

U-Pb ВОЗРАСТ ЭКСТРУЗИВНЫХ ПОРОД КАЛЬДЕРЫ УКСИЧАН В СРЕДИННОМ ХРЕБТЕ КАМЧАТКИ – ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ К ДАТИРОВАНИЮ МОЛОДЫХ ЦИРКОНОВ

© 2013 г. Ю. А. Костицын, М. О. Аносова

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
119991, г. Москва, ул. Косыгина, 19; e-mail: kostitsyn@geokhi.ru*

Поступила в редакцию 04.08.2011 г.

Принята к печати 20.11.2011 г.

Ключевые слова: лазерная абляция, кальдера Уксичан, датирование молодых цирконов, Срединный хребет Камчатки, U-Pb возраст.

DOI: 10.7868/S0016752513020052

ВВЕДЕНИЕ

История развития вулканизма на Камчатке занимает исследователей разных специальностей уже не одно десятилетие. С одной стороны – это важнейший фактор воздействия на окружающую среду, формирующий рельеф, оказывающий влияние на климат, животный мир этого края. С другой стороны – эволюция вулканизма, эволюция состава изверженного материала во времени могут служить индикатором развития глубинных процессов в земной коре и мантии под Камчаткой, представляющих как практический, так и несомненный фундаментальный интерес.

Благодаря применению тefрохронологического метода в сочетании с радиоуглеродным датированием в исследовании хронологии голоценового [например, 1–5] и позднплейстоценового [6] вулканизма достигнут значительный прогресс. Однако более ранние четвертичные и неогеновые образования не могут быть датированы таким способом – предел радиоуглеродного метода составляет первые десятки тысяч лет. В то же время, развитие методов изотопного датирования, которые еще недавно считались инструментом докембрийской геохронологии (например, Rb-Sr, U-Pb) сделало возможным, при соблюдении определенных условий, получать надежные и точные геохронологические определения порядка 1 млн. лет и менее [7]. Это и вдохновило нас на проведение геохронологических исследований пород кальдеры Уксичан в Срединном хребте Камчатки U-Pb методом по цирконам.

Вулкан Уксичан интересен, прежде всего, сложностью своего строения, которая воспринималась всегда как признак многоэтапности, длительности формирования. По поводу истории развития этого вулкана в литературе можно встретить разные оценки, основанные, как пра-

вило, на комплексе геологических данных, за которыми обычно скрываются общие представления того или иного исследователя, или просто приведенные без какого-либо обоснования. Возраст фундамента оценивается позднемиоцен-плиоценовым [8, 9], т.е. около 5.3 млн. лет по современной международной стратиграфической шкале [10], а возможно и более древним. Некоторые исследователи эффузивно-пирокластические отложения фундамента также относят к ранним образованиям собственно вулкана Уксичан [11]. Но во всех работах, где так или иначе упоминается возраст пород этого вулканического центра [9, 11–13], отмечается большая длительность его формирования, от, по крайней мере, раннего плиоцена до позднего плейстоцена и даже голоцена. То есть предполагается, что длительность формирования вулкана Уксичан составляет несколько миллионов лет.

В то же время, приуроченность магматических пород разного состава к единому вулканическому центру позволяет предположить сближенность во времени их образования. Для разрешения этого противоречия мы поставили специальные геохронологические исследования, результаты которых приведены в этой статье.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Вулкан Уксичан – один из крупнейших вулканических центров Камчатки – расположен в пределах Срединного хребта, к западу от водораздела. В его строении выделяется несколько этажей или стадий формирования [9, 11–13]:

– фундамент, сложенный умереннокалиевыми вулканогенными породами, преимущественно пирокластическими;

