

Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова)

© А. В. Рыбин*¹, М. В. Чибисова¹, С. З. Смирнов²,
Ю. А. Мартынов³, А. В. Дегтерев¹

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

³Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: a.rybin@imgg.ru

Приводятся результаты петролого-геохимических и изотопных исследований вулканических комплексов кальдеры Медвежья, расположенной в северо-восточной части о. Итуруп (Курильские острова). Длительность и полицикличность формирования кальдеры обусловили широкое разнообразие разнофациальных вулканитов по составу – от базальтов до риолитов. По относительным концентрациям породообразующих окислов, литофильных, высокозарядных, редкоземельных элементов и их соотношениям, породы различных вулканических комплексов кальдеры Медвежья принадлежат к низкокальциевому типу известково-щелочной серии, типичной для фронтальной зоны Курильской островной дуги. Изотопные данные по Nd и Sr свидетельствуют о генетическом родстве вулканитов кальдеры и происхождении их из единого магматического источника. Петрохимическая однородность нарушается появлением в позднем голоцене магнезиальных базальтов, нехарактерных для фронтальной зоны Курильских островов.

Ключевые слова: Курильские острова, кальдера, вулканические комплексы, петрология, геохимия, изотопия Nd и Sr.

Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands)

Aleksander V. Rybin*¹, Marina V. Chibisova¹, Sergey Z. Smirnov²,
Yuriy A. Martynov³, Artem V. Degterev¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

*E-mail: a.rybin@imgg.ru

The results of petrology-geochemical and isotope studies of volcanic complexes of the Medvezhya caldera located in the northeast part of Iturup Island (Kuril Islands) have been presented. The duration and the polycyclic character of the caldera formation led to a wide variety of different-facies volcanites in composition from basalt to rhyolite. According to the relative concentrations of rock-forming oxides, lithophilic, highly charged, rare-earth elements and their ratios, rocks of various volcanic complexes of the Caldera Medvezhya belong to the low-potassium type of calc-alkaline series typical for the frontal zone of the Kuril Island Arc. Isotopic data on Nd and Sr indicate the genetic affinity of caldera volcanites and their origin from a single magmatic source. Petrochemical homogeneity is disturbed by the appearance of magnesian basalts uncharacteristic for the frontal zone of the Kuril Islands in the Late Holocene.

Keywords: the Kuril Islands, caldera, volcanic complexes, petrology, geochemistry, Nd and Sr isotopy.

Введение

Кальдера Медвежья расположена в северо-восточной части о. Итуруп, это четвертичная полигенная вулканотектоническая структура, которая прошла в своем развитии длительные и сложные этапы формирования. В настоящее время она является самой крупной кальдерой на Курильских островах, ее размеры достигают около 6 км в диаметре по внутренней бровке склона и 12 км по внешнему склону. В истории формирования кальдеры выделяются три основные стадии вулканической активности: докальдерная, синкальдерная и посткальдерная. Докальдерная связана с образованием крупного щитового вулкана (0.48 млн лет) и представлена лавами, редко туфами средне-основного состава. Синкальдерная (моложе 0.41 млн лет) включает эффузивно-пирокластическую, экструзивно-субвулканическую и эксплозивно-осадочную фации. Посткальдерная связана с формированием голоценовых внутрикальдерных стратовулканов Медвежий, Средний, Кудрявый, Меньший Брат, Коротышка, Аме-

ба и др. [Ермаков, Семакин, 1996; Остапенко, 1969; Пискунов и др., 1999; Рыбин и др., 2000] (рис. 1). В настоящее время активным является только влк. Кудрявый, в привершинной части которого расположены высокотемпературные фумарольные выходы, несущие редкометалльную минерализацию.

В южной части п-ова Медвежий в фундаменте кальдеры залегают шаровые лавы, обломочно-подушечные брекчии, аквагенные туфы базальтов и андезибазальтов, прорванные дайками и субвулканическими телами андезибазальтов и андезитов (1.25 млн лет). В северной и северо-восточной части породы фундамента представлены вулканогенно-осадочной толщей – переслаивающимися песчаниками, алевролитами и туфами кислого состава (4.9 млн лет) [Рыбин и др., 2000].

Материалы и методы исследований

Материал, представленный в статье, получен сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН в результате многолетних научно-исследовательских работ в северной части о. Итуруп. В работе

