

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ 3D-МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ  
ТОЛБАЧИНСКОГО ДОЛА ПО ДАННЫМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ***Кугаенко Ю.А.<sup>1</sup>, Салтыков В.А.<sup>1</sup>, Горбатиков А.В.<sup>2</sup>, Степанова М.Ю.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский,  
ku@emsd.ru**<sup>2</sup> Институт физики Земли РАН, г.Москва*

В данной работе исследуется глубинное строение Толбачинского Дола - крупной зоны ареального базальтового вулканизма, протянувшаяся почти на 40 км на юг от действующего вулкана Плоский Толбачик (Южная часть Ключевской группы вулканов на Камчатке). Это линейная структура, сформировавшаяся в течение последних 10 тыс. лет и сохраняющая высокую эруптивную активность. Во всем Курило-Камчатском вулканическом поясе по средней продуктивности в голоцене Толбачинский Дол уступает только Ключевскому вулкану. С 27.12.2012 г. по 23.08.2013 г. в северной части Толбачинского Дола происходило очередное грандиозное базальтовое лавовое извержение.

Главной особенностью Толбачинского дола является большая концентрация шлаковых конусов в его осевой части: в узкой полосе шириной 3-4 км, отвечающей крупной зоне разломов, сосредоточено около 80% всех эруптивных центров в виде многочисленных трещин и цепочек шлаковых конусов, образующих отчетливо выраженную в рельефе вулканическую гряду. Благодаря особенностям проявлений эруптивной активности Толбачинская региональная зона шлаковых конусов включена в ряд действующих и потенциально активных вулканических образований Камчатки в качестве самостоятельного объекта [7]. Средняя часть Толбачинского Дола представляет отдельный интерес и имеет ряд особенностей: сосредоточение здесь самых крупных шлаковых конусов (относительная высота около 300 м); контрастность состава поступающей на поверхность магмы; высокий коэффициент эксплозивности извержений последних 2 тыс. лет. Здесь находится Северный прорыв (1975 г.) Большого трещинного Толбачинского извержения (СП БТТИ). История вулканизма Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов и детальное описание БТТИ изложены в [1, 2, 9, 10].

Для реконструкции глубинной структуры среды под зоной шлаковых конусов применен метод низкочастотного микросейсмического зондирования [3], который базируется на использовании информации о пространственно-спектральных вариациях естественного поля микросейсм. Метод низкочастотного микросейсмического зондирования реализуется в допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод волны Рэлея и базируется на свойстве скоростных неоднородностей земной коры искажать спектр низкочастотного микросейсмического поля в своей окрестности. На поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды на определенной частоте  $f$  уменьшаются, а над низкоскоростными – возрастают. Частота  $f$  связана с глубиной залегания неоднородности  $H$  и скоростью фундаментальной моды волны Рэлея  $V_R(f)$  соотношением  $H(f) = 0.4 \lambda(f) = 0.4 V_R(f)/f$ , что подтверждено как исследованиями геологических объектов различного масштаба и генезиса, так и модельными расчетами.  $H(f)$  – глубина,  $\lambda(f)$  – длина волны фундаментальной моды Рэлеевской волны,  $V_R(f)$  – скорость фундаментальной моды Рэлеевской волны,  $f$  – частота в спектре микросейсмического сигнала, для которой производится расчет). Метод не требует применения обширных синхронизированных сейсмических сетей с большим количеством датчиков.

Наблюдения представляют собой последовательные сеансы регистрации фонового естественного сейсмического излучения в заданных точках. Для достижения статистической устойчивости микросейсмический сигнал накапливается в течение экспериментально определенного времени стационарности сигнала. Для исключения естественной временной трендовой составляющей в спектре зондирующего микросейсмического сигнала измерения в точках сети корректируются на записи опорной (базовой) станции, которая работает непрерывно на протяжении всего времени проведения съемки.

