

УДК 550.344

РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В РАЙОНЕ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

Абкадыров И.Ф.¹, Букатов Ю.Ю.¹, Геранин К.О.^{1,2}

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,*

²*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга.*

Научный руководитель д.г.-м.н. Селиверстов Н.И.

Проведено исследование глубинного строения земной коры в районе Авачинского вулкана методом низкочастотного микросейсмического зондирования. Исследования проводились в течение двух лет и проходили в два этапа. Профиль проходил через Авачинский вулкан, его общая протяженность составила около 40 км. Построен микросейсмический разрез, отражающий распределение контрастов (в Дб) скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре до глубин более 20 км. На разрезе выделено порядка 10 скоростных аномалий, отождествляемых с основными структурными элементами земной коры в этом районе. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с результатами проведенных ранее геофизических исследований.

Ключевые слова: Авачинский вулкан, микросейсмическое зондирование, микросейсмь, скоростные неоднородности.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее изученных геофизическими методами на Камчатке является вулкан Авачинский. Здесь в 80-е годы XX века был выполнен большой объем геофизических работ с применением различных методов: сейсморазведка [2], гравиразведка [7], электромагнитное зондирование [10]. Результаты этих работ помогли установить основные черты строения земной коры в окрестностях вулкана и выделить зоны, предположительно отождествляемые с магматическими каналами и очагами. Однако точное положение, размеры и другие характеристики этих зон до настоящего времени не выяснены и являются предметом дискуссий.

Геофизические исследования в районе Авачинского вулкана нами проводились в течении двух лет (2012-2013 гг.). Целью этих работ является изучение глубинного строения под Авачинско-Корякской группой вул-

канов. В качестве основного метода исследования был выбран метод микросейсмического зондирования (ММЗ). В данном методе зондирующим сигналом выступают рэлеевские волны, которые определяют основной вклад в вертикальную компоненту микросейсмического поля Земли. Задачи исследования заключались в регистрации микросейсм по профилю, построению разреза, выделению и интерпретации скоростных неоднородностей.

В случае изучения действующих вулканов данный метод имеет ряд преимуществ перед методами классической сейсморазведки. Во-первых, вулканогенные объекты, как правило, имеют сложное глубинное строение, связанное с резкой фациальной изменчивостью пород, наличием многочисленных разрывов и субвертикальных магматических тел, что затрудняет построение сейсмических границ. В отличие от классических методов в методе микросейсмического зондирования тела субвертикального залегания, наоборот, являются предпочтительными объектами для изучения и поиска. Во-вторых, реализация сейсморазведочных работ в сложных ландшафтно-геологических условиях весьма трудоемка, что влечет за собой высокие финансовые затраты, в то время как, методика проведения работ этим методом относительно проста и сводится к последовательной регистрации микросейсм по профилю в течение определенного времени от точки к точке.

Стоит отметить, что геофизические исследования с применением этого метода успешно проводятся уже в течение нескольких лет на различных вулканогенных объектах Камчатки [1,8,9].

МЕТОДИКА

Для изучения глубинной структуры среды под вулканом Авачинский был применен метод низкочастотного микросейсмического зондирования, который основывается на свойстве скоростных неоднородностей земной коры искажать спектр низкочастотного микросейсмического поля в своей

окрестности [5]. Ближайшими аналогами ММЗ являются: 1) различные модификации метода поверхностно-волновой томографии на основе оценки фазовой части функции Грина [13]; 2) модификации метода пространственной корреляции (SPAC – методы); 3) модификации метода отношения компонент (H/V- методы). При всем разнообразии технологий реализации (применение сейсмических групп или отдельных точечных измерений) эти подходы объединены тем, что исходная модель формирования микросейсмического поля базируется на представлении о выдержанной локальной слоистости среды. Соответственно, горизонтальное разрешение этих методов составляет величину $3-5\lambda$ (λ - длина волны фундаментальной моды Рэлея, взаимодействующая с неоднородностью).

Модель формирования микросейсмического поля в ММЗ не исходит из обязательной слоистости среды. Считается, что основной вклад в микросейсмическое поле вносится фундаментальными модами Рэлея. Информативным параметром является искажение амплитудного поля при взаимодействии со скоростными неоднородностями. Фазовая информация не используется. Форма и глубина залегания неоднородности оценивается исходя из распределения искажения на поверхности и частоте, на которой это искажение проявляется.