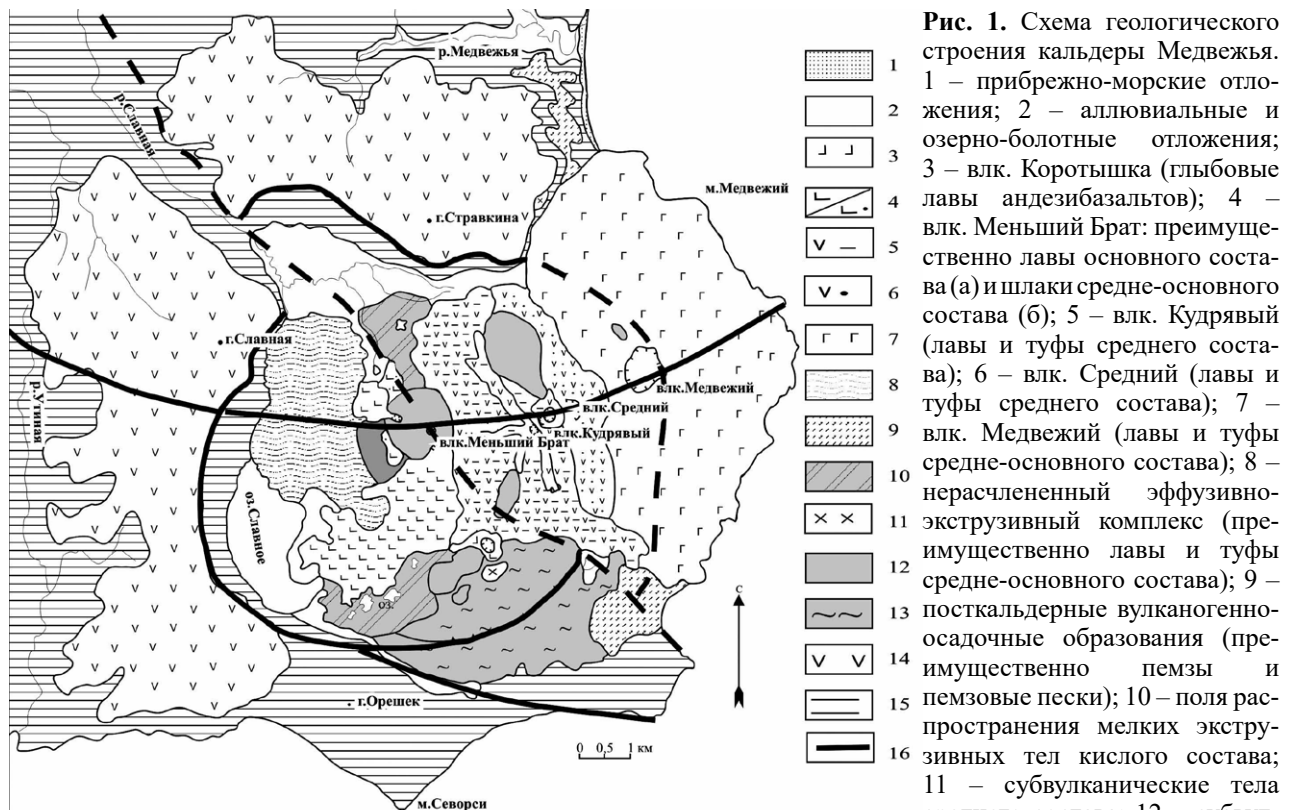


Рис. 1. Схема геологического строения кальдеры Медвежья. 1 – прибрежно-морские отложения; 2 – аллювиальные и озерно-болотные отложения; 3 – влк. Коротышка (глыбовые лавы андезибазальтов); 4 – влк. Меньший Брат: преимущественно лавы основного состава (а) и шлаки средне-основного состава (б); 5 – влк. Кудрявый (лавы и туфы среднего состава); 6 – влк. Средний (лавы и туфы среднего состава); 7 – влк. Медвежий (лавы и туфы средне-основного состава); 8 – нерасчлененный эффузивно-экструзивный комплекс (преимущественно лавы и туфы средне-основного состава); 9 – посткальдерные вулканогенно-осадочные образования (преимущественно пемзы и пемзовые пески); 10 – поля распространения мелких экструзивных тел кислого состава; 11 – субвулканические тела основного состава; 12 – субвулканические тела кислого состава; 13 – фрагмент синкальдерного кратера (игнимбриты; лавы и туфы кислого состава); 14 – сомма кальдеры Медвежья (преимущественно лавы средне-основного состава, реже туфы); 15 – фундамент кальдеры Медвежья: пемзовые пески, туфы кислого состава, песчаники, алевролиты в северной и северо-восточной и гиалокластиты, лавы в южной части кальдеры; 16 – основные разломы.

кальдерные тела кислого состава; 13 – фрагмент синкальдерного кратера (игнимбриты; лавы и туфы кислого состава); 14 – сомма кальдеры Медвежья (преимущественно лавы средне-основного состава, реже туфы); 15 – фундамент кальдеры Медвежья: пемзовые пески, туфы кислого состава, песчаники, алевролиты в северной и северо-восточной и гиалокластиты, лавы в южной части кальдеры; 16 – основные разломы.

использована выборка из 47 химических анализов, которые равномерно характеризуют фундамент и вулканические комплексы кальдеры Медвежья. Кроме того, для изотопно-геохимических исследований привлечены данные по кордиеритовым роговикам, которые были собраны на склонах влк. Кудрявый. Анализы выполнены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Породообразующие окислы определялись рентгено-флюоресцентным методом (FeO – методом мокрой химии); Cu, Zn, Ge, Mo, Ag, Cd, Sn, W – спектральным количественным; остальные элементы – ICP-MS методом.

Изотопные измерения (12 проб) выполнены на масс-спектрометре VG Sector 54 (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН) в мультиколлекторном режиме. Погрешность первичного изотопного состава Sr не превышает 0.002 %, состава Nd – 0.001 %.

Петрохимическая характеристика вулканических комплексов

Для петрохимической характеристики пород вулканических комплексов кальдеры Медвежья нами использована диаграмма K_2O-SiO_2 , на которую для сравнения нанесены вариационные кривые низкокальевой (НК) и среднекальевой (СК) серий курильских вулканов, рассчитанные по данным более чем 700 анализов [Пискунов, 1987] (рис. 2).