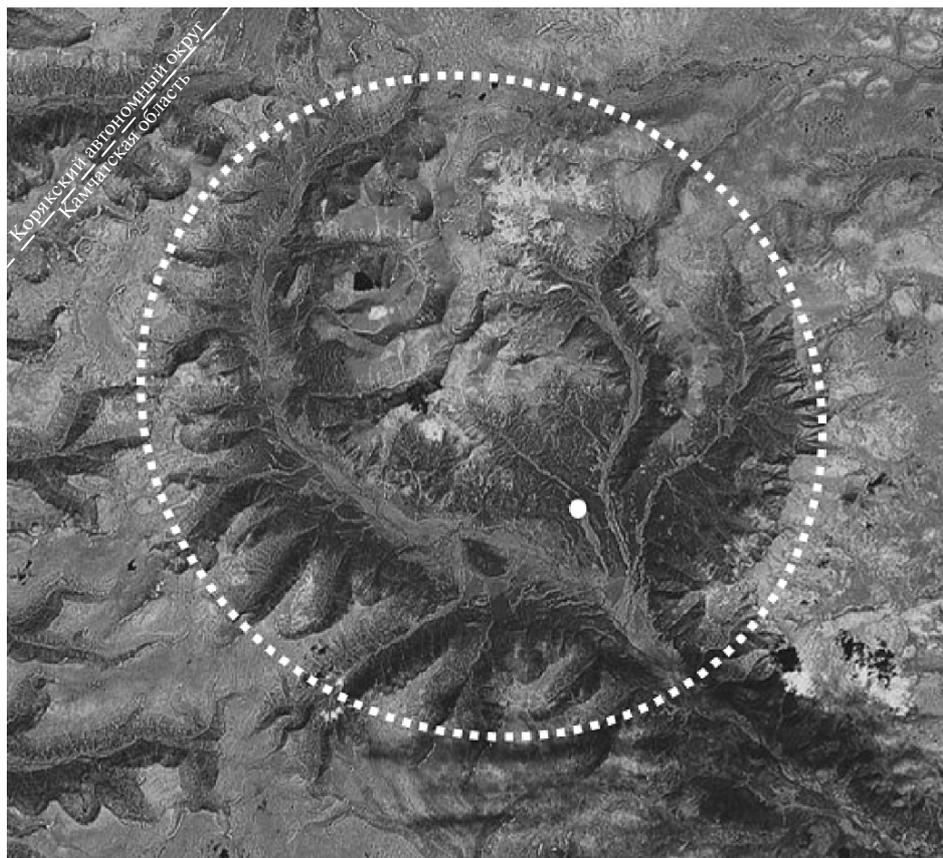


Рис. 1. Космоснимок центральной части вулкана Уксичан с примерной границей кальдеры (овал 15×13 км) и положением места опробования в ручье Украинский (белая точка).

– умеренно- и высококальциевые базальты, андезибазальты и андезиты стратовулкана;

– самая продуктивная стадия – формирование крупнейшего щитового вулкана, занимающего площадь диаметром около 50 км и сложенного преимущественно шохонитами, латитами и игнимбритами;

– кальдера обрушения (рис. 1), в центральной части которой образовался экструзивный комплекс высококальциевых латитов, дацитов, трахидацитов и трахириодацитов;

Кроме того, щитовую постройку Уксичана прорывает множество наложенных более мелких моногенных конусов.

Такая многостадийность и сложность строения вулканического центра, а также контрастность химического состава вулканитов послужили основой для предположений о длительности его формирования.

Палеомагнитные исследования позволили предположить [8], что формирование вулканогенных образований щитового вулкана Уксичан относится к эпохе Матуяма, т.е. от 2.59 до 0.78 млн. лет по современным данным [14]. Однако, следует учесть, что в условиях неравномерного накопле-

ния вулканитов, когда катастрофические извержения чередуются с периодами затухания вулканизма, не просто идентифицировать, к какой эпохе относится переслаивание прямо и обратно намагниченных толщ. Поэтому проведенные почти полвека назад палеомагнитные исследования не могли поставить точку в вопросе о возрасте экструзивных пород кальдеры и обрамляющих ее пачек вулканитов.

Предпринимались изотопные исследования К-Аг системы вулканитов Уксичана для определения их возраста. Так, К-Аг возраст лав из нижних горизонтов разреза [13] составляет 3.6 млн. лет (погрешность, к сожалению, не указана), а возраст двух образцов игнимбринов, также из нижней части вулканической толщи, определенный ^{40}Ar - ^{39}Ar методом по плагноклазу, составил 3.56 ± 0.50 и 3.34 ± 0.07 млн. лет [15]. Последние две даты не различаются в пределах погрешностей. Отличается ли от них первая из трех дат, сказать трудно, т.к. ее доверительный интервал не указан, поэтому скорее всего следует принять, что все три К-Аг даты указывают на один и тот же возраст, который определяется лучшим из цитированных трех определений, т.е. 3.34 ± 0.07 млн. лет.

Методика опробования

Сложное, местами дискуссионное строение вулканического центра и предполагаемое длительное его развитие делает задачу изучения истории его формирования довольно непростой. При классическом подходе пришлось бы опробовать и датировать множество отдельных вулканических и субвулканических тел, что было бы слишком трудоемко. Поэтому мы применили иной, нестандартный подход: циркон для анализа был отобран шлиховым опробованием в ручье Украинский вблизи его выхода из кальдеры (рис. 1). В этом месте ручей стекает с внутрикальдерного возвышения, образованного породами экструзивного комплекса. Такой способ опробования позволяет получить представительную пробу, содержащую циркон практически из всех породы кальдеры Уксичан для последующего U-Pb анализа единичных зерен методом лазерной абляции.

Конечно, при таком опробовании мы получаем зерна циркона без конкретной привязки внутри кальдеры. Однако задача опробования как раз в этом и состояла – путем U-Pb изотопного анализа индивидуальных зерен циркона получить все возможные значения возраста, отвечающие разным этапам формирования экструзивных пород кальдеры. В зависимости от полученного спектра U-Pb возрастов для такой обобщенной пробы, можно будет планировать дальнейшие более детальные геохронологические исследования.

Полученная таким путем фракция циркона сохранила довольно крупные зерна: при толщине призмы 100–150 мкм длина кристаллов преимущественно составляет 500–700 мкм и в единичных случаях превышает 1 мм. Отношение длины к толщине кристаллов варьирует преимущественно от 2 до 8, хотя встречаются и более удлиненные индивидуумы. Вариация длины кристаллов обусловлена в основном размерами призм; в подавляющем большинстве зерен длина призмы в несколько раз больше длины пирамиды. У большинства пирамид преимущественно развиты грани {101}, хотя {211} тоже наблюдаются у части кристаллов. Такая морфология зерен циркона указывает в целом на их быстрый рост, что характерно для вулканических и субвулканических пород, а также на вариации состава материнского расплава [16].

