

ИЗУЧЕНИЕ МАГМАТИЗМА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Т.В. Володькова

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск,
e-mail: tat-volodkova@yandex.ru

Крупнейшие острова Курильской островной дуги (КОД) покрыты крупномасштабной аэрогеофизической съемкой с использованием аппаратуры СКАТ-77. Среднеквадратическая погрешность измерения магнитного поля при этом составляет до 5 нТл, а точность измерения содержаний естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ): по урану – $(0,1-0,15) \cdot 10^{-4}\%$, торию – $(0,55-0,65) \cdot 10^{-4}\%$, калию – $(0,05-0,10)\%$. Использовались карты отношений естественных радиоактивных элементов. Магматические комплексы и отдельные свиты характеризуются средними фоновыми значениями U/Th, K/Th, U/K; по сравнению с содержаниями ЕРЭ, они меньше зависят от погрешностей съемки и сопоставимы с результатами наземных исследований. Величина доверительного интервала ($\pm 2-3\sigma$) составляет: U/Th - 0,1; K/Th - 0,1; U/K - 0,25.

Уран, торий, калий входят в число крайне несовместимых элементов-индикаторов магматических процессов. Неизменные породы, сформированные под воздействием процессов кристаллизационной дифференциации в закрытых магматических очагах, вне зависимости от состава, характеризуются постоянством отношений ЕРЭ. Они сближены по возрасту, сопряжены с основными этапами единого магматического цикла, сопоставимого со временем существования крупного магматического очага (вулканического центра). Гидротермально-метасоматически измененные породы (со степенью изменения более 10-20 %), выделяются аномальными отношениями ЕРЭ. В открытых магматических очагах от фазы к фазе, за счет притока глубинных флюидов, условия кристаллизации магм меняются, поэтому средние значения отношений ЕРЭ магматических пород будут закономерно варьировать. Значения фоновых отношений ЕРЭ магматических комплексов резко изменяются под воздействием гидротермально-метасоматических процессов, мантийного метасоматоза и изменения геодинамических условий. Разработана методика учета влияния гидротермально-метасоматических процессов на характеристики отношений ЕРЭ; при статистических расчетах такие данные исключаются из выборок. Мантийный метасоматоз и ювенильная флюидизация типичны для плюмового магматизма; с ним связывается внедрение исключительно субщелочных и щелочных пород. С учетом этих положений, сделана попытка картирования магматических комплексов и вулканогенных свит Курильских островов и определения природы магматизма [Володькова, 2007].

На Курильских островах выделяется цепь вулканических центров, для которых типично концентрически-кольцевое зональное строение; к их эпицентрам приурочены локальные аномалии теплового потока на картах масштаба 1:2500000. Зональность проявлена, в первую очередь, закономерным концентрически-кольцевым распределением магматических комплексов различного состава, что находит полное отражение в аэрогеофизических данных. По морфологии и фону магнитного поля, а также с учетом распределения локальных аномалий интенсивностью более 1500 нТл, в вулканических центрах четко выделяются внутренняя и внешняя зона, конформные аномалиям теплового потока; особенности магнитного поля определяются величинами фугитивности кислорода и процессами «отсадки магнетита». Основные закономерности строения и развития вулканических центров даны в [Володькова, 2007; Пискунов, 1987].

Магматические породы Курил, близкие по основности, но различные по типу щелочности, совершенно идентичны по внешнему облику, но четко разделяются по фоновым значениям отношений ЕРЭ. В полях корреляции отношений ЕРЭ породы каждого типа щелочности, в зависимости от насыщенности флюидами, образуют три тренда; рассчитаны значения фоновых отношений ЕРЭ ведущих магматических комплексов Курил. Установлено, что закономерности магматизма Курил определяются относительной степенью влияния Курильского мантийного диапира (плюма). Глубина заложения Курильского плюма может составлять порядка 1000 км [Сычев, 1985]. Курильский диапир - мощный термальный источник, который, взаимодействуя с зоной субдукции, способствует обогащению магм H_2O и

флюидами. Именно с его влиянием связано формирование пород относительно повышенной щелочности и эффекта поперечной зональности [Пискунов, 1987; Володькова, 2007].

