

УДК 552.323(571.645)

## ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЛЬДЕРЫ МЕДВЕЖЬЕЙ (о. ИТУРУП, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 1999 г. Б. Н. Пискунов, А. В. Рыбин, член-корреспондент РАН К. Ф. Сергеев

Поступило 13.08.98 г.

Заметным событием последних лет на Курильских островах явилось открытие в пределах кальдеры Медвежьей на о. Итуруп высокотемпературных фумарол и уникального современного минералообразования, приводящего к значительному скоплению редких металлов, в том числе рения [1–3]. Большинство опубликованных работ по этому объекту носят узконаправленный характер и посвящены анализу строения и морфологии вулкана, его возрастному расчленению, фумарольной деятельности и современному минералообразованию. Петрогеохимическая характеристика слагающих кальдеру продуктов вулканизма осталась за пределами внимания исследователей, а приводимые данные сводились, в основном, к повторению результатов работ 30-летней давности, указывающих на близость составов лав к типу вулкана Пеле [4]. В настоящей работе предпринята попытка восполнить этот пробел и дать по возможности детальную петрогеохимическую характеристику этой кальдеры, с целью установления в будущем на Курильской дуге аналогичных по составу вулканов. В основу работы положены оригинальные аналитические данные, полученные за период работ в 1994–1997 гг., а также литературные материалы.

Кальдера Медвежья представляет собой четвертичную полигенную вулканическую структуру, включающую ряд активных современных вулканов. В истории ее становления выделяются три стадии: а) докальдерная, связанная с образованием крупного щитового вулкана; б) кальдерообразования с извержением пемзово-пирокластического материала и внедрением риолит-дацитовых экструзий; в) посткальдерная с образованием внутренних стратовулканов Неизвестный, Медвежий, Средний, Кудрявый, Меньшой Брат и лавового поля на дне кальдеры. Формирование кальдеры относится к среднему плейстоцену, посткальдерных вулканов – к позднему плейстоце-

ну и голоцену [5]. В настоящее время активным является только вулкан Кудрявый, в привершинной части которого расположены два кратера с сольфатарно-фумарольными проявлениями (до 940°C), несущими редкометалльную нагрузку.

Для всего вулканического сооружения кальдеры соотношение базальтов, андезитов-базальтов, андезитов и дацитов с риолитами в первом приближении может быть выражено отношением 1 : 1.5 : 1.2 : 1. Оливин-пироксен-плаггиоклазовые и пироксен-плаггиоклазовые базальты характерны для нижних частей соммы, а также внутрикальдерных вулканов Медвежий, Меньшой Брат и Неизвестный. Пироксен-плаггиоклазовые (нередко с оливином) андезиты-базальты развиты в докальдерном щитовом вулкане, на внутрикальдерных конусах Кудрявый, Меньшой Брат и Средний, а также формируют лавовое поле на дне кальдеры. Двупироксен-плаггиоклазовые андезиты в разных количествах присутствуют как на сомме, так и на внутрикальдерных конусах, но более всего они представлены на вулканах Средний и Кудрявый. Двупироксеновые и гиперстеновые дациты и риолиты формируют экструзивные и субвулканические тела, а также стратифицированные пемзовые и пемзо-игнимбритовые отложения (см. табл. 1).

Таким образом, в истории вулканической деятельности района проявляются два цикла пульсации магмы: а) полный гомодромный, начинающийся внедрением базальтовой магмы в период формирования докальдерного щитового вулкана и заканчивающийся экструзиями дацит-риолитовой магмы в экструзивно-пирокластический этап кальдерообразования; б) неполный базальт-андезит-базальт-андезитовый в стадию образования посткальдерных стратовулканических построек.

При петрохимической характеристике мы используем диаграмму  $K_2O-SiO_2$ , на которую для сравнения нанесены вариационные кривые низкокалиевой (НК) и среднекалиевой (СК) серий курильских вулканов, рассчитанные по данным более чем 700 анализов [6]. На диаграмме показано положение вулканитов первого гомодромного цикла, включающего лавы соммы (рис. 1а, 2), и экструзивно-пирокластические образования (рис. 1а, 1).

*Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск*

**Таблица 1.** Средние составы вулканических комплексов кальдеры Медвежьей

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	56.26	70.57	74.55	53.92	59.20	56.58	58.95	56.58	52.70
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.63	0.43	0.67	0.56	0.69	0.80	0.97	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.22	13.99	12.12	18.69	17.75	17.62	19.82	16.49	16.07
Fe <sub>общ</sub>	9.61	3.93	3.24	9.80	7.66	8.43	5.84	8.42	9.45
MgO	3.85	0.85	0.58	4.62	3.50	4.67	3.14	5.31	8.55
CaO	8.25	3.18	2.43	9.39	7.93	8.78	7.55	8.57	9.89
Na <sub>2</sub> O	2.86	4.28	3.87	2.50	2.72	2.62	2.95	2.90	2.17
K <sub>2</sub> O	0.40	1.25	1.57	0.41	0.70	0.61	0.68	0.76	0.46
<i>n</i>	20	4	2	18	7	23	2	3	10
Sc	44.9	17.1	23.4	37.7	31.0	34.2	34.5	34.3	34.5
Rb	4.3	21.4	16.9	7.0	11.5	10.4	6.9	9.0	6.9
Sr	223.2	287.1	234.2	248.4	240.6	240.8	242.6	243.1	242.6
Y	20.7	33.7	33.7	22.7	26.6	26.6	21.9	24.4	21.9
Zr	34.4	87.8	89.7	48.5	74.6	60.3	32.1	53.9	32.1
Nb	1.3	1.6	0.2	0.9	0.3	1.1	0.9	0.8	0.9
Ba	87.3	370.9	250.6	122.2	180.4	174.7	116.4	148.4	116.4
La	1.94	7.27	5.73	2.99	3.94	3.95	3.22	3.53	3.22
Ce	5.01	17.96	13.54	7.66	10.88	10.03	8.46	9.26	8.46
Pr	0.96	2.31	2.28	1.27	1.46	1.56	1.38	1.42	1.38
Nd	5.20	12.61	11.49	6.72	8.56	8.28	7.09	7.66	7.09
Sm	1.92	3.52	3.35	2.23	2.64	2.62	2.32	2.45	2.32
Eu	0.69	1.27	0.95	0.76	0.81	0.86	0.75	0.80	0.75
Gd	2.45	3.68	4.00	2.70	3.17	3.08	2.88	2.96	2.88
Tb	0.49	0.71	0.76	0.53	0.59	0.60	0.53	0.56	0.53
Dy	3.18	4.60	4.85	3.61	3.81	3.96	3.58	3.74	3.58
Ho	0.72	0.99	1.09	0.81	0.82	0.88	0.80	0.83	0.80
Er	2.09	3.04	3.43	2.37	2.52	2.62	2.47	2.50	2.47
Tm	0.34	0.50	0.58	0.40	0.41	0.44	0.40	0.41	0.40
Yb	2.13	3.22	3.53	2.47	2.71	2.73	2.46	2.59	2.46
Lu	0.32	0.51	0.59	0.39	0.42	0.43	0.39	0.41	0.39
Hf	1.00	2.66	3.12	1.55	1.90	1.83	1.41	1.67	1.41
Ta	1.14	<0.1	0.03	0.17	0.08	0.45	0.06	0.19	0.06
Pb	2.3	14.2	9.9	17.3	12.7	12.2	5.2	11.8	5.2
Th	0.24	1.61	1.62	0.58	0.96	0.85	1.14	0.88	1.14
U	0.16	0.45	0.66	0.26	0.36	0.33	0.36	0.33	0.36
<i>n</i>	3	2	2	3	4	4	2	3	3

Примечание. 1 – сомма кальдеры Медвежьей; 2 – риодацитовый экструзивный купол вулк. Кудрявого; 3 – риодацитовый экструзивный купол вулк. Меньшой Брат; 4 – лавы вулк. Медвежьего, 5 – лавы вулк. Среднего; 6 – лавы вулк. Кудрявого; 7 – экструзивный купол в кратере вулк. Кудрявого; 8 – лавы вулк. Меньшой Брат; 9 – высокомагнезиальные лавы вулк. Меньшой Брат и Кудрявый. Анализы на петрогенные элементы выполнены рентгеноспектральным методом и методом “мокрой” химии в ИЭМ РАН, ИГЕМ РАН и в ИМГИГ ДВО РАН, на микрокомпоненты – в ИГ СО РАН (г. Иркутск) методом ICP-MS; *n* – число анализов.