Несмотря на шлиховой отбор пробы из ручья, зерна практически не окатаны, поверхности кристаллов не повреждены, что, очевидно, объясняется их недалеким переносом водными потоками от коренного источника.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Изотопные исследования индивидуальных зерен циркона проводились в лаборатории изотоп-

ной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН методом лазерной абляции. Для этого использовали ICP-MS спектрометр Element-XR (Thermo-Finnigan) и лазерную установку UP-213 (New-Wave Research). В целом методика анализа близка к описанной в работе [17].

Выделенные зерна циркона отмывали от природного и лабораторного загрязнения смесью азотной и плавиковой (5 : 1) кислотой в ультразвуковой ванне при комнатной температуре 30 минут, затем несколько раз ополаскивали дистиллированной водой. Отмытые и высушенные зерна циркона с помощью препаративной иглы под бинокулярной выкладывали на подложку (двусторонний скотч) и заливали эпоксидной смолой для получения стандартной 25-мм шашки. После затвердевания смолы поверхность шашки шлифовывали на 1/4 – 1/3 размера исследуемых зерен на корундовых абразивах так, чтобы большая часть каждого зерна оставалась нескрытой для надежного механического удержания смолой. Если сошлифовывать половину зерна или больше, то оно нередко вылетает из смолы в процессе лазерной абляции. После шлифования шашку полировали алмазным абразивом с крупностью зерна ~1 мкм. Перед установкой образцов в камеру лазера шашки отмывали 5%-ной азотной кислотой в ультразвуковой ванне и ополаскивали водой.

Шашки с образцами и стандартами помещали в самодельную камеру из оргстекла, покрытую просветленным под 213 нм кварцевым стеклом толщиной 2 мм. В ходе анализа камера продувалась гелием со скоростью 0.4–0.5 л/мин. После выхода потока гелия из камеры к нему примешивался аргон с примерно вдвое большим расходом. Потоки газов – наиболее важные и чувствительные параметры при настройке оптимального сигнала. Настройку на максимум сигналов Pb⁺ и U⁺ и минимум отношения UO⁺/U⁺ производили при линейном сканировании стандарта GJ-1. Типичное отношение UO⁺/U⁺ в анализе составляет 0.02–0.03%.

Диаметр лазерного пятна при абляции – 30 мкм, частота импульсов – 4 Гц, плотность энергии в пятне ~10–15 Дж/см².

Анализ каждого зерна циркона проводили в фиксированной точке по следующей схеме: в течение 50 с измеряли фоны, при этом лазер работал, но луч был перекрыт заслонкой; затем заслонка в заданный момент открывалась и следующие 110 с происходило испарение образца пучком лазера и полученный аэрозоль поступал в ICP источник. Сканирование масс-спектра осуществляли по центрам следующих масс: 206-207-208-232-238 с длительностями замера 30-30-15-10-10 мс соответственно. Измерение на массе 204 не проводили из-за неизменно высоких фонов ртути в спектре.

Пример единичного анализа ненарушенного циркона приведен на рис. 2а. Однако, если лазерный луч по мере абляции вскрывал включения, трещины или иные дефекты, содержащие обыкновенный свинец, то временная развертка результатов анализа могла выглядеть, как показано на рис. 2б. Последующая обработка результатов измерения проводилась с помощью программного пакета Glitter [18]. В основном она сводилась к выбору одного интервала на временной развертке с ненарушенными сигналами измеряемых изотопов. В примере на рис. 2б это был бы интервал между 60-й и 90-й секундами анализа.

К сожалению, программный пакет Glitter не вычисляет коэффициент корреляции погрешностей изотопных отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, поэтому в качестве его оценки мы используем следующее выражение:

$$\rho = \frac{v_{6/2}^2 + v_{7/5}^2}{v_{6/2}^2 + v_{7/5}^2 + v_{7/6}^2},$$

где v — относительная погрешность (коэффициент вариации) соответствующего изотопного отношения. Статистическое моделирование сигналов с гауссовым распределением показало хорошее соответствие между результатами прямого расчета и этой приближенной оценкой коэффициента корреляции ошибок соответствующих отношений.

Анализ образцов производили блоками, каждый из которых начинался и заканчивался анализом стандартов, т.к. лазерная абляция — сравнительный метод анализа. В нашем протоколе каждый блок начинался и заканчивался парой анализов стандарта GJ-1 [17]. После первой пары анализов стандарта GJ-1 и перед завершающей анализировали стандарт 91500 [19] для независимого контроля правильности результатов.

Результаты анализа циркона 91500, полученные в ходе настоящего исследования, приведены на рис. 3. На этом же рисунке для сравнения показаны результаты изотопного анализа этого образца [19, 20], проведенные методом TIMS с кислотным разложением. Как видно, наши данные для этого стандарта неплохо согласуются с данными TIMS, хотя они и не позволяют увидеть его небольшую переменную дискордантность, вскрытую более точными анализами TIMS.

