

Аномалии микросейсм в районах вулканической активности**Ю.А. Кугаенко***Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский, ku@emsd.ru*

Рассматривается применение метода низкочастотного микросейсмического зондирования для исследования областей активного вулканизма. По аномалиям в спектрах микросейсм восстанавливается глубинная структура сложнопостроенной геологической среды. Представлены некоторые результаты, полученные при применении этого метода на Камчатке и в ряде других вулканических районов. Обсуждаются проблемы работы с полем микросейсм в условиях извержения, когда появляются локальные источники низкочастотного сигнала.

Вулканические области характеризуются сложным строением: среда под ними содержит элементы магматических питающих систем – подводные каналы, разноглубинные магматические камеры, магмоводы различной конфигурации и пр. Для исследования сложнопостроенных геологических сред должны привлекаться специализированные инструментальные методы. В последние 10–15 лет в арсенале геофизических методов появилась новая технология оценки параметров геологических объектов – метод низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ) [3].

ММЗ относится к методам пассивной сейсмологии, в котором в качестве зондирующего сигнала выступают фоновые низкочастотные ($f < 1$ Гц) микросейсмические колебания. Наиболее признанные механизмы генерации низкочастотных микросейсм – это воздействия прилива и передача вариаций давления непосредственно на поверхность суши либо через водную толщу на дно акваторий с последующим распространением по континенту. В свою очередь, вариации давления могут порождаться ветровым воздействием на поверхность океана или возникать в результате вариаций атмосферного давления в центрах крупных атмосферных вихрей над акваториями и сушей, а также вследствие зарождения внутренних гравитационных волн в слоях океанических вод в районах с протяженным шельфом. Предполагается, что генерация микросейсм происходит в дальней зоне, а наблюдаемое микросейсмическое поле является результатом интерференции волн разных типов, но в нем преобладают поверхностные волны и оно носит случайный характер. ММЗ реализуется в допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод Рэлея. В основу ММЗ заложено взаимодействие волны Рэлея с заглубленными скоростными неоднородностями, которые искажают спектр низкочастотного микросейсмического поля в своей окрестности, причем низкоскоростные глубинные аномалии проявляются повышением амплитуды волны Рэлея на некоторой частоте на поверхности, а высокоскоростные – понижением амплитуды. Для построения глубинного разреза в ММЗ используется эмпирическое соотношение, связывающее фазовую скорость волны Рэлея V_R , частоту в спектре f и глубину H через мультипликативный коэффициент: $H(f) = 0,4 \cdot \lambda(f) = 0,4 \cdot V_R(f)/f$. ММЗ позволяет построить разрез локальных скоростных пространственных вариаций по отношению к средней региональной скоростной модели, которая берется из независимых источников. Разрешающая способность метода при восстановлении изображения по горизонтали оценивается как $(0,25 - 0,3) \cdot \lambda$, где λ – эффективная зондирующая длина волны. Оценка разрешения по вертикали составляет $(0,3 - 0,5) \cdot \lambda$, где λ – эффективная длина волны для средней глубины между неоднородностями. Также показано, что обнаружить присутствие изолированной малой неоднородности возможно, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 и более

раз. К важным практическим преимуществам ММЗ, определяющим его реализуемость в современных финансовых условиях, относятся: (1) постоянное наличие зондирующего сигнала – поверхностных волн Релея, которые, как правило, преобладают в микросейсмах и (2) возможность проведения наблюдений ограниченным количеством сейсмических приборов.

ММЗ хорошо зарекомендовал себя при решении широкого круга задач при исследовании различных геологических объектов. В частности, возможность выделять субвертикальные структуры и исследовать объекты с глубинными “корнями” продемонстрирована для грязевых вулканов и кимберлитовых трубок [2, 8, 9].

Накапливается опыт применения ММЗ для исследований магматических аппаратов различных активных вулканических областей.

