

## ГЕОХИМИЯ КАМЕНСКОГО МИГМАТИТ-ПЛУТОНА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2018 г. М. Д. Вишнякова, Н. С. Бородина, Г. Б. Ферштатер

Каменский массив (КМ) примыкает с юга к Адуйскому гранитному массиву. В КМ обнажена зона развития мигматитов, в которой, по-видимому, происходили процессы магмогенерации, сформировавшие, по крайней мере, часть Адуйского массива. Анализ поведения петрогенных элементов показывает, что все разновидности пород КМ образуют единые гомодромные тренды с закономерным изменением состава от мигматитов до гранитов, что подтверждает их генетическое родство. Тренды распределения редких и редкоземельных элементов, нормированные на хондрит, сходны во всех типах пород КМ и близки трендам сходных по основности пород Верхисетского массива. Мигматизация, анатексис и обособление гранитного расплава происходили при  $P = 4.6\text{--}6.5$  кбар и  $T = 620\text{--}723^\circ\text{C}$ . Наблюдения за геологическими взаимоотношениями пород, изучение химического состава пород и минералов, P-T условий и геохимии пород КМ показывают, что данный плутон может быть использован в качестве эталона гранитного магмообразования в ювенильной коре Уральского орогена.

Каменский мигматит-плутон располагается в палеоконтинентальной зоне северо-западного мегаблока Среднего Урала, примыкая с юга к Адуйскому гранитному массиву, самому крупному в этой зоне. В массиве прекрасно представлена зона мигматитов, в которой, по всей вероятности, происходила магмогенерация, сформировавшая, по крайней мере, часть Адуйского массива.

Гранитоиды северной части Каменского массива образуют тела овальной, удлиненной или неправильной формы и имеют большей частью гранитный состав. Центральная и южная части массива состоят преимущественно из гранодиоритов, в меньшей степени из кварцевых диоритов. Западная часть массива, представляющая его корневую зону, сложена полосчатыми мигматитами [Ферштатер и др., 2008], восточная – слабо мигматизированными и гомогенными гранодиоритами, адамеллитами и гранитами.

Анализы петрогенных элементов выполнены в ЦКП “Геоаналитик” лаборатории ФХМИ Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (аналитики Н.П. Горбунова и Л.А. Татарина). Содержание редких элементов определено методом ICP-MS в лабораториях Университета Гранады (Испания) (аналитики Ф. Беа, П. Монтеро) и Института геологии и геохимии (аналитики Д.В. Киселева, Н.В. Чередниченко).

Наименее кремнекислые разности мигматитов по химическому составу (табл. 1) соответствуют биотит-роговообманковым и биотитовым кварцевым диоритам и гранодиоритам, бедными калиевым полевым шпатом. Плагноклаз в них отвечает  $An_{20\text{--}34}$ , часто имеет антипертитовое строение, что свидетельствует о сравнительно высокотемпературных условиях мигматизации. В адамеллитах и гранитах параллельно с увеличением содержания кварца возрастает содержание калишпата, ко-

торый представлен преимущественно ортоклазом. В породах обычен мирмекит, свидетельствующий об абиссальных условиях их формирования. Биотит всегда характеризуется большей магнезиальностью  $\#Mg = Mg/(Mg + Fe)$  по сравнению с сосуществующей роговой обманкой, что характерно для мигматизации, когда температурная устойчивость биотита выше, чем роговой обманки. Состав плагноклаза в адамеллитах и гранитах  $An_{11\text{--}28}$ .

