

## РАДИОНУКЛИДЫ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ВУЛКАНИТАХ КАМЧАТКИ

В.И. Андреев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: via@kscnet.ru

На Камчатке первые исследования радиоактивности были сделаны в 1936 г. Содержание “эманаций радия” газов, из побочных прорывов Ключевского вулкана извержения 1932 г., достигало 0,6 эман. По данным Заварицкого, эманации радия в фумарольных газах вулкана Авача ~ 7 эман. [Шаврова, 1937].

Нами исследовались вулканические породы наземных действующих вулканов Камчатки. Исследованы изверженные породы и минеральные новообразования подводного вулкана Пийпа. Большая часть исследованных пород - голоценовые, четвертичные; в небольшом количестве были изучены более древние (мел-палеогеновые) породы. Кроме неизменных пород, исследовалась радиоактивность различных гидротермально измененных пород и минеральных новообразований: опалитов, хлоридов, сульфатов. Проводились полевые измерения гамма-активности и объемной активности радона (OARn).

Средние содержания урана в большинстве исследованных вулкаников (порядка 1000 анализов, преимущественно гамма спектрометрическим методом) ~ 1 г/т и разнятся обычно незначительно от 1,1 до 1,6 г/т. Среднее содержание тория в вулканогенных породах большинства различных вулканов от 1,4 до 2,1 г/т. Редко в некоторых отдельных разновидностях пород содержание урана или тория (одного из компонентов) очень низкое ~ 0,1 г/т.

Содержание калия стабильно и в среднем составляет 1,3 – 1,4 вес.%. В общих чертах содержания проанализированных РАЭ (U, Th, K) обнаруживают прямую корреляцию друг с другом и с химическим составом вмещающих пород, прежде всего с калием, индикаторные отношения, прежде всего Th/U и K/U соответствуют генетическим и региональным особенностям, отмеченным ранее.

Среди пород, не подвергшиеся вторичным изменениям, содержание радиоактивных элементов (РАЭ) возрастает в ряду: неки-дайки-лавовые потоки-шлаки-бомбы (U+Th) от 1,3 до 3,5 г/т; урана с 0,5 до 1,6. Очевидно, возрастание содержания урана в представленном ряду фаций связано с уменьшением времени и степени дегазации. Измененные породы поверхностного формирования – метасоматиты, содержащие фториды, хлориды, сульфаты обогащены ураном до (до 2,5), при содержании тория (1,3 г/т), калия (1,2%). В кислых гидротермально измененных пропилитизированных породах с глубиной (от 20 до 400 м) содержание РАЭ возрастает: U с 1,6 до 2,2 г/т; Th с 3,8 до 6,4 г/т; K с 2,6 до 3,1 %. Опалитизированные и глинистые породы гидротермальной фации отличаются повышенным содержанием урана (2,6), тория (4,1 г/т) и невысоким калия (до 0,8 %). Наибольшие вариации в содержании РАЭ, превышающие десятикратные, характерны для гидротермально измененных пород. Максимальные содержания урана (31 г/т) и тория (46 г/т) обнаружены в различных каолиновых глинах с Южно-Кихпиньчского термального поля).

При наложении гипергенеза происходит частичный вынос РАЭ, особенно из пород прижерловой и гидротермальной фаций. Наиболее интенсивно выносятся уран и калий, содержание которых может уменьшится в несколько раз. Гидротермально-измененные породы с глубин ~ 150 м характеризуются высокими содержаниями тория (5,6 г/т), калия (3,3 %) при содержании урана (2,0 г/т). Таким образом, породы всех перечисленных фаций характеризуются определенными содержаниями и соотношениями РАЭ. [Андреев и др., 2006].

Сравнительно высоким и стабильным содержанием РАЭ отличаются субщелочные глиноземистые мегаплагиафировые лавы, слагающие фундамент и отдельные плейстоценовые стратовулканы Ключевской группы. Время наибольшей интенсивности извержений мегаплагиафировых лав Ключевской группы вулканов – средний – верхний плейстцен до последнего Толбачинского извержения 1975-76 гг. По химическому составу эти лавы соответствуют субщелочным, глиноземистым базальтам и обладают сравнительно высоким содержанием (РАЭ): U – 2,0 г/т; Th – 2,3 г/т; K – 1,8 %; Th/U – 1,1.

