

ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛИ МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗОНЫ ТРЕЩИННЫХ ТОЛБАЧИНСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Кугаенко Ю.А.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, e-mail: ku@emsd.ru

Обобщены результаты применения метода низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ) для изучения магматической питающей системы Толбачинского Дола¹, где преобладают трещинные извержения. Исходные данные были получены в 2010–2015 гг. при пошаговой регистрации фонового микросейсмического излучения (микросейсмической съемке) на детально размеченном полигоне, который включает зоны трещинных извержений 1975–1976 гг. и 2012–2013 гг., а также частично постройку вулкана Плоский Толбачик. В ММЗ аномальные вариации в спектрах микросейсм уязвляются с глубинными неоднородностями [2]. По результатам микросейсмической съемки построена структурная модель, объединяющая выявленные глубинные элементы, ассоциирующиеся с системой питания поля ареального вулканизма. Для повышения достоверности интерпретации ММЗ-аномалий привлечены результаты независимых геолого-геофизических исследований. Выявленные структуры сопоставлены с новой сейсмотомографической моделью магматических источников, питающих южную часть Ключевской группы вулканов [10].

Особенности Толбачинского Дола

Толбачинская зона ареального (моногенного) вулканизма и в особенности ее южная ветвь – Толбачинский Дол (ТД) – сохраняет высокую активность и достаточно хорошо изучена различными методами. В частности, большое внимание было уделено последним историческим извержениям: Большому трещинному Толбачинскому извержению 1975–1976 гг. (БТТИ) и Трещинному Толбачинскому извержению 2012–2013 гг. (ТТИ). Основные особенности ТД: контрастный состав изверженных базальтов; неравномерность пространственного распределения эруптивных центров магмы различного состава; наложение на стратовулкан Плоский Толбачик; временная изменчивость. Центры извержений глиноземистых базальтов стянуты к северной части ТД и вулкану Плоский Толбачик (ВПТ), магнезиальные базальты извергаются преимущественно в средней части Дола, а их промежуточные разности преобладают в южной [1]. Такая поверхностная картина свидетельствует о латеральных отличиях различных сегментов магматической питающей системы под ТД и ВПТ.

Формирование представлений о глубинном строении Толбачинского Дола

Основным элементом тектономагматической модели ТД является разломная зона СВ простирания, пересекающая ВПТ (рис. 1). Эта структура диагностирована как глубинный разлом по геологическим данным [5]: значительная протяженность разрывов земной коры, их высокая вулканическая активность, сравнительная однородность состава вулканитов. В этой же работе впервые говорится о рифтовой природе разломной зоны. Ранее предполагалось, что глубина ее заложения соответствует области перехода между земной корой и верхней мантией (не менее 30–35 км) [1]. В [3, 4] приводится глубина корней разлома, соответствующая средней коре (10–15 км) и предполагается, что плоскость разлома круто падает ~ на восток (угол падения 75–80°), а разлом рассматривается в качестве главного магмовода, питающего ТД.

Первая модель магматического питания ТД была предложена после БТТИ [1]. Это извержение было представлено разнесенными на 10 км прорывами, Северным и Южным (СП и ЮП), и сопровождалось образованием на вершине ВПТ провальной кальдеры, появление которой предположительно связывалось с оттоком базальтов из-под вулкана в район ЮП. Рои землетрясений, свидетельствовавшие о скрытом внедрении базальтовых даек, вытянулись на 50 км к югу от ВПТ, иллюстрируя масштабы происходивших явлений. Модель магматического питания разнесенных вдоль рифта эруптивных центров БТТИ базировалась на гипотезе смещения магматических

¹ В данном исследовании Толбачинским Долом именуется Ю–ЮЗ ветвь Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов, или Толбачинской ареальной зоны. Толбачинский Дол рассматривается как самостоятельное активное вулканическое образование – Толбачинское поле ареального вулканизма.

расплавов и существовании сублатеральных магмоводов, глубины залегания которых оставались дискуссионными.

Развитие камчатской системы сейсмического мониторинга обеспечило получение детальных данных о землетрясениях Ключевской группы вулканов и позволило применять сейсмическую томографию (СТ) для исследования ее внутреннего строения.