Поправки на неравновесность

Для молодых значений U-Pb возраста, порядка первых миллионов лет и менее, необходимо учитывать отсутствие векового равновесия в цепочках распада $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ и $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ и вносить соответствующие поправки [21, 22]. Коррекция необходима для наиболее долгоживущих

промежуточных членов: в ряду $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ это ^{234}U ($T_{1/2} = 0.25$ млн. лет), ^{230}Th (0.076 млн. лет) и ^{226}Ra (1.6 тыс. лет), а в ряду $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ это ^{231}Pa (32.8 тыс. лет). Расчет возраста с использованием простых выражений

$$t_{238} = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}} + 1 \right)$$

и

$$t_{235} = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} + 1 \right)$$

можно было бы проводить, если бы активности всех промежуточных членов ряда в цирконе изначально были строго одинаковыми. Однако это не так. При кристаллизации циркона двухвалентный радий, элемент второй группы, ближайший тяжелый аналог бария, очевидно, не входит в структуру циркона столь же легко, как уран или торий. Пятивалентный протактиний, аналог тантала, также оказывается “чужим”. Исходную активность этих нуклидов относительно родоначальника соответствующего ряда распада можно представить как отношение коэффициентов распределения нуклид/уран между цирконом и его источником. Такие комбинированные коэффициенты распределения для отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ между цирконом и источником вещества принимались равными 1, 0.001 и 0.01 соответственно. Комбинированный коэффициент распределения для $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ вычислялся исходя из измеренного Th/U отношения в анализируемом зерне циркона и среднего Th/U отношения для данного типа пород. Для островодужных базальтов эта величина близка к 2.6 (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>). В итоге поправка на неравновесность в рядах распада к значению возраста для исследованных в этой работе зерен циркона оказалась около +0.1 млн. лет, что заметно превышает полученную статистическую погрешность результата.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты локального анализа 88 зерен циркона показаны на рис. 4, на графике Тера-Вассербурга. Большая часть данных на графике группируется вблизи конкордии и лишь одна точка отклоняется от нее сильно вверх по направлению к составу обыкновенного свинца. Дискордия, проведенная через все аналитические точки, пересекает ось ординат выше самой древней точки на конкордии, в области $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.84$, что отвечает составу современного свинца. Очевидно, смещение части точек вдоль этой линии отражает примесь обыкновенного свинца в них, а не влияние какого-либо древнего события.

