

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ И ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МОДЕЛИ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ИЗВЕРЖЕНИЙ ТОЛБАЧИНСКОГО ДОЛА

Кугаенко Ю.А.¹, Волынец А.О.²

¹*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский, ku@emsd.ru*

²*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г.Петропавловск-Камчатский,
a.volynets@gmail.com*

Комплексирование результатов, полученных в различных областях знаний, является эффективным приемом повышения достоверности при построении моделей исследуемого геологического объекта. Необходимость комплексирования обусловлена неоднозначностью (многозначностью) истолкования результатов геофизических и других исследований. Кроме того, те или иные элементы геологического строения среды по-разному проявляют себя при применении различных методов.

В отечественной вулканологии эталоном построения комплексной модели является Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. (БТТИ) – одно из исторических извержений Толбачинского Дола (ТД) [1]. ТД – область моногенного вулканизма в южной части Ключевской группы вулканов на Камчатке, образовавшаяся в голоцене и связанная с глубинным разломом (рифтом), пересекающим вулкан Плоский Толбачик (ВПТ). Для БТТИ по результатам комплексных исследований была разработана модель магматического питания разнесенных вдоль рифта эруптивных центров этого извержения, базирующаяся на гипотезе смешения магматических расплавов [1, 2]. В рамках предложенной модели предполагается существование разноглубинных областей генерации магм: магнезиальной (Mg) на глубине от 60 до 120-250 км и глиноземистой (Al) в пределах 20-40 км от поверхности. Анализируя закономерности в геологической истории формирования ТД, авторы модели также высказали гипотезу о том, что мощные извержения Mg-базальтов провоцировали последующие извержения Al-базальтов, залегающих на меньшей глубине. Появление базальтов промежуточного состава объяснялось смешением Mg- и Al-базальтов в процессе перемещений и подъема к поверхности.

Альтернативная модель питания БТТИ была предложена в работах [5, 6]. Отрицая возможность смешения двух разноглубинных расплавов, авторы модели считают, что исходным составом для магм Северного прорыва является Al-базальт, который эволюционировал до Mg-базальта в результате растворения метеорной воды в периферическом очаге глубиной 2.5-3 км. Глубину очага Южного прорыва по минералогическим критериям (условиям кристаллизации плагиоклаза) авторы оценивают в 7-8 км.

Модель периферического магматического очага была разработана и для ВПТ [15]. Она построена по комплексу независимых данных (сейсмологических, геодезических, об истории развития вулкана, расходе магм и пр.). Согласно модели периферический очаг ВПТ располагается под вершинной кальдерой, его кровля находится на глубине 2 км, очаг имеет поперечные размеры 5-6 км по горизонтали и 3-4 км по вертикали.

Достоверно известно четыре исторических извержения Толбачинской зоны ареального вулканизма: описанное С.П. Крашенинниковым извержение 1740 г., прорыв 1941 г., БТТИ 1975-1976 гг. и Трещинное Толбачинское извержение 2012-2013 гг. имени 50-летия ИВиС (ТТИ-50) [18]. Два последних события всесторонне изучены и могут привлекаться для развития моделей глубинного питания этого вулканического центра.

Сейсмичность, предвещающая БТТИ и ТТИ-50, имеет существенные различия. БТТИ было успешно предсказано по сейсмическим данным благодаря короткой (9 дней), но интенсивной сейсмической подготовке [1]. Перед ТТИ-50 сейсмическая активизация длилась долго, не менее 4-5 месяцев [12], однако имела значительно более низкий энергетический уровень. Ее длительность хорошо согласуется с деформационной аномалией по GPS-данным [12]. Характер предвестниковой активизации можно считать первым из выявленных в дальнейшем различий между ТТИ-50 и БТТИ, отражающим особенности их подготовки, строения и питания. На изучение этих особенностей в последние годы направлены многочисленные разносторонние исследования, которые со временем могут составить основу расширенной комплексной модели не только ТТИ-50 и БТТИ, но всего Толбачинского вулканического центра.

