

УДК: 550.42:552.321.1:552.42(470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2020-6-3-6

ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛАХ ГНЕЙСОВ И ГРАНИТОВ МУРЗИНСКОГО ГРАНИТНОГО АРЕАЛА, СРЕДНИЙ УРАЛ**С.В. Прибавкин, Н.С. Бородина, М.В. Червяковская***Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского Екатеринбург, 620016 Россия;
pribavkin@igg.uran.ru***GEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS IN ROCK-FORMING MINERALS OF GNEISSES AND GRANITES OF THE MURZINKA GRANITE AREA, CENTRAL URALS****S.V. Pribavkin, N.S. Borodina, M.V. Chervyakovskaya***Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterindurg,
620016 Russia; pribavkin@igg.uran.ru*

В Мурзинском гранитном ареале (Средний Урал), объединяющем Мурзинский гранитный массив и подстилающие его породы мурзинско-адуйского метаморфического комплекса (ММК), ранее была выявлена четкая геохимическая зональность магматизма, выраженная в росте концентраций Rb, Li, Nb и Ta, и уменьшении содержаний Ba и Sr и отношений K/Rb, Zr/Hf и Nb/Ta с запада на восток от жильных гранитов южаковского комплекса к гранитам ватихского и далее к гранитам мурзинского комплекса (Ферштатер и др., 2019). В развитии представлений о геохимической зональности гранитного магматизма Мурзинского ареала, а также роли гнейсов мурзинско-адуйского метаморфического комплекса в гранитообразовании нами исследовано распределение редких элементов в биотите и полевых шпатах гнейсов и гранитов. В биотите накапливаются Li, Rb, Cs, Nb, Ga, Zn, Mn, Sc, Sn и Tl и снижаются содержания V, Cr, Co, Ni, Y, Zr и Ba с запада на восток от жильных биотитовых гранитов южаковского к двуслюдяным гранитам мурзинского комплексов. В этом же направлении закономерно меняется и состав полевых шпатов: плагиоклазы обогащаются Li, Rb, Cs, Be, Zn, калиевые полевые шпаты обогащаются Rb и обедняются Sr, Ba. Причиной вариативности редкоэлементного состава породообразующих минералов гнейсов и гранитов является изменение с запада на восток состава корового протолита, а также условий гранитообразования.

Илл. 6. Табл. 4. Библ. 18.

Ключевые слова: гранит, гнейс, биотит, полевой шпат, геохимия, редкие элементы, Мурзинка.

The Murzinka granite area (Central Urals), which combines Murzinka granite pluton and underlying rocks of the Murzinka-Adui metamorphic complex, exhibits an evident WE-trending geochemical zonation of magmatism with increasing of Rb, Li, Nb and Ta contents and decreasing Ba and Sr contents and K/Rb, Zr/Hf and Nb/Ta ratios from vein granites of the Yuzhakovo complex to granites of the Vatikha complex and further to granites of the Murzinka complex (Fershtater et al., 2019). To develop the ideas about geochemical zonation of the Murzinka granite magmatism, as well as about the role of gneisses of the Murzinka-Adui metamorphic complex in the formation of granites, we studied the distribution of trace elements in biotite and feldspars of gneisses and granites. Biotite shows an increase in Li, Rb, Cs, Nb, Ga, Zn, Mn, Sc, Sn and Tl contents and a decrease in V, Cr, Co, Ni, Y, Zr and Ba contents from vein biotites of the Yuzhakovo granites to two-

mica granites of the Murzinka complex. The composition of feldspars also changes in this direction: plagioclase is enriched in Li, Rb, Cs, Be, Zn and depleted in Sr, Ba, Ga and Pb and K-feldspar is enriched in Rb and depleted in Sr and Ba. The varying trace element composition of rock-forming minerals of gneisses and granites is explained by WE-trending change in the composition of a crustal protolith, as well as the formation conditions of granites.

Figures 6. Tables 4. References 18.

Key words: granite, gneiss, biotite, feldspar, geochemistry, rare elements, Murzinka.

Введение

Мурзинский гранитный ареал (Средний Урал) объединяет позднепалеозойский Мурзинский межформационный гранитный массив (ММ), падающий на восток, и подстилающие его допалеозойские породы (RF₂) мурзинско-адуйского метаморфического комплекса (ММК). Последние представляют собой фрагмент древней коры, находящийся среди осадочно-вулканогенных толщ (S–C), сформированных в процессе закрытия уральского палеоокеанического бассейна (Ферштатер, Бородина, 2018). Предыдущие исследования пород мурзинского ареала выявили четкую латеральную (с запада на восток) геохимическую зональность от гранитов корневой зоны Мурзинского массива к его кровле, выраженную в росте концентраций Rb, Li, Nb и Ta и уменьшении содержаний Ba и Sr и отношений K/Rb, Zr/Hf и Nb/Ta (Орогенный..., 1994; Ферштатер, Бородина, 2018; Прибавкин и др., 2019; Ферштатер и др., 2019). Также было показано, что в процессе гранитообразования в этом направлении снижалось давление при обособлении эвтектического гранитного расплава от 6–7 до 3 кбар и возрастало содержание воды от 4–5 до 8 %, приближаясь к водонасыщенной гранитной эвтектике. Изменение этих параметров выразилось в закономерном уменьшении меланократовости пород, росте кислотности, калиевой щелочности, уменьшении основности плагиоклаза, исчезновении антипертитов и появлении мусковита. В то же время наличие изотопной гетерогенности гранитов Мурзинского ареала, различий в параметрах генерации магмы не позволяют объяснить наблюдаемую геохимическую зональность процессом частичного плавления единого субстрата и вариациями в степени фракционной кристаллизации единого магматического очага. В этой связи и в продолжение работ Г.Б. Ферштатера нами предпринято дальнейшее изучение гранитного магматизма и роли гнейсов ММК в гранитообразовании. Целью исследования является изучение поведения редких элементов в

породообразующих минералах гнейсов и гранитов в зависимости от состава пород вкрест простирания структур ММК и ММ и получение новых данных по геохимии минералов и минерагенической специализации пород Мурзинского ареала.

Геологическая позиция

Изучение состава пород ММК позволило выделить в составе метаморфических толщ пара- и ортогнейсы (Коровко и др., 2002; Ферштатер, Бородина, 2018; Ферштатер и др., 2019). Первые были сформированы по известково-песчано-глинистым осадкам с заметной долей органогенного вещества. Их накопление происходило в прибрежно-морской обстановке. Вторые – по вулканитам кислого и среднего состава, их туфам и туффидам, накопившимся в той же обстановке морского мелководья.

Граниты Мурзинского ареала образуют три комплекса (с запада на восток): южаковский, ватихский и мурзинский (Орогенный..., 1994). Первый представлен биотитовыми гранитами ММК с антипертитовым плагиоклазом и пертитовым ортоклазом, образующими многочисленные жильные тела, нередко преобладающие по объему над вмещающими метаморфитами. Геологическая позиция гранитов этого комплекса позволяет рассматривать их в качестве корневой зоны Мурзинского массива. Второй комплекс слагает основание Мурзинского массива и представлен также биотитовыми гранитами, во многом близкими по составу гранитам южаковского комплекса. Эти граниты подразделены на два подкомплекса: западно- и восточно-ватихский. Первый близок по особенностям химического состава и минералогии к южаковским гранитам, а второй по всем признакам приближается к гранитам мурзинского комплекса, формирующего апикальную часть массива. Последние сложены двуслюдяными, преимущественно микроклиновыми гранитами, в которых к востоку возрастает количество жил аплитов и пегматитов. Контакт между последними двумя комплексами гранитов

интрузивный. Граниты южаковского и ватихского комплекса характеризуются «коровыми» изотопными характеристиками, тогда как мурзинские – «мантийными».

Методы исследования

Состав породообразующих минералов из гнейсов и гранитов изучен в шести образцах, отобранных поперек простирания структур ММК и ММ (рис. 1, табл. 1). Содержание 52 редких элементов в минералах определено в шлифах методом ЛА-ИСП-МС на приборе NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для LA NWR213 (ESI) в помещении класса чистоты ИСО 7, ЦКП «Геоаналитик» (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург). Параметры анализа: энергия лазерного излучения – 10.5–11.5 Дж/см², частота повторений импульсов – 10 Гц, диаметр кратера – 25 мкм, расход транспортирующего потока He – 400 мл/мин, время работы лазера – 50 с, время прогрева лазера перед измерением – 20 с; расход пробоподающего потока Ar – 0.94 л/мин, мощность радиочастотного генератора – 1100 Вт, время задержки на массе – 10 мс, число циклов сканирования – 1, число реплик – 500. Результаты анализа обработаны в программе GLITTER V4.4. с использованием внутреннего стандарта SiO₂. В качестве внешнего первичного стандарта использовалось стандартное стекло NIST SRM 610 (в качестве вторичного – стандартное стекло NIST SRM 612), измеренного методом «взятия в вилку» через 10–12 измерений. Погрешность измерения стандартного стекла NIST SRM 610 для измеренных элементов варьирует от 3 до 7 % (1σ). Пределы обнаружения элементов (г/т): Li – 0.09, Rb – 0.18, Cs – 0.04, Be – 0.37, Sr – 0.3, Ba – 0.68, Sc – 0.25, Y – 0.05, Zr – 0.28, Nb – 0.23, Sn – 0.31, W – 0.1, Tl – 0.04, Pb – 0.05, V – 0.15, Cr – 6.89, Co – 0.08, Ni – 0.31, Zn – 44, Ga – 0.18, Eu – 0.04.