Мантийные диапиры и островные дуги Земли образуют взаимосвязанные пары. Характеристики отношений ЕРЭ могут использоваться при изучении тектоники таких систем. Не решен важнейший вопрос: какие процессы - плюмовые или субдукционные – являются первичными и определяющими в системе мантийный диапир - островная дуга. Возможно, влияние восходящего плюма способствовало возникновению и развитию в ослабленных зонах процессов субдукции? Или плюм формируется в окнах разбитой на блоки и погружающейся в мантию океанической плиты? Развиваются ли эти два процесса одновременно? Ранее все вулканы Курильской дуги, как пониженной, так и повышенной щелочности, относились к единому островодужному комплексу, сформированному при одновременном влиянии мантийного диапира и зоны субдукции [Пискунов, 1987; Петрология..., 1987].

Характеристики отношений ЕРЭ могут использоваться для четкой дифференциации коровых и мантийных образований, а также выявления обогащенных мантийных резервуаров EM I, EM II, HIMU, возникновение которых объясняется воздействием плюмов. Уран-калиевое отношение может играть роль критерия, позволяющего выделять группы пород различной геодинамической принадлежности (таблица 1).

Таблица 1. Характеристики средних значений отношений ЕРЭ магматических пород важнейших тектонических типов [Володькова 2008].

Наименование интрузивных (ИК) и вулканических (ВК) комплексов	Значения отношений ЕРЭ			Примечания
	U/Th	K/Th	U/K	
Континентальная кора СС	0,23	0,25	0,85	Николаева, 1997; Рябчиков, 1997
Осадочный слой	0,20	0,20	0,20	Смыслов, 1974
Гранитно-метаморфический слой	0,25	0,20	1,28	Смыслов, 1974
Андезито-метаморфический слой	0,21	0,21	1,00	Смыслов, 1974
Гранулито-базитовый	0,33	0,50	0,66	Смыслов, 1974
Примитивная мантия РМ	0,26	0,30	0,94	Рябчиков, 1997; Флеров, 2001
Деплетированная мантия DM	0,40	0,53	0,80	Рябчиков, 1997; Хаин, 2002
Обогащенная мантия EM I	0,08	0,17	0,45	Woodhead, 1989; Weaver, 1991
Обогащенная мантия EM II	0,49	0,49	1,00	Wilson, 2001; Weaver, 1991
Обогащенная мантия HIMU	0,25	0,10	2,51	Chauvel, 1992
Ультраосновные породы	0,37	1,87	0,20	Базилевский, 1985
Граниты аляскитовые	0,50	0,28	1,75	Базилевский, 1985
Меймечиты, ийолиты	0,27	0,18	1,45	Базилевский, 1985
Нефелиновые сиениты агпайтовые	0,36	0,18	2,04	Базилевский, 1985
Базальты, трахидациты, J ₃ -K ₁	0,33	0,57	0,80	Субщелочной ряд, Монголия и Забайкалье, Ярмолюк, 2003
Платобазальты, базальт-комендит-пантеллеритовые ассоциации, PZ ₃ -MZ ₁	0,32	0,58	0,56	
Базальты щелочные, источник близок к DM, KZ ₁	0,25	1,01	0,20	Монголия, Хубсугул, Геншафт, 2006
Базальты щелочные, источник DM+HIMU, KZ ₁	0,23	0,48	1,10	Монголия, Дериганга, Геншафт, 2006
Базальты щелочные, источник DM+EM, KZ ₁	0,33	0,90	0,63	Монголия, Хангай, Геншафт, 2006
Амфиболсодержащие известково-щелочные гранитоиды I-типа	0,25	0,14	1,73	Австралия (андийский тип), Розен, 2001
Порфиридные биотитовые граниты I-типа	0,29	0,14	2,10	Тырныауз, Розен, 2001
Гранодиориты, кварцевые диориты тоналит-тронджемитовой серии I-типа (переходной режим)	0,28	0,25	1,67	Урал, Зенькова, 2001
Кислые образования пониженной щелочности субдукционного I-типа	0,40	0,30	1,90	Курилы, Володькова, 2007
Высокоглиноземистые гранитоиды коллизионные S-типа	0,26	0,18	1,47	Австралия, Розен, 2001
Кислые образования известково-щелочного состава островодужные	0,33	0,44	0,61	Курилы, Володькова, 2007

М-типа				
Гранитоиды толеитовой ассоциации М-типа (СОХ)	0,33	0,35	0,94	
Монциты А-типа	0,11	0,17	0,66	Забайкалье, Цыганков, 2007
Кварцевые сиениты А-типа	0,16	0,08	0,16	Забайкалье, Цыганков, 2007
Лейкограниты А-типа	0,12	0,16	0,76	Забайкалье, Цыганков, 2007