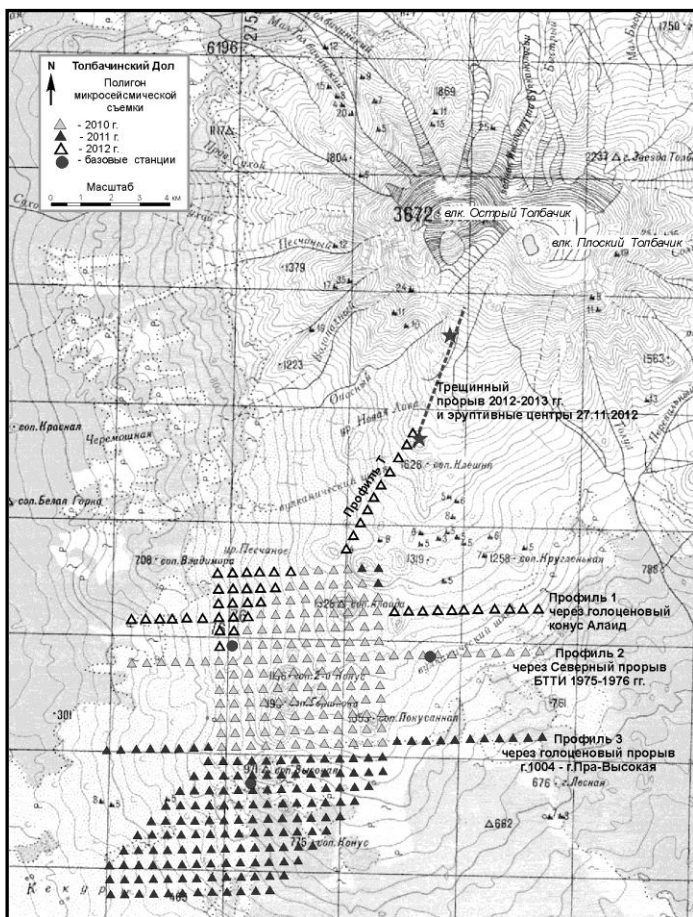


Рис. 1. Полигон микросейсмической съемки, выполненной в районе Толбачинского Дола в 2010-2011 гг. Треугольниками отмечены точки, в которых проводилась регистрация фонового микросейсмического излучения. Кружки – базовые станции. Профили микросейсмической съемки имеют длину 14-15 км. Площадная съемка выполнена в 300 точках с шагом 500 м. Дополнительный профиль Т, начатый осенью 2012 г., захватывает южную оконечность нового трещинного прорыва Толбачинского извержения 2012-2013 гг.

20 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн вдоль указанных профилей (рис.2). Разрезы демонстрирует сложное строение зоны современного ареального вулканизма. При интерпретации выявленных неоднородностей мы учитывали, что во всех трех случаях профили прошли через зоны реально существовавших извержений, в ходе которых имел место подъем глубинного вещества к поверхности. Поэтому мы считаем возможным при интерпретации результатов наших построений употреблять термины «магматический очаг», «магмовод», «питающий канал извержения», не исключая из внимания и возможные обширные зоны трещиноватости, сопутствующие внедрению и образованию магматических тел. На разрезах (рис. 2) выделяются относительно низкоскоростные аномалии, которые могут быть магмоводами или объемами среды, содержащими некоторое количество магмы. Сопоставление изображений показывает, что разрезы аналогичны, на них выделяются очень похожие структуры.

Выявлены низкоскоростные области мы интерпретируем следующим образом: А1-А3 – зоны генерации магмы, В1-В3 - области промежуточных магматических очагов, С1-С3 – области близповерхностных периферических магматических очагов. Субвертикальные низкоскоростные структуры, соединяющие между собой эти объекты, рассматриваются нами как магмопроводящие зоны. Подробнее эти предположения осуждаются и обосновываются нами в работах [5, 6]. На полученный нами разрез по профилю 2, пересекающему СП БТИ, наложены контуры неоднородностей (малоглубинных магматических очагов), выделенных на глубинах 2-3 км и 7-8 км по геофизическим данным и представленных в работах [1] и др. Продемонстрировано, что наши результаты (низкоскоростные неоднородности), полученные независимым методом, соответствуют

Для регистрации использовались портативные широкополосные цифровые велосиметры Guralp CMG-6TD.