Содержания редких элементов в породах проанализированы методом ИСП-МС на масс-спектрометре ELAN 9000 с индуктивно-связанной плазмой по стандартной методике. Химический состав пород определен на волновом спектрометре XRF 1800, а содержания FeO и потери при прокаливании определены методом «мокрой» химии (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Г.С. Неупокоева, Г.А. Аввакумова).

Состав минералов исследован на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с ЭДС

приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ и времени набора спектра 30–60 с. Используются сертифицированные стандартные образцы: диопсид, жадеит, ортоклаз, рутил, родонит, Fe₂O₃. Полученные результаты измерений состава нормализованы к 100 % (аналитик И.А. Готтман).

Минеральный состав изученных пород

Гнейсы ММК, рассматриваемые в работе, представлены следующими разновидностями: 1) гранат-биотитовым гнейсом (обр. 220) гранодиоритового состава, который содержит примерно в равных долях кварц, биотит, ортоклаз, альбит-олигоклаз, в небольшом количестве (менее 4 %) присутствует гранат; 2) пироксен-амфибол-биотитовым диоритогнейсом (обр. 134), отобранным восточнее первого, и состоящим из 45 % олигоклаза, 12 % ортоклаза, 15 % кварца, 18 % биотита, 10 % клинопироксена и амфибола; и 3) биотитовым гнейсом (обр. 93), расположенным в самой восточной части ММК и сложенным олигоклазом (35 %), ортоклазом (29 %), кварцем (28 %) и биотитом (8 %). Этот гнейс сохранился в виде ксенолита адамеллитового состава среди гранитов западного эндоконтакта Мурзинского массива. Акцессорные минералы гнейсов: апатит, циркон, титанит, монацит, ильменит, пирит.

Граниты представлены жильными гранитами южаковского комплекса (обр. 163) и двуслюдяными гранитами мурзинского комплекса одноименного массива (обр. 21, 26). Минеральный состав южаковского гранита: олигоклаз 26 %, ортоклаз 37 %, кварц 30 %, биотит 5 %. Состав мурзинского гранита: альбит-олигоклаз 37–40 %, ортоклаз 24–27 %, кварц 33 %, биотит 3 %, мусковит 1 %. Акцессорные минералы гранитов: апатит, циркон, монацит, магнетит.

Геохимия пород

На диаграммах ФАК (Предовский, 1980) и Al–(Na₂O + K₂O), FM–(Na₂O + K₂O) (Юдович и др., 1996) образец гнейса 220 располагается в поле метаграувакк-метааркозов, что характеризует его как парагнейс. Он обладает высокоглиноземистым составом и повышенным содержанием Si, указывающими на значительную долю в осадке как глинистой, так и кремнистой составляющей (табл. 1). Повышенная сумма Fe + Mg и концентрации Cr,

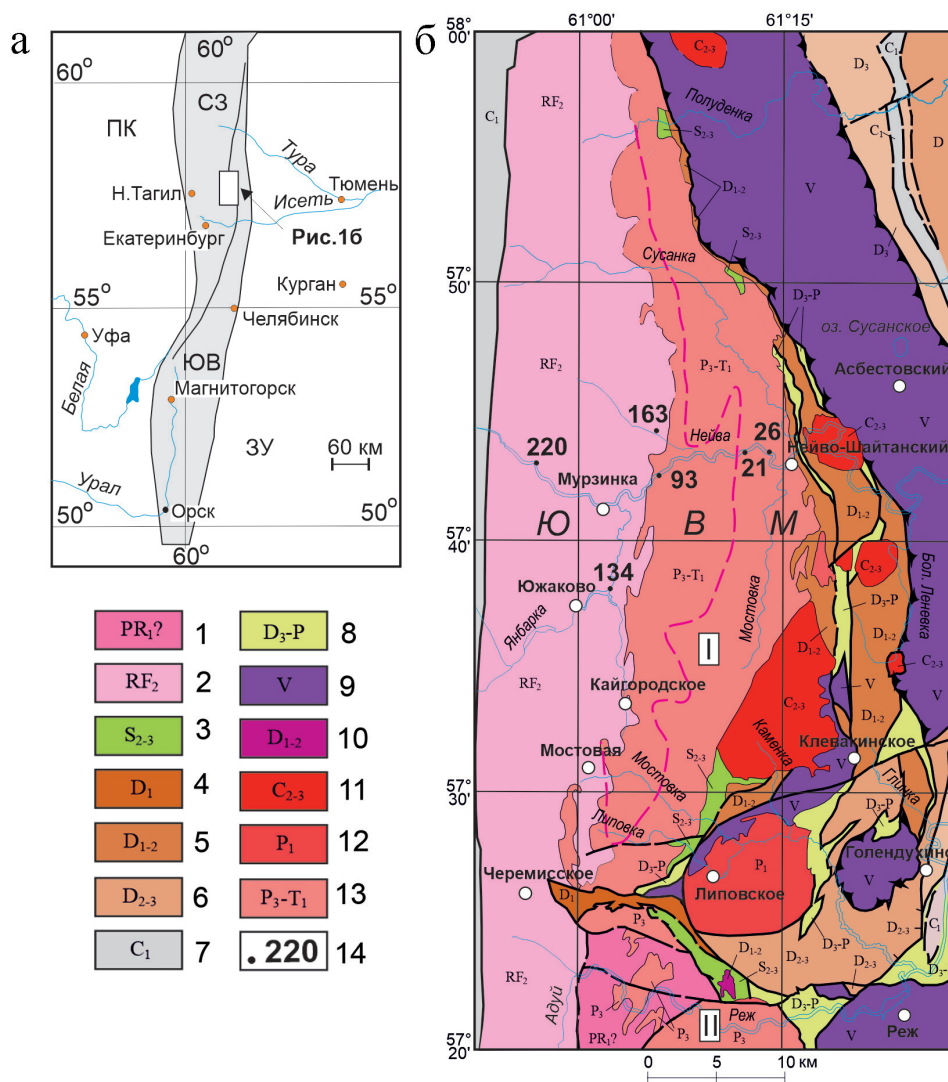


Рис. 1. Географическое положение исследуемого района (а) и геолого-тектоническая схема северной части мурзинско-адуйского метаморфического комплекса по (Казиков и др., 2016) с изменениями (б).

Метаморфические и магматические ассоциации: 1 – мигматит-гнейсовая; 2 – кристаллических сланцев, пара- и ортогнейсов с телами жильных гранитов южакского комплекса; 3 – терригенно-кремнистая; 4 – терригенно-карбонатная; 5 – карбонатно-терригенно-базальт-андезит-риолитовая; 6 – кремнисто-базальт-андезиобазальтовая; 7 – карбонатно-терригенно-базальт-риолитовая; 8 – меланж полимиктовый; 9 – дунит-гарцбургит-габбровая; 10 – диорит-плагиогранитовая; 11 – гранодиорит-гранитовая; 12 – монцодиорит-граносиенит-лейкогранитовая; 13 – гранитовая, гранит-лейкогранитовая; 14 – места отбора проб и их номера.

Пунктирная линия разделяет примерные области развития гранитов ватихского и мурзинского комплекса по материалам (Коровко и др., 2002; Орогенный, 1994; Ферштатер, Бородин, 2018). Ю, В, М – области развития гранитов южакского, ватихского, мурзинского комплексов, соответственно. I – Мурзинский массив, II – Адуйский массив.

Fig. 1. Geographical position of the studied area (a) and geological-tectonic scheme of the northern part of the Murzinka-Aduy metamorphic complex modified after (Kazakov et al., 2016) (b).

Metamorphic and magmatic associations: 1 – migmatite gneiss; 2 – crystal schist, para- and orthogneiss with vein granite bodies of the Yuzhakovo complex; 3 – terrigenous-siliceous; 4 – terrigenous-carbonate; 5 – carbonate-terrigenous-basalt-andesite-rhyolite; 6 – siliceous-basalt-basaltic andesite; 7 – carbonate-terrigenous-basalt-rhyolite; 8 – polymictic mélange; 9 – dunite-harzburgite-gabbro; 10 – diorite-plagiogranite; 11 – granodiorite-granite; 12 – monzodiorite-granosyenite-leucogranite; 13 – granite, granite-leucogranite; 14 – sampling areas and sample numbers.

The dotted line divides the approximate areas of granites of the Vatikha and Murzinka complexes based on materials (Korovko et al., 2002; Orogenny, 1994; Fershtater, Borodina, 2018). Ю, В, М – granites of the Yuzhakovo, Vatikha, and Murzinka complexes, respectively. I – Murzinka pluton, II – Aduy pluton.