Совокупность составов вулканитов кальдеры Медвежья располагается 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.

Продукты *внутрикальдерного вулканизма* (рис. 2) в петрохимическом отношении аналогичны породам фундамента и синкальдерного комплекса и составляют с ними единый вариационный ряд. В области основных составов они также проектируются несколько ниже кривой НК-серии, а в поле кислых пород выше ее.

Наиболее низкие содержания калия характерны для базальтов внутрикальдерного влк. Медвежий, хотя его андезиты полностью проектируются на кривую НК-серии. Ком-

пактная группа андезибазальтов и андезитов влк. Кудрявый также локализуется с небольшим разбросом вблизи вариационной кривой НК-серии. Аналогичную картину можно наблюдать по отношению к базальтам, андезибазальтам и андезитам вулканов Меньший Брат и Средний. Влк. Неизвестный представлен двумя группами пород – базальтами и андезибазальтами, с одной стороны, и андезитами и игнимбритами дацитового состава, с другой. Вторая группа характеризуется относительно повышенным содержанием K_2O и по его содержанию занимает промежуточное положение между НК- и СК-сериями. По всем остальным оксидам, кроме MgO, продукты внутрикальдерного вулканизма полностью соответствуют составам НК-серии и с различными разбросами проектируются вдоль типовых кривых соответствующих оксидов.

На диаграмме MgO–SiO₂ (рис. 2) породы влк. Меньший Брат образуют обособленную группу с 1.5–2-кратным обогащением MgO по сравнению с типичными составами НК- и СК-серий вулканитов Курил. У них значительно понижено содержание Al₂O₃ и Na₂O, что свидетельствует об уменьшении количества плагиоклаза за счет темноцветных минералов. Однако содержание CaO несколько превышает среднее значение НК-серии, что объясняется присутствием во вкрапленниках наряду с оливином моноклинного пироксена. Магнезиальные базальты – довольно редкое явление на Курильских островах. Кроме того, изученные нами породы существенно отличаются по своему химическому составу от магнезиальных базальтов вулканов Эбеко и Ветровой (о. Парамушир), в частности повышенным содержанием MgO (8–9 масс. %), SiO₂, TiO₂, Na₂O при относительно низких концентрациях CaO, Al₂O₃ и, в меньшей мере, K₂O. По сравнению с лавами влк. Алайд (о. Атласова) [Фролова и др., 1985], который расположен в тыловой зоне Курильской островной дуги, породы влк. Меньший Брат имеют повышенное содержание SiO₂, TiO₂ и низкое – Na₂O, Al₂O₃, K₂O.

Другой отличительной особенностью магнезиальных лав влк. Меньший Брат является наличие включений хромпикотита (Cr₂O₃ до 48 масс. %) в оливинах (Fo₈₉) [Чибисова и др., 2009]. Наиболее ранними вкрапленни-