Полигон, на котором в 2010-2012 гг. проводилась микросейсмическая съемка в районе Толбачинского Дола, представлен на рис. 1. Он включает область площадной съемки, три параллельных профиля длиной 14-15 км, пересекающих основной магмоподводящий разлом Толбачинского Дола через зоны разновозрастных трещинных прорывов, и часть еще не законченного профиля Т, уходящего в северо-восточном направлении к вулкану Плоский Толбачик. Шаг съемки 500 м. Частота дискретизации 100 отсчетов/сек. Полигон был размечен с помощью цифровых карт на этапе подготовки полевых работ с занесением координат точек наблюдения в портативные GPS-навигаторы. Такой подход обеспечил линейность профиля и равномерность реперов регистрации.

Профиль 1 был заложен через голоценовый шлаковый конус Алайд (возраст – 1-1,5 тыс. лет). Профиль 2 пересек цепочку конусов Северного прорыва БТИ 1975-1976 гг. Профиль 3 прошел на 3 км южнее, через область более древних извержений, представленную вулканическими постройками горы Высокой (возраст - менее 1 тыс. лет) и горами 1004 и Пра-Высокой (возраст – около 2 тыс. лет).

По данным микросейсмической съемки построены глубинные разрезы до

представлениям о расположении магматических очагов под СП по данным выполненных ранее комплексных исследований БТТИ.

