

## СКОРОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОД ЮГО-ЗАПАДНЫМ СЕКТОРОМ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

<sup>1</sup>Абкадыров И.Ф., <sup>1</sup>Букатов Ю.Ю., <sup>2</sup>Геранин К.О.

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга

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

Проведено исследование глубинного строения земной коры в пределах юго-западного сектора Авачинского вулкана методом микросейсмического зондирования. Произведена регистрация микросейсм с шагом 200 м по профилю общей протяженностью около 20 км. Построен вертикальный разрез, отражающий распределение контрастов (в Дб) скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре до глубин 20 км. Выделено несколько скоростных неоднородностей, которые отождествляются 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, микросейсмы, скоростные неоднородности.

### ВВЕДЕНИЕ

В районе Авачинского вулкана в 80-ые годы XX века был выполнен большой объем геофизических работ с применением различных методов: сейморазведка [2], гравиразведка [7], электромагнитное зондирование [10]. По результатам этих работ были установлены основные черты строения земной коры в окрестностях Авачинского вулкана. Также, были выделены зоны, предположительно отождествляемые с магматическими каналами и очагами. В связи с этим район считается хорошо изученным. Однако точное положение, размеры и другие характеристики этих зон до настоящего времени не выяснены и являются предметом дискуссий.

Осенью 2012 года в районе Авачинского вулкана нами были начаты геофизические работы, целью которых является изучение глубинного строения земной коры под Авачинско-Корякской группой вулканов. В качестве основного метода исследования был выбран метод микросейсмического зондирования (ММЗ). В данном методе зондирующим сигналом яв-

ляются рэлеевские волны, которые определяют основной вклад в вертикальную компоненту микросейсмического поля Земли. Таким образом, задачи исследований сводились к 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 сейсморазведки, в методе микросейсмического зондирования тела субвертикального залегания наоборот являются предпочтительными объектами для поиска и изучения. 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 ММЗ 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 ИССЛЕДОВАНИЙ.

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. В большинстве методов поверхностно-волновой томографии используется только фазовая информация сейсмограмм. Эти методы, как

правило, основаны на измерении кросскорреляционной функции поверхностных волн Рэлея, присутствующих в микросейсмическом фоне, что позволяет восстанавливать морфологию скоростных горизонтальных неоднородностей земной коры [6]. Что касается метода микросейсмического зондирования, то в нем используется амплитудная информация, поскольку при рассеянии волн Рэлея скоростными неоднородностями непосредственно вблизи этих неоднородностей понятие скорости теряет смысл, т.к. образующиеся (обменные, отраженные и пр.) волны еще не разделены в пространстве по своим типам. В этом случае амплитуды остаются единственным измеряемым параметром, по которому можно оценивать взаимные свойства неоднородностей и среды [6].

Метод микросейсмического зондирования реализуется в допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод Рэлея. 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  $H \approx 0.4 \cdot V_R(f)/f$ , что подтверждено как исследованиями геологических объектов различного масштаба и генезиса, так и модельными расчетами [5].

Согласно численным экспериментам [6], разрешающая способность метода по горизонтали оценивается как  $(0.25-0.3)\lambda$ , где  $\lambda$  – эффективная длина волны. Оценка для разрешения по вертикали составляет  $(0.3-0.5)\lambda$ , где  $\lambda$  – эффективная длина волны для средней точки между неоднородностями. Также эксперименты показали, что присутствие изолированных малых неоднородностей можно увидеть, даже если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз. Безошибочно восстановить положение и границы скоростной неоднородности можно при условиях, когда размеры неоднородности превышают длину зондирующей волны в несколько раз [6,8].

Методика проведения работ ММЗ относительно проста и сводится к последовательной регистрации микросейсм от точки к точке по профилю одним или несколькими переносными датчиками в течение определенного времени. Техника проведения микросейсмического зондирования подразумевает регистрацию сигнала на опорной точке в пределах исследуемого полигона с последующей коррекцией на нее, что позволяет устранить эффект медленной трендовой нестационарности зондирующего микросейсмического сигнала. В нашем случае было использовано две опорные точки: одна станция была установлена на сейсмическом пункте РЕТ (входит в мировую сейсмическую сеть), вторая расположена на перевале между Авачинским и Корякским вулканами на пункте АУН (входит в телеметрическую сеть Авачинской группы).