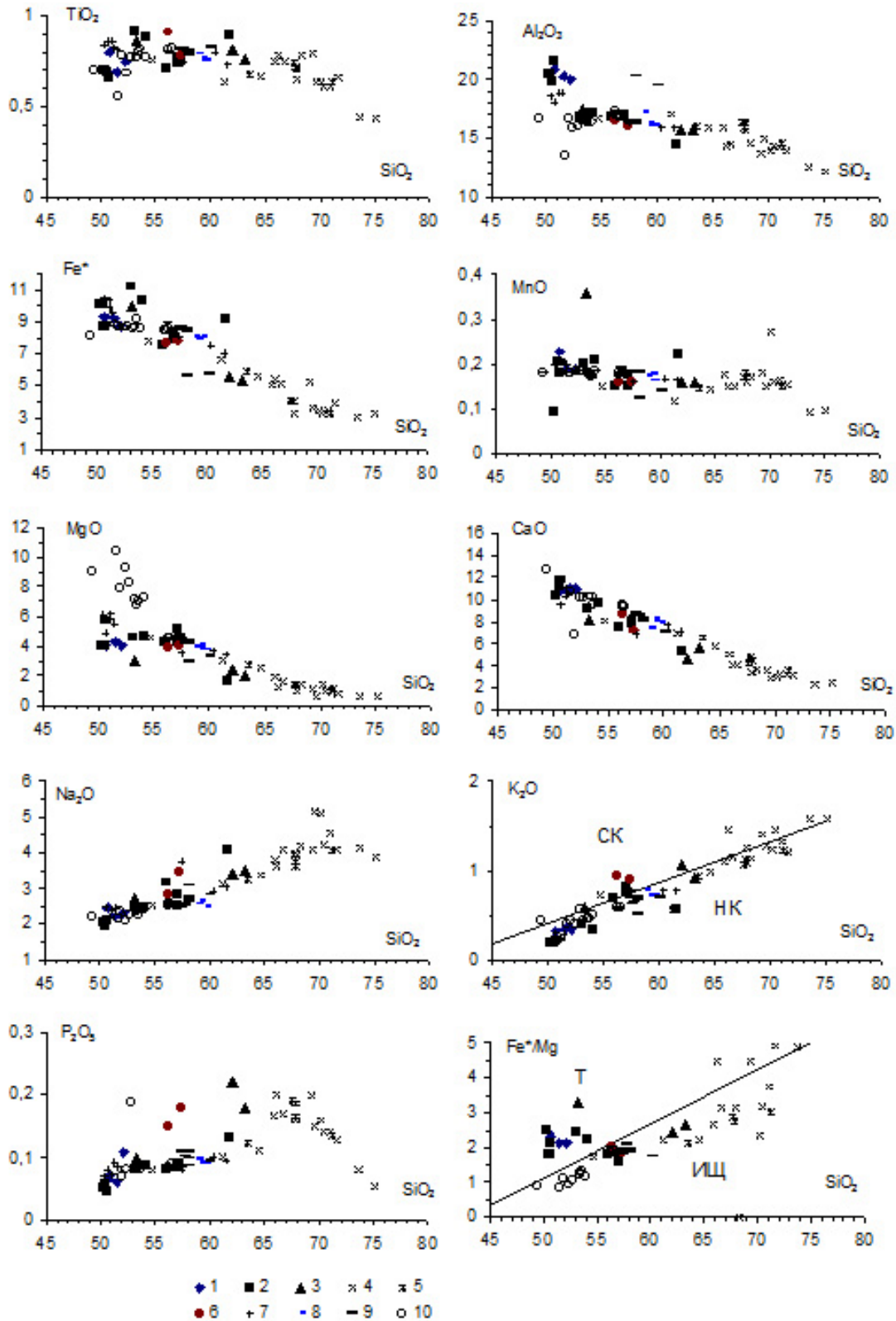


Рис. 2. Соотношение SiO_2 и петрогенных окислов в породах кальдеры Медвежья. 1 – фундамент кальдеры Медвежья (базальты), 2 – сомма кальдеры Медвежья (базальты, андезибазальты), 3 – конус Неизвестный (игнимбри-ты), 4 – экструзивные купола (андезиты, дациты, риодациты), 5 – синкальдерные пемзы (дациты, риодациты), 6 – посткальдерный эффузивный купол (нерасчлененные базальты, андезибазальты), 7 – влк. Медвежий (базальты, андезибазальты), 8 – влк. Средний и 9 – влк. Кудрявый (андезибазальты, андезиты), 10 – влк. Меньший Брат (базальты, андезибазальты). На диаграммах $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ и $\text{Fe}^*\text{Mg}-\text{SiO}_2$ линиями показаны границы раздела среднекалевой и низкокалевой и толеитовой и известково-щелочной серий.

ками в базальтах и андезибазальтах являются оливины, состав которых (88–90 % и даже до 92 % форстерита) близок к составу мантийного оливина [Коваленко и др., 2004]. Это дает основание говорить о примитивной природе первичных магм. В то же время низкая магнетиальность клинопироксена (Kmg_{80}), обратная зональность клино- и ортопироксена (рост магнетиальности к краям кристаллов), наличие симплектитовой пироксеновой каймы у оливина свидетельствуют о широком распространении процессов смешения.

Вариации концентраций микроэлементов в вулканиках кальдеры Медвежья показаны на рис. 3. Для Rb, Ba, Zr, Hf, Y, Th, U устанавливается значимая положительная корреляция с кремнекислотностью изученных пород. Исключение составляют базальты влк. Медвежий, которые существенно обогащены вышеперечисленными элементами. Ксенолиты кордиеритовых роговиков из лав и пирокластики влк. Кудрявый, напротив, обеднены этими элементами, кроме Rb, концентрации которого в них максимальны. Вариации Nb менее закономерны. Им обогащен ряд проб докальдерного комплекса, влк. Кудрявый и экструзивных куполов.

Согласно имеющимся геохимическим данным, для пород различных комплексов кальдеры Медвежья характерны четыре типа распределения редкоземельных элементов (REE) (рис. 4).

Первый тип распределения содержаний REE свойственен базальтам, реже андезибазальтам. В целом их спектры распределения лантаноидов демонстрируют довольно «плоскую» форму (рис. 4а) с некоторым дефицитом легких элементов относительно средних и тяжелых ($La/Yb = 0.6–1.0$). При этом базальты влк. Медвежий имеют положительную европиевую аномалию (Eu/Eu_n^* до 1.2), тогда как магнетиальные базальты влк. Меньший Брат – отрицательную ($Eu/Eu_n^* = 0.8$). В породах докальдерного комплекса и фундамента Eu-аномалия отсутствует.

Второй тип характерен для лав андезибазальтов и андезитов внутрикальдерных стратовулканов, спектры распределения REE которых превышают хондритовый уровень в 10–20 раз, при $La/Yb = 0.9–1.3$. Наиболее

высокие La/Yb отношения характерны для пород экструзивного («горячего») купола влк. Кудрявый, где дефицит тяжелых REE, видимо, обусловлен взаимодействием расплава с высокоглиноземистыми осадочными породами, обедненными этими элементами. Для этих пород характерна также хорошо выраженная отрицательная Eu-аномалия.

Наиболее дифференцированные спектры REE третьего типа ($La/Yb = 1.1–1.5$) характерны для синкальдерного дацит-риодацитового экструзивного комплекса. Среди них выделяются гиперстенные риодациты, залегающие в основании влк. Кудрявый (с отсутствующей или слабой положительной Eu-аномалией), и двупироксеновые дациты-риодациты района влк. Меньший Брат (с хорошо проявленной отрицательной Eu-аномалией).