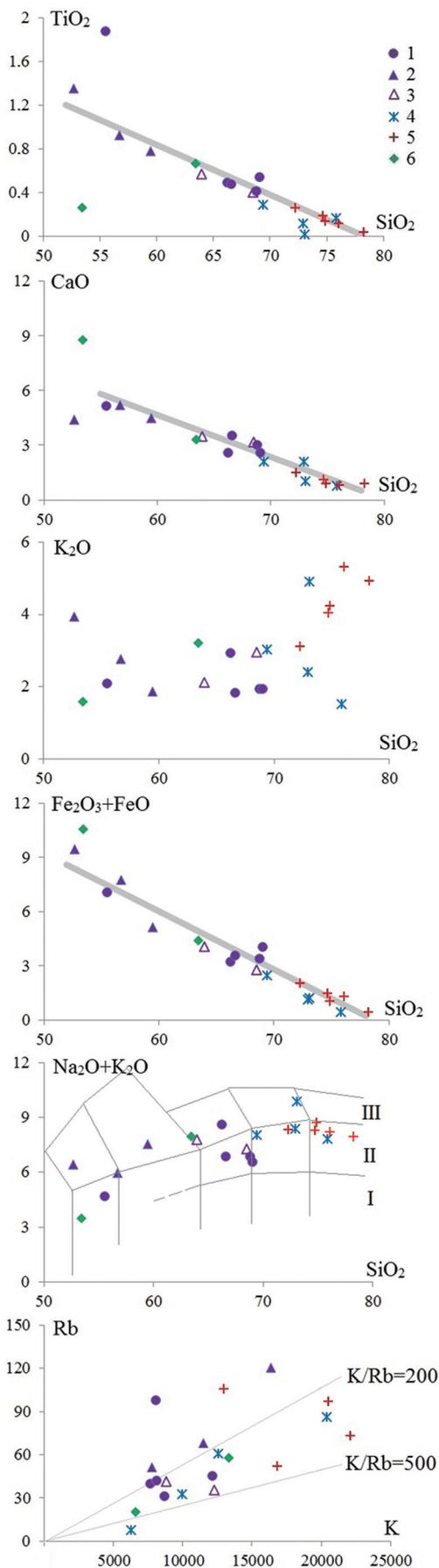
На диаграмме Ab–Q–Or валовые составы мигматитов и гранитов Каменского массива отвечают стандартному тренду, показанному на рис. 1 серой линией [Бородина и др., 2016]. Лейкосомы полосчатых мигматитов сильно отличается по составу от кварц-полевошпатового минимума и эволюционирует в сторону этого минимума, обогащаясь кварцем и калишпатом. Эта эволюция сопровождается перемещением расплава, который кристаллизуется в виде штокверка гранитных обособлений и жил. Образующийся при этом ряд пород характеризуется примерно одинаковым содержанием нормативного калишпата, что подчеркивается направлением линий, соединяющих составы меланосомы и лейкосомы (рис. 2).

Содержание главных петрогенных элементов в породах Каменского массива приведено в табл. 1. На вариационных диаграммах (см. рис. 1) все разновидности образуют единые гомодромные тренды с закономерным изменением состава от мигматитов до гранитов, что подтверждает их генетическое родство. На классификационной диаграмме  $(K_2O + Na_2O) - SiO_2$ , нанесены граничные значения, используемые для разделения пород щелочного, субщелочного и нормального рядов [Петрографический кодекс..., 2008]. Все разновидности попадают в поле пород нормальной щелочности (см. рис. 1). При увеличении содержания кремнезема наблюдается четкая прямая отрицательная

Таблица 1. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в породах Каменского массива