Магматические породы повышенной щелочности грубо делятся на две категории. По-видимому, их формирование связано с воздействием мантийных резервуаров EM I ($U/K \leq 0,8-1,0$) и HIMU ($U/K \geq 1,75-2,0$). Для оценки геодинамического критерия использовались характеристики отношений EPЭ нормальных гранитоидов, реже вулканитов различных геодинамических типов. Отдельные классы гранитоидов могут немного перекрываться по характеристикам уран-калиевого отношения, возможна их более высокая дифференциация. К I-типу относятся как чисто субдукционные (андийские), так и переходные к коллизионному (раннеколлизионные) амфиболсодержащие, биотитовые гранитоиды. Класс коллизионных гранитоидов S-типа ($U/K=1,30-1,75$) включает в себя, по-видимому, синколлизионные и позднеколлизионные гранитоиды; среди магматических пород А-типа можно выделить постколлизионные и собственно внутриплитные. Постколлизионные гранитоиды характеризуются значениями $U/K=0,75-1,30$; для внутриплитных пород повышенной щелочности, связанных с воздействием плюмов, более типичны значения $U/K \leq 0,75$. Гранитоиды, сформированные под воздействием мантийных источников, внутриплитные континентальные (А-тип) и островодужные (М-тип) по уран-калиевому критерию практически не различаются; для магматических пород обоих классов типична повышенная щелочность и значения отношения U/K существенно ниже характеристик деплетированной мантии. По-видимому, оба класса гранитоидов формируются под воздействием процессов мантийного метасоматоза. Таким образом, вариации уран-калиевого критерия отражают как изменения геодинамических условий, так и (в крайнем проявлении) процессы мантийного метасоматоза, а в пределах островных дуг оба эти процесса взаимосвязаны.

Вулканиты островных дуг могут, в принципе, относиться как к андийскому типу, так и островодужному М-типу; они контрастно отличаются по петрогеохимическому составу (таблица 1). Вулканиты андийского типа сравнительно обогащены калием, другими несовместимыми элементами и относятся к известково-щелочному типу; вулканиты толеитовой ассоциации М-типа обеднены радиоактивными элементами. При этом вулканиты Курильского островодужного комплекса могут быть отнесены к единому Западно-Тихоокеанскому толеитовому М-типу [Розен, 2001]. Они сравнительно обеднены радиоактивными и прочими элементами, что традиционно объяснялось их мантийным происхождением и влиянием деплетированной мантии. Показано, что фактически вулканиты Курил относятся к единому известково-щелочному типу; выявленные ранее в небольшом количестве, толеитовые вулканиты включены в группу широко распространенных на Курилах известковых вулканитов [Пискунов, 1987]. На Курилах выделяется две ассоциации разновозрастных магматических пород: известково-щелочные кварцевые диориты, диориты, габброиды и известковистые плагиограниты, граниты, габброиды. [Пискунов, 1987; Петрология..., 1987]. В целом, они довольно близки по величинам отношений U/Th , K/Th , но по значениям U/K -критерия относятся к двум различным геодинамическим типам. Предварительно можно предположить: на Курилах выделяется два геодинамических этапа формирования магматических пород. Среднемиоценовые субвулканические и гипабиссальные интрузии основного-кислого состава острова Кунашир относятся к субдукционному I-типу, а позднемиоцен-плиоценовые кварцевые диориты, диориты, габброиды – к собственно островодужному М-типу [Володькова, 2007; 2008]. С учетом фоновых значений отношений EPЭ, первые включены в серию пород известкового состава, а вторые – в серию известково-щелочных пород, что диаметрально противоположно выявленной по литературным данным геодинамической последовательности [Розен, 2001]. Такое несоответствие не может быть следствием простой ошибки и нуждается в логичном объяснении. Магматические породы известкового состава ассоциируются с единичными коровыми (закрытыми) очагами, для которых типична минимальная флюидизация и вероятно возникли с их участием. С другой стороны, гранитоиды известково-щелочного состава сформировались под воздействием многочисленных, преимущественно мантийных, очагов; для этих пород характерна

относительно повышенная щелочность и флюидизация [Володькова, 2007; Злобин, 1982]. Вероятно, образование пород повышенной щелочности связано с относительно более высоким влиянием Курильского мантийного диапира. Таким образом, несоответствие характеристик отношений ЕРЭ выявленной по петрохимическим признакам геодинамической последовательности объясняется комплексным влиянием на них как геодинамического, так и плюмового фактора. Следовательно, вулканиты Курил относятся к известково-щелочному типу; в среднем миоцене формируются чисто субдукционные, известковые гранитоиды, для которых типично высокое уран-калиевое отношение и минимальное влияние плюмовых флюидов. В позднем миоцене-плиоцене, при комплексном воздействии плюмовых и субдукционных процессов, формируются магматические породы известково-щелочного состава, для которых отмечается низкое уран-калиевое отношение. С учетом фактического отсутствия образований толеитовой ассоциации на Курилах, выделяются вулканиты специфической известково-щелочной ассоциации, по характеристикам отношений ЕРЭ близкие к Западно-Тихоокеанскому М-типу.