В работе [6] показано, что на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды в определенном частотном диапазоне уменьшаются, а над низкоскоростными - возрастают. Существует частота f волны Рэлея, для которой искажения от неоднородности на глубине залегания H максимальны. Эта частота f связана с глубиной залегания неоднородности H и скоростью фундаментальной моды волны Рэлея $V_R(f)$ соотношением $H \approx 0.4 \cdot V_R(f)/f$, что подтверждено исследованиями геологических объектов различного масштаба и генезиса и модельными расчетами. Это соотношение используется при оценке глубины

залегания неизвестной неоднородности, формирующей амплитудные искажения (которые мы можем измерить) на частоте f .

Согласно численным экспериментам [6], разрешающая способность метода по горизонтали оценивается как $(0.25-0.3)\lambda$, где λ – эффективная зондирующая длина волны. Оценка разрешения по вертикали составляет величину $(0.3-0.5)\lambda$, где λ – эффективная длина волны для средней глубины между неоднородностями. Также показано, что присутствие изолированной малой неоднородности можно определить, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз.

Методика проведения полевых измерений проста. Она сводится к накоплению спектра мощности микросейсмического сигнала в течение некоторого времени последовательно от точки к точке вдоль профиля одним или несколькими переносными датчиками. Одновременно регистрируется микросейсмический сигнал на опорной точке в пределах исследуемого полигона для устранения эффекта нестационарности зондирующего микросейсмического сигнала. Для соблюдения этого условия нами была установлена сейсмическая станция на сейсмическом пункте РЕТ, которая работала на протяжении полевых работ на профиле.

Исследования в районе Авачинского вулкана проходили в два этапа (рис. 1). Первый этап проходил в 2012 году, во время полевых работ была отработана юго-западная часть профиля ГСЗ [2], от речки Мутная-1 до северной стороны сомы вулкана Авача (перепад высоты около 2000 м). По профилю отработано 98 точек регистрации с шагом 200 м, общая длина профиля составила около 20 км.

Во время второго этапа (2013 год) была отработана северо-западная часть профиля ГСЗ. Данный отрезок профиля ММЗ проходил по северо-восточному склону вулкана Авачинский (высота начальной точки 1400 м, конечной – 260 м) в направлении Ю-З – С-В (азимут 52.3°). Здесь была проведена регистрация микросейсмического поля в 70 точках с шагом по

профилю 200 м (длина профиля ≈ 14 км). Верхняя часть северо-восточного склона вулкана имеет очень сложный рельеф, в связи с этим из соображений безопасности, было принято решение не отрабатывать этот участок. Таким образом, между профилями ММЗ 2012 и 2013 годов образовался разрыв длиной 3 км.