Таблица 1

Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в породах Мурзинского гранитного ареала

Table 1

Content of major oxides (wt. %) and trace elements (ppm) in rocks of the Murzinka granite halo

№ обр.	220	134	93	163	21	26	Ю	В	М
SiO ₂	67.66	62.5	68.94	72.8	74.15	74.15	72.49	73.70	72.58
TiO ₂	0.85	0.98	0.38	0.14	0.09	0.10	0.19	0.12	0.16
Al ₂ O ₃	13.25	16.09	15.34	12.39	14.04	14.23	14.39	14.21	14.37
Fe ₂ O ₃	0.70	2.17	0.35	1.08	0.38	0.23	0.56	0.25	0.33
FeO	5.60	3.00	3.58	1.00	1.28	2.14	1.33	1.74	1.97
MnO	0.05	0.10	0.05	0.01	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04
MgO	2.37	2.64	0.66	0.27	0.11	0.14	0.30	0.15	0.44
CaO	0.48	4.77	1.50	1.06	0.69	0.80	1.50	0.88	1.09
Na ₂ O	2.39	4.36	4.03	2.64	3.77	3.64	3.41	4.01	3.76
K ₂ O	5.30	2.00	3.65	6.46	4.76	4.54	4.71	4.13	4.52
P ₂ O ₅	0.11	0.31	0.12	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06
п.п.п.	1.00	0.80	0.39	1.70	н.о.	н.о.	0.78	н.о.	н.о.
Сумма	99.8	99.7	99.0	99.6	99.4	100.1	99.8	99.3	99.3
<i>f</i>	0.59	0.51	0.76	0.80	0.89	0.90	0.75	0.77	0.88
A/CNK	1.16	0.60	0.96	0.82	1.01	1.03	0.89	1.00	0.96
Li	25.7	25.4	16.1	10.7	22.5	36.0	10.4	25.0	42.0
Rb	73.8	66.7	67.3	98.1	246.0	266.0	64.8	129.6	204.6
Cs	2.30	2.10	1.00	0.60	1.00	2.00	0.70	1.60	2.50
Be	1.78	2.21	1.89	1.32	3.00	3.00	1.70	2.00	2.90
Sr	70.8	345.1	287.7	216.9	115.0	106.0	446.6	187.9	118.5
Ba	185.6	358.8	1455.0	800.2	355.0	343.0	1031.0	603.0	294.6
Sc	45.2	14.6	3.50	4.00	2.00	8.00	3.60	6.10	7.20
Y	7.90	16.9	2.20	2.30	17.5	6.90	3.00	5.00	8.80
Zr	26.1	21.2	105.2	50.3	104.0	106.0	95.4	112.4	90.2
Nb	3.00	14.2	4.50	8.80	15.0	19.4	3.90	10.6	18.5
Ta	0.10	1.00	0.20	0.30	–	2.20	0.20	2.20	1.80
Sn	2.40	2.50	2.40	0.50	3.50	3.00	0.80	1.80	4.10
W	0.30	1.90	1.10	–	–	–	–	–	–
Tl	2.60	0.40	0.60	–	1.30	2.80	0.40	1.60	6.90
Pb	9.00	12.4	25.8	28.2	–	27.6	–	–	–
V	435.0	102.4	44.8	13.3	10.0	5.00	13.2	9.20	5.20
Cr	191.9	94.0	17.8	2.05	1.00	0.00	4.00	6.30	2.00
Co	24.8	16.8	4.70	1.60	1.00	1.00	1.90	1.40	0.90
Ni	57.3	124.9	14.7	2.20	2.00	0.00	4.30	8.70	3.70
Zn	83.7	64.4	70.5	53.6	38.0	26.0	43.7	26.5	27.7
Ga	33.5	18.6	19.6	19.8	20.0	20.0	16.7	16.6	20.2

Примечание. Средние составы пород Южаковского (Ю), Ватихского (В) и Мурзинского (М) комплексов приведены по данным работ [Gerdes et al., 2002; Ферштатер, Бородин, 2018; Ферштатер и др., 2019]; $f = \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$, $A/\text{CNK} = \text{Al}/(2\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$, мол. %; прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения; н.о. – элемент не определялся.

Note. The average composition of rocks of the Yuzhakovo (Ю), Vatikha (В) and Murzinka (М) complexes are given after (Gerdes et al., 2002; Fershtater, Borodina, 2018; Fershtater et al., 2019); $f = A/\text{CNK} = \text{Al}/(2\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$, mol. %; dash – the content of the component is below detection limit; н.о. – element was not analyzed.

Ni, Co, V и Sc предполагают наличие в продуктах размыва вещества ультраосновных пород. По отношению Al к K + Na и фемическому модулю состав гнейсов образцов 134 и 93 соответствуют андезидацитам, риодацитам или их туфам, что позволяет

относить их к ортогнейсам. Они существенно отличаются от образца 220 пониженными содержаниями Si, K, Li, Cr, V и Co, индексом глиноземистости и повышенными содержаниями Ca, Sr и Ba. По рассмотренным критериям протолитом боль-

шинства гнейсов, составы которых приведены в работах (Ферштатер, 1994; Ферштатер и др., 2019), являлись андезиты, дациты, риолиты и их туфы.

Между жильными гранитами южаковского комплекса и гранитами ММ имеются отчетливые геохимические различия (Ферштатер и др., 2019). Первые не образуют единого геохимического тренда и характеризуются слабыми корреляционными связями SiO_2 с Ва, Sr и Nb и отсутствием таковых с Rb, Y и Zr. Вторые, напротив, демонстрируют четкий тренд возрастания содержаний Rb, Li и Nb и снижения содержаний Ва и Sr с повышением содержаний SiO_2 . Еще одним отличием между этими комплексами является наличие положительной аномалии Eu в большинстве образцов южаковских гранитов и отрицательной аномалии – в ватихских и мурзинских (Gerdes et al., 2002; Ферштатер и др., 2019). Отличны и изотопные отношения Sr и Nd в гранитах этих комплексов.

Образец 163 южаковского гранита характеризуется отношениями K/Na (1.6) и K/Rb (273), высокой железистостью ($f = 0.80$) и низкой глиноземистостью ($A/\text{CNK} = 0.82$). Относительно среднего состава пород одноименного комплекса (табл. 1) он обладает повышенным содержанием Rb и отношением K/Na, пониженными содержаниями Sr и Ва и отношения K/Rb, характерными для поздних фаз гранитов этого комплекса. Помимо этого, он имеет высокую сумму РЗЭ, а в спектре распределения РЗЭ отсутствует Eu максимум, тем не менее, этот образец является типичным представителем поздних гранитов данного комплекса.

Образцы гранитов 21 и 26 мурзинского комплекса характеризуются преобладанием К над Na, но в отличие от южаковских они имеют более низкие отношения K/Na (0.82) и K/Rb (70–80), повышенную железистость ($f = 0.90$) и умеренную глиноземистость ($A/\text{CNK} = 1.02$). Содержания редких элементов близки среднему составу комплекса и отличаются от среднего состава южаковского комплекса повышенными содержаниями Rb, Li, Cs, Zr, Nb и Y.

Геохимия породообразующих минералов

Биотит является главным фемическим минералом пород ММК и гранитов ММ. Его химический состав отвечает анниту-сидерофиллиту, железистость которого возрастает от 0.4 в ортогнейсах повышенной основности до 0.8 в двуслюдяных гранитах (табл. 2, рис. 2а). В последних растет и

доля сидерофиллитового компонента. Исключением из общего тренда является биотит парагнейса, состав которого богат истонитовым компонентом. Температура образования биотита согласно геотермометру (Henry et al., 2005) составляет 760–650 °С для гнейсов ММК и 720–620 °С для гранитов ММ (рис. 2б). Полученные значения температур находятся в полном соответствии с температурными зависимостями составов полевых шпатов (Ферштатер и др., 2019) и циркона (Шардакова и др., 2020).

Полевые шпаты являются основными калиевыми минералами, которые, как и биотит, несут важную информацию о составе и условиях формирования пород. В ортогнейсах преобладает плагиоклаз среднего состава – Ab_{70-74} , тогда как в парагнейсе развит кислый плагиоклаз – Ab_{87} (табл. 3). Состав плагиоклаза из гранитов изменяется от Ab_{74} в южаковском комплексе до Ab_{83-87} – в мурзинском; в последнем также появляется альбит. Состав калиевого полевого шпата варьирует в диапазоне Or_{75-86} и слабо зависит от типа рассматриваемых пород (табл. 4).

В соответствии с кристаллохимическими особенностями, биотит является концентратором Rb, Cs и Ва, занимающих позицию межслоевых катионов, наряду с К, а также Li, Sc, Zn, Ga, Nb, V, Cr и Ni, входящих в октаэдрическую позицию вместе с Mg, Fe и Al (Rieder et al., 1998). В случае отсутствия в породах ильменита, магнетита или их очень небольшого количества, биотит может рассматриваться как главный, а для Zn, Ga, Ti, Nb, V, Cr, Ni – единственный концентратор этих элементов, маркирующий их поведение в процессе метаморфизма и гранитообразования (Макрыгина, 2011). Плагиоклаз является основным концентратором Sr и Eu^{2+} , находящихся внутри каркаса из SiO_4 и AlO_4 тетраэдров, вместе с Ca, Na, Ва и К. Калиевый полевой шпат в этой позиции концентрирует Rb и Pb вместе с К, Na и Ва. Концентрации редких элементов в этих минералах приведены в таблицах 2–4.