Масштабная комплексная модель глубинного строения Ключевской группы вулканов с привлечением результатов СТ была построена С.А. Федотовым [7]. Модель основана на предположении, что магматические источники всей Ключевской группы и магматические очаги ее вулканов взаимосвязаны; при этом магмы поступают в периферические очаги и кратеры действующих стратовулканов по протяженным вертикальным каналам, а к местам образования моногенных конусов – по питающим трещинам, застывающим после извержения. Магматическое питание ТД в этой модели соответствует представлениям, сформировавшимся в 1970-1980-ых годах в ходе исследований БТТИ [1]. В дальнейшем тектономагматическая модель Толбачинских ареальных зон была разработана В.А. Ермаковым на основе комплексирования геологических данных с результатами КМПВ и СТ, а также с учетом особенностей пространственного распределения землетрясений [3]. Согласно этой модели в верхнем крыле наклонного глубинного разлома формируются интрузии, что сопровождается сейсмичностью, концентрирующейся к востоку от оси разлома, в Толудской эпицентральной зоне, рис 1. Магматические источники ареального вулканизма предполагаются на глубине 10–15 км севернее ВПТ и под его постройкой (аномалия Г-1 на рис. 1). Модель также включает периферические магматические очаги под ВПТ на глубинах ~0 км и ~3 км.

Однако следует отметить, что в этих исследованиях район ТД находился на периферии или даже вне зоны надежных СТ-построений из-за относительно слабой локальной сейсмичности и удаленности от основной группы региональных сейсмических станций. Поэтому на начальном этапе СТ не принесла никаких новых фактических данных о глубинном строении территории ТД.

После ТТИ (с учетом новых данных об этом извержении) для магматической питающей системы ТД и ВПТ была предложена модель [9], частично созвучная вышеизложенным предположениям. Модель включает четыре разномасштабные разноглубинные магматические камеры и соединяющие их зоны (каналы). Сосуществование магм различного состава трактуется в соответствии с [11]. В модели предусмотрена возможность латеральных глубинных перемещений базальтов вдоль рифта.

Все перечисленные построения, по сути, являются эвристическими, то есть не подкреплены количественными оценками.

Специализированные сейсмологические исследования

Новый этап в исследовании строения земной коры в районе ТД открывают специально спланированные сейсмологические работы, в результате которых получены количественные величины – параметрические оценки аномалий, которые можно связать с элементами магматической питающей системы.

С 2010 г. ведутся исследования ТД с применением ММЗ [2]. В этом методе в качестве зондирующего сигнала используются низкочастотные (с частотой менее 1 Гц) микросейсм, которые регистрируются пошагово в заданных точках полигона. Съемкой 2010–2015 гг. охвачены как зоны разновозрастных голоценовых прорывов в центральной части ТД, так и район ТТИ 2012–2013 гг.; в 2014 г. пройден ММЗ-профиль до края вершинной кальдеры ВПТ. Съемка выполнена более чем в 450 точках с шагом 500 м.

Основные элементы магматической питающей системы ТД, выделенные с использованием ММЗ: сублатеральная структура на глубинах 15–25 км, уходящая под ВПТ (ММЗ-1 на рис. 1, 2); сублатеральный магмовод на глубине 4–8 км, уходящий вдоль рифта от центральной в южную часть ТД (ММЗ-2); крупная (~ 15–20 км вдоль разломной зоны и ~ 9–10 км в поперечном направлении) транскоровая область магмопроводимости под центральной частью ТД, под цепью наиболее высоких шлаковых конусов (ММЗ-3). Более подробное исследование последней неоднородности выявило чередующиеся магматические камеры и подводящие каналы, а также закономерности в их положении и конфигурации [6]. Исследование района ТТИ показало, что его наклонный питающий канал выходит из-под вулкана Плоский Толбачик с глубины 1–4 км, это соответствует внедрению радиальной дайки. Область магматической камеры, питавшей извержение 2012–2013 гг., проявляется слабо, что может свидетельствовать о ее деградации после завершения эруптивного процесса. Таким образом, по результатам ММЗ показано, что элементы системы магматического питания для разных

сегментов ТД различны. Выявлена сложная глубинная структура, объединяющая субвертикальные и латеральные элементы, включающая магматические камеры и подводящие каналы.