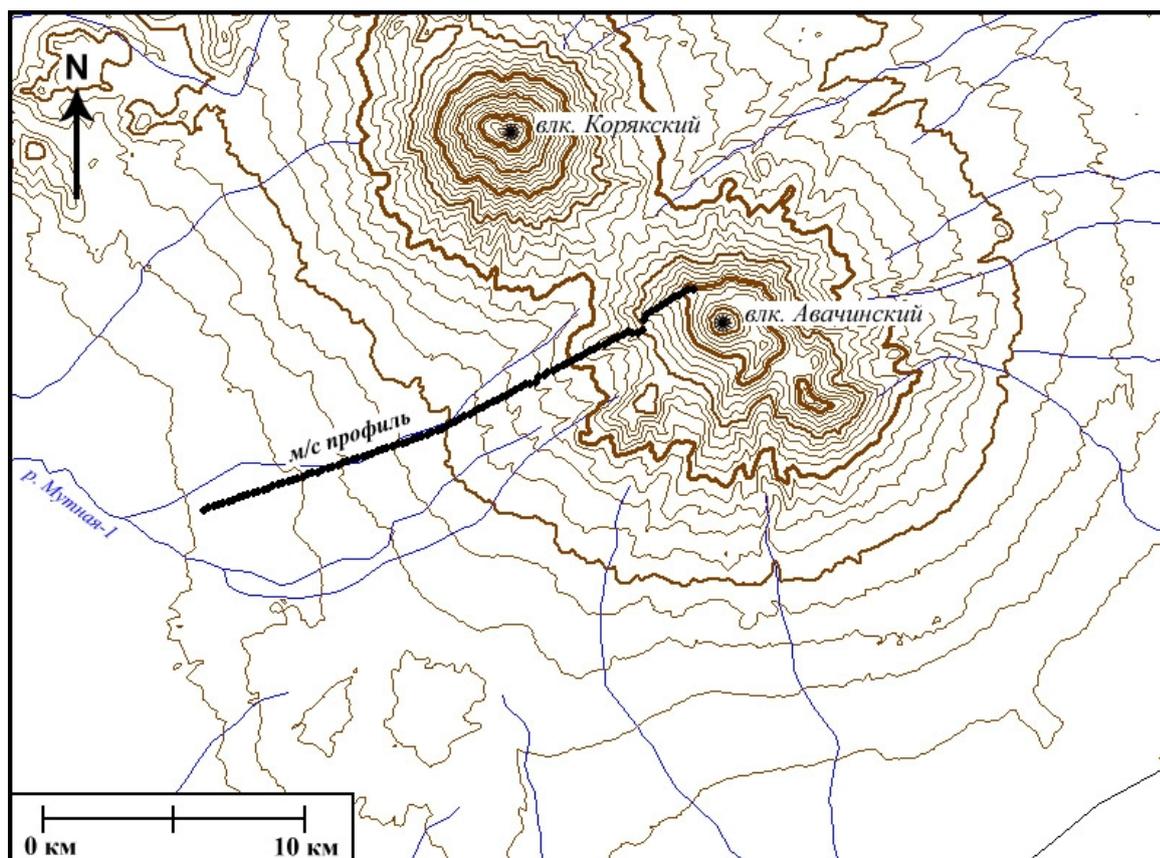


Рис. 1 Схема района работ. Показано положение юго-западной части профиля.

Во время полевых работ был отработан профиль, расположенный в юго-западном секторе Авачинского вулкана. Он проходил от речки Мутная-1 до северной стороны соммы вулкана Авачинский (перепад высоты около 2000 м). По профилю отработано 98 точек регистрации с шагом 200 м, общая длина профиля составила около 20 км (рис.1). Привязка точек на профиле осуществлялась с помощью GPS-навигатора.

Для регистрации был использован измерительно-аппартурный комплекс из четырех портативных широкополосных цифровых сейсмометров Guralp CMG-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 отсч/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.