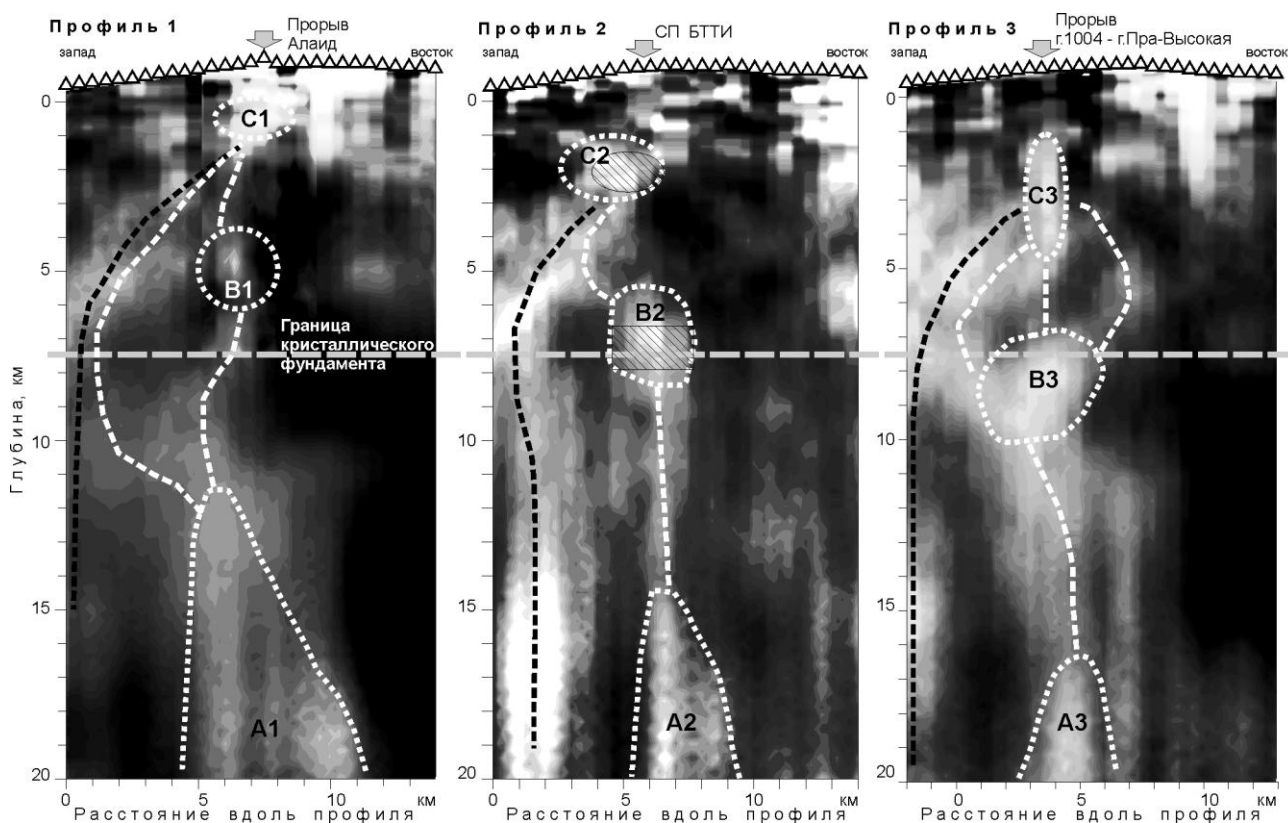


Рис. 2. Вертикальные разрезы вдоль микросейсмических профилей 1-3 (рис.1), отражающие глубинное распределение относительных скоростей сейсмических волн, с элементами интерпретации. Низкоскоростные неоднородности соответствуют светлым тонам палитры. А1-А3, В1-В3 и С1-С3 – низкоскоростные неоднородности, выделенные методом микросейсмического зондирования. Точечный пунктир - границы выделенных низкоскоростных областей. Треугольники – реперы микросейсмической съемки. Штриховым пунктиром (белым и черным) обозначены возможные магмоводы магматической питающей системы Толбачинского Дола, выделяемые как низкоскоростные структуры. Объект В1 под прорывом Алаид в данном представлении выделяется не очень ярко, он нанесен на рисунок по результатам 3D построений.

Рассмотренные прорывы являются разнесенными во времени эпизодами, но пространственно близкими (соседними) событиями эруптивной активности Толбачинского Дола, сходными по характеру извержений и составу пород [2]. Поэтому продемонстрированная схожесть их глубинного строения (до глубины 20 км) представляется неслучайной. Мы предполагаем, что на примере трех разновозрастных прорывов обнаружена закономерность в конфигурации питающих систем извержений Толбачинской региональной зоны ареального вулканизма (в ее средней части).

- питающие каналы извержений имеют сложную конфигурацию, они близки к вертикальным формам в кристаллическом фундаменте и становятся наклонными на менее глубоких горизонтах; их особенностью является дифференцированный характер – чередование участков канала и ограниченных низкоскоростных областей, которые могли сформироваться в местах скопления или повышенного содержания магмы и могут интерпретироваться как магматические очаги;

- на глубинах 15-20 км располагается верхняя часть зоны магматического питания вышележащих вулканических прорывов. Она может быть единой для всей цепочки конусов осевой части Толбачинского Дола;

- промежуточный магматический очаг формируется близ границы кристаллического фундамента в диапазоне глубин 5-9 км;