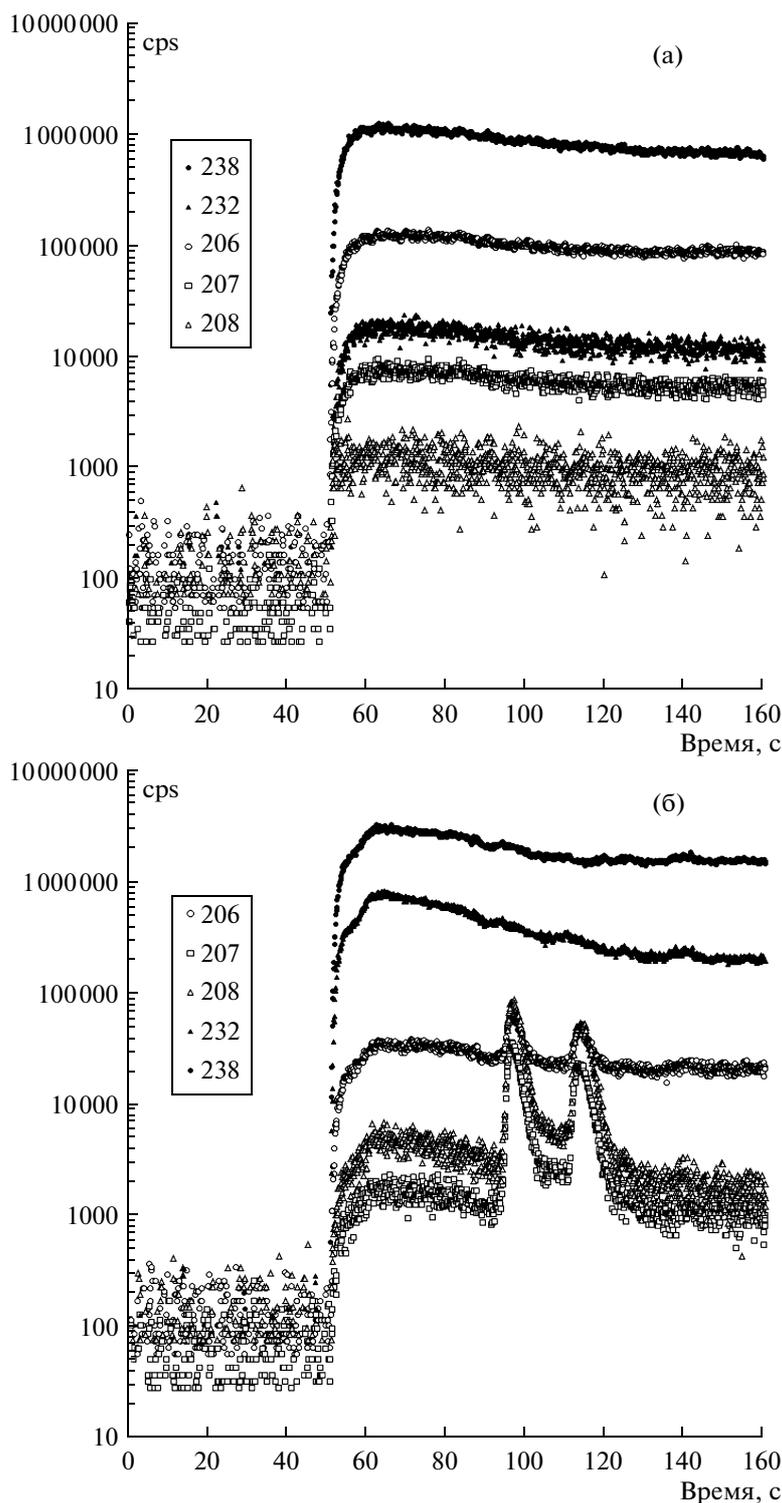


Рис. 2. Примеры измерения сигналов в ходе единичного анализа. Первые 50 с анализа луч лазера перекрыт заслонкой и производится замер фонов, затем заслонка открывается и происходит испарение образца. На нижнем графике сигналы изотопов свинца с 92-й секунды отчетливо показывают присутствие дефектов с обыкновенным свинцом (трещины или минеральные включения).

Тем не менее, наличие примесного обыкновенного свинца в некоторых данных вынуждает применять модель с дискордией. В результате, по 88 точкам получено значение возраста $3.28 \pm$

0.04 млн. лет, СКВО = 1.7. Этот возраст отвечает позднему плиоцену. Более древних значений возраста, так же как и более молодых, четвертичных, в результате анализа не обнаружено.

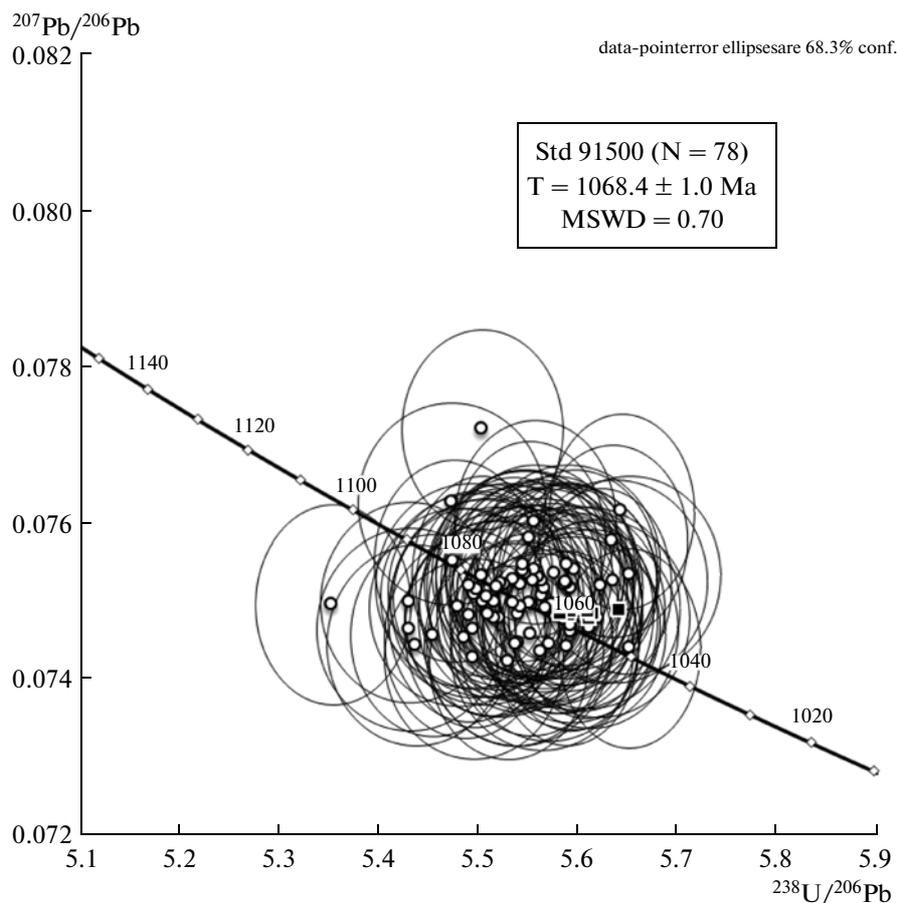


Рис. 3. Диаграмма Тера-Вассербурга с полученными в ходе выполнения настоящей работы результатами анализа стандарта 91 500 относительно стандарта GJ-1. Квадратами показаны данные для 91 500, полученные методом TIMS [19, 20].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Циркон для анализа был отобран шлиховым опробованием в ручье Украинский вблизи его выхода из кальдеры. В принципе, у такого способа опробования могут быть две диаметрально противоположные цели: сбор циркона из одного геологического тела или напротив, представительное опробование всей дренируемой территории. В обоих случаях используется высокая устойчивость циркона к выветриванию, способность сохранять ненарушенными химический состав минерала и изотопный состав слагающих его элементов, когда большинство породообразующих минералов разрушается и освободившийся циркон переносится временными и постоянными водными потоками вместе с другими тяжелыми минералами.