При обработке данных микросейсмического зондирования на этапе построения глубинного изображения используется скоростная модель  $V_R(f)$ . В нашем случае мы использовали новую скоростную модель, предложенную для Авачинского вулкана Сеньюковым С.Л. [12] (рис.2). Данная скоростная модель построена до глубины 30 км и насчитывает 6 слоев.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате полевых работ были получены записи микросейсмического поля по профилю. Каждое измерение представляет собой накопление спектра мощности микросейсмического сигнала в частотном диапазоне от сотых долей герца до нескольких герц. Спектр микросейсмического сигнала накапливался по мере достижения им статистической устойчивости. Последующая обработка основывается на инверсии частотно-

пространственного распределения амплитуд фундаментальной рэлеевской моды естественного микросейсмического поля.

В результате обработки получен вертикальный разрез по профилю, отражающий распределение контрастов скоростей (в Дб) поперечных сейсмических волн в земной коре до глубины 20 км (рис.2).

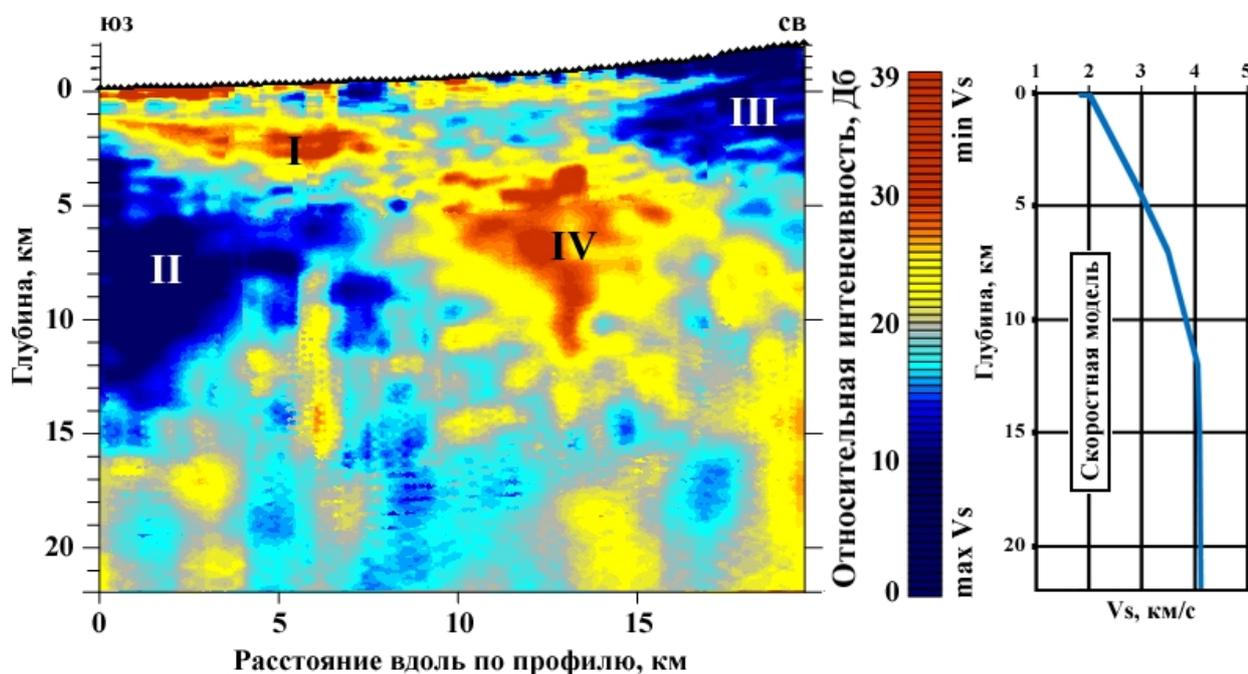


Рис.2. Разрез по профилю ММЗ, отражающий распределение контрастов скоростей (в Дб) поперечных сейсмических волн в земной коре до глубины 20 км.

Разрез характеризуется сложным строением, что характерно для районов современного вулканизма. На разрезе можно выделить несколько контрастных зон (на рис. 2 обозначены I, II, III и IV). До глубин  $\approx 1$  км узкой полосой выделяется приповерхностная низкоскоростная неоднородность, которая, очевидно, связана с четвертичными вулканогенно-осадочными отложениями.

Ниже четвертичных отложений в диапазоне глубин от 1 до  $\approx 5$  км расположена низкоскоростная (высокоамплитудная) неоднородность I, достигающая максимальной мощности около 4 км. По-видимому, эта область соответствует слабоконсолидированным породам палеоген-неогенового возраста, заполняющим Авачинскую вулcano-тектоническую депрессию.