С использованием обобщенных трендов значений отношений ЕРЭ, можно попытаться оценить степень относительного влияния плюмового и геодинамического фактора при возникновении Курильских вулканитов различного состава (таблица 2).

Таблица 2. Обобщенные характеристики отношений ЕРЭ магматических комплексов Курил [Володькова 2007].

Состав	Отношения ЕРЭ					
	Средневзвешенные значения			Пределы изменения		
	U/Th	K/Th	U/K	U/Th	K/Th	U/K
Известково-щелочной состав (нормальная щелочность)						
Базальты, андезито-базальты	0,64	1,40	0,61	0,60-0,80	1,15-1,55	0,25-0,85
Андезиты, андезито-дациты	0,51	0,91	0,68	0,40-0,60	0,75-1,15	0,25-0,85
Дациты-риолиты	0,33	0,44	0,61	0,20-0,40	0,30-0,75	0,25-0,85
Известковый состав (пониженная щелочность)						
Базальты, андезито-базальты	0,68	1,11	0,67	0,45-0,85	0,90-1,25	0,25-0,80
Андезиты, андезито-дациты	0,59	0,79	1,00	0,45-0,85	0,65-0,90	0,80-1,25
Дациты-риолиты	0,71	0,60	1,41	0,45-0,85	0,45-0,65	1,25-1,80

С учетом погрешностей, все вулканиты известково-щелочного состава характеризуются практически постоянным уран-калиевым отношением; для известковых вулканитов с падением основности отмечается закономерный рост величины U/K-отношения. Характеристики уран-ториевого отношения не всегда образуют четкие тренды и мало пригодны для анализа; с падением основности, в обеих группах пород отмечается резкое снижение калий-ториевого отношения. Существование трендов определяется особенностями процессов кристаллизационной дифференциации в очагах; при полном отсутствии флюидов породы любого состава должны были сохранять постоянство всех характеристик ЕРЭ.

По-видимому, ювенильная флюидизация типична для обеих групп пород; наиболее четким ее показателем является величина калий-ториевого отношения. В группе пород известково-щелочного состава, вариации величины калий-ториевого отношения значительно выше, что отражает относительно повышенную степень ювенильной флюидизации. По величине уран-калиевого отношения, за исключением дацитов-риолитов известкового состава, вулканиты Курил в целом варьируют слабо. Относительное повышение величины уран-калиевого отношения этого типа пород объясняется спецификой протекания некоторых вулканических процессов, а не закономерным влиянием плюма [Володькова, 2007]. Для уточнения геодинамических особенностей, сравниваются характеристики наиболее ранних дифференциатов обеих групп (базальтоидов). Они практически идентичны, за исключением несколько повышенного, за счет повышенной флюидизации, калий-ториевого отношения в группе вулканитов известково-щелочного состава. По-мнению автора, это является хорошим доказательством принадлежности обеих серий пород к единому геодинамическому типу. Тем не менее, некоторые признаки существования на Курилах вулканитов двух геодинамических типов, почти одновозрастных, имеются; для доказательства этих положений необходимы специальные исследования.

Список литературы

Володькова Т.В. Особенности магматизма острова Кунашир (Курильская островная дуга) по аэрогеофизическим данным // Тихоокеанская геология, 2007. Т. 26. № 6. С. 15-37.

Володькова Т.В. Характеристики отношений ЕРЭ гранитоидов различных геодинамических типов // Граниты и эволюция Земли: геодинамическая позиция, петрогенезис и рудоносность гранитоидных батолитов. I Междунар. Геолог. конф., 26-29 августа 2008 г., Улан-Удэ: Изд-во БНЦ, 2008. С. 68-71.

Злобин Т.К. Федорченко В.И. и др. Структура литосферы острова Кунашир (Курильская островная дуга) по сейсмическим данным // Тихоокеанская геология, 1982. № 1. С. 92-100.

Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей. М.: Наука, 1987. 336 с.

Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 238 с.

Розен О.М., Федоровский В.С. Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры. М.: Научный мир, 2001. 187 с.

Сычев П.М. Аномальные зоны в верхней мантии, механизм их образования и роль в развитии структур земной коры // Тихоокеанская геология, 1985. № 6. С. 25-35.