Представляемое нами исследование находится на начальной стадии. В работе используются результаты микросейсмической съемки (метод низкочастотного микросейсмического зондирования - ММЗ [4, 10, 11]), сейсмичность и петрологические данные по составу пород, извергавшихся на ТД на протяжении голоцена, и, в особенности, во время БТТИ и ТТИ-50. Основные цели выполняемой работы:

- исследование современной активности и структуры земной коры области моногенного вулканизма при помощи микросейсмической съемки и локальной сейсмичности;
- последующее построение моделей магматических питающих систем этой области путем комплексирования результатов, полученных сейсмологическими, петрологическими и другими геолого-геофизическими методами;
- выявление особенностей глубинного строения моногенных вулканических аппаратов;
- уточнение моделей двух наиболее изученных извержений: БТТИ и ТТИ-50.

В течение последних двух тысяч лет толбачинские извержения имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при построении моделей:

- ВПТ к началу голоцена потерял активность, затем был захвачен трещинной зоной ареального вулканизма, которая унаследовала его питающие каналы; в течение последних примерно двух тысяч лет стратовулкан работает как подчиненная структура – один из эруптивных центров региональной зоны шлаковых конусов [1, 17]. Все известные на настоящий момент исторические трещинные извержения ТД предварялись, а в некоторых случаях и сопровождались активизацией ВПТ. Вероятно, для этих извержений ВПТ следует рассматривать в качестве одного из эруптивных центров, как это было сделано для БТТИ [1, 15]. Для трех последних трещинных толбачинских извержения (1941, 1975-1976, 2012-2013 гг.) сопутствующая активность ВПТ от извержения к извержению проявлялась все более слабо. Вероятно, этот эруптивный центр на данном временном интервале находился в процессе деградации.
- Поступление на поверхность магм контрастного состава (умеренно-калиевых высокомагнезиальных и субщелочных глиноземистых) и их промежуточных разновидностей; в процессе ТТИ-50 были извержены породы уникального для Толбачинского дола состава, ранее не описанные в этом районе – высоко-калиевые трахиандезибазальты [19, 21].
- Пространственная концентрация эруптивных центров, включая ВПТ, вдоль осевой линии субмеридиональной зоны глубинного разлома, поставляющего магму к поверхности и проходящего через ВПТ.
- Неравномерность пространственного распределения эруптивных центров (поставляющих на поверхность магмы различного состава) вдоль линии глубинного разлома, что позволяет предположить существенные латеральные отличия различных сегментов магматической питающей системы под ТД и ВПТ.

ТТИ-50 дало толчок к разработке новых моделей Толбачинских извержений. Сам факт столь значительного извержения вновь возродил интерес к Толбачинской вулканической зоне, а полученные дополнительные факты и данные создали основу для обновления и пересмотра представлений о деталях внутреннего устройства активной полосы ареального вулканизма. Как следствие, появились новые публикации и новые (в основном узкоспециализированные) модели глубинного строения.

Новые геофизические данные пока немногочисленны. Это результаты применения ММЗ для исследования конфигурации магматической питающей системы ТД (2010-2015 гг.) и геоэлектрическая модель земной коры ТД по данным аудиоманнитотеллурического и магнитотеллурического зондирования, выполненного в 2014 г. [13]. Выявленные глубинные аномалии в основном находятся в согласии и могут быть проинтерпретированы как элементы магмоподводящих структур.

На основе комплексного анализа полученных ранее геологических и геофизических (геолого-структурных, петрологических, сеймотектонических, сеймотомографических и др.) данных, а также предварявшей ТТИ-50 сейсмичности в работах В.А. Ермакова с соавторами [3, 7] разрабатывается тектономагматическая модель магматической системы ТД. В рамках этой модели, в частности, предполагается, что стабильные и временно живущие в земной коре ТД и вулканическом конусе ВПТ магматические очаги локализованы в единой зоне круто наклоненного глубинного разлома, корни которого соответствуют зоне горизонтального сжатия в средней коре. Обобщение рассмотренных данных позволило авторам этих публикаций предположить наличие магматических источников ареального вулканизма в изученном районе на глубинах 10–15 км. Предварявшая ТТИ-50

сейсмичность проинтерпретирована как активизация двух малоглубинных магматических камер под ВПТ.

Более представительны работы по петролого-геохимическому анализу вещества толбачинских извержений, включая ТТИ-50 [8, 9, 16, 19, 21 и др.], в каждой из которых в той или иной степени затрагиваются проблемы происхождения магм и конфигурации источников извержений. Анализ существующих петрологических моделей показывает неоднозначность толкования характера процессов, приводящих к наблюдаемому разнообразию составов пород; не существует согласия и в вопросе глубины существования очагов Mg- и Al-магм. В то же время позиция большинства авторов в той или иной степени согласуется с концепцией смещения магм, выдвинутой для объяснения контрастных составов изверженных пород в позднем голоцене. Работы в этом направлении продолжаются.