Четвертый тип распределения REE характерен для включений кислого кордиеритового стекла, которые имеют весьма низкий уровень содержания лантаноидов, за исключением La и Ce, и, как результат этого, им присущ субгоризонтальный спектр распределения концентраций REE со слабым обогащением легкими лантаноидами ($La/Yb = 1.2$).

Распределение F, Cl, B, Au изучалось в основном в базитовых лавах влк. Кудрявый, меньше – в лавах влк. Меньший Брат, влк. Средний и в кордиеритовых стеклах. Максимальные концентрации фтора (до 0.03 %) и хлора (до 0.07 %) присущи лавам влк. Кудрявый, при вариациях Cl/F от 1 до 12 (среднее 6–10). В целом это характерно для пород низкокальциевой серии островных дуг. Средние содержания бора в породах кальдеры – 10–20 г/т; повышенные значения (до 150–200 г/т) отмечаются в ряде проб влк. Кудрявый. Содержания золота в породах кальдеры Медвежья варьируют в интервале 0.0001–0.1 г/т; максимумы (0.001–0.1 г/т) присущи лавам влк. Кудрявый.

По рудным элементам W, Ge, Zn, Cu, Mo, Cd, Sn выполнено ограниченное количество анализов, тем не менее оно выявило основные тенденции распределения этих элементов. Максимумы Ge, Cu, Zn присущи основным и средним породам; W, Ag, Sn – преимущественно кислым; содержания Cd и Mo не обнаруживают корреляции с кремнекислотностью пород.

На мультиэлементных диаграммах составы пород кальдеры, нормированные к недеpleted мантии [Taylor, McLennan, 1985], имеют сходные формы графиков распределения элементов с четко выраженными максимумами по Ba и K и минимумами по Th, Nb, Ti, что характерно для пород островных дуг (рис. 5). По относительным концентрациям элементов и их соотношениям породы кальдеры Медвежья относятся к типичной низкокислотной серии Курильской островной дуги.

Изотопы стронция и неодима

Изотопный состав Sr и Nd в вулканических комплексах кальдеры Медвежья изучен на материале, подобранном таким образом, чтобы он представлял все вулканические комплексы. Изотопные характеристики Nd и Sr занимают на рис. 6 довольно компактную область и располагаются вблизи поля «мантийной корреляции». Подобное расположение фигуративных точек свидетельствует о генетическом родстве вулканитов кальдеры Мед-