Литий. Кларк Li в кислых магматических породах составляет 40 г/т (кларки здесь и далее даны по (Виноградов, 1962)), что несколько выше содержаний в биотитовых гранитах ММК и ММ (табл. 1). Основным концентратором Li является биотит. Его содержание в биотите гнейсов и южаковском граните колеблется от 90 до 160 г/т. Значительно более высокое содержание Li отмечается в биотитовых и, особенно, двуслюдяных гранитах ММ, достигающее в последних 1280 г/т (табл. 2). Для полевых шпатов Li является несовместимым элементом, и

Таблица 2

Содержание главных оксидов (мас. %) и редких элементов (г/т) в биотите Мурзинского гранитного ареала

Table 2

Content of major oxides (wt. %) and trace elements (ppm) in biotite of the Murzinka granite halo

№ обр.	220			134		93		163		21			26
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	37.24	37.37	37.24	38.86	38.57	37.73	35.95	36.58	38.94	36.25	36.25	38.25	39.24
TiO ₂	3.53	3.88	2.27	5.36	4.28	4.33	3.93	4.12	3.57	2.92	2.84	2.46	2.64
Al ₂ O ₃	20.17	20.86	20.95	14.48	14.53	16.17	16.00	16.61	15.72	19.08	19.03	17.39	17.21
FeO	19.80	19.14	21.44	20.10	21.27	23.36	25.19	26.91	26.75	27.15	27.16	26.33	24.49
MnO	–	–	0.06	0.26	0.29	0.34	0.26	0.26	0.24	0.72	0.79	0.69	0.68
MgO	9.20	8.74	8.62	11.06	11.36	8.37	8.61	5.88	5.44	3.77	3.78	3.91	3.84
CaO	–	–	0.26	–	0.03	–	0.03	–	0.53	–	–	0.54	1.20
Na ₂ O	–	–	0.47	–	0.08	–	0.17	–	0.51	0.30	0.31	0.87	1.88
K ₂ O	10.07	10.01	8.70	9.88	9.59	9.70	9.87	9.63	8.31	9.81	9.83	9.56	8.81
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>f</i>	0.54	0.55	0.58	0.50	0.51	0.61	0.62	0.72	0.73	0.80	0.80	0.79	0.78
Li	161.1	159.4	167.1	110.0	93.7	92.2	100.6	123.6	139.8	430.6	486.3	638.9	1274
Rb	467.1	480.2	438.7	427.8	346.3	748.8	228.4	817.6	851.5	1549	1419	1709	1750
Cs	8.65	9.26	9.54	12.79	10.16	8.45	3.05	10.78	7.52	16.25	12.4	16.26	33.27
Be	0.43	0.42	1.25	0.16	0.29	1.53	–	–	–	0.98	0.64	–	–
Sr	0.713	1.58	1.66	3.75	113.9	2.86	196.3	1.89	–	1.73	1.37	–	–
Ba	137	149	163	1777	1140	1578	483	541	518	194	196	284	216
Ga	50.25	49.57	39.67	30.26	23.74	57.87	40.75	63.94	68.64	114.1	108.5	104.6	100.8
Tl	2.41	2.33	3.01	2.67	2.43	4.5	1.28	4.19	5.08	9.06	8.41	15.15	15.53
Sn	6.40	6.16	6.54	5.17	6.56	22.55	12.27	5.41	5.62	95.23	92.81	109.5	56.52
Pb	0.525	0.706	1.11	3.06	3.52	6.42	42.83	2.09	5.13	4.05	3.08	3.68	3.27
W	1.13	1.48	1.78	1.63	1.08	0.46	1.34	1.90	–	1.62	2.93	0.92	1.11
Cu	1.57	3.65	1.21	2.84	14.23	10.79	18.55	1.69	3.94	2.99	0.65	–	–
Zn	99.18	148.4	121.0	385.7	144.4	557.5	375.1	542.4	525.2	652.7	557.4	743.5	836.9
Sc	49.98	48.98	91.43	15.53	9.4	33.28	16.85	46.00	42.61	54.14	48.85	61.92	60.52
Y	0.11	0.08	0.36	0.14	1.26	0.99	2.62	0.13	–	0.11	0.13	0.07	–
Zr	3.38	3.68	2.18	3.52	12.6	8.97	40.62	0.63	–	0.21	2.04	0.56	–
Nb	8.60	8.68	5.64	69.09	44.68	50.68	27.06	186.0	157.9	470.1	452.1	518.7	402.3
Ta	0.52	0.52	0.37	3.50	1.30	2.20	0.63	5.80	4.10	26.3	23.1	34.5	34.9
V	661.7	651.1	480.6	454.6	293.2	458.3	278.4	173.0	174.8	106.2	94.13	109.7	97.57
Cr	325.5	360.4	239.8	218.4	116.7	51.19	149.8	25.88	–	33.08	31.6	32.31	18.33
Mn	190.0	181.4	148.5	1883	1297	2279	1655	1856	1676	5718	5750	6149	5345
Co	41.78	39.34	36.16	70.68	52.71	43.41	27.7	22.31	20.24	16.09	15.04	17.95	13.89
Ni	96.8	97.49	82.63	152.8	116.3	21.67	13.75	18.01	19.07	6.73	3.41	7.61	–

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: прочерк – не определено.

Note. Here and in Tables 3 and 4: dash – not determined.

его концентрации в гнейсах и гранитах ММК не превышают 3 г/т. Исключение составляют двуслюдяные граниты ММ, содержание Li в плагиоклазе которых достигает 62 г/т, а в калиевом полево шпате – 12 г/т (табл. 3, 4). Впрочем, столь высокие концентрации этого элемента в полевых шпатах, возможно, связаны с включениями светлых слюд.

Рубидий. Основными концентраторами Rb являются минералы К – калиевый полевой шпат и слюды. В калиевом полево шпате двуслюдяных гранитов ММ его содержание превышает 500 г/т,

тогда как в калиевом полево шпате гнейсов и гранитов ММК содержится не более 300 г/т. Сходная картина наблюдается и в биотите. Биотит двуслюдяных гранитов содержит 1500–1800 г/т Rb, а биотитовых гранитов южаковского комплекса – порядка 800 г/т. Слюдам гнейсов соответствуют содержания Rb менее 500 г/т.

Цезий. В калиевом полево шпате содержание Cs не превышает 3 г/т, а в плагиоклазе – 0.2 г/т. В тоже время отметим высокую (около 4 г/т) концентрацию Cs в плагиоклазе обр. 26, а также

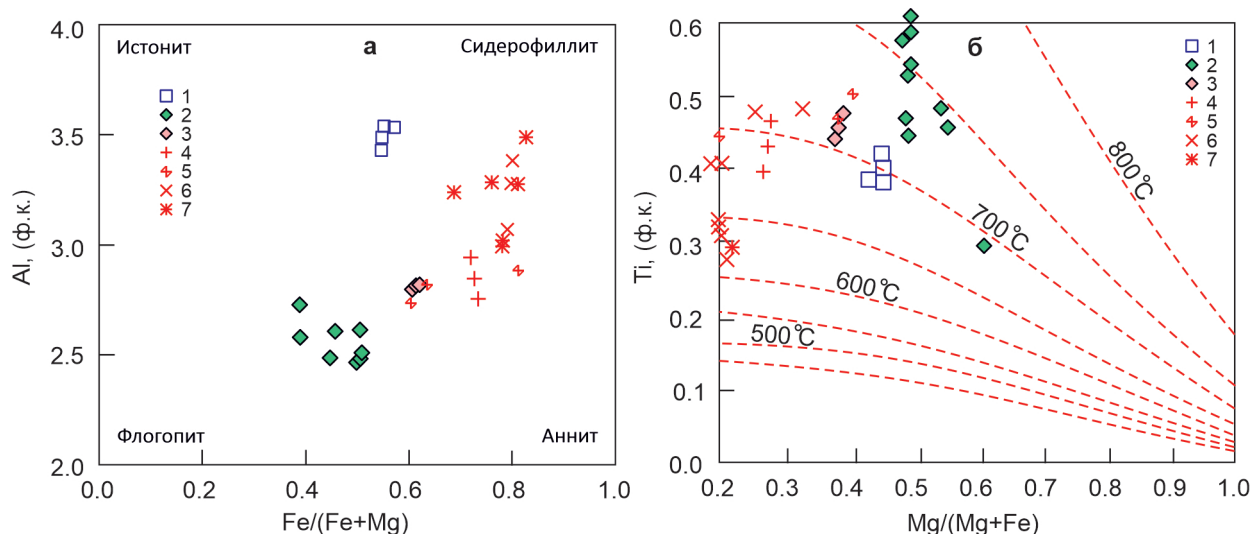


Рис. 2. Состав биотита из пород Мурзинского гранитного ареала на диаграммах Al–Fe/(Fe + Mg) (а) и Ti–Mg/(Mg + Fe) (б).

Здесь и на рис. 3–6: 1 – парагнейс (обр. 220); 2 – диоритогнейс (обр. 127, 134); 3 – гранитогнейс (обр. 93); 4 – жильный гранит южаковского комплекса (обр. 163); 5 – граниты ватихского комплекса, западная часть Мурзинского массива (обр. 57, 63, 104); 6 – граниты мурзинского комплекса, восточная часть Мурзинского массива (6 – обр. 19, 21, 7 – обр. 26, 27, 44, 46). Наряду с авторскими данными использован состав биотита из работ (Орогенный, 1994; Ферштатер и др., 2019). Температурные зависимости определены в соответствии с работой (Henry et al., 2005).

Fig. 2. Composition of biotite from rocks of the Murzinka granite area on Al–Fe/(Fe + Mg) (a) and Ti–Mg/(Mg + Fe) (b) diagrams.

Here and in Figs. 3–6: 1 – paragneiss (sample 220); 2 – diorite gneiss (samples 127, 134); 3 – granite gneiss (sample 93); 4 – vein granite of the Yuzhakovo complex (sample 163); 5 – granite of the Vatikha complex, the western part of Murzinka pluton (samples 57, 63, 104); 6 – granite of the Murzinka complex, the eastern part of the Murzinka pluton (6 – samples 19, 21, 7 – samples 26, 27, 44, 46). Original data are supplemented by the composition of biotite from (Orogenic, 1994; Fershtater et al., 2019). Temperatures are determined in accordance with (Henry et al., 2005).