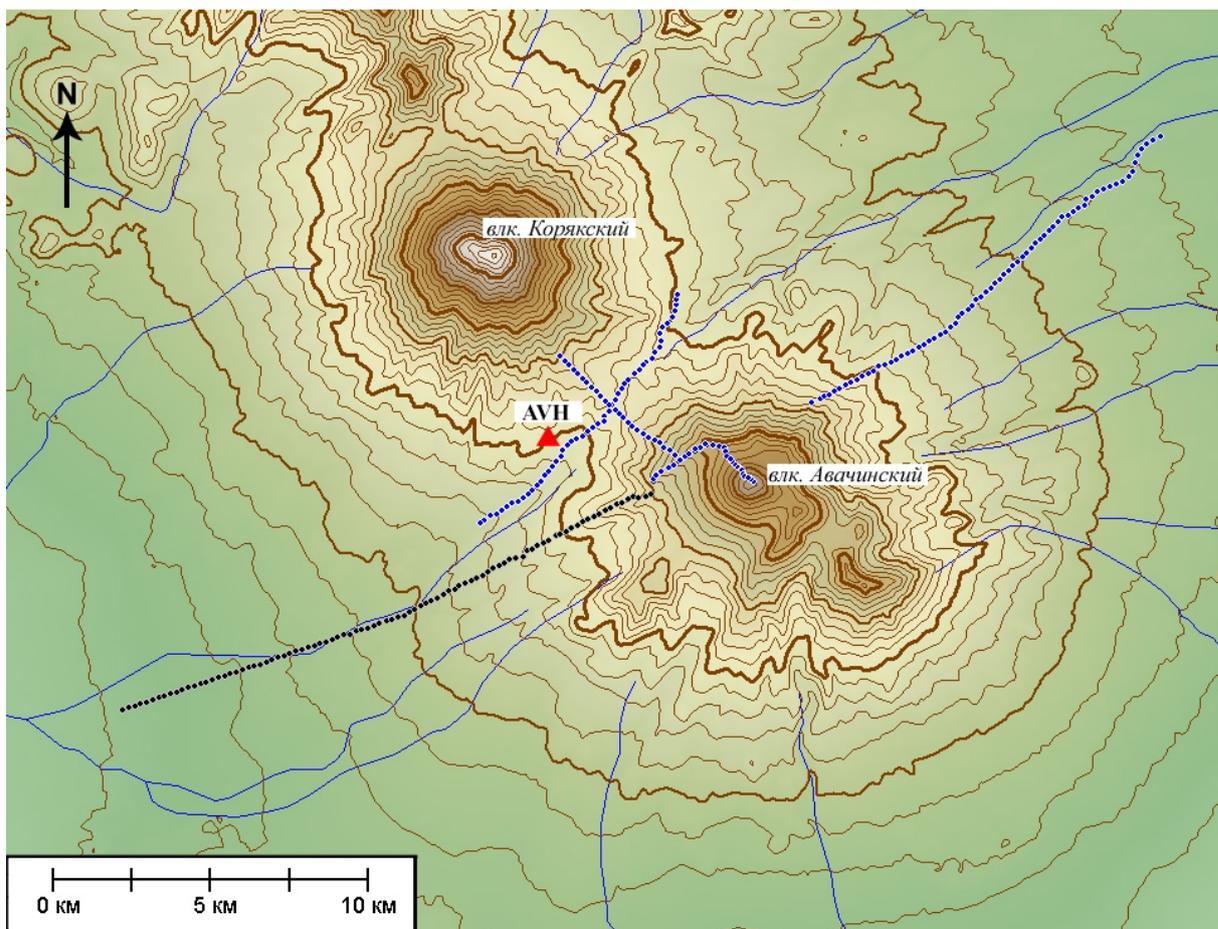


Рис. 1 Схема района работ. Показано положение профилей, выполненных в 2012 (черными точками) и 2013 (синими точками) годах.

Для регистрации был использован измерительно-аппартурный комплекс из пяти портативных широкополосных цифровых сейсмометров Geigarp SMG-6TD, которые обеспечивали регистрацию микросейсм по трем компонентам в частотном диапазоне $f=0.033-50$ Гц. Такой широкий диапазон частот обеспечивается благодаря применению технологии форсбалансных датчиков с петлей обратной связи. Дискретизация сигнала составляла 100 отч/с. Диапазон аналого-цифрового преобразования - 24 бита.

Синхронизация отсчетов по времени обеспечивалась встроенными приемниками GPS. Время регистрации в каждой точке составляло не менее 150 минут, что определялось необходимостью достижения статистической устойчивости спектра.

ОБРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

После регистрации статистически устойчивых спектров микросейсмического поля во всех точках профиля была произведена их коррекция на опорную станцию (РЕТ). Далее производилось построение профиля распределения пространственных вариаций амплитуд микросейсм для каждой частоты в спектре и привязка к соответствующей глубине, исходя из соотношения: $H(f) = 0.4 \cdot V_R(f)/f$. Как видно, при построении разреза необходимо знать скоростную модель $V_R(f)$. Для ее оценки была использована скоростная модель С.Л. Сеньюкова для Авачинского вулкана [12], построенная для диапазона глубин 0-30 км и насчитывающая 6 слоев. После чего был получен вертикальный разрез, отражающий распределение вариаций (в дБ) скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре до глубины 20 км (рис. 2).