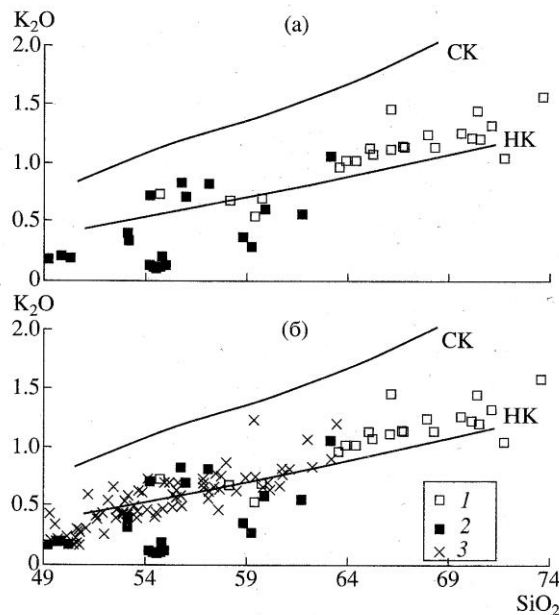


Рис. 1. Соотношение  $K_2O$ – $SiO_2$  в породах соммы и экструзивно-пирокластических образований (а), а также внутрикальдерных вулканов (б). Обозначения в тексте.

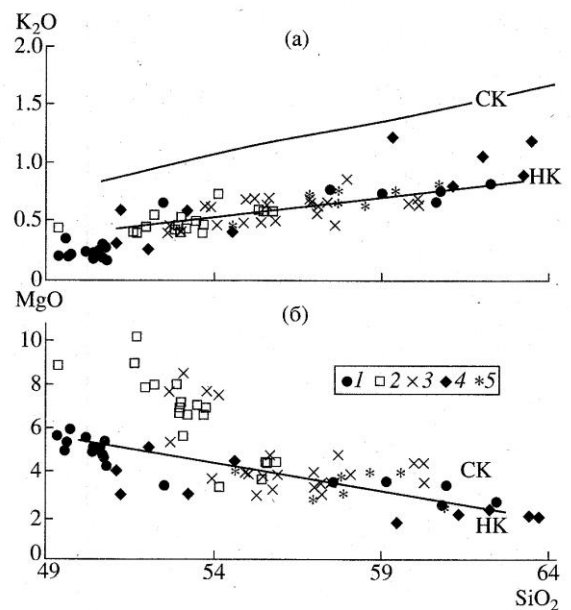


Рис. 2. Соотношение  $K_2O$  и  $MgO$  с  $SiO_2$  в лавах внутрикальдерных вулканов: 1 – вулк. Медвежий, 2 – вулк. Меньшой Брат, 3 – вулк. Кудрявый, 4 – вулк. Неизвестный, 5 – вулк. Средний.

Породы соммы варьируют от базальтов до дацитов при преобладании андезитов-базальтов и андезитов. Экструзивно-пирокластические образования представлены андезитами, дацитами и риолитами и лишь в одном случае экструзивный купол имеет андезитово-базальтовый состав.

Вся совокупность составов проектируется вдоль линии НК-серии, отражая низкое содержание  $K_2O$ , и в области основных–средних пород локализуется несколько ниже, а в поле кислых – выше вариационной кривой. В этом отношении породы кальдеры сходны с известными лавами дуг Идзу-Бонинской и Тонга, отличаясь от них лишь пониженной концентрацией общего железа. Анализ содержаний других породообразующих оксидов показывает, что породы первого цикла представляют типичные для Курильской дуги островодужные вулканические продукты, а точки их составов без исключения локализируются вблизи соответствующих средних вариационных кривых для каждого оксида [6, 7]. Они характеризуются в первую очередь преобладанием натрия среди щелочей, повышенным содержанием  $Al_2O_3$  и  $CaO$ . Оксид магния и суммарное железо также находятся на уровне содержаний, характерных для НК- и СК-серий. Для  $CaO$  и общего  $Fe$  отмечается небольшое снижение содержаний в кислых породах по сравнению с типовыми кривыми для курильских вулканов.