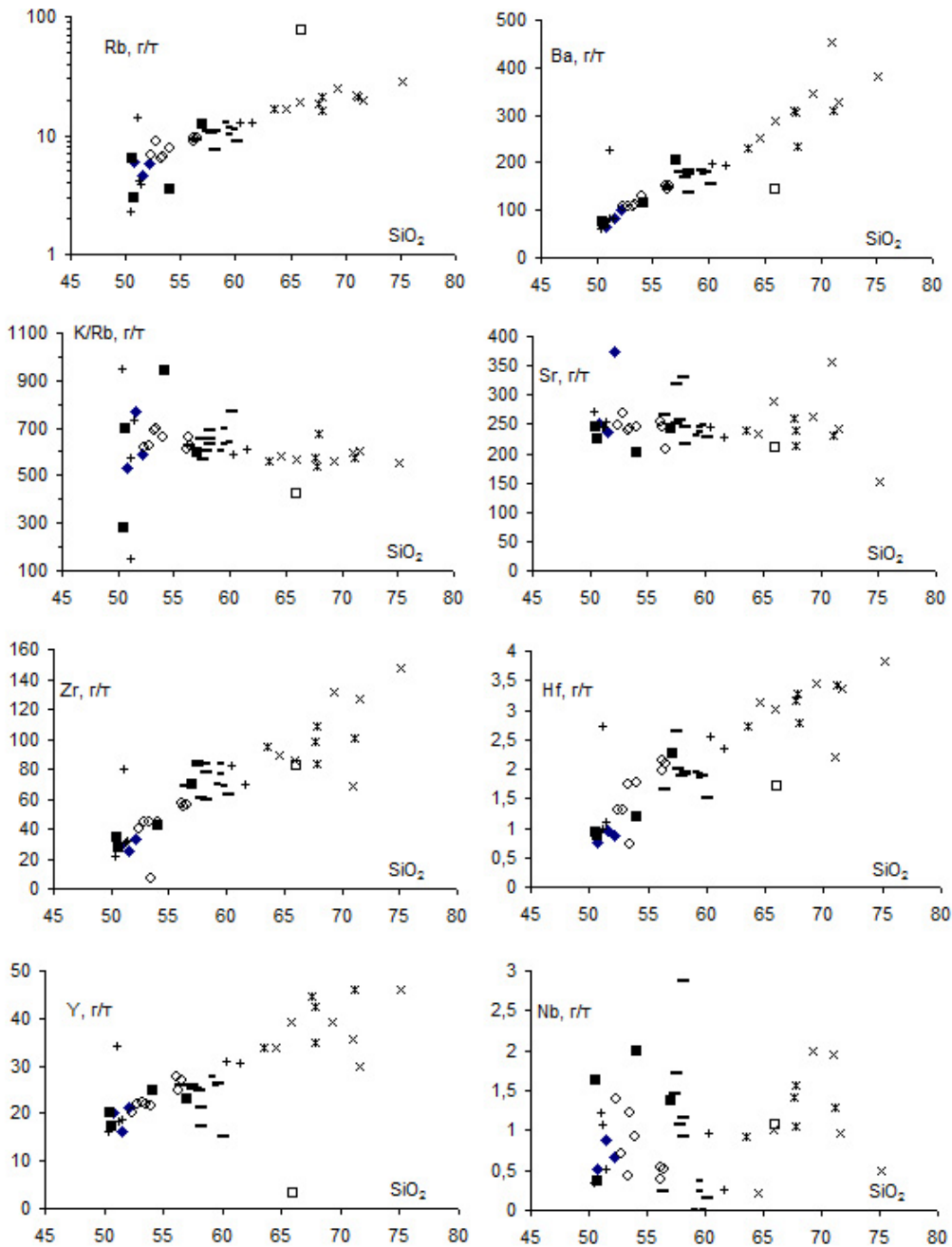


Рис. 3. Соотношение SiO_2 с литофильными и высокозарядными элементами в породах кальдеры Медвежья. Усл. обозначения см. на рис. 2.

вежья и происхождении их из единого магматического источника. На фоне близкого к однородному распределения удается выделить весьма важные закономерности генезиса магм, сформировавших вулканические комплексы.

1. Соотношение изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ варьирует в пределах 0.70322–0.70346. Максимальные значения присущи породам фундамента, минимальные – лавам последнего извержения влк. Кудрявый. Соотношение изотопов $^{143}\text{Nd}/^{147}\text{Nd}$ варьирует от 0.513064 до 0.513134. Максимальные значения присущи базальтам докальдерного комплекса соммы; минимальные – риодацитам синкальдерного комплекса.

2. Не выражена зависимость вариаций изотопов Sr и Nd от кремнекислотности пород (рис. 6 Г, Е), что свидетельствует об общности условий магмообразования в ряду базальт–риолит и едином источнике магматических расплавов.

3. По средним составам выявляется прямая корреляция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ изотопных отношений и возраста вулканических комплексов (рис. 6А), независимо от кремнекислотности пород.

4. Включения кордиеритового стекла в лавах влк. Кудрявый имеют изотопные характеристики, близкие к таковым для вмещающих лав. Предполагаемая контаминация лав кальдеры материалом коры (о которой свидетель-