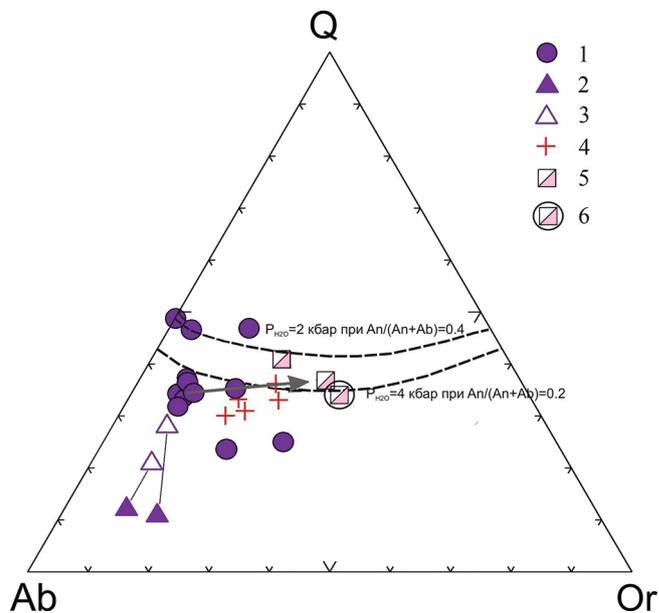
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
SiO <sub>2</sub>	55.51	66.22	68.49	68.77	69.04	52.67	56.71	59.46	63.95	68.49	69.38	72.94	73.07	75.85	72.25	74.68	74.87	76.06	78.22	63.43	53.42
TiO <sub>2</sub>	1.88	0.49	0.40	0.41	0.54	1.35	0.93	0.78	0.57	0.40	0.29	0.12	0.02	0.17	0.26	0.19	0.14	0.12	0.04	0.67	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.83	16.69	15.98	15.19	14.89	17.32	17.14	17.11	16.77	15.98	16.52	14.46	15.56	13.19	14.76	14.02	14.06	12.72	12.29	15.73	11.92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	1.80	1.78	3.05	2.44	4.57	н.о.	1.55	1.78	1.78	1.22	0.65	0.48	0.08	0.61	0.04	0.32	0.90	0.04	2.20	5.57
FeO	6.10	1.44	1.00	0.35	1.60	4.90	7.75	3.59	2.51	1.00	1.25	0.50	0.72	0.36	1.44	1.44	0.72	0.40	0.40	2.20	5.00
MnO	0.09	0.05	0.06	0.04	0.07	0.13	0.12	0.08	0.06	0.06	0.04	0.03	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.08	0.21
MgO	3.10	1.52	1.17	1.77	1.31	5.24	3.54	2.96	2.39	1.17	1.14	0.33	0.39	0.40	0.99	0.70	0.70	0.30	0.11	2.81	9.63
CaO	5.17	2.59	3.18	3.01	2.59	4.41	5.20	4.49	3.48	3.18	2.08	2.11	1.02	0.75	1.50	1.11	0.90	0.83	0.88	3.31	8.77
Na <sub>2</sub> O	2.61	5.68	4.30	4.91	4.62	2.49	3.20	5.68	5.68	4.33	5.03	6.00	4.97	6.34	5.21	4.26	4.50	2.89	3.01	4.76	1.90
K <sub>2</sub> O	2.09	2.93	2.96	1.95	1.94	3.94	2.77	1.87	2.12	2.96	3.03	2.40	4.91	1.51	3.12	4.05	4.24	5.32	4.94	3.21	1.59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.38	0.20	0.17	0.15	0.19	0.67	0.53	0.37	0.18	0.17	0.07	0.05	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.04	0.01	0.55	0.01
П.п.п.	1.37	0.33	0.40	0.50	0.60	1.79	0.38	0.47	0.40	0.40	0.44	0.25	0.11	0.15	0.42	0.23	0.00	0.00	0.10	0.80	1.10
Li	36.08	30.64	11.75	18.68	22.21	67.39	34.20	36.75	31.76	11.75	28.92	13.53	7.25	12.56	55.24	26.06	27.41	6.91	4.21	20.22	12.81
Rb	31.49	45.17	35.63	42.01	97.73	1.21	68.19	51.44	41.54	35.63	60.88	32.61	86.40	7.72	106	52.44	202	73.35	97.21	57.98	20.42
Cs	1.65	1.44	0.83	1.46	1.89	6.43	1.98	1.39	1.86	0.83	1.90	0.55	1.20	0.56	3.55	0.95	3.93	0.52	0.67	1.55	2.29
Be	1.11	1.90	1.11	0.92	1.14	1.29	1.94	1.64	1.67	1.11	2.02	0.63	4.18	1.46	2.37	0.94	3.57	0.44	0.79	1.50	0.46
Sr	826	466	932	547	412	794	726	837	752	932	400	403	138	51.37	310	203	245	91.71	87.73	1025	202
Ba	606	680	1652	521	368	483	596	670	713	1652	653	1213	256	148	565	559	1092	345	432	995	115
Sc	13.71	5.09	7.12	4.22	4.45	10.99	14.07	13.82	8.47	7.12	5.51	1.68	2.12	3.91	3.61	1.41	0.75	0.70	н.о.	6.56	21.70
V	139	44.45	41.58	35.86	41.58	135	134	118	66.95	41.58	42.38	6.22	4.07	12.99	23.05	14.79	11.54	10.11	3.74	58.58	94.68
Cr	11.29	119	29.02	10.64	23.71	94.48	46.92	95.87	40.60	29.02	17.96	7.99	4.24	4.03	9.98	2.24	4.32	4.89	4.65	19.75	138
Co	16.91	5.85	5.54	5.28	6.39	22.54	13.05	16.21	9.07	5.54	5.27	1.05	0.40	0.41	2.87	2.46	0.89	1.31	0.43	7.88	19.97
Ni	6.71	4.93	14.31	5.82	11.34	57.54	17.93	44.09	26.33	14.31	5.34	4.17	0.00	0.00	3.26	7.08	21.73	2.63	1.45	16.91	25.84
Cu	31.99	15.97	40.17	29.23	11.02	110	21.43	73.53	30.18	40.17	0.41	11.93	39.58	5.92	14.11	9.27	35.17	2.78	4.79	18.57	10.86