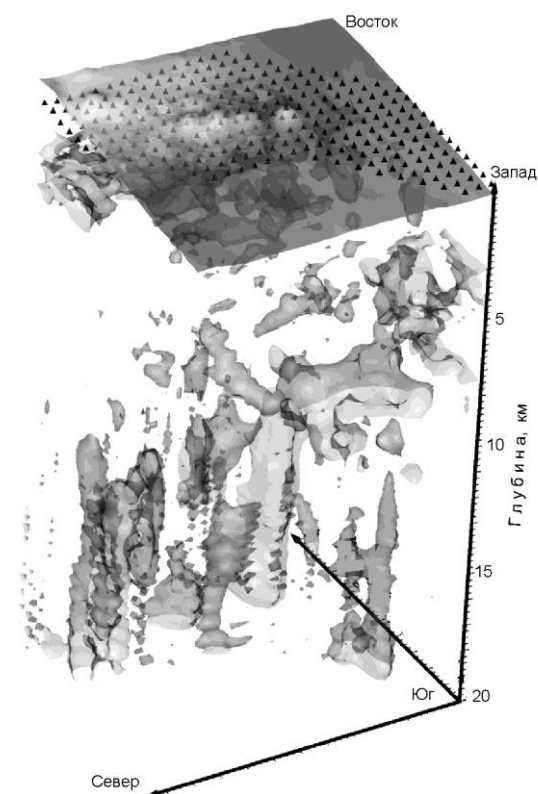
- верхний малоглубинный очаг располагается непосредственно под зоной прорыва в диапазоне глубин 1,5-4 км от поверхности, что по [4] соответствует оптимальной глубине формирования периферического очага;

- выявленные низкоскоростные неоднородности имеют тенденцию заглубления в южном направлении;

- под западной частью Толбачинского Дола, в 4-6 км от основного канала извержений, проходит низкоскоростная структура, в верхней своей части соединяющаяся с верхними приповерхностными очагами прорывов; мы предлагаем рассматривать ее как возможный дополнительный или альтернативный путь поступления магмы в приповерхностный очаг. Кроме того, эта структура, наклонная в верхней части, связана со строением разломной зоны в осевой части Толбачинского Дола.

Ограниченный объем статьи не позволяет в достаточной мере проиллюстрировать результаты 3D-модели, полученной по результатам площадной съемки. Поэтому ниже сформулированы основные выявленные особенности конфигурации низкоскоростных структур, которые мы связываем с магматической питающей системой Толбачинского Дола:

- распределение низкоскоростных структур в исследуемом объеме среды неоднородно;
- основные субвертикальные структуры, которые мы рассматриваем как питающие каналы извержений, сконцентрированы в район цепочки наиболее высоких конусов (СП БТТИ – г.1004 – г.Высокая);
- в направлении на север последний единичный «корень» выявляется чуть южнее конуса Алаид, севернее субвертикальные низкоскоростные зоны не выделяются;
- в южной части района площадной съемки (южнее г.Высокой) субвертикальные формы отсутствуют, однако на глубине 6-8 км выявлен субгоризонтальный объект, выходящий на юг за пределы полигона (этот объект отображен на рис.3). Судя по получаемым 3D-изображениям, эта структура может в своей северной части соединиться с субвертикальным подводным каналом.



Представленные результаты 3D-моделирования носят предварительный характер.

Рис.3. 3D-представление низкоскоростных аномалий, выявленных под районом проведения площадной эквидистантной микросейсмической съемки Толбачинского Дола. Представление ориентировано на наилучшую визуализацию субгоризонтальной низкоскоростной структуры на глубине 6-8 км, проявляющейся под южной частью полигона (южнее г.Высокой) и уходящей на юг за его границы.

На рис.4 приведен разрез вдоль выполненной в 2012 г. части микросейсмического профиля Т. На северо-востоке профиль заканчивается за конусом Красным. Именно эта область была наиболее активна на протяжении всего Толбачинского извержения 2012-2013 г. Важным результатом является то, что под конусом Красным не выявлены субвертикальные низкоскоростные каналы, которые могли бы ассоциироваться с подводными каналами древних извержений или каналом готовящегося извержения. Представленная информация может быть использована при разработке моделей трещинного извержения 2012-2013 гг. Вероятно, питание извержения на начальном этапе обеспечивалось основным магматическим очагом,

расположенным под вулканом Плоский Толбачик, что подтверждается сейсмической активизацией 2012 г., охватившей всю постройку вулкана [8].

