1989]

Также в химическом составе фоййитовых образцов разных массивов в отличие от составов сиенитов и щелочных сиенитов проявлено высокое содержание СаО (см. табл. 1). Данную особенность можно привязать к одной из моделей образования щелочно-сиенитовых магм, ассимиляции, заключающейся в участии карбонатной компоненты, которая представлена в виде кембрийских вмещающих известняков.

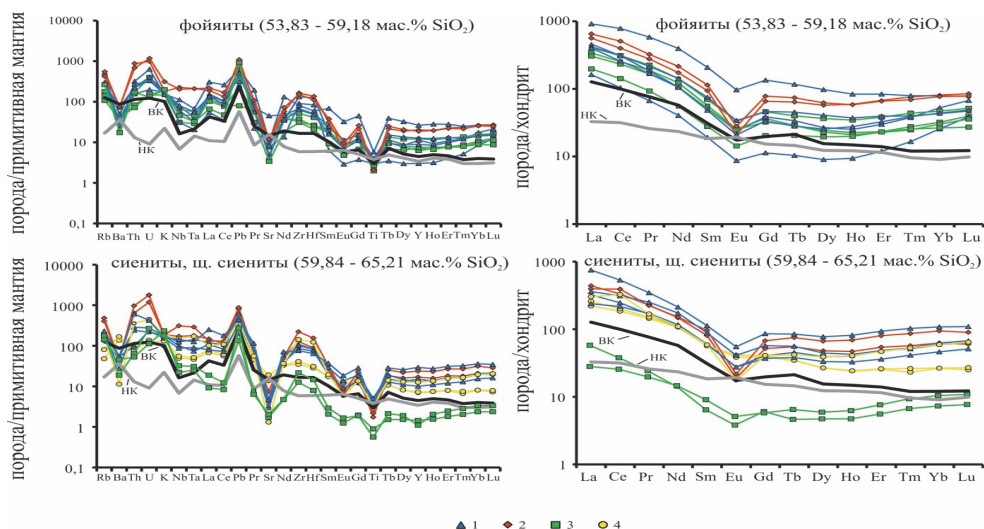


Рис. 5. Графики нормированного распределения редкоземельных элементов в породах массивов сайбарского комплекса

1 – Сайбарский массив, 2 – массив г. Высокой, 3 – Буровский массив, 4 – массив г. Косматой. ВК и НК – составы верхней и нижней континентальных кор по [Taylor, McLennan 1981; Rudnick, Gao, 2003]. Нормировка на состав хондрита по [Sun, McDonough, 1989]

Заключение

По представленным выше геохимическим данным интрузивных массивов щелочных сиенитов можно сделать следующие выводы.

1. Формирование щелочно-сиенитовых массивов связано с позднеордовикским этапом щелочно-сиенитового магматизма, проявленного в горном обрамлении Сыдо-Ербинской впадины Минусинского прогиба. В результате были образованы такие породы, как щелочные нефелиновые сиениты (фойяиты), щелочные сиениты (тенсбергиты) и сиениты.

2. Фойяиты, тенсбергиты и сиениты, отобранные с разных интрузивных массивов, обладают близким химическим составом, отчетливо выраженным в виде широких вариаций содержания РЗЭ, сходных форм спектров на спайдер-диаграммах, а также высоких показателей суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ от 9,9 до 13,9 мас. %), что указывает на отсутствие участия гранит-диоритовых комплексов в образовании исследуемых щелочно-сиенитовых интрузий.

3. Для всех исследуемых интрузивных массивов можно предположить единую модель происхождения магматического расплава, связанную с ассимиляцией карбонатным веществом. Согласно данной модели в первоначальный щелочной расплав, из которого образовались щелочные сиениты и сиениты, были добавлены блоки вмещающих карбонатных пород, что привело к увеличению содержания щелочей, а также десиликации расплава, в результате чего сформировались породы, близкие по составу к фойяитам.