аномально высокие концентрации в этом образце Li и Rb, что может быть связано с включениями светлых слюд. В биотите максимальное количество Cs установлено в двуслюдяных гранитах – 33 г/т, минимальное – в биотите диоритогнейса – 3 г/т. В целом, содержание Cs в слюдах гнейсов и биотитовых гранитов сопоставимы.

Бериллий. Содержания Be, как Li, Rb и Cs в гнейсах близки его содержанию в биотитовых гранитах, но несколько понижены относительно двуслюдяных разностей. Концентрация Be в исследованных гранитах составляет 1.3–3 г/т, что ниже кларка для кислых пород, равного 5.5 г/т. В плагиоклазе, калиевом полевом шпате и биотите за редким исключением содержится менее 1 г/т Be. Эти данные подтверждают отсутствие высокотемпературных поглотителей Be, например, таких как ортит, и возможность его концентрации в остаточных флюидах, приводящей к развитию берилловой минерализации. Данное предположение согласуется с результатом работы (Ферштатер, Бородина, 2018), в которой приведены содержания Li, Rb, Cs и Be

в пегматите и контактирующем с ним граните; показано, что содержания этих элементов в процессе пегматитообразования возрастают почти на порядок, что и приводит к формированию в пегматитах топаз-берилловой минерализации.

Стронций – типичный рассеянный литофильный элемент. Чаще всего Sr изоморфно замещает Ca. В магматических породах Sr рассеивается в плагиоклазах, калишпатах, ортите, апатите. Его содержание в жильных гранитах ММК варьирует от 100 до 800 г/т, в гранитах ММ – от 90 до 300 г/т, в гнейсах – от 70 до 1300 г/т (табл. 1 и данные из работ (Орогенный..., 1994; Ферштатер, Бородина, 2018; Ферштатер и др., 2019)). Содержание Sr в биотите ниже 2 г/т за исключением биотита ортогнейсов, содержащего до 200 г/т Sr, что связано с наличием микровключений ортита. Содержание Sr в плагиоклазе гнейсов не опускается ниже 500 г/т, а в плагиоклазе гранитов его содержания резко снижаются от биотитовых к двуслюдяным разностям от 600 до 20 г/т. Подобная картина наблюдается и в калиевом полевом шпате из этих пород.

Таблица 3

Содержание главных оксидов (мас. %) и редких элементов (г/т) в плагиоклазе Мурзинского гранитного ареала

Table 3

Content of major oxides (wt. %) and trace elements (ppm) in plagioclase of the Murzinka granite halo

№ обр. № п/п	220		134			93			163			21			26					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SiO ₂	65.56	61.40	61.50	60.46	61.40	62.92	63.33	61.81	62.37	62.38	63.16	63.62	64.78	64.87	67.15	65.11	67.84	67.24	65.36	64.94
Al ₂ O ₃	21.80	24.36	24.30	24.13	23.93	23.42	23.13	22.99	23.13	22.68	23.18	21.47	22.11	22.17	19.13	22	19.69	20.1	21.78	22.0
FeO	—	0.12	—	0.09	0.08	—	—	0.05	0.06	0.05	—	0.02	—	—	0.18	—	—	—	—	—
CaO	2.29	5.82	5.82	5.98	5.73	4.63	4.27	4.46	4.59	4.33	4.40	4.97	3.03	3.09	1.30	2.84	1.53	1.98	2.52	2.85
Na ₂ O	10.03	7.78	7.91	8.19	8.33	8.78	8.71	9.35	9.28	9.51	8.66	8.77	9.59	9.53	10.85	9.89	10.7	10.56	9.92	9.72
K ₂ O	0.33	0.53	0.47	0.53	0.49	0.25	0.54	0.52	0.23	0.50	0.60	0.72	0.49	0.34	0.22	0.15	0.24	0.12	0.42	0.48
Сумма	100	100	100	99	100	100	100	99	100	99.0	100	100	100	100	99.0	100	100	100	100	100
An (%)	11.0	28.0	28.0	28.0	27.0	22.0	21.0	20.0	21.0	20.0	21.0	23.0	14.0	15.0	6.00	13.0	7.00	9.00	12.0	14.0
Ab (%)	87.1	68.6	69.2	69.2	70.5	76.3	76.2	76.9	77.5	77.7	75.4	73.2	82.8	83.1	92.6	85.6	91.4	90.0	85.6	83.7
Or (%)	2.60	3.80	3.30	3.60	3.40	1.80	4.00	3.60	1.60	3.50	4.40	5.00	3.70	2.60	1.80	0.90	1.30	0.70	2.40	3.70
Li	1.61	0.49	0.43	1.09	0.90	2.39	2.04	2.73	1.40	1.92	1.28	1.24	2.14	1.97	3.96	2.13	2.72	62.85	64.76	63.96
Rb	5.81	0.86	0.48	2.67	2.31	8.18	0.66	5.10	5.47	4.20	4.43	1.64	18.58	21.28	25.11	25.18	28.09	70.94	73.15	70.47
Cs	0.05	—	—	0.03	0.34	0.15	—	0.07	0.09	0.04	0.06	0.02	0.10	0.11	0.18	0.12	0.09	4.20	4.02	4.06
Be	—	3.31	3.14	—	1.70	2.06	3.14	2.66	—	3.60	—	1.10	—	—	—	—	0.43	4.03	4.08	4.97
Sr	741.5	612.7	562.3	716.1	733.1	530.4	581.2	629.2	720.2	682.0	689.1	449.7	68.44	70.15	51.41	74.50	73.38	22.15	23.20	22.46
Ba	62.06	128.4	116.9	103.1	94.38	95.07	117.2	109.1	63.71	99.12	57.43	54.50	68.41	64.09	36.73	64.88	62.47	19.80	23.53	23.02
Ga	2.01	17.77	21.59	11.93	11.58	25.28	26.80	20.58	1.80	20.21	2.30	21.29	1.54	2.39	27.64	2.04	2.03	2.94	3.26	3.03
Tl	0.01	0.03	—	0.07	—	0.03	—	0.10	—	0.03	0.07	0.02	—	0.03	2.67	—	0.02	0.18	0.18	0.22
Sn	5.26	—	—	15.32	15.23	0.29	—	3.07	6.12	4.43	5.94	1.40	0.43	0.41	—	—	—	2.06	2.38	2.16
Pb	0.71	18.02	17.79	11.12	10.04	24.89	23.06	18.56	1.28	21.14	1.16	14.53	0.89	2.28	32.52	2.01	1.47	2.43	2.28	2.25
Zn	131.7	125.8	80.62	3.08	4.47	93.21	124.2	9.94	3.42	20.84	114.3	3.44	90.71	63.06	50.51	118.1	92.08	80.64	59.82	86.43
Sc	1.13	0.68	0.55	—	0.69	1.04	0.67	—	—	0.78	1.02	—	1.01	2.31	—	0.85	0.91	1.07	0.96	0.95
Y	1.70	0.24	0.08	1.27	0.80	0.11	—	0.56	1.52	1.07	1.66	0.57	1.41	1.23	—	1.33	1.26	1.99	1.93	1.96
Zr	78.30	—	—	35.37	36.62	0.59	—	19.62	72.47	69.48	53.48	16.33	85.41	62.02	6.99	63.47	63.61	51.14	52.16	52.02
Nb	4.48	0.06	0.03	2.26	2.35	0.03	0.03	1.49	4.30	1.40	3.51	0.82	7.06	8.02	—	7.66	8.19	1.68	1.63	1.78
Eu	0.10	1.26	1.01	0.70	0.61	0.64	0.88	0.69	0.13	0.72	0.08	0.78	0.03	0.05	—	0.08	0.02	0.10	0.07	0.07

Примечание. An (%), Ab (%) и Or (%) — доли анортитового, альбитового и ортоклазового компонента, соответственно.

Note. An (%), Ab (%), and Or (%) — amount of anorthite, albite, and orthoclase components, respectively.

Таблица 4

Содержание главных оксидов (мас. %) и редких элементов (г/т) в калиевом полевоом шпате Мурзинского гранитного ареала

Table 4

Content of major oxides (wt. %) and trace elements (ppm) in K-feldspar of the Murzinka granite halo

№ обр.	220					93		163		26
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	65.34	65.27	65.13	65.03	67.41	64.69	64.82	65.34	64.11	64.98
Al ₂ O ₃	19.07	19.11	19.15	19.1	17.54	18.79	18.79	18.85	16.61	16.71
FeO	–	–	–	–	0.16	–	–	–	0.05	–
CaO	–	–	–	–	0.72	–	–	–	0.81	0.57
BaO	–	0.25	0.19	0.24	–	0.65	0.65	0.24	–	–
Na ₂ O	2.11	2.36	2.49	2.05	2.77	1.21	1.81	2.27	2.41	2.45
K ₂ O	13.48	13.02	13.05	13.59	11.40	14.65	13.93	13.3	12.9	13.93
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	97.0	99.0
An (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10
Ab (%)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20
Or (%)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.70	0.90	0.80	0.80	0.70	0.70
Li	4.11	3.32	4.00	4.44	2.89	8.36	7.07	5.41	2.09	12.29
Rb	132.5	131.1	138.7	139.1	107.1	254.0	270.7	264.0	198.5	527.9
Cs	0.32	0.52	0.30	0.34	0.26	0.79	0.90	0.43	0.31	2.77
Be	0.24	0.45	0.80	0.14	–	0.22	0.33	–	–	0.80
Sr	123.3	127.6	144.8	146.6	189.1	437.1	480.4	305.3	555.9	78.21
Ba	778.3	788.4	960.2	939.9	913.7	3479	3830	1528	1630	669.4
Ga	10.88	9.40	12.29	10.73	9.67	14.72	16.70	21.26	10.78	13.35
Tl	0.50	0.51	0.66	0.51	0.73	1.14	1.24	1.10	0.92	3.63
Sn	1.25	1.59	1.52	1.39	1.94	0.28	0.36	0.84	2.52	1.33
Pb	32.14	32.63	35.50	35.35	45.67	67.86	66.12	54.76	52.71	55.49
Zn	168.7	163.6	216.3	192.5	1.67	451.7	446.5	210.0	3.58	2.44
Sc	1.29	1.46	1.12	1.07	0.52	0.95	1.10	1.28	–	0.98
Y	0.53	0.13	0.05	0.11	0.37	0.22	0.31	0.07	0.82	0.33
Zr	0.21	0.50	–	–	3.15	0.22	–	–	26.14	7.76
Nb	0.07	0.16	–	0.02	0.20	0.04	–	–	1.57	–
Eu	1.55	1.52	1.62	1.56	1.71	0.89	1.09	0.88	1.04	0.30