В юго-западной части профиля расположена обширная (протяженность по профилю около 8 км) высокоскоростная неоднородность **II**. По глубине и характеру залегания верхняя граница этой неоднородности совпадает с сейсмической границей, выделенной на разрезе по профилю КМПВ-ГСЗ [2,3]. Эта граница соответствует кровле кристаллического мел-палеогенового фундамента депрессии. Таким образом, верхняя часть этой неоднородности представляет собой не что иное, как кристаллический фундамент. Учитывая мощность (до 10 км) и глубину залегания ниже  $\approx 15$  км, нижнюю часть этой зоны можно отнести к подошве нижней коры.

В центре микросейсмического разреза расположена низкоскоростная неоднородность **IV**. Подобная низкоскоростная аномалия также была выделена ранее в работах [11]. Местоположение и размеры этой аномалии совпадают с Авачинским грабеном. Здесь стоит отметить, что форма этой неоднородности 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 возможно поступление гидротермальных растворов с глубин 25-35 км [4, 11].

Непосредственно под вулканом расположена скоростная неоднородность **III**, которую условно можно поделить на две части. Верхняя часть этой неоднородности относится к постройке древнего вулкана (Пра-Авача). Нижняя часть, вероятнее всего, представляет собой приподнятый блок кристаллического фундамента депрессии.

Также можно отметить субвертикальную низкоскоростную неоднородность под вулканом на глубинах ниже 5 км. Скорее всего, она связана с системой магматических каналов и очагами. Но утверждать это и давать оценки размеров и глубин залегания магматических тел на данном этапе исследований нельзя, тем более что этот вопрос среди исследователей Авачинского вулкана является весьма дискуссионным.

## ВЫВОДЫ

Впервые в районе Авачинского вулкана были проведены геофизические исследования с применением метода микросейсмического зондирования. Построен вертикальный разрез до глубины 20 км, отражающий распределение контрастов скоростей (в Дб) поперечных сейсмических волн в земной коре. Удалось выделить скоростные неоднородности, отождествляемые с основными элементами глубинного строения земной коры в пределах юго-западного склона Авачинского вулкана. Размеры, формы и глубина залегания аномалий, выделенных методом микросейсмического зондирования, хорошо согласуются с предложенными ранее моделями строения земной коры в этом районе. Это говорит о достоверности полученного результата и оправдывает выбор данного метода при исследованиях подобных геологических объектов.

В тоже время на данном этапе исследования давать численные оценки размеров и глубин залегания магматических тел преждевременно. Для этого требуются дополнительные работы с северной стороны Авачинского вулкана.

Авторы выражают благодарность Горбатикову А.В. и Степановой М.Ю. за помощь в обработке материала и построения разреза, Чеброву В.Н. за предоставление сейсмических данных со станции «Авача» (AVH).

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов 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-Кошелёвской термоаномалии (южная Камчатка) по данным микросейсмического зондирования Труды второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», Петропавловск-Камчатский. 2010. - стр. 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 группавулканов: 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 вол 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. - Москва: МАИК "Наука", 2011. - стр. 539-543.
9. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Абкадыров И.Ф., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Воропаев 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 ДВО РАН, 2011. - стр. 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.

**VELOCITY HETEROGENEITIES BENEATH THE  
SOUTH-WESTERN ZONE OF AVACHA VOLCANO**

*<sup>1</sup>Abkadyrov I.F., <sup>1</sup>Bukatov Yu.Yu., <sup>2</sup>Geranin K.O.*

*<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

*<sup>2</sup>Vitus Bering Kamchatka State University*

A deep structure of the earth crust within the south-western zone of Avacha Volcano was studied using a microseismic sounding method. The author recorded microseisms with intervals of 200 m along the 20-km long profile. A created vertical section shows the distribution of contrast range (in decibel) of S-wave velocity in the earth crust to the depth of 20 km. Some velocity heterogeneities that are indentified with major structural elements of the earth crust in this zone were revealed. Obtained results were analyzed and compared with the previously collected results from geophysical investigation.

*Keywords: Avacha volcano, a microseismic sounding, microseisms, velocity heterogeneities*