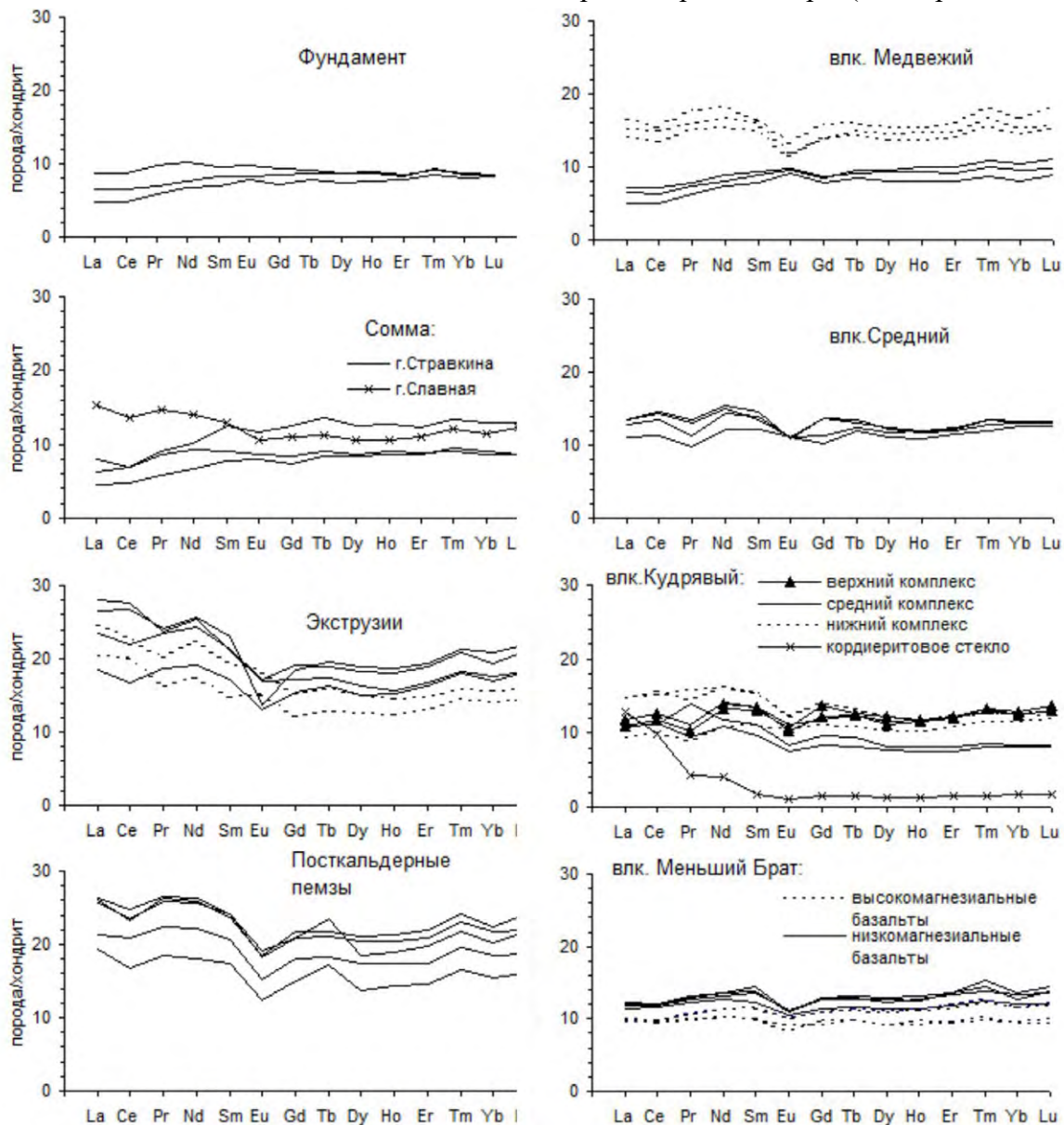


Рис. 4. Содержания редкоземельных элементов в породах кальдеры Медвежья, нормализованные к хондриту [Sun, McDonough, 1989].

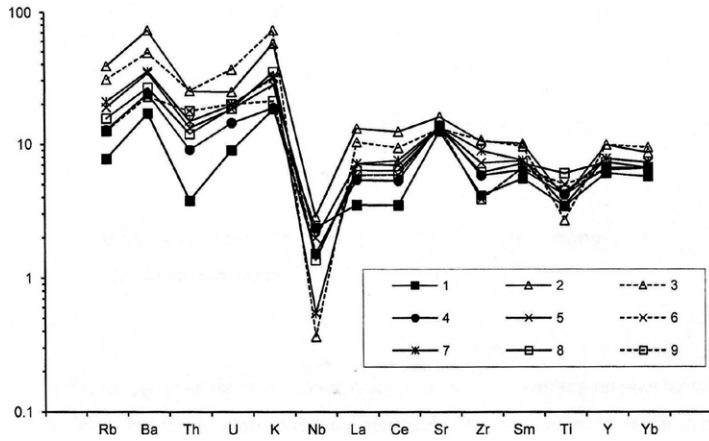


Рис. 5. Мультиэлементные диаграммы для пород кальдеры Медвежья. 1 – докальдерный комплекс, 2 – риодацитовый экструзивный купол влк. Кудрявый, 3 – риодацитовый экструзивный купол влк. Меньший Брат, 4 – лавы влк. Медвежий, 5 – лавы влк. Средний, 6 – лавы влк. Кудрявый, 7 – экструзивный купол в кратере влк. Кудрявый, 8 – лавы влк. Меньший Брат, 9 – высокомагнетизальные лавы вулканов Меньший Брат и Кудрявый. Нормировано по недеPLETED мантии [Taylor, McLennan, 1985].