Барий наиболее близок по свойствам Sr и значительно отличается от Ca. Наиболее высокие концентрации Ba отмечаются в гранитах ММК и содержащихся в них ксенолитах гнейсов (обр. 93). В этих же породах максимально обогащен барием калиевый полевоый шпат и биотит. Высокие концентрации Ba отмечены и в биотите диоритогнейса (обр. 134), что связано с отсутствием в породе калиевого полевого шпата. Низкие концентрации Ba характерны для двуслюдяных гранитов ММ и слагающих их минералов.

Галлий. Количество Ga в изученных породах – на уровне кларка в земной коре (19 г/т). Исключением является богатый биотитом парагнейс, содержащий около 33 г/т Ga. В полевых шпатах Ga присутствует в количестве 1.5–27 г/т, а в биотите – более 23 г/т (до 114 г/т в биотите двуслюдяных гранитов).

Олово. В гнейсах ММК и гранитах ММ содержания Sn близки кларковому (около 3 г/т), тог-

да как в гранитах ММК оно составляет 0.8 г/т. Содержание Sn в биотите из гранитов ММК около 5 г/т, а в биотите двуслюдяных гранитов ММ – 100 г/т. В плагиоклазе из всех изученных пород его содержание не превышает 15 г/т.

Свинец. Содержание свинца в гранитах ММК и ММ в среднем составляет 25 г/т (при кларке в кислых породах 20 г/т), в гнейсах снижается до 6 г/т. Его главным концентратором является калиевый полевоый шпат, содержащий около 36 г/т Pb в парагнейсе и 50–70 г/т – в остальных породах. В плагиоклазе содержание Pb снижается от ортогнейсов (10–25 г/т) к гранитам (1–15 г/т) в зависимости от основности плагиоклаза, коррелируясь с Ga. Содержание Pb в биотите гнейсов и гранитов не превышает 4 г/т.

Цинк в кислых породах содержится в количестве 60 г/т. От гранитов ММК к гранитам ММ наблюдается снижение концентраций Zn (53–26 г/т). Содержание Zn в гнейсах несколько выше, чем в

гранитах, что совпадает с их более основным составом. В биотите отмечается рост содержания Zn от ортогнейсов к двуслюдяным гранитам от 100 до 840 г/т, коррелирующий с возрастанием железистости слюд. Содержание Zn в плагиоклазе и калиевом полево шпате при отсутствии сильной корреляции Zn с другими элементами и составом минералов меняются не закономерно от 0 до 450 г/т, определяясь, по-видимому, наличием микровключений цинковых минералов.

Скандий – типичный литофильный элемент. В кислых магматических породах кларк Sc составляет 3 г/т. Содержание Sc в ортогнейсах кислого состава и гранитах ММК и ММ близки (2–8 г/т). Парагнейс, содержащий 45 г/т Sc, по-видимому, является исключением, а такое содержание может быть объяснено сорбцией этого элемента глинами (Макрыгина, 2011). Его содержание в полевых шпатах составляет менее 1.5 г/т, тогда как в биотите – более 10 г/т, достигая 62 г/т в биотите двуслюдяных гранитов.

Цирконий содержится в большинстве гранитов в концентрациях около 100 г/т, в гнейсах – 20–100 г/т. Содержание Zr в биотите и полевых шпатах колеблется в широком диапазоне значений от 0.2 до 85 г/т, что обусловлено неравномерным присутствием микровключений циркона. При этом средние содержания Zr в плагиоклазе колеблются от 35 до 78 г/т, в биотите и калиевом полево шпате – от 0 до 25 г/т.

Ниобий. В исследуемых гнейсах и гранитах его содержание колеблется от 3 до 19 г/т, что сопоставимо с кларком элемента в кислых изверженных породах и верхней коре, равным 20 г/т. Ниобий концентрируется в биотите. Его наибольшие содержания установлены в двуслюдяных гранитах, в которых биотит содержит до 520 г/т Nb. В биотите жильных гранитов ММК его содержание не превышает 200 г/т, в ортогнейсах – не более 70 г/т, минимальные содержания фиксируются в биотите парагнейса (менее 10 г/т). В полевых шпатах содержания Nb достигают 8 г/т и связаны, по-видимому, с микровключениями слюд и акцессорных минералов.

Ванадий, хром. Кларк V в кислых породах 40 г/т, Cr – 25 г/т. В исследуемых гранитах содержание V не превышает 15 г/т, а Cr – 6 г/т, тогда как в ортогнейсах диоритового и гранодиоритового состава колеблется от 40–110 г/т V и 18–95 г/т Cr, отвечая кларку элементов в породах среднего состава. В парагнейсе содержание V составляет

435 г/т и Cr – 192 г/т, что отражает присутствие в терригенном осадке органического вещества (ванадий) и продуктов размыва ультраосновных пород (хром). Содержание V в биотитах варьирует от 90 г/т в двуслюдяных до 170 г/т в биотитовых гранитах; биотит ортогнейсов содержит 270–460 г/т V, а парагнейса – до 660 г/т V. В полевых шпатах содержание V не превышает 4 г/т. Концентрация Cr в биотите гранитов составляет менее 33 г/т, а ортогнейсов – 50–220 г/т. Биотит парагнейса содержит 240–360 г/т Cr.

Обсуждение результатов

Содержания редких элементов в биотите (табл. 2) демонстрируют накопление Li, Rb, Cs, Nb, Ga, Zn, Mn, Sc, Sn и Tl и снижение концентраций V, Cr, Co, Ni, Y, Zr и Ba в зависимости от величины железистости минерала (рис. 3). Исключение составляет биотит парагнейса, который, как и на классификационной диаграмме (рис. 2а), отличается от остальных. В частности, его концентрации Li, Ba, Cr, V и Sc не вписываются в наблюдаемый тренд биотита пород первичного магматогенного происхождения (ортогнейсы, граниты). В этой связи, можно предположить, что микропримесный состав биотита обусловлен составом и происхождением породы. Это подтверждается ростом концентраций Rb, Nb и Ga и снижением концентраций Ba, Cr, Ni и Co как в породах, так и в биотите (рис. 4) от диоритогнейсов к жильным гранитам ММК и далее к двуслюдяным гранитам ММ. Иной корреляционной связью характеризуются такие элементы, как Zn и Sc. Их концентрации снижаются от диоритогнейсов к гранитам, но возрастают в биотите из этих пород. Последнюю зависимость можно объяснить расширением изоморфной емкости биотита в отношении этих элементов с ростом железистости, а также возрастающей активности F, с которым связан перенос Sc и Zn (Щекина, Граменицкий, 2008). В случае Zr, Y, Li, Cs и Be корреляционные зависимости между породой и биотитом слабы или отсутствуют, что может быть связано с появлением других минералов-концентраторов этих элементов в процессе гранитообразования, например, таких как циркон, ксенотим и мусковит.

Содержания редких элементов в полевых шпатах демонстрируют наличие зависимости между концентрациями Ba, Pb, Eu, Ga, Sc и Zn и долей анортитового компонента в плагиоклазе, а также долей альбитового компонента в калиевом полево

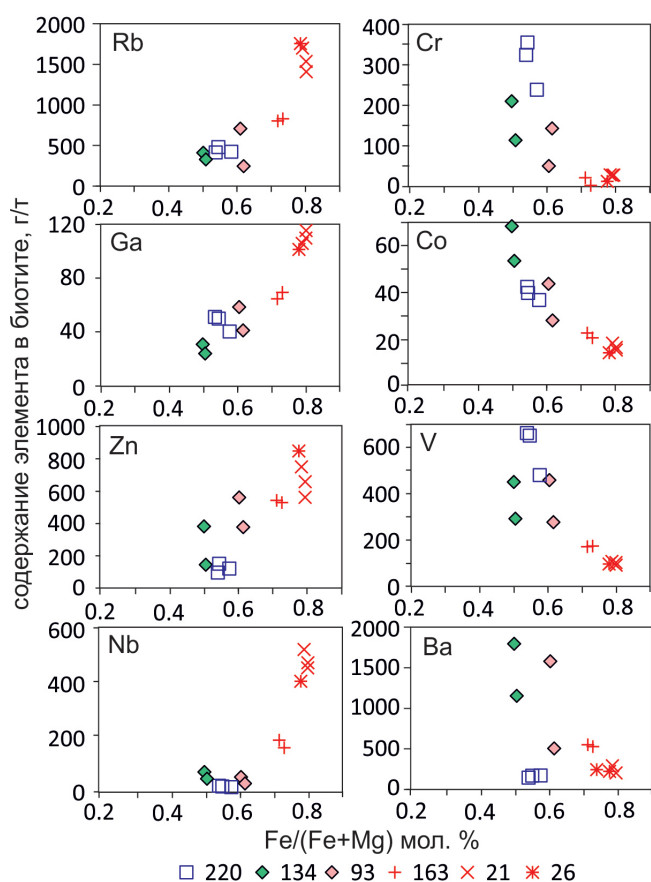


Рис. 3. Соотношение между содержанием редких элементов и железистостью биотита пород Мурзинского гранитного ареала.