### Заключение

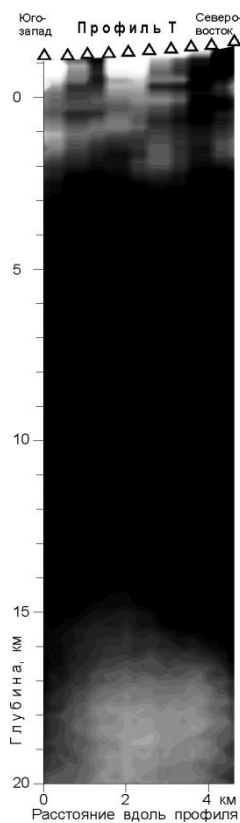
Глубинное строение магматической системы и питающих каналов Толбачинского Дола исследуется с использованием новой технологии пассивной сейсмологии - методом низкочастотного микросейсмического зондирования.

В 2010-2012 гг. проведены специально спланированные полевые работы на детально размеченном полигоне, где была выполнена микросейсмическая съемка. Полигон включает несколько профилей и область эквидистантной площадной съемки.

По данным микросейсмической съемки построены глубинные разрезы до 20 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн.



Под тремя разновозрастными трещинными прорывами Толбачинского Дола показаны элементы магматической системы, которые проявляются как низкоскоростные аномалии. Выявленные аномалии сопоставлены с данными по геофизической изученности глубинного строения исследуемого района и проинтерпретированы как разноглубинные области магматических очагов и соединяющих их питающих каналов. Показано, что элементы магматической питающей системы под тремя изученными эруптивными центрами схожи между собой. Выдвинуто предположение, что существует закономерность в конфигурации питающих систем извержений средней части Толбачинской региональной зоны ареального вулканизма. Повторяемость результатов вдоль трех профилей свидетельствует в пользу того, что выявленные структуры действительно существуют.



По результатам площадной съемки построена предварительная 3D-модель глубинной структуры исследуемой области. Выявлены различия строения в ее различных частях.

Показано, что под южным концом трещины нового Толбачинского извержения 2012-2013 гг. за полтора месяца до его начала не выделяются субвертикальные структурные неоднородности, которые могли бы быть интерпретированы как подводящие каналы готовящегося прорыва.

Исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ № 13-05-00117.

Рис. 4. Вертикальный разрез вдоль микросейсмического профиля Т (рис.1), отражающий глубинное распределение относительных скоростей сейсмических волн. Светлые тона соответствуют относительно пониженной скорости, темные – повышенной. Профиль ориентирован на вершину вулкана Плоский Толбачик для исследования области магматического очага. Пока он пройден лишь частично и заканчивается за конусом Красным, в области южных эруптивных центров Толбачинского извержения 2012-2013 гг., под которыми по данным за октябрь 2012 г. методом микросейсмического зондирования не выявлены признаки каких-либо субвертикальных низкоскоростных структур, которые могли бы интерпретироваться как формирующиеся питающие каналы предстоящего извержения, которое началось в

конце ноября 2012 г., через полтора месяца после проведения микросейсмической съемки.

### Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение / Отв.ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б. и др. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. Гл. V. С. 177-222.
3. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008а. № 7. С. 66-84.
4. Ермаков В.А, Геншафт Ю.С. Механизм извержения Северного прорыва Толбачинского дола в 1975 г. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 5. С. 1076-1080.
5. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Особенности глубинного строения района Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. по данным микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2013. № 5.
6. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Абкадыров И.Ф. Новые данные о глубинном строении Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 539-543.
7. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Новый подход к определению понятия "действующий вулкан" // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 191-203.
8. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Об аномалии сейсмического режима, предварявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 20. С.16-19
9. Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н. и др. Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т.2. М.: Наука, 1991. С. 214-274.
10. Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменение по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3-20.