В 2014–2015 гг. в районе Толбачинского Дола была установлена временная сеть из 30 дополнительных сейсмических станций, которые позволили И.Ю. Кулакову построить первую СТ-модель южной части Ключевской группы вулканов [10]. Для района ТД обнаружено три возможных пространственно разнесенных источника питания (К-1, К-2, К-3 на рис. 1). Они интерпретируются как системы магмопроводящих трещин – дайковых комплексов. Один из источников выявлен под центральной частью ТД. Дайковый комплекс, питающий ВПТ, субвертикален до глубин 10–15 км, а в более заглубленных горизонтах система трещин наклонно уходит на север и соединяется с зоной питания вулканов центральной части Ключевской группы, то есть принципиально отличается от классических представлений о субвертикальных каналах [7].

Аномалия под центральной частью ТД, где образовались наиболее крупные шлаковые конусы, ярко проявляется и на томографических, и на ММЗ-разрезах (К-3 и ММЗ-3 на рис.1, 2). Это может говорить о том, что в этой части Ключевской группы вулканов в земной коре существует транскоровая колонна, в которой магматический расплав, вероятно, присутствует даже при длительном отсутствии извержений. В верхней части она может рассматриваться как дайковый комплекс.

Сравнение районов БТТИ 1975–1976 гг. и ТТИ 2012–2013 гг. показало, что эти трещинные извержения произошли в принципиально разных по глубинному строению частях ТД. В центральной части ТД выявленная транскоровая колонна предполагает прямое мантийное питание извержений, включая Северный прорыв 1975 г. В северной части ТД, под ВПТ и ТТИ, в коре проходит слой сублатеральных (наклонных) перемещений магмы с севера, откуда и осуществлялось питание этих эруптивных центров (что согласуется с результатами СТ [3, 10]).

Оба исследования не выявляют значительных малоглубинных магматических камер (очагов) под ВПТ, какими они описаны в [3, 8, 9].

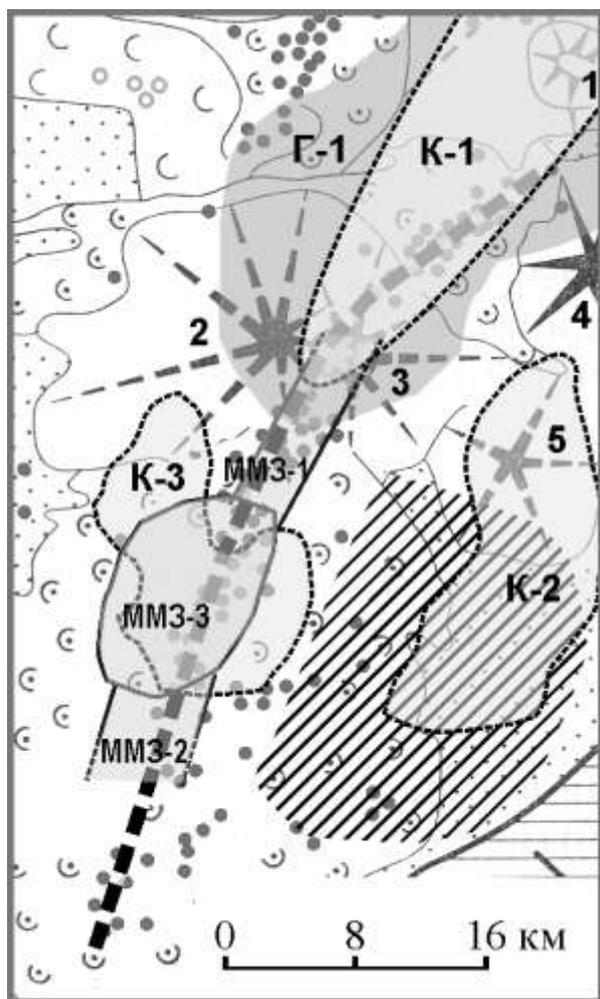


Рис. 1. Аномалии, ассоциируемые с элементами магматической питающей системы в южной части Ключевской группы вулканов.