Первый подход полезен, когда исследуемая порода бедна цирконом, что характерно для пород основного состава, и для его выделения обычным способом в лабораторных условиях понадобилось бы отбирать из каждого коренного обнажения нереально большие пробы, скажем, многие десятки или даже сотни килограмм. Если

же такое геологическое тело дренируется небольшим водным потоком, который выше точки отбора шлиховой пробы не выходит за пределы площади обнажения этого тела, то мы можем ожидать, что в ложе этого потока окажутся зерна циркона, выделенные из породы естественными процессами выветривания и сепарации минералов по удельному весу. Отбор шлиха в таком случае позволит сэкономить много сил для выделения циркона из интересующего нас геологического тела. Также для труднодоступных районов может оказаться существенным, что вместо многокилограммовой коренной пробы вы получаете небольшой пакетик тяжелых минералов с цирконом.

Противоположный подход применяется к территориям — вне зависимости от их площади — со сложным геологическим строением, когда неизвестно, насколько разновозрастны слагающие эти территории породы [23, 24]. Он состоит в том, что, отбирая шлиховую пробу из более или менее крупной реки, мы можем увидеть признаки разных событий, отвечающих возрасту всех дрениру-

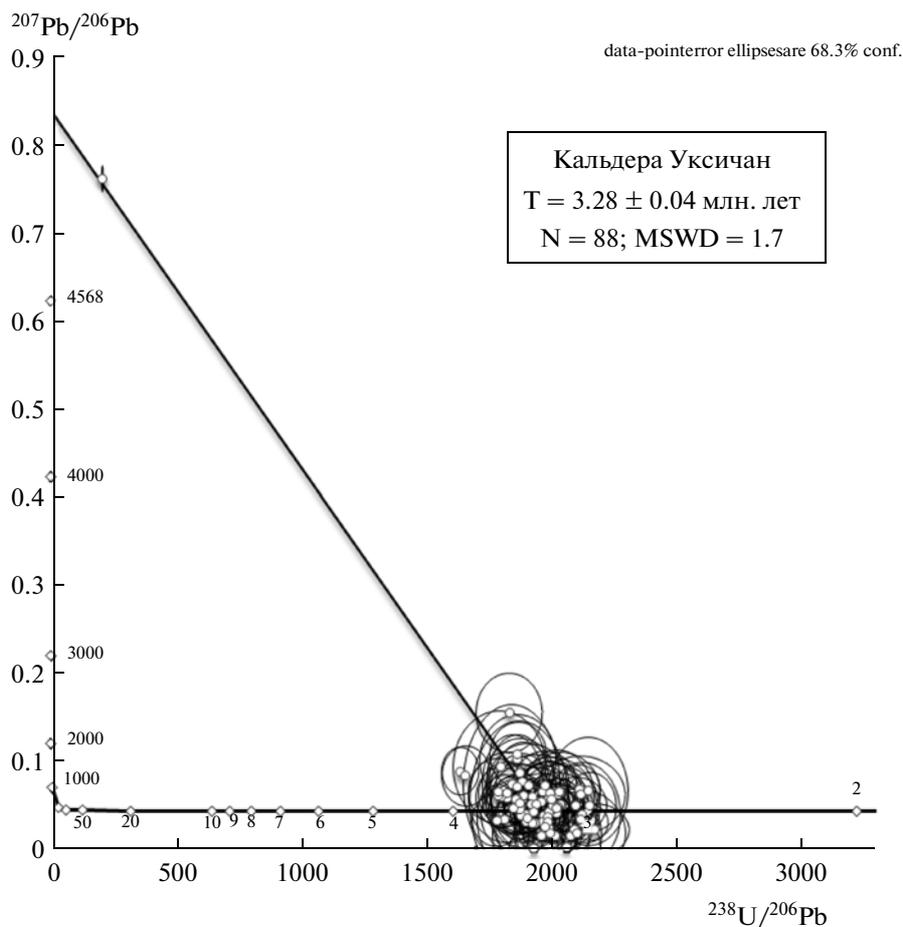


Рис. 4. Диаграмма Тера-Вассербурга с результатами анализа детритовых цирконов из кальдеры Уксичан. Верхнее пересечение дискордии не имеет возрастного смысла и обусловлено примесью обыкновенного свинца.

емых пород, при исследовании представительного количества индивидуальных зерен циркона.

В первом случае для получения статистически надежного геохронологического результата обычно достаточно проанализировать 40–50 зерен циркона, во втором – количество зерен желательно увеличить, по крайней мере, до 100 или более, чтобы не пропустить в выборке относительно слабо представленные события.

Кальдера Уксичан сложена различными по составу породами, преимущественно это высококальциевые дациты и андезиты, латиты, трахиты, шошониты экструзивного комплекса, т.е. наиболее поздние. Однако в пределах кальдеры обнажаются и породы вулканического фундамента – самые древние в последовательности формирования Уксичана. Кроме того, поздний экструзивный комплекс, так или иначе, наложился на более ранние породы, слагавшие подводный канал для более ранних лав различного состава, от кислых до основных. Присутствие вулканических и субвулканических пород среднего и кислого состава, как на ранних, так и на поздних этапах

формирования вулкана позволяет предположить, что в продуктах их выветривания в пределах кальдеры присутствуют зерна циркона, представляющие различные фазы (этапы) становления вулкана.