На рис. 1а обращает на себя внимание широкий разброс составов в области андезитов-базальтов и базальтов и присутствие пород с предельно низким содержанием  $K_2O$ . Относительно повышенное содержание в последних  $Al_2O_3$  и  $CaO$  позволяет предполагать их происхождение в результате кристаллизационной дифференциации с обогащением расплава плагиоклазом – явление, широко распространенное в лавах соммы [4, 5]. Можно допустить, что близкие по кремнекислотности относительно высококальциевые лавы соммы на рис. 1а, характеризующиеся пониженными содержаниями  $Al_2O_3$  и  $CaO$ , представляют компонентарную составляющую обогащенным основным плагиоклазом низкокальциевым породам.

Продукты внутрикальдерного вулканизма (рис. 1б, 3) в петрохимическом отношении аналогичны породам гомодромного цикла, и составляют с ними единый вариационный ряд. В области основных составов они также проектируются несколько ниже кривой НК-серии, а в поле кислых вместе с экструзивами стадии кальдерообразования – выше ее. В отличие от пород соммы у них не столь ярко выражены процессы дифференциации с обогащением составов плагиоклазом.

Наиболее низким содержанием калия отличаются базальты внутрикальдерного вулкана Медвежий, хотя его андезиты полностью проектируются на кривую НК-серии (рис. 2а). Компактная группа андезитов-базальтов и андезитов вулкана

Кудрявый также локализуется с небольшим разбросом вблизи вариационной кривой НК-серии. Последнее относится и к базальтам, андезито-базальтам и андезитам вулканов Меньшой Брат и Средний. Вулкан Неизвестный представлен двумя группами пород – базальтами и андезито-базальтами, с одной стороны, и андезитами и игнибритами дацитового состава, с другой. Вторая группа характеризуется относительно повышенным содержанием  $K_2O$  и по его содержанию занимает промежуточное положение между кривыми НК- и СК-серий. По всем остальным оксидам, кроме  $MgO$ , продукты внутрикальдерного вулканизма полностью соответствуют составам НК-серии и с различными разбросами проектируются вдоль типовых кривых соответствующих оксидов.

При исследовании состава лав кальдеры Медвежьей выявлены признаки кристаллизационной дифференциации, связанные с обогащением темноцветными минералами. При макро- и микроскопическом изучении лав внутрикальдерных вулканов Кудрявый, Меньшой Брат и лавового поля на дне кальдеры обращает на себя внимание пересыщенность многих базальтов и андезито-базальтов клинопироксеном и оливином. На диаграмме  $MgO-SiO_2$  (рис. 2б) эти породы образуют обособленную группу с 1.5–2-кратным обогащением  $MgO$  по сравнению с типичными составами НК- и СК-серий. У них значительно понижено содержание  $Al_2O_3$  и  $Na_2O$ , что свидетельствует об уменьшении количества плагиоклаза за счет темноцветных минералов. Однако содержание  $CaO$  несколько превышает среднее значение НК-серии, что объясняется скоплением во вкрапленниках наряду с оливином и моноклинного пироксена.

По концентрациям редкоземельных элементов выделяются три типа распределения РЗЭ (рис. 3). Первый, относительно хорошо дифференцированный ( $La/Yb_n = 1.3-1.5$ ), характерен для субвулканических тел кислого состава, но при сходных концентрациях РЗЭ они различаются по европиевому критерию; так, для риодацитов вулкана Кудрявый характерно отсутствие Eu-аномалии, а в риодацитах субвулканического тела Меньшой Брат она достигает 0.8. Второй тип – близкий к “плоскому” с превышением хондритового уровня в 7–12 раз ( $Eu/Eu^* = 0.8-1$ ;  $(La/Yb)_n = 0.7-1.0$ ), характерен для средне-основных пород внутрикальдерных вулканов. Среди них выделяются экструзивные андезиты прикратерной части вулкана Кудрявый, в которых соотношение легких и тяжелых редких земель достигает 1.3. Третий тип, сходный с распределением РЗЭ в океанических базальтах, выявлен в породах соммы кальдеры Медвежьей. Для него характерна наибольшая деплетированность легкими РЗЭ ( $(La/Yb)_n = 0.6-0.7$ ) и отсутствие европиевой аномалии.