Fig. 3. Correlation between trace element contents and Fe/(Fe+Mg) value of biotite of rocks of the Murzinka granite area.

шпате (табл. 4, рис. 5). В то же время зависимости между концентрациями редких элементов в полевых шпатах и породе слабы или отсутствуют. По нашему мнению, эти факты скорее указывает на доминирование кристаллохимического контроля концентраций этих элементов в структуре полевых шпатов, нежели контроля со стороны геохимического состава пород.

Ранее выявленная зональность гранитного магматизма (Орогенный..., 1994; Ферштатер, Бородина, 2018; Ферштатер и др., 2019), фиксируемая в составах пород и слагающих их минеральных парагенезисах, подтверждается полученными данными геохимии породообразующих минералов гранитов и гнейсов (рис. 6). С запада на восток от гранитов южакковского к гранитам мурзинского комплекса в биотите отмечается рост концентраций Li, Rb, Cs, Ga, Tl, Zn, Sc, Nb, Ta. В этом направлении плагиоклазы обогащаются Li, Rb, Cs, Be и обедняются Sr, Ba. В калиевом полевом шпате растут концен-

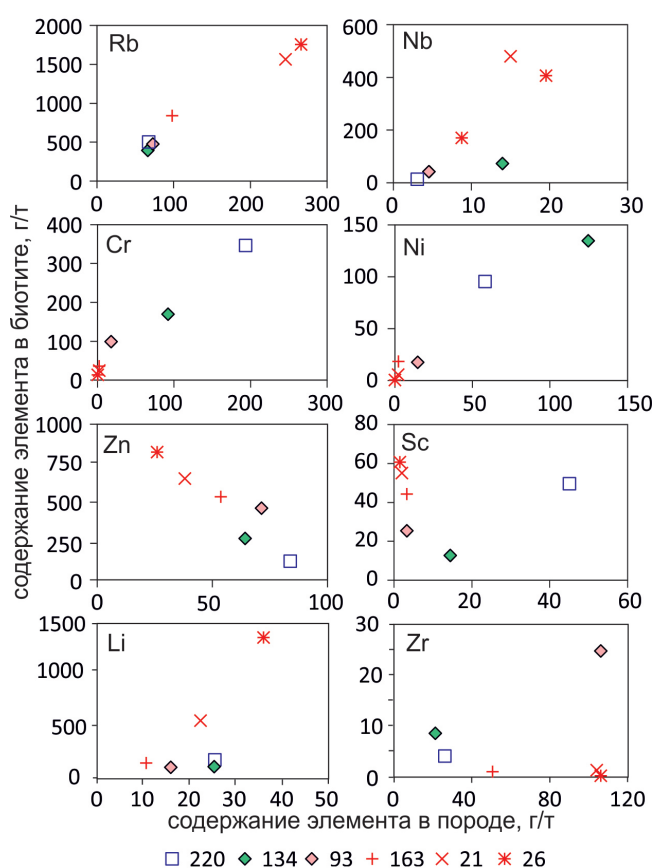


Рис. 4. Соотношение между средним содержанием редких элементов в биотите и породе Мурзинского гранитного ареала.

Fig. 4. Correlation between average trace element content of biotite and rocks of the Murzinka granite area.

трации Li, Rb и Cs и падают – Sr, Ba и Zn. В ортогнейсах также отмечается изменение состава минералов в этом направлении: в биотите к востоку снижаются концентрации Cr, Ni, Co, V и Ba и возрастают концентрации Rb, Zn и Ga; в плагиоклазе растут содержания Rb, Li и Ga, что может быть обусловлено более сиалическим составом гнейсов на востоке.

Выявленные закономерности изменения микроэлементного состава минералов гранитов с запада на восток от жильных биотитовых гранитов в корневой зоне ММ к двуслюдяным гранитам кровли массива предполагают генетическую связь описываемых комплексов в результате флюидно-магматической эволюции единого расплава. В этом направлении возрастают кремнекислотность пород и содержания несовместимых элементов (Li, Cs, Rb, Nb, Ta, Y) и снижается K/Rb отношение. В то же время эти изменения в составе пород и минералов могут быть объяснены и иными причинами,

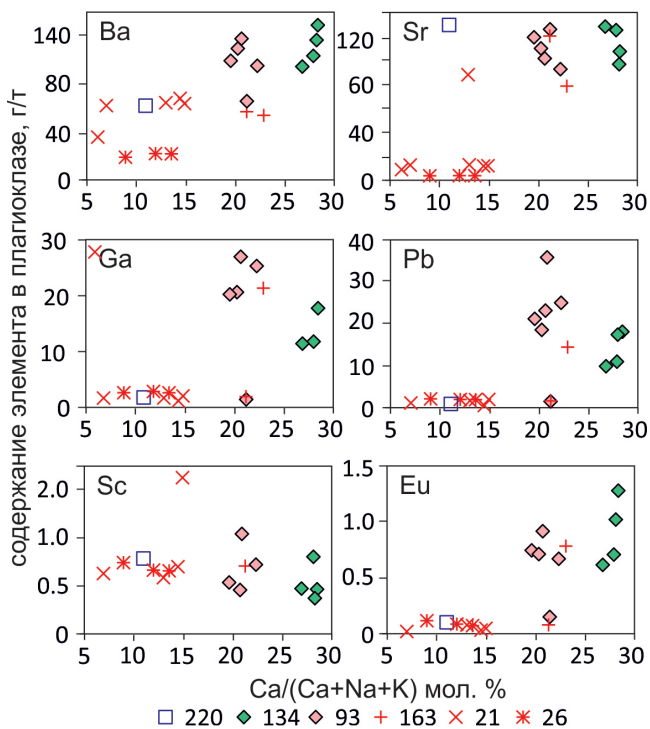


Рис. 5. Соотношение между содержанием редких элементов и величиной анортитового компонента в плагиоклазе пород Мурзинского гранитного ареала.

Fig. 5. Correlation between trace element content and anorthite content in plagioclase of rocks of the Murzinka granite area.

в частности, возрастанием кремнекислотности протолита, увеличением степени частичного плавления и более водным характером анатексиса. Наиболее веским аргументом в пользу обусловленности геохимических особенностей гранитов составом протолита может служить изотопная гетерогенность магматизма, выраженная в отличии первичных изотопных отношений Sr и Nd в гранитах южакковского ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.709\text{--}0.730$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.5116\text{--}0.5114$) и мурзинского комплекса ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.5123\text{--}0.5125$) (Gerdes et al., 2002; Ферштатер и др., 2019).

Полученные данные по составу редких элементов в породообразующих минералах магматической стадии кристаллизации гранитов могут быть использованы для определения металлогенической специализации описываемых комплексов. Например, содержание элемента ниже кларка может указывать на отсутствие высокотемпературно-

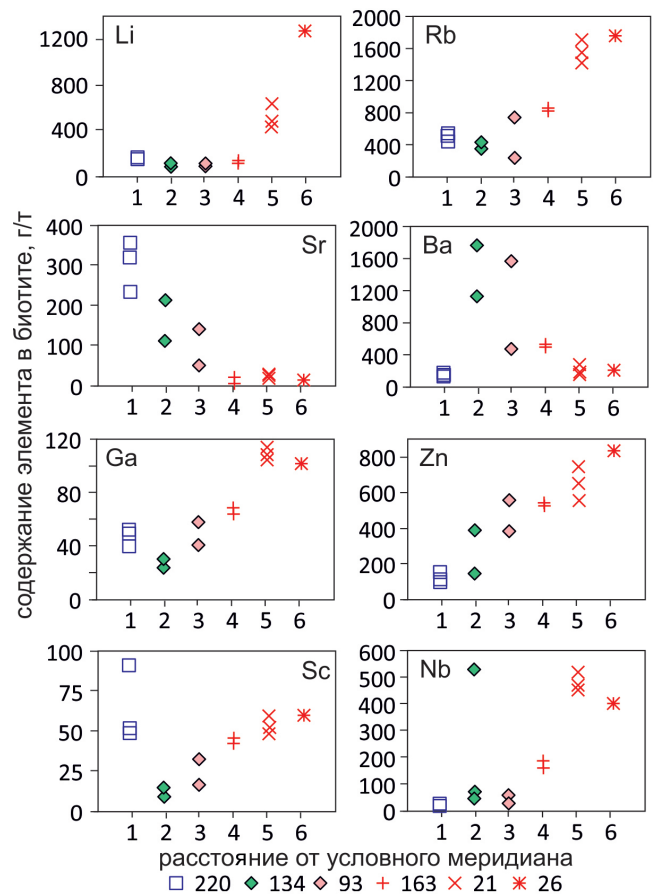


Рис. 6. Латеральная зональность с запада на восток от условного меридиана, выраженная в составе биотита пород Мурзинского гранитного ареала.

Fig. 6. WE-trending zonation from a conventional meridian expressed in the composition of biotite of the Murzinka granite area.