Zn	110	55.15	48.44	24.53	63.43	100	89.59	128	85.60	48.44	27.66	37.10	0.00	0.00	57.22	118	82.59	14.14	3.59	37.73	33.87
Ga	21.40	18.58	13.13	15.29	19.52	22.16	21.33	21.77	19.39	13.13	17.14	12.87	19.52	9.71	17.67	14.20	15.03	14.32	14.44	15.44	11.68
Y	15.58	9.01	8.85	5.64	5.46	12.25	22.46	19.86	12.96	8.85	8.77	4.33	8.57	5.21	5.69	3.11	4.83	1.03	0.93	10.66	10.70
Nb	5.83	7.43	10.31	3.40	4.37	9.24	16.61	10.46	5.89	10.31	5.46	1.95	3.23	1.43	5.77	2.94	2.38	0.97	0.31	17.17	0.81
Ta	0.30	0.58	0.49	0.30	0.18	0.35	0.39	0.89	0.45	0.49	0.45	0.10	0.62	0.11	5.03	0.27	0.19	0.06	0.03	0.93	0.05
Zr	20.63	97.85	19.02	50.05	42.58	11.46	120	93.57	86.57	19.02	82.42	112	98.66	55.72	53.45	39.49	55.63	38.10	59.96	67.83	20.34
Hf	0.72	2.32	0.89	1.42	0.97	0.62	2.29	2.10	2.25	0.89	2.56	3.28	4.43	1.66	1.81	1.20	1.48	1.15	2.06	1.80	0.97
Mo	0.43	0.54	0.89	0.10	0.13	0.41	0.58	0.47	0.23	0.89	0.09	1.10	0.14	0.06	1.10	0.65	1.51	0.14	0.15	0.28	0.10
Sn	2.19	1.92	0.96	1.21	1.39	1.63	2.79	4.33	2.27	0.96	1.65	0.41	0.50	0.84	1.82	0.93	3.82	0.22	0.27	1.43	0.44
Tl	0.43	0.49	0.89	0.51	н.о.	1.34	0.16	11.46	1.96	0.89	0.45	0.71	0.56	0.20	1.54	0.39	1.79	н.о.	н.о.	н.о.	0.33
Pb	13.25	14.34	18.08	10.28	14.23	11.42	11.58	26.24	20.08	18.08	16.14	19.44	58.73	4.71	25.23	20.98	31.78	21.89	26.12	12.60	7.97
U	0.60	1.22	2.40	1.47	0.64	3.49	3.94	1.70	2.28	2.40	2.42	3.22	35.12	0.33	1.43	0.75	0.96	0.65	1.01	1.80	0.34
Th	2.54	3.99	4.00	4.78	4.36	4.39	5.20	4.46	4.44	4.00	7.33	4.82	7.52	0.46	6.07	2.75	3.10	2.07	3.78	5.37	0.32
La	18.17	19.18	29.50	19.31	17.91	36.73	40.45	37.73	24.02	29.50	17.31	13.91	8.24	1.16	13.76	7.59	10.98	1.45	4.62	41.98	2.36
Ce	42.87	39.52	60.83	37.17	33.36	77.96	99.33	85.13	50.52	60.83	35.89	25.87	13.78	3.09	26.48	17.85	26.50	3.08	7.79	82.71	6.43
Pr	5.60	4.37	6.75	4.07	3.27	9.12	11.03	10.65	6.32	6.75	4.02	2.53	1.37	0.59	2.92	1.68	2.80	0.32	0.65	9.19	0.97
Nd	23.50	15.86	24.82	14.93	10.31	36.37	45.90	40.33	24.64	24.82	14.38	8.91	4.29	3.06	9.53	5.68	9.91	1.15	1.85	32.60	5.01
Sm	4.93	2.90	3.76	2.75	1.51	5.77	8.22	7.20	4.57	3.76	2.60	1.34	0.92	0.86	1.65	0.98	1.97	0.25	0.21	5.19	1.58
Eu	1.49	0.83	0.99	1.71	0.44	1.49	2.14	1.82	1.27	0.99	0.82	0.53	0.28	0.20	0.49	0.29	0.78	0.13	0.17	1.27	0.43
Gd	4.17	2.21	2.43	1.35	1.36	4.12	5.05	5.55	3.56	2.43	2.08	0.94	0.88	0.96	1.29	0.72	1.45	0.24	0.16	2.17	1.91
Tb	0.58	0.31	0.32	0.22	0.17	0.49	0.75	0.73	0.48	0.32	0.29	0.12	0.17	0.16	0.18	0.10	0.21	0.03	0.02	0.39	0.32
Dy	3.04	1.60	1.94	1.27	1.00	2.87	4.47	3.81	2.47	1.94	1.53	0.79	1.28	1.07	1.60	0.55	1.01	0.18	0.11	2.35	2.30
Ho	0.59	0.32	0.36	0.23	0.20	0.51	0.81	0.74	0.46	0.36	0.31	0.18	0.31	0.26	0.21	0.11	0.20	0.04	0.03	0.44	0.50
Er	1.52	0.83	0.96	0.64	0.56	1.36	2.12	1.80	1.29	0.96	0.79	0.53	1.11	0.73	0.58	0.33	0.51	0.13	0.10	1.23	1.46
Tm	0.21	0.13	0.14	0.08	0.07	0.19	0.29	0.28	0.19	0.14	0.12	0.09	0.21	0.12	0.09	0.06	0.08	0.02	0.02	0.16	0.23
Yb	1.22	0.76	0.88	0.47	0.44	1.11	1.76	1.59	1.13	0.88	0.78	0.63	1.54	0.73	0.57	0.33	0.46	0.16	0.20	1.01	1.58
Lu	0.17	0.11	0.12	0.07	0.06	0.16	0.25	0.21	0.16	0.12	0.12	0.10	0.28	0.11	0.08	0.05	0.06	0.03	0.05	0.14	0.23