Список литературы

- Афонин В. П., Гуничева Т. Н., Пискунова Л. Ф.* Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ. Новосибирск : Наука, 1984. 228 с.
- Володин А. Г.* Геологические исследования в 1924 г. в районе г. Сайбар и Большетелецкого Байтака // Известия Геологического комитета. 1925. Т. 44, № 6. С. 18–43.
- Когарко Л. Н.* Проблема генезиса апаитовых магм. М. : Наука, 1977. 294 с.
- Косоруков А. П.* Девонский щелочно-сиенитовый комплекс Сыдо-Ербинской впадины и ее горного обрамления // Магматические комплексы складчатых областей юга Сибири. Новосибирск : Наука, 1981. С. 128–157.
- Лучицкий И. В.* Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. М. : Изд-во АН СССР. 1960. 276 с.
- Магматические горные породы. В 6 т. Т. 1. Классификация, номенклатура, петрография / Е. Д. Андреева [и др.]. М. : Наука, 1983. Ч. 2. 401 с.
- Перфилова О. Ю., Махлаев М. Л., Сидорас С. Д.* Ордовикская вулканоплутоническая ассоциация в структурах горного обрамления Минусинских впадин // Литосфера. 2004. № 3. С. 137–152.
- Перфилова О. Ю., Воронцов А. А., Лобастов Б. М.* Палеозойские щелочные интрузии в восточном обрамлении Сыдо-Ербинской впадины (геология и петрография) // Бурятский государственный университет: Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии. 2018. С. 291–293.
- Разнообразие кембро-ордовикских ультрабазит-базитовых ассоциаций Центрально-Азиатского складчатого пояса как отражение процессов взаимодействия плюма и литосферной мантии / А. Э. Изох [и др.] // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. В 2 т. Т. 1. Иркутск, 2005. С. 106–108.
- Руднев С. Н.* Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. 300 с.
- Саранчина Г. М.* Щелочные породы массива Сайбар (Западная Сибирь, Красноярский край) // Ученые записки ЛГУ. 1940. № 45. 26 с.
- Федосеев Г. С., Поляков Г. В.* Интрузии гранитов и сиенитов восточного обрамления Сыдо-Ербинской и Южно-Минусинской впадин // Среднепалеозойские интрузии гранитов и сиенитов Кузнецкого Алатау и северо-западной части Восточного Саяна. Новосибирск : Наука, 1974. С. 148–207.
- Федоров Э. Е.* К вопросу о сиенитовой интрузии Тубино-Сисимского района (Красноярский край) // Материалы ВСЕГЕИ. Общая серия. 1948. № 8. С. 106–112.
- Эдельштейн Я. С.* Геологический очерк Минусинской котловины и прилегающих частей Кузнецкого Алатау и Восточного Саяна // Очерки по геологии Сибири. Л. : Изд-во АН СССР, 1932. 59 с.
- A Geochemical Classification for Granitic Rocks / B. R. Frost [et al.] // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 2033–2048.
- Dorais M.* Compositional variations in pyroxenes and amphiboles of the Belknap Mountain complex, New Hampshire: Evidence for origin of silica-saturated alkaline rocks // Amer. Miner. 1990. Vol. 75. P. 1092–1105.
- Evolution of Syenite Magmas: Insights from the Geology, Geochemistry and O-Nd Isotopic Characteristics of the Ordovician Saibar Intrusion, Altai-Sayan Area, Russia / A. A. Vorontsov, A. E. Izoh, V. V. Yarmolyuk, T. Y. Komaritsyna [et al.] // Minerals. 2021. Vol. 11. P. 473–498.
- Fox F. K. Jr.* Alkalic rocks of South-central British Columbia and northeastern Washington // Geol. Soc. Amer. Abstr. Programs. 1977. Vol. 9, N 6. P. 723.
- Frost B. R., Frost C. D.* A geochemical classification for feldspathic igneous rocks // J. Petrol. 2008. Vol. 49. P. 1955–1969.
- Geochemical and isotopic studies from the Yamato Mountains, East Antarctica: Implications of the origin of syenitic magmas / J.-X. Zhao, K. Shiraiishi, D. J. Ellis, J. W. Sheratin // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59. P. 1363–1382.

Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico / D. L. Lynch, T. E. Musselman, J. T. Gutmann, P. J. Patchett // *Lithos*. 1993. Vol. 29. N 3–4. P. 295–302.

Maniar P. D., Piccoli P. M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. Vol. 101. P. 635–643.

Mantle derivation of Archean amphibolebearing granitoids and associated mafic rocks: evidence from the southern Superior Province, Canada / R. H. Sutcliffe, A. R. Smith, W. Doherty, R. L. Barnett // *Contr. Mineral. Petrol.* 1990. Vol. 105. P. 255–274.

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3: The Crust / ed. H. D. Holland, K. K. Turekian. Amsterdam : Elsevier, 2003. P. 1–56.

Shand S. J. The eruptive rocks: 2nd ed. New York : Wiley 1943. 444 p.

Strauss C. A., Truter F. C. The alkali complex at Spitskop, Sekukuniland, Eastern Transvaal // *Transactions of the Geological Society of South Africa*. 1950. Vol. 53. P. 81–125.

Sun S. S., McDonough W. F. Magmatism in the ocean basins // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. N 42. P. 313–345.

Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford : Blackwell, 1985. 312 p.