го минерала-концентратора и возможность накопления элемента на пневматолит-гидротермальной стадии с формированием рудных концентраций. Наиболее показательны в этом отношении Be, Ta и Nb, концентрации которых в исследованных гранитах и породообразующих минералах низкие, что может быть связано с высоким содержанием F, способствующего экстракции этих компонентов из расплава во флюидную фазу (Холоднов, Бушляков, 2002). Это хорошо показано в работе (Ферштатер, Бородина, 2018) на примере пегматитовой жилы Мокруша, в которой концентрации Be, Nb, Ta и Sn на порядок превышают концентрации в контактирующем граните. С накоплением Be, Ta и Nb в остаточном расплаве-флюиде связано формирование в апикальной части ММ месторождений редкометалльных пегматитов и грейзенов (Золоев и др., 2004). Рудная специализация последних обусловлена, в том числе, и извлечением металлов из

биотита и полевых шпатов при их преобразовании в мусковит и альбит.

Выводы

Впервые определены содержания редких элементов в породообразующих минералах гранитов южакского и мурзинского комплекса в составе Мурзинского гранитного ареала на Среднем Урале. Установлено изменение состава биотита широтного профиля мурзинского метаморфического комплекса и Мурзинского массива. Полученные данные демонстрируют рост железистости и концентраций Rb, Li, Cs, Sc, Sn, Mn, Zn, Ga с запада на восток. В этом направлении закономерно меняется и состав полевых шпатов: плагиоклазы обогащаются Zn и обедняются Sr, Ba, Ga, Pb, калиевые полевые шпаты обогащаются Rb и обедняются Sr, Ba. Предполагается, что главной причиной направленного изменения концентраций редких элементов в минералах гранитов является смена состава корового протолита (гнейсов) в области магмагенерации, а также условий гранитообразования. Сходные изменения редкоэлементного состава минералов с запада на восток наблюдается и в изученных ортогнейсах метаморфического комплекса. Полученные данные не противоречат модели Г.Б. Ферштатера (Ферштатер и др., 2019) согласно которой указанные гранитные комплексы являются независимыми, образованными плавлением гнейсов разного состава и возраста. Показана редкометалльная специализация, особенно гранитов мурзинского комплекса, на Be, Ta, Nb и обоснована связь с ними редкометалльных пегматитов и грейзенов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, №№ госрегистрации АААА-А18-118052590034-0, АААА-А18-118052590029-6 и АААА-А18-118053090045-8.

Литература

Виноградов А.П. (1962) Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. *Геохимия*, 7, 555–571.

Золотов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. (2004) Минерагенез и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург, Министерство природных ресурсов РФ, ГУПР по Свердловской области, ИГГ УрО РАН, ОФО УГСЭ, 336 с.

Казаков И.И., Стороженко Е.В., Харитонов И.Н., Стефановский В.В. (2016) Отчет о результатах работ по объекту ГДП-200 Лист О-41-XX (Алапаевская площадь)

за 2014–2016 гг. Книга 1. Екатеринбург, ОАО УГСЭ, 306 с. (ФБУ ТФГИ по УРФО).

Коровко А.В., Кузовков, Г.Н., Бурнатная Л.Н., Мананкова Г.П., Пуртов В.А., Брусницин В.Д., Ведерников В.В. (2002) Информационный отчет по прогнозно-поисковым работам на золото на Алапаевской площади. Отчет Исетской ГСП за 2000–2002 гг. Книга 1. Верхняя Пышма, РГФ, ТГФ, ОАО СУГРЭ, 282 с. (ФБУ ТФГИ по УРФО).

Макрыгина В.А. (2011) Геохимия отдельных элементов: Учебное пособие. Новосибирск, Гео, 195 с.

Предовский А.А. (1980) Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л., Наука, 152 с.

Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Червяковская М.В. (2019) Геохимия редких элементов в биотитах и биотитсодержащих породах Мурзинского ареала. *Ежегодник-2018. Труды ИГГ УрО РАН*, (166), 122–126.

Орогенный гранитоидный магматизм Урала (1994) Ред. Г.Б. Ферштатер. Миасс–Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 250 с.

Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С. (2018) Мурзинский массив на Среднем Урале как пример межформационного гранитного плутона: магматические источники, геохимическая зональность, особенности формирования. *Литосфера*, 18(5), 672–691.

Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Монтеро П., Беа Ф., Бородин Н.С., Вишнякова М.Д., Солошенко Н.Г., Стрелецкая М.В. (2019) Возраст и изотопно-геохимические особенности мурзинско-аудуйского метаморфического комплекса в связи с проблемой формирования Мурзинского межформационного гранитного плутона. *Геология и геофизика*, 60(3), 342–365.

Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург, УрО РАН, 392 с.

Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В., Краснобаев А.А., Бородин Н.С., Червяковская М.В. (2020) Цирконы из пород мурзинско-аудуйского метаморфического комплекса (Средний Урал): геохимия, термометрия, генетические следствия. *Геодинамика и тектонофизика*.

Щекина Т.И., Граменицкий Е.Н. (2008) К геохимии скандия в магматическом процессе по экспериментальным данным. *Геохимия*, (4), 387–402.

Юдович Я.Э., Мерц А.В., Кетрис М.П. (1996) Петрохимическая диагностика метааркозов и метариолитов в древних толщах Приполярного Урала. *Доклады Академии наук*, 351(3), 383–386.

Gerdes A., Montero P., Bea F., Fershtater G., Borodina N., Osipova T., Shardakova G. (2002) Peraluminous granites frequently with mantle-like isotope compositions: the continental-type Murzinka and Dzhabyk batholith of the Eastern Urals. *International Journal of Earth Science*, 91, 3–19.

Henry D.J., Guidotti C.V., Thomson J.A. (2005) The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*, **90**(2–3), 316–328.

Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval' P.V., Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. (1998) Nomenclature of the micas. *Mineralogical Magazine*, **63**, 267–279.

References

Gerdes A., Montero P., Bea F., Fershtater G., Borodina N., Osipova T., Shardakova G. (2002) Peraluminous granites frequently with mantle-like isotope compositions: the continental-type Murzinka and Dzhabyk batholith of the Eastern Urals. *International Journal of Earth Science*, **91**, 3–19.

Fershtater G.B., Borodina N.S. (2018) [Murzinka pluton, Central Urals, as example of interformational granite pluton: magmatic sources, geochemical zoning, and formation features]. *Litosfera [Lithosphere]*, **18**(5), 672–691. (in Russian)

Fershtater G.B., Krasnobaev A.A., Montero P., Bea F., Borodina N.S., Vishnyakova M.D., Soloshenko N.G., Streletskaia M.V. (2019) [Age and isotope-geochemical features of the Murzinka-Adui metamorphic complex in connection with the problem of formation of the Murzinka interformational granite pluton]. *Russian Geology and Geophysics*, **60**(3), 342–365.

Henry D.J., Guidotti C.V., Thomson J.A. (2005) The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*, **90**(2–3), 316–328.

Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Kharitonov I.N., Stefanovsky V.V. (2016) [Report on results of work at GDP-200 Sheet O-41-XX (Alapaevsk area) for 2014–2016. Book 1]. Yekaterinburg, OAO UGSE, 306 p. (in Russian)

Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N. (2002) [Halogens in endogenous ore formation]. Yekaterinburg, UB RAS, 392 p. (in Russian)

Korovko A.V., Kuzovkov G.N., Burnatnaya L.N., Manankova G.P., Purtov V.A., Brusnitsyn V.D., Vedernikov V.V. (2002) Information report on prospecting for gold in the Alapaevsk area. Report of the Iset Survey Party for 2000–2002. Book 1. Verkhnyaya Pyshma, RGF, TGF, OAO SUGRE, 282 p. (in Russian)

Makrygina V.A. (2011) [Geochemistry of some elements: educational guide]. Novosibirsk, Geo, 195 p. (in Russian)

[Orogenic granitoid magmatism of the Urals] (1994) / Ed. G.B. Fershtater. Miass–Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 250 p. (in Russian)

Predovsky A.A. (1980) [Conditions of sedimentogenesis and volcanism of the Early Precambrian]. Leningrad, Nauka, 152 p. (in Russian)

Pribavkin S.V., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V. (2019) [Geochemistry of trace elements in biotite and biotite-bearing rocks of the Murzinka area]. *Ezhegodnik-2018. Trudy IGG UrO RAN [Yearbook-2018. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS]*, (166), 122–126 (in Russian)

Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval' P.V., Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. (1998) Nomenclature of the micas. *Mineralogical Magazine*, **63**, 267–279.

Shardakova G.Y., Pribavkin S.V., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V. (2020) Zircon from rocks of the Murzinka-Adui metamorphic complex: geochemistry, thermometry, genesis. *Geodynamics and Tectonophysics*. (in press)

Shchekina T.I., Gramenitsky E.N. (2008) Geochemistry of Sc in the magmatic process: experimental evidence. *Geochemistry International*, (4), 351–366.

Vinogradov A.P. (1962) [Average content of chemical elements in main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, **7**, 555–571. (in Russian)

Yudovich Ya.E., Merts A.V., Ketris M.P. (1996) [Petrochemical analysis of meta-arcoses and metarhyolites in ancient strata of the Subpolar Urals]. *Doklady Akademii Nauk [Reports of Earth Sciences]*, **351**(3), 383–386. (in Russian)

Zoloev K.K., Levin V.Ya., Mormil S.I., Shardakova G.Y. (2004) [Minerageny and deposits of rare metals, molybdenum, and tungsten of the Urals]. Yekaterinburg, Ministerstvo prirodnih resusov RF, IGG UrO RAN, UGSE, 336 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 1 марта 2020 г.