Примечание. 1–5 – мигматиты (валовой состав) – 308, 319, 416а, 429 и Кам40; 6–8 – меланосома – 417б, 409, 314; 9, 10 – лейкосома – 315, 417а; 11–14 – гранитные жилы в мигматитах – 312, 419, 320, 321; 15–19 – граниты крупных тел – 301, 309, 302, Кам41, Кам42; 20, 21 – дайки диорита, слабо мигматизированные, секущие полосчатые мигматиты – 430, 421б.



**Рис. 1.** Вариационные диаграммы А. Харкера:  $TiO_2-SiO_2$ ,  $(Fe_2O_3 + FeO)-SiO_2$ ,  $CaO-SiO_2$ ,  $(Na_2O + K_2O)-SiO_2$ ,  $K_2O-SiO_2$ ,  $Rb-K$ .

Здесь и на рис. 3: 1 – однородные мигматиты, 2 – меланосома, 3 – лейкосома, 4 – гранитные жилы в мигматитах, 5 – граниты крупных тел, 6 – дайки. Серой линией здесь и на рис. 3 показаны направления трендов распределения изученных элементов.

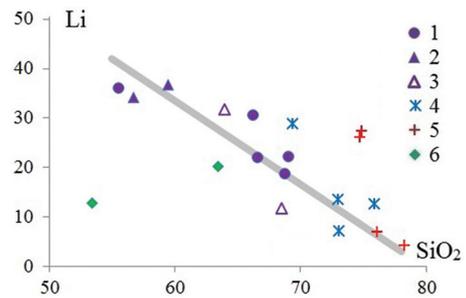
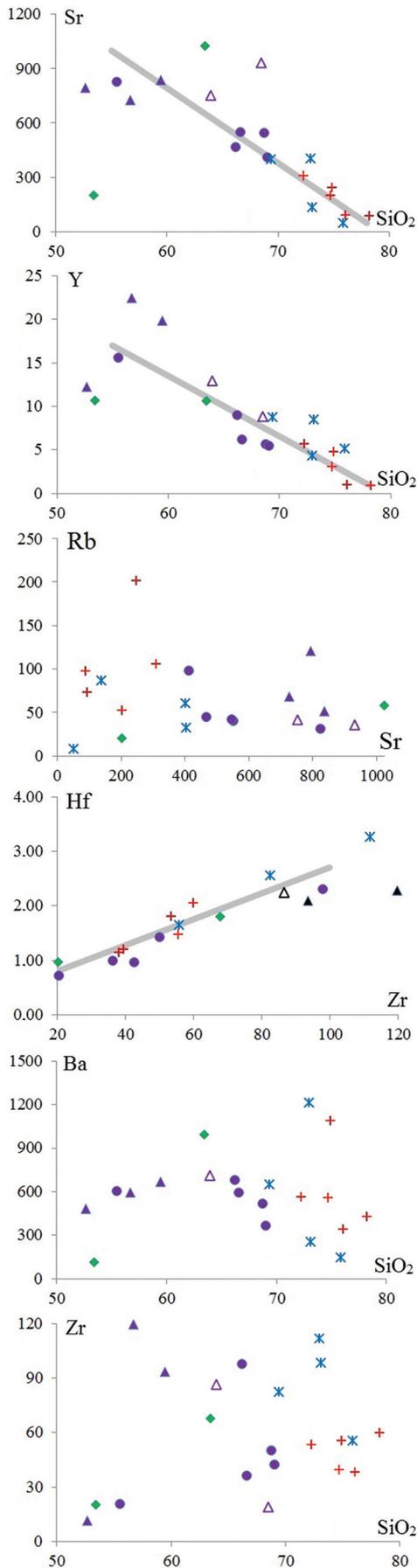