Разрез характеризуется сложным и неоднородным строением, как по вертикали, так и по горизонтали, что объяснимо для района современного вулканизма. На разрезе выделяются несколько контрастных зон (обозначены римскими цифрами на рис. 2). В юго-восточной части профиля до глубины около 1 км узкой полосой выделяется приповерхностная низкоскоростная зона, очевидно связанная с четвертичными ледниковыми и вулканогенно-осадочными отложениями направленных взрывов. Ниже четвертичных отложений в диапазоне глубин 1-5 км расположена низкоскоростная неоднородность **I**, достигающая максимальной мощности около 4 км. Эта область соответствует слабо-консолидированным породам палеоген-неогенового возраста, заполняющим вулcano-тектоническую депрессию.

В юго-западной части профиля расположена обширная (протяженность по профилю около 8 км) высокоскоростная зона **II**. По глубине и характеру залегания верхний край этой неоднородности совпадает с сейсмической границей, выделенной ранее по профилю КМПВ-ГСЗ [2, 3]. Эта граница соответствует кровле кристаллического мел-палеогенового фундамента депрессии. Верхняя часть неоднородности **II** представляет собой, по всей видимости, кристаллический фундамент. Учитывая мощность (до 10 км) и глубину залегания (ниже 15 км), нижнюю часть этой зоны можно отнести к подошве нижней коры.

У подножья юго-западного склона вулкана расположена низкоскоростная аномалия **IV**. Подобная низкоскоростная аномалия была выделена ранее в работе [11]. Местоположение и размеры этой аномалии совпадают с Авачинским грабеном. Здесь стоит отметить, что форма неоднородности **IV** не вполне соответствует форме грабена, а больше напоминает форму «перевернутого треугольника». Скорее всего, эта область представляет собой систему разломов, в которой в настоящее время протекают активные тектонические процессы. Также предполагается, что по этой зоне поступают гидротермальные растворы с глубин 25-35 км [3, 10, 11].

На разрезе присутствует несколько субвертикальных низкоскоростных аномалий уходящих на большую глубину, обозначенные цифрами **V**, **VI** и **VII**. Наличие таких зон подтверждается и более ранними геолого-геофизическими работами. По всей видимости, эти аномалии связаны с тектоническими нарушениями в этом районе и относятся к кольцевым разломам. Предположение о существовании кольцевых разломов, также свидетельствует наличие экструзий и шлаковых конусов расположенных вокруг вулкана.

У подножья северо-восточного склона вулкана выделяется чашеобразная зона **VIII**, характеризующаяся низкими значениями скорости упругих волн. Максимальная мощность этой аномальной зоны достигает 3 км.

Породы в пределах верхней части этой зоны представлены четвертичными отложениями пирокластических потоков андезито-базальтового и андезитового состава. Нижняя часть, по-видимому, как и в случае с аномалией I, связана со слабо-консолидированным породам неогенового возраста.

Северо-восточная часть профиля характеризуется наличием обширной высокоскоростной области IX. Эту область можно считать северо-восточным бортом вулканотектонической депрессии. Здесь наблюдается уменьшение толщи рыхлых отложений и неглубокое залегание поверхности верхнемеловой толщи. По данным КМПВ-ГСЗ на этом участке профиля граница фундамента является нерезкой, на которой претерпевает разрыв только значение градиента скорости [2].

Наиболее интересной представляется центральная часть профиля, к которой относится непосредственно Авачинский вулкан. Под вулканом расположена высокоскоростная область III, которую условно можно поделить на две части. Верхняя часть этой области относится, по-видимому, к постройке древнего вулкана (Пра-Авача). Нижняя часть до глубин 1.5-2 км ниже уровня моря, вероятнее всего, представляет собой приподнятый блок кристаллического фундамента.

Стоит отметить, что во время полевых работ на северо-восточном склоне вулкана нам не удалось в полном объеме отработать участок профиля в привершинной его части. Верхняя часть северо-восточного склона Авачинского вулкана имеет очень сложный рельеф: большой угол наклона, высокая сыпучесть, наличие ледника и даек, - все это приводило к высокой вероятности схода каменных лавин и обвалов и к невозможности постановки сейсмических станций. В связи с этим был выполнен дополнительный профиль, проходящий от юго-восточного склона вулкана Корякский (высота 1500 м) до вершины вулкана Авачинский.