Вулканы:

1 – Безымянный, 2 – Острый Толбачик; 3 – Плоский Толбачик; 4 – Овальная Зимина; 5 – Большая Удина. Серые кружки – моногенные шлаковые конусы Толбачинских ареальных зон.

Ось рифтовой разломной зоны обозначена широким штриховым пунктиром.

Результаты ММЗ:

ММЗ-1, ММЗ-2, ММЗ-3 – низкоскоростные аномалии по данным ММЗ, см. разрез на рис. 2.

Результаты томографического

эксперимента 2014–2015 гг., возможные источники магм [10]:

К-1 – наклонный канал, поднимающийся с севера под вулкан Плоский Толбачик;

К-2 – резервуар под Толудской эпицентральной зоной,

К-3 – питающая колонна под центральной частью Толбачинского Дола.

Результаты сейсмической томографии 2000–2010 гг. [3]. Г-1 – аномалия Р-волн на глубине 10–15 км.

Толудская эпицентральной зона выделена штриховкой.

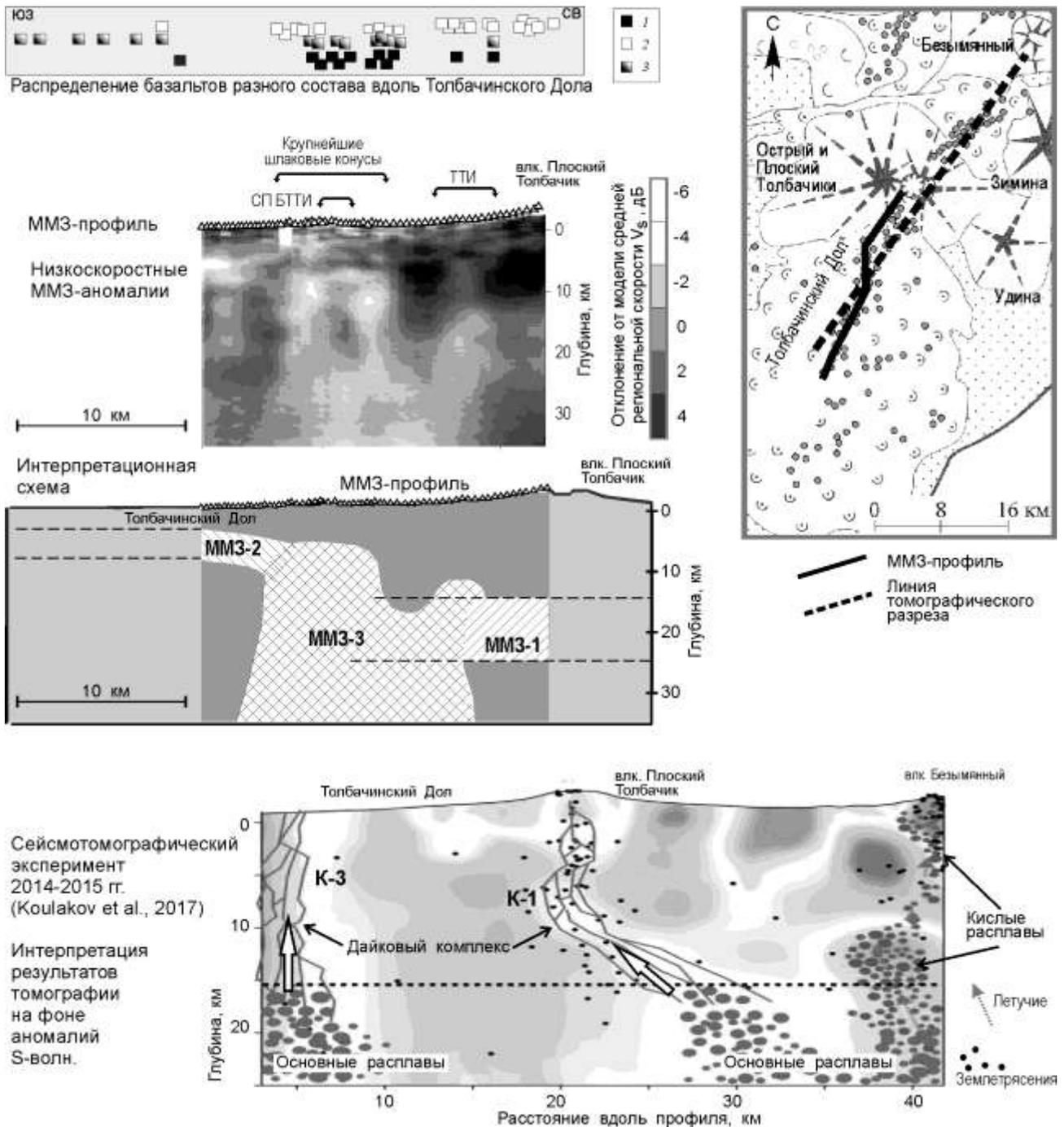


Рис. 2. Основные выявленные структурные элементы магматической питающей системы Толбачинского Дола. В верхней части рисунка показано неравномерное распределение базальтов разного состава вдоль Толбачинского Дола, отражающее различия в системе магматического питания поля ареального вулканизма. 1 – магнезиальные базальты, 2 – глиноземистые базальты, 3 – их промежуточные разновидности. На схеме вверху справа нанесены линии разрезов, представленных ниже: черная сплошная линия соответствует ММЗ-профилю, протянувшегося от вершины вулкана Плоский Толбачик в сторону Южного прорыва БТТИ; штрих-пунктир – линия вертикального сечения томографической модели. Названия аномалий соответствуют рис. 1. Результаты ММЗ представлены в двух вариантах: оригинальный ММЗ-разрез и интерпретационная схема, показывающая взаиморасположение основных магмопроводящих структур.

Заключение

Новые инструментальные сейсмологические данные позволяют дополнить и уточнить модель магматического питания Толбачинского Дола на основе количественных оценок. Результаты микросейсмической съемки (2010–2015 гг.) и детального сейсмотомографического эксперимента (2014–2015 гг.) выявили параметрические аномалии, которые могут интерпретироваться как элементы магматической питающей системы. Аномалии, выявленные под Толбачинским Долом двумя независимыми методами, в основном согласуются. Микросейсмическое зондирование детализирует конфигурацию аномалий и позволяет дополнить томографическую модель сублатеральными элементами. Представленная глубинная структура допускает миграцию магматических расплавов вдоль ареальной зоны и не противоречит модели смешения магм, на которой базируется одно из направлений трактовки петрогенезиса базальтов Толбачинского Дола.