Несмотря на это, в пробе из р. Украинский обнаружены цирконы с гомогенным возрастом, 3.28 ± 0.04 млн. лет. Признаков более ранних или более поздних событий не обнаружено (рис. 4). Если бы кальдера Уксичан формировалась в течение нескольких миллионов лет, как это предполагалось ранее, то зерна циркона из пород различного возраста находились бы в пределах кальдеры и неизбежно попали бы в пробу.

Проведенные недавно геохронологические исследования вулканических пород Уксичана Ar-Ar методом по плагиоклазу [15] показали близкие результаты: 3.56 ± 0.50 и 3.34 ± 0.07 млн. лет, которые в пределах погрешностей не отличаются от полученного нами.

Получение единого значения U-Pb возраста по цирконам и совпадение значений U-Pb и Ar-Ar возраста, очевидно, не может быть следствием

наложенного процесса, метаморфизма. Для перестройки U-Pb системы цирконов необходим метаморфизм предельно высоких степеней, признаков которого не наблюдается в вулканитах кальдеры Уксичан. Имеющие место гидротермальные изменения некоторых пород в пределах кальдеры носят локальный характер и не могли бы привести, скажем, к перекристаллизации или термальному омоложению цирконов во всех вулканах. Совпадение показаний K-Ar геохронометра по плагиоклазу и U-Pb по циркону также указывает, что никаких вторичных искажений в показаниях обоих хронометров не было.

Проведенные исследования указывают на то, что принимавшаяся ранее схема длительного формирования кальдеры Уксичан, накопления вулканитов в течение нескольких миллионов лет, по всей вероятности не верна. Следует иметь в виду, что большая часть вулканической последовательности пород, от основания до наиболее поздних внутрикальдерных экструзивных образований, сформировалась в весьма сжатый промежуток времени. Сейчас трудно говорить о его реальной длительности, она, скорее всего, меньше полученной погрешности возраста, а само событие, сформировавшее вулканические породы кальдеры Уксичан, имеет возраст 3.28 ± 0.04 млн. лет.

Радиоуглеродные и тефрохронологические исследования [1–3, 5 и др.] показывают, что формирование отдельных вулканов, накопление вулканических толщ значительной мощности, могут происходить за очень короткие интервалы времени, за сотни или тысячи лет. Катастрофические кальдерообразующие извержения так же происходят быстро, в геологическом масштабе времени — мгновенно. Поэтому вполне возможно, что весь комплекс вулкана Уксичан, мог сформироваться довольно быстро, как это следует из представленных здесь результатов.

Напротив, в свете современных данных о скорости формирования вулканов было бы сложнее объяснить причину длительного вулканизма в одной точке, на протяжении нескольких миллионов лет. У большинства исследователей не вызывает сомнения, что первопричиной образования островодужных расплавов является процесс субдукции. Представляется вполне логичным, что в зонах активных континентальных окраин с высокими скоростями субдукции длительная, в течение миллионов лет, вулканическая активность в одной фиксированной точке должна быть скорее исключением, чем правилом, в противном случае не редкими были бы признаки направленной миграции вулканического очага вдоль направления погружения океанической плиты. Такие признаки не описаны в современной литературе. При линейной скорости погружения тихоокеанской плиты порядка 9 см/год [25] связанный с ней маг-

матический очаг, живущий 3–5 млн. лет должен был бы переместиться на сотни километров. Таких цепей на Камчатке нет. Напротив, простирающиеся вулканические хребты [26] Курильских островов и Камчатки ориентировано не в направлении субдукции, а вдоль конвергентных границ [27]. Сами вулканы, входящие в такие объединения, образованы одновременно и не несут признаков направленной миграции долгоживущего глубинного очага. Примером может служить цепь вулканов Авачинский — Корякский — Ааг, в которой последний вулкан — потухший, хотя относительно направления субдукции находится в тылу двух действующих соседей. Долгоживущими и при этом неподвижными могли бы быть приповерхностные вулканические очаги, но их собственный тепловой ресурс, очевидно, ограничен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шлиховое опробование для выделения цирконов и последующего геохронологического исследования может быть использовано для решения разных задач: от региональных предварительных оценок возраста всех пород, имеющих в бассейне речной системы до локального опробования отдельных геологических объектов.

Цирконы из шлиховой пробы, отобранной в ручье Украинский в кальдере вулкана Уксичан, показали согласованное значение U-Pb возраста, отвечающее 3.28 ± 0.04 млн. лет. Этот факт позволяет с высокой долей уверенности отклонить гипотезу длительного формирования этого вулканического центра, которая ранее была выдвинута на основе косвенных признаков и надолго прижилась в геологической литературе.