Среди вулканов, сложенных мегаплагиафировыми лавами выделяются субщелочные породы крупнейшего вулкана Юго - Западной Камчатки Большая Ипелька, отличающиеся

низким, для подобных образований, расположенных в тыловой зоне островной дуги, содержанием урана  $-0,8$  г/т . высоким содержанием тория  $- 2,4$  г/т, калия  $- 1,6$  вес. %, и соответственно высоким для камчатских вулканогенных пород Th/U отношением  $= 3,1$  вдвое превышающим эту величину, приведенную ранее во многих работах предыдущих исследователей. Вулкан Большая Ипелька фиксирует крупную вспышку базальтового вулканизма в начале четвертичного цикла, характерную для вулканических зон Камчатки. Взаимоотношения с более молодыми постройками, ледниковыми комплексами верхнеплейстоценовых оледенений и ряд других признаков позволяют определить возраст Большой Ипельки как нижнеплейстоценовый. Окончилась активная деятельность вулкана Большая Ипелька  $\sim 500$  тыс. л. н. Этот вулкан выделяется необычайно большим диаметром основания  $\sim 40$  км и объемом  $\sim 400$  км<sup>3</sup>, при небольшой высоте  $- 1000$  м [Шеймович и др., 1978]. (Для сравнения объем Ключевского вулкана  $= 200$  км<sup>3</sup>).

Возможно, причина сравнительно низкого содержания урана и соответственно повышенного торий-уранового отношения в необычайно большом объеме этого вулкана, который ко времени окончания активной деятельности был, по крайней мере, вдвое больше. Следовательно, становление вулканических толщ, преимущественно эффузивов шло дольше обычного. За это время уран, подвижность которого в приповерхностных условиях резко возрастает, по сравнению с торием, был в значительной мере вынесен.

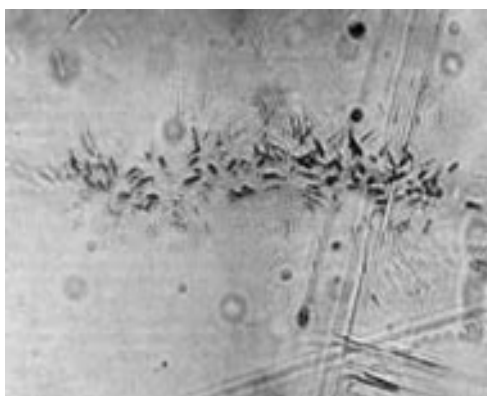
Для определения содержания и распределения урана применялся метод треков индуцированного деления урана-235. Чувствительность метода до  $10^{-8}$  г/т, точность анализов  $\sim 20$  %. Высокая разрешающая способность метода позволила определить характер распределения урана в пределах площади шлифов порядка  $0,01$  мм<sup>2</sup>. Применение трекового метода позволило исследовать микрораспределение урана в основной массе, во вкрапленниках и на границах между кристаллами и основной массой. Исследования распределения урана проводились на современных вулканитах, образующихся в 1975-76 гг. во время извержения Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), в породах различных формаций Гамченской вулcano-тектонической структуры и в метаморфических сланцах складчатого фундамента мел-палеогенового возраста.

Изверженные Южным конусом БТТИ породы были представлены мегаплагиофировыми лавами, в которых порядка 20 % объема составляли фенокристаллы плагиоклаза, среди которых выделялось 3 генерации. Мегакристаллы первой генерации размером по длинной оси до 30 мм, сильно кородированные, с внедрениями четко ограненных кристаллов второй генерации, кристаллизовались первыми. К третьей генерации относились микролиты плагиоклаза размером  $< 0,1$  мм, рассеянные в стекловатой основной массе.

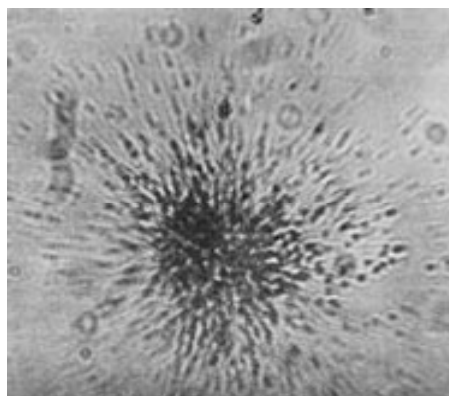
В бомбах и лавах из истоков бокк уран был распределен весьма неравномерно, что было обусловлено локальными сгущениями урана, давшими на детекторе «звездочки», где концентрация треков была более чем на два порядка выше средней. Размер таких звездочек был в пределах  $0,01$  мм<sup>2</sup>, строение симметричное, от центра, где концентрация треков была наибольшей, расходились лучи, в которых плотность треков постепенно убывала. Площадь звездочек в шлифах не превышала 0,5%, доля приходящихся на них треков достигала 15%. От истоков до конечных частей наиболее длинных потоков (около 9 км), происходило постепенное разрушение звездочек и выравнивание концентрации треков. При относительно медленном, (в течение нескольких дней), остывании и дегазации лавы, сгущения постепенно рассеивались. В кристаллах плагиоклазов плотность треков (и содержание урана) было значительно меньше, чем в основной массе. На внешней границе кристаллов была заметна зона шириной  $\sim 0,03$ . [Андреев, 1979]