**Рис. 2.** Диаграмма Ab-Q-Or (CIPW мезонормы) для пород Каменского (1-4) и Адуйского (5, 6) массивов.

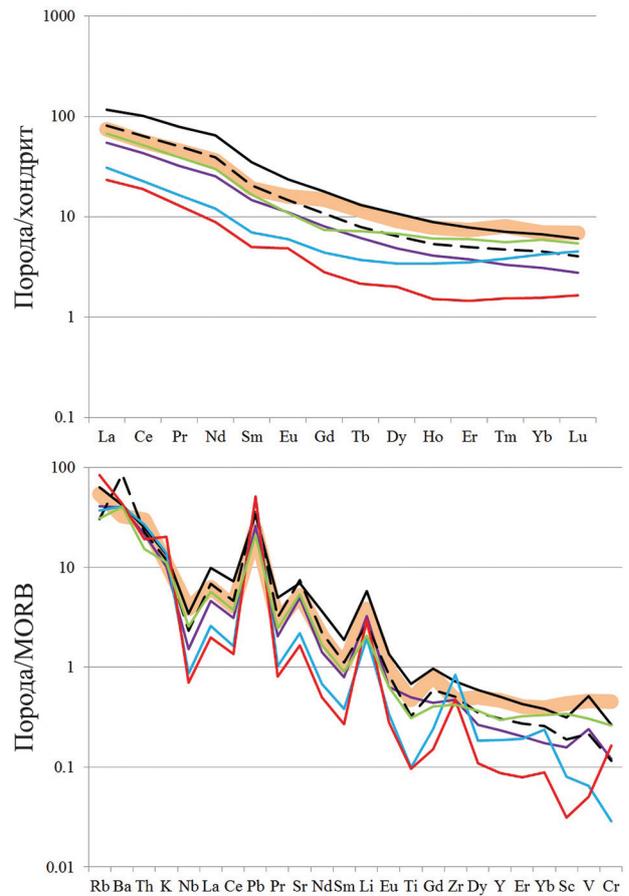
1 – валовый состав мигматитов, 2 – меланосома, 3 – лейкосома, 4 – граниты крупных тел, 5 – граниты (Ад-3 и Ад-4) из западной части массива, 6 – средний состав гранита. Тонкими линиями соединены составы меланосомы и лейкосомы. Серой стрелкой показан тренд эволюции анатектического расплава. Штриховые линии – кварц-полевошпатовая котектика при  $An/(An + Ab) = 0.4$  и  $0.2$  [Ферштатер, 1987].

корреляция содержания  $TiO_2$ ,  $FeO_{общ}$ ,  $CaO$ . Содержание  $K_2O$  примерно постоянно в интервале пород от главных разностей мигматитов и отчетливо возрастает в гранитных дифференциатах. В гранитных жилах мигматитов содержание  $K_2O$  заметно колеблется (см. рис. 1, табл. 1).

Содержания редких и редкоземельных элементов приведены в табл. 1 и на рис. 3. Большинство рассматриваемых элементов обнаруживают корреляцию с количеством кремнезема в породах, т. е. закономерно меняют концентрацию в ходе эволюции. При увеличении содержания кремнезема наблюдается снижение содержания  $Sr$ ,  $Y$ ,  $Li$ . Жильные граниты мигматитов характеризуются повышенным содержанием  $Y$ ,  $Zr$  и низким –  $Sr$ . Для всех пород Каменского массива характерен четкий положительный тренд  $Hf-Zr$ . Содержание  $Va$  не зави-



**Рис. 3.** Вариационные диаграммы Sr–SiO<sub>2</sub>, Ba–SiO<sub>2</sub>, Y–SiO<sub>2</sub>, Zr–SiO<sub>2</sub>, Rb–Sr, Li–SiO<sub>2</sub>, Hf–Zr.



**Рис. 4.** Распределение редких и редкоземельных элементов в Каменском массиве.

Фиолетовой линией показаны однородные мигматиты, черной – меланосома, черной штриховой – лейкосома, синей – граниты в мигматитах, красной – граниты, зеленой – дайки, оранжевой – средний состав пород Верхисетского массива.

сит от типа пород. На диаграмме Rb–Sr концентрация Sr возрастает от гранитов к мигматитам, при этом содержание Rb практически не меняется.

Тренды распределения редких и редкоземельных элементов, нормированные на хондрит, сходны во всех типах пород Каменского массива и близки трендам пород Верхисетского массива (рис. 4), ла-

**Таблица 2.** P-T параметры формирования пород Каменского массива

Геотермобарометр	Однородный мигматит (308)	Гранитные жилы в мигматитах (312)	Мигматизированная дайка диорита (430)
Pl-Amp [Ферштатер, 1990]	4.8–6.2 кбар	5.6–6.5 кбар	5.7–6.5 кбар
Amp [Schmidt, 1993]	5.0–6.8 кбар	5.1–5.7 кбар	5.4–5.9 кбар
Pl-Amp [Holland, Blundy, 1994]	4.6–6.3 кбар	5.0–5.7 кбар	5.4–5.9 кбар
Pl-Amp [Holland, Blundy, 1994]	702–722°C	672–681°C	672–676°C
Ti-Amp °C [Ottens, 1984]	644–710°C	620–649°C	643–661°C

теральным аналогом которого является Каменский [Рапопорт, Рудица, 2000]. Во всех породах массива отмечаются отрицательные Nb, Ti-аномалии, положительные аномалии Pb, Sr и Li (тренды, нормированы по MORB), что отражает, по-видимому, влияние флюида, рожденного в зоне субдукции. Также наблюдаются положительные аномалии HFSE (Zr и Yb) в гранитах, в других породах они слабые отрицательные. Породы Каменского массива в целом характеризуются особенностями распределения редких элементов, отражающими их надсубдукционную природу.

Мигматизация, анатексис и обособление гранитного расплава происходили при давлении 4.6–6.5 бар и температуре 620–723°C, судя по равновесию главных породообразующих минералов (табл. 2).

Наблюдения за геологическими взаимоотношениями пород, изучение химического состава пород и минералов, P-T условий образования, а также геохимических особенностей пород Каменского массива показывают, что он может быть использован в качестве эталона гранитного магмообразования в ювенильной коре Уральского орогена.

*Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-11805250029-6 государственного задания ИГТ УрО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бородин Н.С., Замятина М.Д., Ферштатер Г.Б.* Новые данные по петрологии и геохимии гранитоидов корневой зоны Адуйского массива // Ежегодник-2015. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2016. С. 80–85.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд. 2-е. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.
- Рапопорт М.С., Рудица Н.И.* Магматическая геология позднегерцинских орогенных гранитоидов Урала // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2000. С. 116–129.
- Ферштатер Г.Б.* Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 1987. 232 с.
- Ферштатер Г.Б.* Эмпирический плагиоклаз-роговообманковый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328.
- Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С., Холоднов В.В.* Мигматизация в Каменском тоналит-гранодиорит-гранитном массиве как один из источников пермских гранитов // Ежегодник-2007. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2008. С. 182–188.
- Holland T., Blundy J.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contrib. Mineral. Petrol. 1994. V. 116. P. 433–447.
- Ottens M.T.* The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites // Contrib. Mineral. Petrol. 1984. V. 86. P. 189–99.
- Schmidt M.W.* Phase relations and compositions in tonalite as a function of pressure: an experimental study at 650°C // Amer. J. Sci. 1993. V. 293. P. 1011–1060.