Магматические очаги, связанные с зонами субдукции, имеют очень короткие времена жизни, много меньше одного миллиона лет. В противном случае они порождали бы на поверхности многокилометровые вулканические цепи вдоль направления движения погружающейся плиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 11-05-00062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А., Селянгин О.Б., Сулержицкий Л.Д. Тефрохронологические исследования как метод изучения закономерностей циклического развития вулкана // Бюллетень Вулканогеологических Станций. 1978. Т. 54. № С. 41–52.
2. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Эндеогенные катастрофы в голоцене на Камчатке и Курильских островах // Доклады РАН. 2003. Т. 389. № 5. С. 662–665.

3. Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. 2008. ИГЕМ РАН: Москва. С. 19–40.
4. Певзнер М.М. Северная граница вулканической активности Камчатки в голоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. Т. 15. № 1. С. 117–144.
5. Певзнер М.М. Пространственно-временные закономерности активизации вулканизма Срединного хребта Камчатки в голоцене (по данным радиоуглеродного датирования). Диссертация ... доктора геол.-мин. наук. 2011. ГИН РАН. 332 С.
6. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Новые данные о возрасте плейстоценовых отложений Центральной Камчатской депрессии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13. № 1. С. 106–115.
7. Костицын Ю.А., Белоусова Е.А., Бортников Н.С., Шарков В.Е. U-Pb возраст и $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ цирконов в габброидах из осевой зоны Срединно-Атлантического хребта (САХ): результаты исследования методом лазерной абляции // Доклады РАН. 2009. Т. 428. № 5. С. 654–658.
8. Огородов Н.В., Кожемяка Н.Н., Важеевская А.А., Огородова А.С. Вулкан Уксичан в Срединном хребте Камчатки / Вулканизм и геохимия его продуктов. 1966. Наука: Москва. С. 27–39.
9. Огородов Н.В., Кожемяка Н.Н., Важеевская А.А., Огородова А.С. Вулканы и четвертичный вулканизм Срединного хребта Камчатки. 1972. Москва: Наука. 192 с.
10. Ogg J.G., Ogg G., Gradstein F.M. The Concise Geologic Time Scale (CGTS). 2008: Cambridge University Press. 184 p.
11. Василевский М.М., Стефанов Ю.М., Широкий Б.И. Металлогения верхнего структурного этажа Камчатки и проблемы рудной специализации этапов тектоно-магматического развития складчатых областей / Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. 1977. Недра: Москва. С. 14–59.
12. Антипин В.С., Вольнец О.Н., Перепелов А.Б., Паточка М.Г., Пампура В.Д., Успенский В.С. Геологические соотношения и геохимическая эволюция известково-щелочного и субщелочного вулканизма кальдеры Уксичан (Камчатка) / Геохимия магматических пород современных и древних активных зон. 1987. Наука: Новосибирск. С. 73–90.
13. Перепелов А.Б., Чащин А.А., Мартынов Ю.А. Срединно-камчатская зона (плиоцен-голоцен) / Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Ханчук А.И., Ред. 2006. Дальнаука: Владивосток. С. 382–398.
14. Mankinen E.A., Wentworth C.M. Preliminary Paleomagnetic Results From The Coyote Creek Outdoor Classroom Drill Hole, Santa Clara Valley, California // USGS Open File Report. 2003. V. 03–187. P. 1–35.
15. Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar and U-Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 189. P. 57–80.
16. Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. Atlas of Zircon Textures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. V. 53. P. 469–500.
17. Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology // Chemical Geology. 2004. V. 211. P. 47–69.
18. van Achterbergh E., Ryanm, C. G., Griffin, W. L. GLITTER: On-line interactive data reduction for the laser ablation ICP-MS microprobe // Proceedings of the 9th V.M. Goldschmidt Conference. 1999. Cambridge, Massachusetts 305.
19. Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Quadt A.V., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // Geo-standards Newsletter. 1995. V. 19. P. 1–23.
20. Amelin Y., Zaitsev A.N. Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. P. 2399–2419.
21. Schärer U. The effect of initial ^{230}Th disequilibrium on young UPb ages: the Makalu case, Himalaya // Earth and Planetary Science Letters. 1984. V. 67. P. 191–204.
22. Schmitt A.K., Grove M., Harrison T.M., Lovera O., Hulen J., Walters M. The Geysers – Cobb Mountain Magma System, California (Part 1): U-Pb zircon ages of volcanic rocks, conditions of zircon crystallization and magma residence times // Geochim. Cosmochim. Acta. 2003. V. 67. P. 3423–3442.
23. Belousova E.A., Preiss W.V., Schwarz M.P., Griffin W.L. Tectonic affinities of the Houghton Inlier, South Australia: U-Pb and Hf isotope data from zircons in modern stream sediments // Australian Journal of Earth Sciences. 2006. V. 53. P. 971–989.
24. Campbell I.H., Allen C.M. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen // Nature Geoscience. 2008. V. 1. P. 554–558.
25. Gorbатов A., Kostogorov V. Maximum depth of seismicity and thermal parameter of the subducting slab: general empirical relation and its application // Tectonophysics. 1997. V. 277. P. 165–187.
26. Леонов В.Л. Вулканические хребты: морфология, ориентировка, значение для геотермии / Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Международный полевой Курило-Камчатский семинар. Рычагов С.Н. Editor. 2005, ОТТИСК. С. 171–180.
27. Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и Сейсмология. 1999. Т. № 2. С. 3–23.