Остров Иерро, Канарские острова. По данным микросейсмической съемки, проведенной в 2004 г., под западной, наиболее молодой частью острова было локализовано относительно низкоскоростное субвертикальное тело, существование которого было подтверждено гравитационными исследованиями [11]. Это неоднородность была проинтерпретирована как внедрение, которое может содержать магматические расплавы. В сентябре–ноябре 2011 г. у побережья о. Иерро наблюдалось подводное извержение, сопровождавшееся активизацией слабой сейсмичности. Землетрясения были сконцентрированы на глубине 10–25 км, в верхней части выявленной методом микросейсмического зондирования низкоскоростной структуры, что может быть связано с растрескиванием кровли магматического очага, выявленного предварительно с помощью ММЗ.

Вулкан Эльбрус. В 2014–2015 гг. был пройден микросейсмический профиль от подножия восточной вершины вулкана Эльбрус (высота 5100 м) вдоль Баксанского ущелья. Часть разреза, проходящая под постройкой вулкана, иллюстрирует ряд субвертикальных скоростных аномалий [7]. Авторы ассоциируют их с элементами магматической питающей системы.

Район Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии и вулкан Кихпиньч, Камчатка. Идентифицирована и пространственно локализована область закристаллизовавшегося магматического очага под восточной частью депрессии на глубинах 6–10 км [5]. Выявлены области предположительной концентрации базальтовых расплавов, с которыми может быть связана наблюдающаяся в последние ~15 лет локальная геодинамическая активизация исследуемого района: периферический магматический очаг вулканического массива Кихпиньч на глубине 5–12 км и более глубокая (15–20 км) магматическая камера. Результаты соответствуют существующим представлениям о глубинном строении этого района по геологическим и петрологическим данным. Получено согласие геометрии обнаруженных глубинных структур с локальной микросейсмичностью и моделью внедрения магмы в верхние горизонты коры, разработанной по данным спутниковой интерферометрии.

Вулкан Авачинский, Камчатка. Микросейсмический профиль через вулкан Авачинский был пройден в 2012–2013 гг. Разрез свидетельствует о сложном несимметричном относительно вулкана строении земной коры [1]. Ярко проявляется структура, обычно называемая Авачинским грабеном (по [12] – скрытая несимметричная палеокальдера). Под Авачинским вулканом на глубинах больше 5 км прослеживается субвертикальная низкоскоростная аномалия, которую можно увязать с магматической питающей системой. Малоуглубинный магматический очаг по данным ММЗ не обнаружен, как и по [12].

Толбачинский Дол, Камчатка. Исследования Толбачинского Дола с применением ММЗ ведутся с 2010 г. [4]. Микросейсмическая съемка выполнена более чем в 450 точках. В 2014 г. пройден ММЗ-профиль до края вершинной кальдеры

вулкана Плоский Толбачик. Съемкой охвачены как зоны разновозрастных голоценовых прорывов, так и район трещинного извержения 2012–2013 гг. Имеющиеся материалы позволяют получить представление об особенностях строения среды на достаточно большой территории, характеризующейся неравномерным проявлением вулканизма. Полигон позволяет скомпилировать целый ряд протяженных профилей, проходящих через различные вулканические объекты, а разрезы, соответствующие близко расположенным профилям, при совпадении результатов могут свидетельствовать о реальности выявленных аномальных структур.

В докладе представлены некоторые результаты работ 2010–2015 гг. Основные элементы магматической питающей системы Толбачинского Дола, выделенные с использованием ММЗ:

- сублатеральная структура, соответствующая слою нейтральной плавучести магмы на глубинах 15–25 км и уходящая под вулкан Плоский Толбачик;
- крупная сквозькорая область магмопроводимости под центральной частью Толбачинского Дола;
- сублатеральный магмовод на глубине 4–8 км, уходящий вдоль рифта от центральной в южную часть Толбачинского Дола.