The Pikes Peak batholith, Colorado Front Range, and model for the origin of the gabbroanorthosite-syenite-potassic granite suite / F. Barker, D. R. Wones, W. N. Sharp, G. A. Desborough // *Precambrian Research*. 1975. Vol. 2. P. 97–160.

Tilley C. E. Problems of alkali rock genesis // *Q. J. Geol. Soc. Lond.* 1957. Vol. 113. P. 323–360.

Wyllie P. J. Limestone assimilation // *The alkaline rocks* / H. Sorensen (ed.). London : Wiley sons, 1974. 622 p.

References

Afonin V.P., Gunicheva T.N., Piskunova L.F. Rentgenofluorestantsnyi silikatnyi analiz [X-ray fluorescence silicate analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 228 p. (in Russian)

Vologdin A.G. Geologicheskie issledovaniya v 1924 g. v raione g. Saibar i Bol'she Telekskogo Baitaka [Geological research in 1924 in the region of Saibar and Bolshe-Telek Baitak]. *Izvestiya geologicheskogo komiteta* [News of the Geological Committee]. 1925, vol. 44, no. 6, pp. 18-43. (in Russian)

Kogarko L.N. *Problema genezisa agpaitovykh magm* [The Problem of the Genesis of Agpaitic Magmas]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 294 p. (in Russian)

Kosorukov A.P. Devonskii shchelochno-syenitovyi kompleks Sydo-Erbinskoi vpadiny i ee gornogo obramleniya [Devon alkaline-syenite complex Sydo-Yerbinsk depression and its mountain framing]. *Magmaticheskie komplekxy skladchatykh oblastei yuga Sibiri* [Magmatic complexes of the folded regions of southern Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, pp. 128-157. (in Russian)

Luchitskii I.V. *Vulkanizm i tektonika devonskikh vpadin Minusinskogo mezhgornogo progiba* [Volcanism and tectonics of the Devonian depressions of the Minusinsk intermountain trough]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1960, 276 p. (in Russian)

Andreeva E.D., Baskina V.A., Bogatkov O.A. et al. *Magmaticheskie gornye porody* [Magmatic rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1983, vol. 1: Classification, nomenclature, petrography, part 2, 401 p. (in Russian)

Perfilova O.Yu., Makhlaev M.L., Sidoras S.D. Ordovikskaya vulkano-plutonicheskaya asotsiatsiya v strukturakh gornogo obramleniya Minusinskikh vpadin [Ordovik volcanic plutonic association in the structures of the mountain framing of the Minusinsk depressions]. *Litosfera* [Lithosphere], 2004, no. 3, pp. 137-152. (in Russian)

Perfilova O.Yu., Vorontsov A.A., Lobastov B.M. Paleozoiskie shchelochnye in-truzii v vos-tochnom obramlenii Sydo-Erbinskoi vpadiny (geologiya i petrografiya) [Paleozoic alkaline intrusions in the eastern frame of the Sydo-Erba depression (geology and petrography)]. *Geodinamika i minerageniya Severnoi i Tsentral'noi Azii* [Geodynamics and mineralogy of North and Central Asia]. Ulan-Ude, Buryatskii gosudarstvennyi universitet [Buryat State University], 2018, pp. 291-293. (in Russian)

Izokh A.E., Shelepaev R.A., Lavrenchuk A.V. et al. Raznoobrazie kembro-ordovikskikh ultrabazit-bazitovykh asotsiatsii Tsentralno-Aziatskogo skladchatogo poyasa kak otrazhenie

protessov vzaimodeistviya plyuma i litosfernoi mantii [The diversity of the Cambrian-Ordovician ultrabasic basic associations of the Central Asian fold belt as a reflection of the processes of interaction of the plume and lithospheric mantle]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya* [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent): Meeting materials]. Irkutsk, 2005, vol. 1, pp. 106-108. (in Russian)

Rudnev S.N. *Rannepaleozoiskii granitoidnyi magmatizm Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti i Ozernoi zony Zapadnoi Mongolii* [Early Paleozoic granitoid magmatism of the Altai-Sayan folded region and Lake zone of Western Mongolia]. Novosibirsk: SB RAS Publ., 2013, 300 p. (in Russian)

Saranchina G.M. Shchelochnye porody massiva Saibar (Zapadnaya Sibir', Krasno-yarskii kraj) [Alkaline rocks of the Saybar massif (Western Siberia, Krasnoyarsk Territory)]. *Uchen. zap. LGU* [Scientific Notes of Leningrad State University]. 1940, no. 45, 26 p. (in Russian)