Мы, как и ряд других исследователей, например [Адамчук и др., 1986], полагаем, что высокие содержания РАЭ большинства вулканитов связаны с обогащением магматических пород этими компонентами в периферических или промежуточных очагах. Одним из подтверждений этого тезиса являются субщелочные мегаплагиофировые лавы, гигантские мегакристаллы которых, видимо, сравнительно долго формировались в близ поверхностных камерах.

В сланцах мелового фундамента Гамченского ряда вулканов были обнаружены аномальные зоны с резко повышенной по сравнению с фоновой концентрацией треков. Эти зоны шириной в сотые и длиной в десятые доли мм соответствовали микропрожилкам обогащенным ураном (рис. 1, А). В экструзиях, реже в лавовых потоках, наблюдались аномалии, в которых плотность треков на 1—2 порядка превышала среднюю для исследуемой



А) аномальное сгущение треков в уран-содержащем микропрожилке, в сланцах фундамента.



Б) сгущение треков - “звездочка” в субмикроскопических минералах в лавах и экструзиях.

породы. Размер и строение трековых аномалий Гамченского ряда вулканов были подобны сходным образованиям в базальтах Толбачинского извержения 1975—1976 гг. (рис.1, Б). При дифференциации вещества на заключительных этапах развития тектоно-магматических циклов с появлением экструзивных образований увеличивалась неравномерность микрораспределения урана.

Повышенные концентрации урана в лавах могли быть связаны с какими-то неустойчивыми в поверхностных условиях субмикроскопическими кристаллами, в которых уран мог изоморфно замещать другие элементы. В экструзиях и сланцах аномальные субмикроскопические сгущения урана также были связаны с урансодержащими минералами.

Наблюдалось небольшое увеличение торий-уранового отношения в игнимбритах по сравнению с экструзивными и лавовыми образованиями близкого химического состава, связанное, возможно, с неравномерным газовым переносом урана и тория.

Проведенные исследования по распределению радиоактивных элементов в крупном долгоживущем вулканическом центре Гамченской вулcano-тектонической структуры показали, что содержание и соотношение РАЭ в породах могут быть критерием при формационном анализе отдельных вулканических аппаратов, магматических комплексов и их фаций.

Распределение РАЭ в современных изверженных породах вулкана Карымский, кальдеры Академии Наук (кратера Токарева, 1996 г), Новых Толбачинских вулканов извержения 1975-76 гг., в минеральных новообразованиях этих и некоторых других действующих вулканов Камчатки показало, что в большинстве случаев характерно соотношение:  $Ra > U > Th$ . По распределению и содержанию U и Th андезито-дациты Карымского и базальты Новых Толбачинских вулканов близки. В изверженных в 1996 г. породах кратера Токарева отмечаются большие вариации содержаний РАЭ. В минеральных новообразованиях (хлоридах натрия и калия, сульфатах, фторидах, опалитах, гейзеритах) содержание урана сопоставимо с неизменными породами, содержание тория и калия в большинстве новообразований ниже, чем в неизменных породах.

Радиоактивное равновесие определяется соотношением  $N_1/\lambda_1 = N_2/\lambda_2$ , где  $N_1$ - число атомов материнского изотопа,  $\lambda_1$ - константа распада материнского изотопа,  $N_2$  – число атомов дочернего изотопа  $\lambda_2$  – константа распада дочернего изотопа [Гитаева, 2000].

Нарушения радиоактивного равновесия – избыток  $^{226}Ra$ , не подкрепленного материнским  $^{238}U$  в современных наземных изверженных породах и в минеральных новообразованиях, особенно во фторидах БТТИ, по нашим данным достигало трехкратной величины, в андезитах и дацитах подводного вулкана Пийпа (Берингово море), проявляющего активную фумарольную деятельность, во вмещающих андезитах и дацитах содержание  $^{238}U$  - 5,3 и 6,9 Бк/кг;  $^{232}Th$  – 3,09 и 4,35 Бк/кг при  $^{226}Ra$  – 5,5 и 8,5;  $^{228}Ra$  – 3,09 и 4,35 Бк/кг то есть на момент взятия проб близко к равновесному. В тоже время, во взятых с той же глубины - 500 м минеральных новообразованиях, состоящих из барита с небольшой примесью гипса и ангидрита, при содержании  $^{238}U$  и  $^{232}Th$  -1,26 и 0,41 Бк/кг, содержание  $^{226}Ra$  и  $^{228}Ra$  достигало 8430 и 2955 Бк/кг, то есть радиоактивное равновесие – отношение  $Ra/U$  и  $Th/U$  превышало

равновесное в тысячи раз.