Ниже представлены элементы магматической питающей системы ТД и ВПТ, выявленные ММЗ и согласующиеся с результатами других независимых исследований (предварительные результаты):

1. Сублатеральная структура, соответствующая слою нейтральной плавучести магмы на глубинах 15-25 км под ВПТ, возможный проводник Al-магмы вдоль рифта. Существование на этих глубинах зоны сублатеральных перемещений магмы обсуждается в [1, 14, 16]. Поступление базальтов может происходить с севера, как это было зафиксировано по сейсмическим данным в начале ТТИ-50 [20].

2. Долгоживущая сквозькорая область магмопроводимости под центральной и северной частью Толбачинского Дола, обеспечивающая поступление на поверхность преимущественно Mg-магмы с глубины 35-60 км. На разрезах ММЗ эта область проявляется как обширная низкоскоростная структура, основная часть которой локализована под центральной частью ТД, и прослеживается на север до подножия ВПТ. Смещение Al- и Mg-магмы, вероятно, происходит в верхних горизонтах этой зоны Mg-магмопроводимости в областях концентрации магмы, которые описаны ниже в п.3.

3. Под трещинными прорывами ТД, которые находятся в пределах зоны сквозькорой магмопроводимости, выявлены скоростные неоднородности на глубинах 2-3 км, 7-8 км и 15-20 км, проинтерпретированные как возможные области концентрации магмы (магматические очаги). Показано, что поступление магмы в эти области могло идти из разных глубинных источников по пространственно обособленным несвязанным каналам, что может являться одной из возможных причин смещения и изменения химического состава базальтов в ходе извержений.

4. Сублатеральный магмовод на глубине 4-8 км, уходящий вдоль рифта от центральной в южную часть ТД, по которому перемещаются преимущественно магмы промежуточного состава после смещения. Эта структура проявила себя в ходе БТТИ миграцией гипоцентров землетрясений и является одним из ключевых элементов модели смещения магм.

Такая системы может обеспечить неравномерность состава излившихся пород вдоль толбачинского рифта. Модель смещения магм не отвергается по крайней мере для процессов в коре на глубинах до 20-25 км.

На базе выявленных магмопроводящих структур уточнена модель питания БТТИ. Если рассматривать ВПТ как один из эруптивных центров БТТИ, то можно утверждать, что БТТИ началось несколько раньше его Северного прорыва. Началом БТТИ следует считать 28.07.1975 г., когда активизировался ВПТ и были отмечены слабые вершинные выбросы вещества [1], соответствующего по составу Al-магме, обильно изливавшейся впоследствии из Южного прорыва БТТИ. Для этих двух эруптивных центров БТТИ единым источником Al-магмы может выступать сублатеральный магмовод на глубине 15-25 км, описанный выше.

Источником Mg-магмы Северного прорыва являлась сквозькорая область Mg-магмопроводимости, активизация которой была замечена 27.06.1975 г. по землетрясениям, концентрировавшимся под готовящемся прорывом. Перемещение Mg-магмы из глубин генерации (35-60 км) шло преимущественно асейсмично до уровня ~10 км, предвестниковая сейсмичность регистрировалась в верхней части разреза.

На этапе подготовки БТТИ обе магмоподводящие структуры испытали глубинное возмущение, в результате чего одновременно началась активность в районе Северного прорыва и сначала подъем, а затем отток магмы и обрушения в кратере ВПТ. На этом начальном этапе перемещения Al-магмы осуществлялись по центральному магмоводу ВПТ, хорошо проработанному ранее, поэтому процесс был асейсмичным (на уровне чувствительности сети сейсмических станций в 1975 г.). По-видимому, магмовод ВПТ претерпел в процессе БТТИ значительное разрушение (в

частности, в августе 1975 г., когда на ВПТ фиксировалась интенсивная сейсмичность) и перестал существовать, чем и объясняется наблюдавшаяся в 2012-2013 г. безучастность кратера ВПТ к извержению ТТИ-50.

Смещение магм БТТИ могло происходить под Северным прорывом на глубинах в 2-3 км и 7-8 км, куда разными путями поступили Mg- и Al-магмы.