Концептуальная модель магматического питания Ю–ЮЗ ветви Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов находится в развитии. В дальнейшем в первую очередь необходимо исследовать связь выявленных структурных элементов в центральной части Дола с обширной скоростной аномалией, расположенной на востоке, под Толудской эпицентральной зоной. С другой стороны, для «оживления» предложенной структурной схемы большое значение будет иметь привлечение специалистов смежных областей знания: геологов, петрологов, вулканологов. В ближайшее время дополнительную томографическую информацию даст сейсмологический проект изучения Ключевской группы вулканов *KISS* (2015–2016 гг.) [12].

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Короблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.
3. Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сенюков С.Л. Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 1. С. 5–33.
4. Ермаков В.А., Ермаков А.В. Геолого-петрологические модели извержения 1975–76 гг. на Толбачинском долу // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2006. Вып. 5. С. 53–115.
5. Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А. Значение рифтогенеза в формировании четвертичных вулканических зон Камчатки // Вестник МГУ. Серия геологическая. 1974. № 3. С. 3–20.
6. 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. С. 23–39.
7. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
8. Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменения по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3–20.
9. Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D. Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // *JVGR*. 2015. V. 307. P. 22–37.
10. Koulakov I., Abkadyrov I., Arifi N. et al. Three different types of plumbing systems beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny and Klyuchevskoy in Kamchatka // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. V. 122. Is. 5. P. 3852–3874. Doi: 10.1002/2017JB014082
11. Portnyagin M., Duggen S., Hauff F., et al. Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: towards quantitative modeling of subduction-related open magmatic systems // *JVGR*. 2015. V. 307. P. 133–155.
12. Shapiro N. M., Sens-Schönfelder C., Lühr B. G. et al. Understanding Kamchatka's extraordinary volcano cluster // *EOS*. 2017. V. 98. Doi: 10.1029/2017EO071351. Published on 01 May 2017.