Тем не менее, на разрезе можно увидеть, что ниже высокоскоростной аномалии III происходит увеличение значений относительной интенсив-

ности микросейсмического сигнала, что свидетельствует об уменьшении скорости упругих волн. Здесь можно отметить субвертикальную низкоскоростную неоднородность X под центром вулкана. На разрезе эта зона имеет столбообразный вид и уходит на глубину более 20 км. Очевидно, что эта аномалия связана с зоной магматического питания вулкана, которая представляет из себя систему магматических каналов и очагов. По данным более ранних работ под вулканом была выделена зона повышенного поглощения сейсмических волн, которая интерпретируется как периферический магматический очаг [2, 4]. По данным микросейсмического зондирования такая зона в явном виде не просматривается.

ВЫВОДЫ

В районе Авачинского вулкана по профилю ГСЗ были проведены геофизические работы методом низкочастотного микросейсмического зондирования. Построен вертикальный разрез до глубины 20 км, отражающий распределение вариаций (в дБ) скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре относительно средней скоростной модели.

На разрезе выделено несколько скоростных аномалий, которые отождествляются с основными элементами глубинного строения земной коры в районе Авачинского вулкана.

Размеры, формы и глубина залегания аномалий, хорошо согласуются с предложенными ранее моделями строения земной коры в этом районе. Такая схожесть говорит о достоверности полученного результата и оправдывает выбор метода ММЗ для мониторинга активности и исследования геологических объектов в зонах современного вулканизма.

Авторы выражают благодарность Горбатикову А.В. и Степановой М.Ю. за помощь в обработке материала и построения разреза.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (№12-III-A-08-176) и РФФИ (№ 12-05-31357 мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абкадыров И.Ф., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Букатов Ю.Ю.* Особенности строения верхней части земной коры в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии (южная Камчатка) по данным микросейсмического зондирования // Труды 2 региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский. 2010. С.13-15.
2. *Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргапольцев А.А., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л.* Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. №2. С.43-55.
3. *Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич С.А., Пийп В.Б.* Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным КМПВ-ГСЗ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 3. С.73–81.
4. *Гонтовая Л.И., Ризниченко О.Ю., Нуждина И.Н., Федорченко И.А.* Авачинская группа вулканов: глубинное строение и особенности сейсмичности // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, г. Петропавловск-Камчатский, 2010. С.50-58.
5. *Горбатиков 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.
6. *Горбатиков А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Использование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С.96–112.
7. *Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С.81-94.
8. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Абкадыров И.Ф.* Новые данные о глубинном строении Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // Доклады академии наук. Том 441. № 4. М.: Наука, 2011. С.539-543.
9. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Абкадыров И.Ф., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Воронаев П.В.* Выделение малоглубинных магматических очагов на Камчатке методом низкочастотного микросейсмического зондирования Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит // Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 20–23 сентября 2011 г. Владивосток: Дальнаука, 2011. С.413-415.
10. *Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М: Наука, 1991. 181 с.
11. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* Глубинное строение Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2003. №4. С. 3-10.
12. *Сеньюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдения в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология, 2006. №3. С.1-11.
13. *Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High Resolution Surface Wave Tomography from Ambient Seismic Noise // Science. V. 307. 2005. P. 1615–1618.

RESULTS FROM MICROSEISMIC SOUNDING WITHIN THE
AVACHINSKIY VOLCANO AREA

Abkadyrov I.F., Bukatov Yu.Yu., Geranin K.O.

The authors studied the deep structure of the Earth's crust within the Avachinskiy Volcano area using the low-frequency microseismic sounding. The two-year study was divided into 2 stages. The profile crossed Avachinskiy Volcano and it was about 40 km long. The authors made a microseismic cross section, which shows the distribution of velocity contrasts (in dB) of S-waves inside the Earth's crust to the depth of more than 20 km. Ten velocity anomalies were revealed on the cross section, which correlate with main structural elements of the Earth's crust in this area. The new results and results from previous geophysical investigation were comparatively analyzed.

Keywords: Avachinskiy Volcano, microseismic sounding, microseisms, velocity heterogeneities