Fedoseev G.S., Polyakov G.V. Intruzii granitov i sienitov vostochnogo obramleniya Sydo-Erbinskoi i Yuzhno-Minusinskoi vpadin [Intrusions of granites and syenites of the eastern framing of the Sydo-Yerbinsk and South Minusinsk depressions]. *Srednepaleozoiskie intruzii granitov i sienitov Kuznetskogo Alatau i severo-zapadnoi chasti Vostochnogo Sayana* [Middle Paleozoic intrusions of granites and syenites of the Kuznetsk Alatau and northwestern part of the Eastern Sayan]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, pp. 148–207. (in Russian)

Fedorov E.E. K voprosu o sienitovoi intruzii Tubino-Sisimskogo raiona (Krasnoyarskii kraj) [On the issue of the syenite intrusion of the Tubino-Sisimsky region (Krasnoyarsk Territory)]. *Materials of VSEGEI. Total series*, Gosgeolizdat Publ., 1948, no. 8, pp. 106-112. (in Russian)

Edel'shtein Ya.S. Geologicheskii ocherk Minusinskoi kotloviny i prilgayushchikh chastei Kuznetskogo Alatau i Vostochnogo Sayana [Geological sketch of the Minusinsk Basin and adjacent parts of the Kuznetsk Alatau and East Sayan]. *Ocherki po geologii Sibiri* [Essays on the geology of Siberia]. Leningrad, *Akademiya nauk SSSR* [Academy of Sciences of the USSR]. 1932, 59 p. (in Russian)

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J. et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, pp. 2033-2048.

Dorais M. Compositional variations in pyroxenes and amphiboles of the Belknap Mountain complex, New Hampshire: Evidence for origin of silica-saturated alkaline rocks. *Amer. Miner.*, 1990, vol. 75, pp. 1092–1105.

Vorontsov A.A., Izoh A.E., Yarmolyuk V.V., et al. Evolution of Syenite Magmas: Insights from the Geology, Geochemistry and O-Nd Isotopic Characteristics of the Ordovician Saibar Intrusion, Altai-Sayan Area, Russia. *Minerals*, 2021, vol. 11, pp. 473–498.

Fox F.K.Jr. Alkaline rocks of South-central British Columbia and northeastern Washington. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Programs*, 1977, vol. 9, no. 6, pp. 723.

Frost B.R., Frost C.D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *J. Petrol.*, 2008, vol. 49, pp. 1955-1969.

Zhao J.-X., Shiraishi K., Ellis D.J., Sheratin J.W. Geochemical and isotopic studies from the Yamato Mountains, East Antarctica: Implications of the origin of syenitic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1995, vol. 59, pp. 1363-1382.

Lynch D.L., Musselman T.E., Gutmann J.T., Patchett P.J. Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico. *Lithos*, 1993, vol. 29, no. 3-4, pp. 295-302.

Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1989, vol. 101, pp. 635-643.

Sutcliffe R.H., Smith A.R., Doherty W., Barnett R.L. Mantle derivation of Archean amphibole-bearing granitoids and associated mafic rocks: evidens from the southern Superior Province, Canada. *Contr. Mineral. Petrol.*, 1990, vol. 105, pp. 255-274.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. Ed. by H. D. Holland, K. K. Turekian. Amsterdam, Elsevier, 2003, vol. 3: The Crust, pp. 1-56.

Shand S.J. *The eruptive rocks*. 2nd ed. New York, Wiley, 1943, 444 p.

Strauss C.A., Truter F.C. The alkali complex at Spitskop, Sekukuniland, Eastern Transvaal. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 1950, vol. 53, pp. 81-125.

Sun S. S., McDonough W. F. Magmatism in the ocean basins. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989, no. 42, pp. 313-345.

Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell, 1985, 312 p.

Barker F., Wones D.R., Sharp W.N., Desborough G.A. The Pikes Peak batholith, Colorado Front Range, and model for the origin of the gabbro-anorthosite-syenite-potassic granite suite. *Precambrian Research*, 1975, vol. 2, pp. 97-160.

Tilley C.E. Problems of alkali rock genesis. *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, 1957, vol. 113, pp. 323–360.

Wyllie P.J. Limestone assimilation. *In: The alkaline rocks* (Ed. by H. Sorensen). London, Wiley sons, 1974. 622 p.

Сведения об авторе

Душкин Егор Павлович

магистрант, геологический факультет
Иркутский государственный университет
664003, Россия, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: egor.dushkin.99@mail.ru

Information about the author

Dushkin Egor Pavlovich

Undergraduate, Faculty of Geology
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: egor.dushkin.99@mail.ru

Код научной специальности: 25.00.01.

Статья поступила в редакцию **06.04.2022**; одобрена после рецензирования **04.07.2022**; принята к публикации **12.09.2022**

The article was submitted **April, 6, 2022**; approved after reviewing **July, 4, 2022**; accepted for publication **September, 12, 2022**