Отток магмы промежуточного состава к Южному прорыву БТТИ происходил сублатерально по магмоводу на глубине 4-8 км и сопровождался миграцией сейсмичности. Затем магма промежуточного состава была замещена Al-магмой, продвигавшейся с севера на юг тем же путем. После завершения деятельности Южного прорыва по сейсмическим данным была отмечена миграция магмы далее в южном направлении, однако активность угасла без выхода базальтов на поверхность. Таким образом, длина южного магмовода составляет ~ 30 км.

Заключение

Авторами ведется разработка комплексной модели магматической питающей системы позднеголоценовых извержений Толбачинского Дола на базе комплексирования разносторонней информации. При этом используются как оригинальные, полученные непосредственно авторами, результаты инструментальных исследований и петролого-геохимических анализов вещества извержений, так и другие многочисленные модельные представления и архивные материалы. Предполагается в будущем привлечь материалы сейсмологических проектов 2013-2015 гг., направленных на исследование Ключевской группы вулканов [22].

Авторы придерживаются петрологической модели смещения магм для объяснения извержений продуктов контрастного состава.

Исследование не закончено и находится в процессе развития. На данном этапе обоснованно выявлены глубинные структуры, на базе которых может быть уточнена модель питания БТТИ и объяснена неравномерность состава пород разновозрастных эруптивных центров, сгруппированных вдоль осевой линии магмоподводящего разлома зоны ареального вулканизма. В перспективе авторы планируют представить модель для ТТИ-50.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Волюнец О.Н., Флеров Г.Б., Андреев В.Н. и др. Петрохимия, геохимия и вопросы генезиса пород Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 940-943.
3. Гонтовая Л.И., Ермаков В.А., Сеньюков С.Л., Назарова З.А. К вопросу о тектономагматической модели вулкана Плоский Толбачик и его ареальных зон // Вулканизм и связанные с ним процессы. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 143-145.
4. 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. 2008. № 7. С. 66-84.
5. Ермаков В.А., Генштафт Ю.С. Механизм извержения Северного прорыва Толбачинского дола в 1975 г. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 5. С. 1076-1080.
6. Ермаков В.А., Ермаков А.В. Геолого-петрологические модели извержения 1975-76 гг. на Толбачинском долу (Ключевская группа вулканов) // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2006. Вып. 5. С. 53-115.
7. Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л. Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 1. С. 5-33.
8. Колосков А.В., Гонтовая Л.И., Попруженко С.В. Верхняя мантия Камчатки в изотопно-геохимических и геофизических аномалиях. Роль астеносферного диапиризма // 2014. Т. 33. № 3. С. 3-13.
9. Колосков А.В., Давыдова М.Ю., Избеков П.Э., Ананьев В.В., Кандрин А.А. Эволюция состава пород Новых Толбачинских вулканов в ходе извержения 2012-2013 гг. – мантийный контроль в формате «онлайн» // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 5. С. 19-39.
10. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Магматические питающие системы трещинных извержений Толбачинского Дола по данным низкочастотного микросейсмического зондирования // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 67-69.
11. 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.
12. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по

данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40-58.

13. Мороз Ю.Ф., Логинов В.А. Глубинное строение района Толбачинского извержения имени 50-летия ИВиС по электромагнитным данным // Вулканизм и связанные с ним процессы. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 204-208.
14. 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.
15. 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.
16. Флеров Б.Г., Ананьев В.В., Пономарев Г.П. Петрогенезис пород вулканов Острога и Плоского Толбачиков и соотношение вулканических проявлений базальтовой и трахибазальтовой магм на территории Толбачинского Дола (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 15-35.
17. Флеров Г.Б., Мелекесцев И.В. Извержение 2012–2013 гг. как результат продолжающейся активности Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 139-144.
18. 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 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.04.009
19. Portnyagin M., Duggen S., Hauff F., Mironov N., Bindeman I., Thirlwall M., Hoernle K. Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: towards quantitative modelling of subduction-related open magmatic systems // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.08.015
20. Caudron Corentin; Taisne Benoit; Kugaenko Yulia; Saltykov Vadim. Magma migration at the onset of the 2012-13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analyses // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jvolgeores.2015.09.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.010)
21. Volynets A., Edwards B., Melnikov D., Yakushev A., Griboedova I. Monitoring of the volcanic rock compositions during the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.07.014
22. www.ipgg.sbras.ru/ru/news/uchenye-issledyut-kluchevskiyu-gruppu-vulkanov-20012015