Остановимся подробнее на материалах полевых наблюдений 2013 г., которые проводились в ходе ТТИ в августе 2013 г., при этом ММЗ-профили пересекали эруптивную зону. Во время полевых работ в августе 2013 г. шло умеренное извержение стромболианского типа: наблюдалась ритмичная эксплозивно-эффузивная деятельность в одном из новообразованных шлаковых конусов, на дне кратера которого плескалось озеро жидкой лавы, охваченной интенсивным движением и бурным отделением летучих из базальтовой магмы. В ходе ТТИ регистрировалось вулканическое дрожание, которое имело максимум на частоте 1–3 Гц, но распространялось и в область более низких частот, до 0.2–0.3 Гц. Также регистрировались мощные акустические сигналы, которые представляли собой воздушные ударные и инфразвуковые волны, сопровождавшие разрушение лавовых пузырей, со спектральным максимумом в диапазоне частот 0,5–1,5 Гц, квазипериодичность взрывов колебалась от 0,1 Гц до 1,6 Гц [6, 10]. Отток лавы из района действующего шлакового конуса ТТИ осуществлялся по системе лавовых труб со скоростью 1–2 м/с. Выжимание лавы можно было обнаружить на расстояниях до 6 км от ТТИ на фронте лавового потока и местами на поверхности ранее образованных лавовых покровов. В ходе микросейсмической съемки вблизи действовавшего шлакового конуса были зафиксированы интенсивные низкочастотные колебания несейсмического диапазона с частотой 0,1–0,01 Гц и ниже, которые, вероятно, были связаны с деформациями поверхности в связи с перемещениями жидкой лавы по системе скрытых лавоводов непосредственно под зоной наблюдений. Все перечисленные низкочастотные сигналы, связанные с извержением вулкана (вулканическое дрожание, акустические возмущения, быстрые деформационные процессы) приводят к появлению на ММЗ-разрезах ложных аномалий. В настоящее время вопрос о разделении полезных с точки зрения ММЗ сигналов и указанных выше локальных помех не решен.

В целом ММЗ хорошо зарекомендовал себя при исследовании внутреннего строения вулканических областей. Однако при появлении в районе проведения микросейсмической съемки локальных источников низкочастотных сигналов, что характерно для зоны эруптивных центров при извержении, возможны артефакты при восстановлении положения глубинных аномалий. ММЗ в комплексе с независимыми

результатами других геолого-геофизических работ открывает новые возможности для понимания процессов, связанных с особенностями магматических питающих систем.

Список литературы

1. *Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Геранин К.О.* Результаты микросейсмического зондирования в районе Авачинского вулкана // Материалы XIII Региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 15.04.2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 103-114.
2. *Горбатилов А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В.* Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 428. № 4. С. 526–530.
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. 2008. № 7. С. 66-84.
4. *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.
5. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю.* Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпиньч (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015. № 3. С. 89-101.
6. *Кугаенко Ю.А., Фирстов П.П., Воропаев П.В. и др.* Комплексная геофизическая экспедиция в район Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2013. № 2. Вып. 22. С.225-231.
7. *Рогожин Е. А., Горбатилов А.В., Харазова Ю.В. и др.* Особенности глубинного строения и геологической активности горы Эльбрус и участка ущелья Эльбрус–Тырныауз по комплексу геолого-геофизических данных // ДАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 350-353.
8. *Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // ДАН. 2008. Т. 42. № 4. С. 542-546.
9. *Французова В.И., Данилов К.Б.* Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазонасной провинции по аномалиям микросейсмического поля // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 71-78.
10. *Albert S., Fee D., Firstov P. et al.* Infrasound from the 2012-2013 Plosky Tolbachik, Kamchatka fissure eruption // JVGR. 2015. V. 307. P. 68-78.
11. *Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnoso J. et al.* New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from low-frequency microseismic sounding. An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis // Journal Surveys in Geophysics. 2013. V. 34. Issue 4. Pp. 463-489.
12. *Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N. et al.* Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 285. P. 36–46.