Можно полагать, что глубина подводных фумарол  $\sim 500$  м, в условиях суши соответствует глубине 250 м, где обычно происходит образование гидротермальных месторождений РАЭ [Наумов, 1975].

Измерения  $\alpha$  и  $\gamma$  активности на фумаролах и термальных полях БТТИ показали, что объемная активность радона (OARn) в течение 30 лет после извержения снизилась почти до фоновых значений, близких к атмосферным и периодически поднималась до  $10^4$  Бк/м<sup>3</sup> на активизирующихся трещинах и провалах, а гамма-активность ( $\gamma$ ) на прогретых участках термальных полей заметно, местами втрое, возросла.

OARn в спонтанных газах термальных источниках кальдеры Академии Наук, приуроченных к кратеру Токарева после его извержения в 1996 г постепенно снижалась от  $10^4$  Бк/м<sup>3</sup> до фоновых значений, как и  $\gamma$  от 39 до 7-9 мкР/ч. В спонтанных газах Карымских бывших ранее и новых термальных источников после начала извержений в январе 1996 г и сопутствующей мощной сейсмотектонической активизации была высокая до  $10^4$  OARn. Многочисленные источники локализовались в течение первых лет извержения, OARn спонтанных газов снизилась до  $0,6 \times 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> в последние (2006 – 2008 годы). На фоне растяжения, на большей части района Карымских источников, инициировавшего активизацию старых и возникновение новых источников, происходило локальное сжатие, вызвавшее прекращение деятельности самого мощного из Карымских термальных источников, выделявшего  $\sim 5$  м<sup>3</sup>/сек двуокиси углерода с OARn  $> 10^4$  Бк/м<sup>3</sup>.

В мае 1996 г на профиле в снежной толще в зоне сейсмотектонической активизации вблизи Карымских термальных источников была замерена OARn до  $10^4$  Бк/м<sup>3</sup>. В следующем 1997 г в снежной толще на том же профиле OARn нигде не превышала обычных для снега значений – в пределах первых десятков Бк/м<sup>3</sup>. Высокая до  $10^6$  Бк/м<sup>3</sup> была зафиксирована в снежнике на краю Южно-Кихпиньчского термального поля. [Андреев и др., 2006].

Повышенная OARn, обнаруженная в снегу в районе Карымских термальных источников весной 1996 г, была связана с резким увеличением эманационной способности подстилающих вулканогенно - осадочных толщ под влиянием сейсмотектонической активизации, произошедшей в начале 1996 г.

Высокая OARn в снежнике на краю Южно - Кихпиньчского термального поля, зафиксированная в августе 1997 г происходила в условиях сейсмотектонической активизации, предшествующей Кроноцкому (декабрь 1997 г) землетрясению и увеличивающей эманационную способность пород, а также эманациями радона, поступающими из ближайших фумарол и сорбирующимися в снегу.

### Список литературы.

**Адамчук Ю.В., Карпов Г.А., Максимовский В.А.** и др. Содержание урана, тория и сопутствующих элементов (Pb, As, Nd, Sr) в породах и минеральных осадках действующей гидротермальной кальдеры Узон на Камчатке. М.: НИИАтоминформ, 1986. 35 с.

**Андреев В.И.** Распределение урана в вулканических продуктах Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология, 1979. № 6. с. 54-61.

**Андреев В.И., Литасов Н.Е., Пузанков Ю.М.** Радиоактивность пород базальт-дацитовый и андезитовой формаций Гамченской вулcano-тектонической структуры. // Вулканология и сейсмология, 1985. № 2. С. 27-49.

**Андреев В.И., Карданова О.Ф., Карпов Г.А.** и др. Источники радия (<sup>226</sup>Ra) и причины вариаций объемной активности радона (OARn) в свободных газах гидротермально-магматических систем (на примере гидротермально-магматических систем, связанных с действующими вулканами Камчатки) // Вулканизм и геодинамика. Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 3. Улан-Удэ. 2006. С. 691- 695.

**Наумов Г.Б.** Поведение радиоактивных элементов в гидротермальных процессах // Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 155-161.

**Титаева Н.А.** Ядерная геохимия. М.: Изд. МГУ. 2000. 336 с.

**Шаврова Н.Н.** Определение радиоактивности газов побочных прорывов Ключевской сопки // Бюлл. вулканолог. станции, 1937. № 2. С. 7-12.