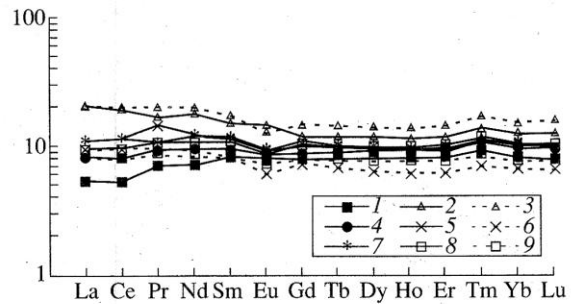


Рис. 3. Распределение редкоземельных элементов в породах кальдеры Медвежьей. 1 – сомма кальдеры Медвежьей; 2 – риодацитовый экструзивный купол вулк. Кудрявого; 3 – риодацитовый экструзивный купол вулк. Меньшой Брат; 4 – лавы вулк. Медвежьего; 5 – лавы вулк. Среднего; 6 – лавы вулк. Кудрявого; 7 – экструзивный купол в кратере вулк. Кудрявого; 8 – лавы вулк. Меньшой Брат; 9 – высокомагнезиальные лавы вулк. Меньшой Брат и Кудрявого. Нормировано по хондриту [8].

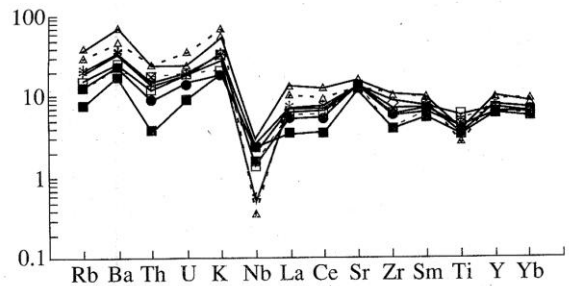


Рис. 4. Мультиэлементные диаграммы для пород кальдеры Медвежьей. Обозначения те же, что и рис. 3. Нормировано по недеплетированной мантии [8].

На мультиэлементных диаграммах (рис. 4), составы пород кальдеры, нормированные по недеплетированной мантии [8], имеют сходные структуры графиков с четко выраженными максимумами по Ba-, K-, Zr-минимумам по Th, Nb, Ti, что характерно, для пород островных дуг. По относительным концентрациям литофильных элементов и их соотношениям породы кальдеры Медвежьей относятся к типичной низкокальевой серии Курильской островной дуги.

Таким образом, выполненное исследование позволяет выделить следующие характерные особенности состава вулканических пород кальдеры Медвежьей: а) широкие вариации составов от базальтов до риодитов со всеми промежуточными разновидностями; б) общий низкий уровень содержания  $K_2O$ , РЗЭ и литофильных элементов, соответствующий составу НК-серии; в) широкое развитие пород – продуктов кристаллизационной дифференциации с

обогащением, с одной стороны, плагиоклазом, с другой, – клинопироксеном и оливином. По этим признакам, включающим тип строения и состав, в южной половине Курильской дуги близкими к кальдере Медвежьей являются кальдерные вулканы Менделеева и Головнина на о. Кунашире, Берутарубе и Хитокапу на о. Итуруп, Заварицкого и Броутона на о. Симушир [6, 7], что позволяет рекомендовать их в качестве объектов для более детальных вулканологических исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко С.И., Таран Ю.А., Коржинский М.А. и др. // ДАН. 1992. Т. 325. № 4. С. 823–828.
2. Коржинский М.А., Ткаченко С.И., Романенко И.М. и др. // ДАН. 1993. Т. 330. № 5. С. 627–629.
3. Знаменский В.С., Лапутина И.П., Таран Ю.А., Якушев А.И. // ДАН. 1993. Т. 333. № 2. С. 227–230.
4. Остапенко В.Ф. Изв. Сахалинского отдела географ. о-ва СССР. Южно-Сахалинск, 1970. В. 1. С. 99–108.
5. Ермаков В.А., Семакин В.П. // ДАН. 1996. Т. 351. № 3. С. 361–365.
6. Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 230 с.
7. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 239 с.
8. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford; Blackwell, 1985. 312 p.