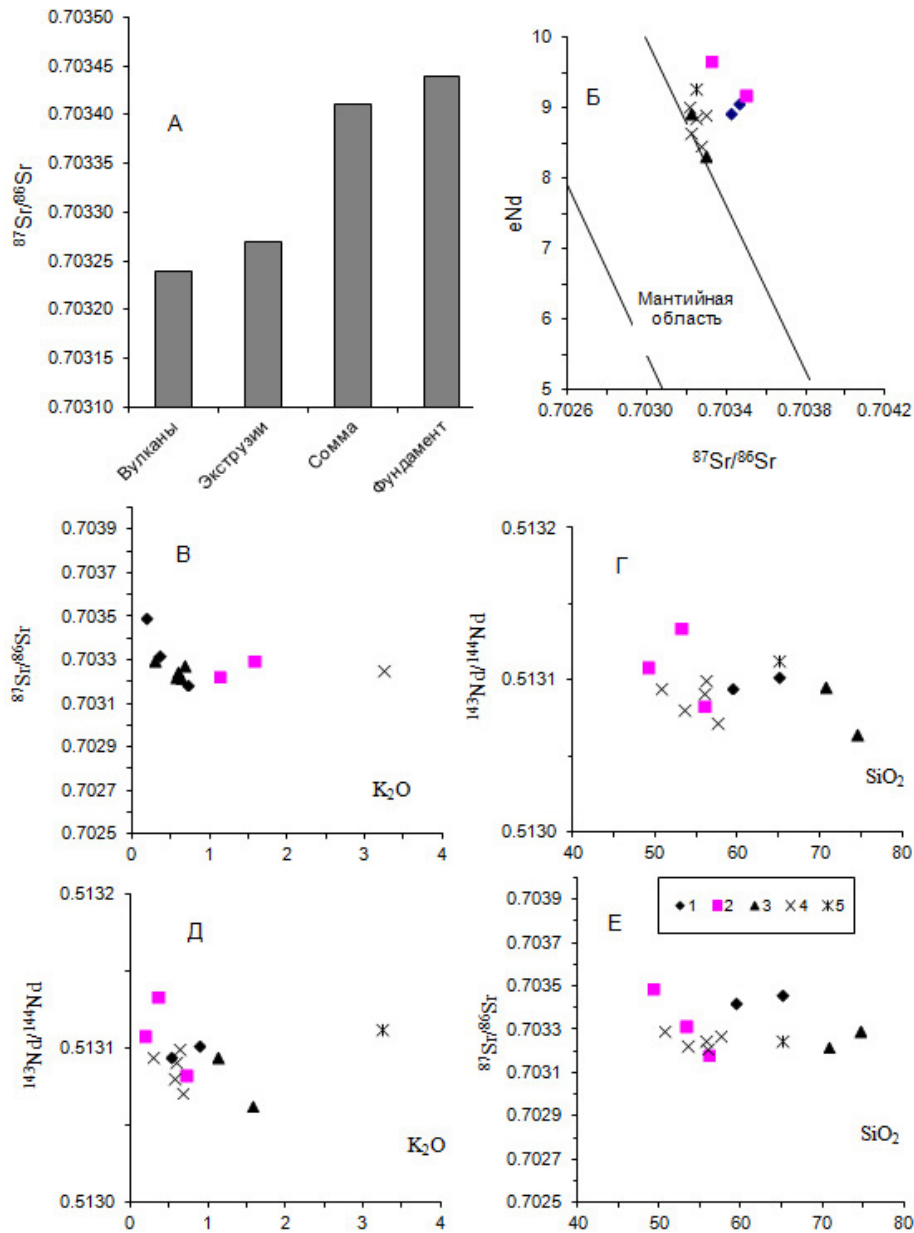


Рис. 6. Изотопные соотношения стронция и неода в породах кальдеры Медвежья. А – вариации изотопов Sr и Nd в зависимости от возраста вулканических комплексов; Б – соотношение нормированных параметров; В–Е – соотношения изотопов стронция и неода с кремнекислотностью и щелочностью пород. 1 – фундамент кальдеры, 2 – докальдерный комплекс, 3 – синкальдерный комплекс (экструзивная фация), 4 – посткальдерные стратовулканы, 5 – кордиеритовые стекла в лавах влк. Кудрявый.

ствуют многочисленные находки плавленых включений) не вносит существенных изменений в изотопную систему эволюционирующих расплавов (рис. 6 Б, В, Е).

5. Андезиты «горячего купола» влк. Кудрявый, несущие признаки гидротермальной переработки (до 14 % потерь при прокаливании) и вмещающие самые высокотемпературные площадки с рениеносной минерализацией, по изотопным характеристикам неотличимы от неизмененных андезитов и базальтов влк. Кудрявый.

Заключение

В истории формирования кальдеры выделяются три основные стадии вулканической активности: докальдерная, синкальдерная и посткальдерная, которые обусловили широкое разнообразие разнофациальных вулкаников по составу от базальтов до риолитов. По относительным концентрациям породообразующих окислов, литофильных, высокозарядных, редкоземельных элементов и их соотношениям породы различных вулканических комплексов кальдеры Медвежья относятся к типичным островодужным вулканическим продуктам, характерным для фронтальной зоны Курильских островов.

Изотопные данные по Nd и Sr занимают довольно компактную область и располагаются вблизи поля «мантийной корреляции». Подобное расположение фигуративных точек свидетельствует о генетическом родстве вулкаников кальдеры Медвежья и происхождении их из единого магматического источника.

Отличительная черта вулканизма кальдеры Медвежья по сравнению с другими подобными структурами на Курильских островах – появление в позднем голоцене магнезиальных базальтов, представляющих собой продукт смешения первичных высокомагнезиальных расплавов с низкобарическими дифференциатами.

Другой интересный факт – наличие включений плавленых кордиеритовых роговиков в породах влк. Кудрявый, свидетельствующее о контаминации лав коровым материалом с аномальными геохимическими характеристиками.

Список литературы

1. Ермаков В.А., Семакин В.П. Геология кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // *Докл. АН*. 1996. Т. 351, № 3. С. 361–365.
2. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л. и др. Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавленных включений // *Геохимия*. 2004. № 5. С. 467–487.
3. Остапенко В.Ф. *Геологическое строение кальдер Медвежья и Заварицкого и связь с ними полезных ископаемых*: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Южно-Сахалинск, 1969. 19 с.
4. Пискунов Б.Н. *Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг*. М.: Наука, 1987. 237 с.
5. Пискунов Б.Н., Рыбин А.В., Сергеев К.Ф. Петрогеохимическая характеристика кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // *Докл. АН*. 1999. Т. 368, № 3. С. 380–384.
6. Рыбин А.В., Данченко В.Я., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Магматические комплексы и редкометальное оруденение вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // *Вестн. Сахалин. музея*. 2000. № 7. С. 234–259.
7. Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гущин А.В., Фролов В.Т., Сывороткин В.Л. *Происхождение вулканических серий островных дуг*. М.: Недра, 1985. 275 с.
8. Чибисова М.В., Рыбин А.В., Мартынов Ю.А., Округин В.М. Химический состав и минералогия базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. № 1 (13). С. 178–186.
9. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. London Spec. Publications*. 1989. Vol. 42 (1). P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
10. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.

Сведения об авторах

РЫБИН Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, руководитель лаборатории, ЧИБИСОВА Марина Владимировна, научный сотрудник, ДЕГТЕРЕВ Артем Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник – лаборатория вулканологии и вулканопереопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; СМЕРНОВ Сергей Захарович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, зам. директора по научной части – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск; МАРТЫНОВ Юрий Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геохимии – Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток.