



ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ В РАЙОНЕ ВУЛКАНА РЕДАУТ

Е.В. Касаткина¹, Т.А. Ступина¹, И.Ю. Кулаков^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

Вулканы являются одними из самых быстроизменяющихся и трудноизучаемых геологических объектов. Задача выявления закономерностей процессов, происходящих в периоды их активности, является одной из приоритетных в мировой сейсмологии. В качестве одной из таких закономерностей в данной работе рассматривается, основанная на технике растяжения, функция вариации сейсмической скорости за двухлетний временной период в районе вулкана Редаут. Метод исследования, применяемый авторами, основывается на пассивной шумовой интерферометрии, позволяющей использовать информацию о среде в «шумовых» записях за продолжительное время. Результаты исследования по сейсмическим данным за двухлетний период показали понижение скорости в постройке вулкана и согласуются с результатами изменения скорости, полученными по объемным волнам методом сейсмической томографии.

Шумовая интерферометрия, сейсмическая скорость, функция кросс-корреляции

RESEARCH OF THE SEISMIC VELOCITY VARIATION UNDER THE REDOUBT VOLCANO

E.V. Kasatkina¹, T.A. Stupina¹, I.Yu. Koulakov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

Volcanoes are the most rapidly changing and difficult to study geological features. Identifying physical signatures of processes occurring during seismic and volcanic activity is one of the most important problem in seismology. Here we reveal temporal changes of seismic velocity in the upper crust for two years of eruption activity of the Redoubt volcano. Based on correlation of continuous records of seismic noise at pairs of stations, we obtained correlograms for selected time periods. Using the stretching method, we obtained relative velocity changes between stations. These variations appear to be consistent with the results of repeated tomography that was previously derived based on body waves from local earthquakes.

Noise interferometry, seismic velocity, cross correlation function

ВВЕДЕНИЕ

Доказанная принципиальная возможность применения подходов шумовой интерферометрии в решении многих задач сейсмологии [Claerbout, 1968; Snieder et al., 2002; Campillo, Paul, 2003; Brenguier et al., 2008a; Gouedard et al., 2008; Hadziioannou et al., 2009, 2011; Clarke et al., 2011] дала мощный толчок развитию методов, использующих информацию о геологической среде в шумовых записях за достаточно

продолжительный временной период. Положительным моментом данного подхода является возможность использования пассивных источников излучения, что существенно удешевляет работы по сбору сейсмических данных. Во многих современных исследованиях отражена работоспособность подобных методов, основанных на шумовой интерферометрии. Например, использование нетрадиционных частей сейсмограмм получило широкое развитие в методах томографии и мониторинга [Shapiro and Campillo, 2004; Shapiro et al., 2005; Sens-Schönfelder, Wegler, 2006; Brenguier et al., 2007, 2008b; Yang et al., 2007], в применении к различного рода геологическим объектам [Grêt et al., 2005; Brenguier et al., 2008a; Duputel et al., 2009; Mordret et al., 2010, 2016].

Вулканы являются одними из самых быстроизменяющихся и трудноизучаемых геологических объектов. Задача выявления закономерностей процессов, происходящих в периоды их активности, является одной из приоритетных в современной сейсмологии. Методы пассивной шумовой интерферометрии были успешно апробированы в задачах мониторинга изменений среды под вулканами ля Питон де ля Фурнез (о. Реюньон), Мерапи (Индонезия), Руапеху (Новая Зеландия), Тоба (Индонезия) и показали свою эффективность [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006; Brenguier et al., 2008a; Duputel et al., 2009; Mordret et al., 2010; Jaxybulatov et al., 2014].

Объектом исследования настоящей работы является вулкан Редаут, входящий в состав Алеутской вулканической дуги и сформированный около одного млн лет назад в результате субдукции Тихоокеанской плиты под Северо-Американскую. Вулкан является одним из десяти активных вулканов Аляски и только за последнее столетие извергался пять раз (1902, 1933, 1966, 1989, 2009 гг.). В высоту он достигает 3108 м, а диаметр его основания около 10 км. Заполненный льдом вершинный кратер вулкана, шириной около 1.8 км, пробит на северной стороне ледником. Вулкан состоит из внедренных пирокластических и лавовых потоков и базируется на мезозойском гранитном батолите. Излившиеся магмы представлены средне-калиевыми известково-щелочными базальтами, андезитами и дацитами [Till et al., 1994].

Вулкан Редаут интересен тем, что 15 марта 2009 г. на нем произошло сильное извержение [Bull, Buurman, 2013; Coombs et al., 2013; Grapenthin et al., 2013; Power et al., 2013], что позволило предполагать достаточно значимое изменение среды после ряда сейсмических событий продолжительностью до шести месяцев. Подробный анализ содержимого летучих веществ, выделенных во время последнего извержения, был проведен Вернером и др. [Werner et al., 2013]. За предшествующий период времени в работах Бенза [Benz et al., 1996] и Дешона [DeShon et al., 2007] проведены исследования по изучению внутренней структуры вулкана методами сейсмической томографии по объемным волнам с 1989 по 1991 и с 1991 по 2005 г. Авторами одной работы [DeShon et al., 2007] были получены повышенные значения скоростей *P*-волн под вулканом, из чего ими было поставлено под сомнение наличие магматической камеры, которая предполагалась авторами другой работы [Benz et al., 1996]. В работе [Kasatkina et al., 2014] авторы построили модели для *P*- и *S*-волн, соответствующие двум периодам времени, до извержения 2009 г. и после него, показывающие 10 % уменьшение скорости *S*-волн после извержения, что по мнению авторов было вызвано насыщением постройки вулкана мантийным расплавленным веществом. Скорее всего, различие моделей разных авторов связано с использованием данных за разные промежутки времени, в которые активность вулкана могла отличаться, поэтому появился интерес в изучении относительного изменения структуры вулкана в период до и после активности. Выявлению скоростных вариаций, связанных с изменением геологической структуры под вулканом Редаут после извержения, посвящена данная работа.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Первый этап исследования состоит в выделении поверхностной волны из кросс-корреляций волновых пакетов с двух станций. Идея данного подхода, основанного на пассивной шумовой интерферометрии и предложенная еще в 1957 г. в работе [Aki, 1957], достаточно проста. Отклик, который извлекается путем кросс-корреляции записей с двух приемников, может быть проинтерпретирован как отклик, полученный в одном из приемников, если бы источник располагался в другом. Представив функцию источника в виде некоторого вейвлета $s(t)$, отклики в точках среды x_a и x_b могут быть записаны как свертки с Грин-функцией: $u(x_a, x_s, t) = G(x_a, x_s, t) * s(t)$ и $u(x_b, x_s, t) = G(x_b, x_s, t) * s(t)$ соответственно. Тогда отклик в x_b от источника, находящегося в x_a , запишется следующим образом:

$$G(x_b, x_a, t) * S_s(t) = u(x_b, x_s, t) * u(x_a, x_s, -t), \quad (1)$$

где $S_s(t) = s(t) * s(-t)$ – автокорреляция вейвлета. Функция кросс-корреляции «шума», вычисленная по сейсмическим записям суммированием за определенный временной период, является оценкой функции Грина. Свойства корреляционной функции относительно формы вейвлета и топологии источников подробно представлены авторами работ [Stehly et al., 2006; Godin, 2006; Wapenaar, 2010].

Второй этап заключается в выявлении скоростных вариаций по технологии растяжения, суть которой изложена в работах [Brenuier et al., 2008b; Mordret et al., 2010]. Идея метода состоит в предположении, что в каждый временной период при изменениях в однородной скоростной среде изменяется временной сдвиг между функциями кросс-корреляций. Смещение в большую сторону по временной оси происходит при уменьшении скорости, в меньшую сторону – при ее увеличении. Определив путь волны в однородной скоростной среде как $d = v\tau$, при пространственно-однородном изменении скорости на Δv временной сдвиг изменяется соответствующим образом на $\Delta\tau$, то есть $d = v\tau = (v + \Delta v)(\tau + \Delta\tau)$. Отсюда получаем, что относительный сдвиг времени не зависит от временного периода, в котором он измеряется и будет определяться как

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta\tau}{\tau} = const. \quad (2)$$

Такая зависимость дает возможность оценить относительное изменение скорости в среде, сравнивая волновые формы поверхностной волны (1) за различные периоды времени с изменением $\Delta\tau$ (сжатие/растяжение), например, через нормированную корреляционную функцию R_{cc} :

$$\Delta\tau^* = \operatorname{argmax} R_{cc}(\Delta\tau), \quad (3)$$

$$R_{cc}(\Delta\tau) = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} h(\tau) h_{ref}(\tau - \Delta\tau) d\tau}{\left(\int_{\tau_1}^{\tau_2} h^2(\tau) d\tau \int_{\tau_1}^{\tau_2} h_{ref}^2(\tau - \Delta\tau) d\tau \right)^{1/2}}, \quad (4)$$

где $h(\tau)$ – кросс-корреляционная функция за исследуемый временной период, $h_{ref}(\tau)$ – кросс-корреляционная функция за временной период, относительно которого изучаются изменения.

ДАННЫЕ И СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ

В обработку были включены сейсмические записи за период с 2008 по 2009 гг. с трех станций, расположенных на вулкане Редаут. Они представляли собой суточные записи вертикальных компонент трех короткопериодных станций RSO, RDN, RDT, предоставленные Аляскинской вулканической службой

(AVO) в формате MSEED. На рисунке 1 приведен пример суточной и пятнадцатисекундной трассы со станции RDN за 04.02.2008. На рисунке 5 представлена карта с расположенными на вулкане станциями.

На этапе предварительной подготовки данных была произведена нарезка на часовые файлы, введена инструментальная поправка, уменьшена частота дискретизации с 100 до 10 Гц.

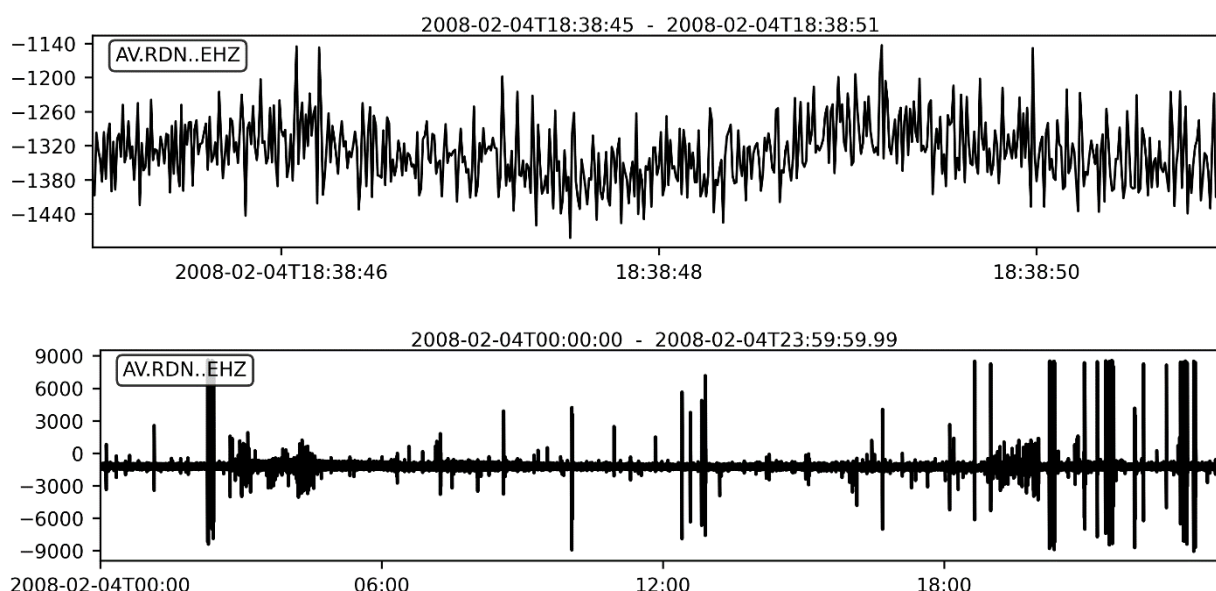


Рис. 1. Пример пятнадцатисекундной и суточной вертикальной сейсмической записи со станции RDN за 04.02.2008

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Реализацию метода в программном коде можно разделить на четыре основных этапа:

1. *Предобработка входных сейсмических записей* включает в себя процедуры детренда, полосовой фильтрации, временной (однобитная) и частотной (отбеливание) нормализации с целью усиления «шумовой» составляющей сигнала и подавления монохромных и локальных сигналов в тех случаях, когда отсутствует возможность избавиться от них по каталогу. Обоснование и необходимость данных шагов предобработки достаточно подробно рассмотрены в работе. [Bensen et al., 2007].
2. *Вычисление кросс-корреляций* (1) между парами станций за часовой временной период с дальнейшим их суммированием за 2008 г. – $h_{ref}(\tau)$ и за 2009 г. – $h(\tau)$.
3. *Выделение поверхностной волны* с визуальной оценкой участков симметричности кросс-корреляций и их суммированием с целью улучшения соотношения сигнал/шум.
4. *Вычисление вариации сейсмической скорости* (2) через функцию R_{cc} из соотношений (3, 4) в заданном интервале, $-6 \text{ с} < \Delta\tau < 6 \text{ с}$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате применения вышеизложенного алгоритма к данным за два временных периода, были получены относительные изменения скорости в среде под вулканом для трех пар станций. Для пары станций RDN–RSO максимальный коэффициент корреляции между кросс-корреляционными функциями был достигнут при $\Delta\tau = 0.35 \text{ с}$ и составил $R_{cc} = 0.86$ (рис. 2, б). При этом вычисленное относительное изменение скорости составило 1.8 % (рис. 2, в).

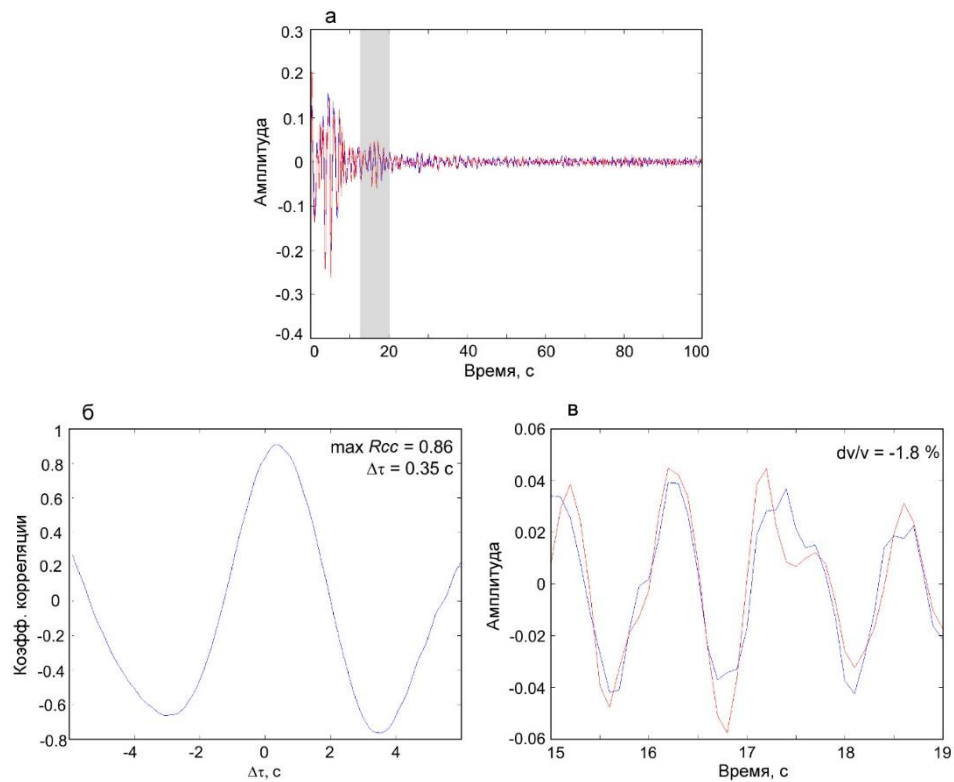


Рис. 2. Результаты применения алгоритма для пары станций RDN–RSO: а – положительные части кросс-корреляционных функций за 2008 (синяя $h(\tau)$) и 2009 (красная $h_{ref}(\tau)$) гг; б – зависимость $R_{cc}(\Delta\tau)$ от степени растяжения; в – полезные части функций $h(\tau)$ и $h_{ref}(\tau)$ при наилучшем их совпадении

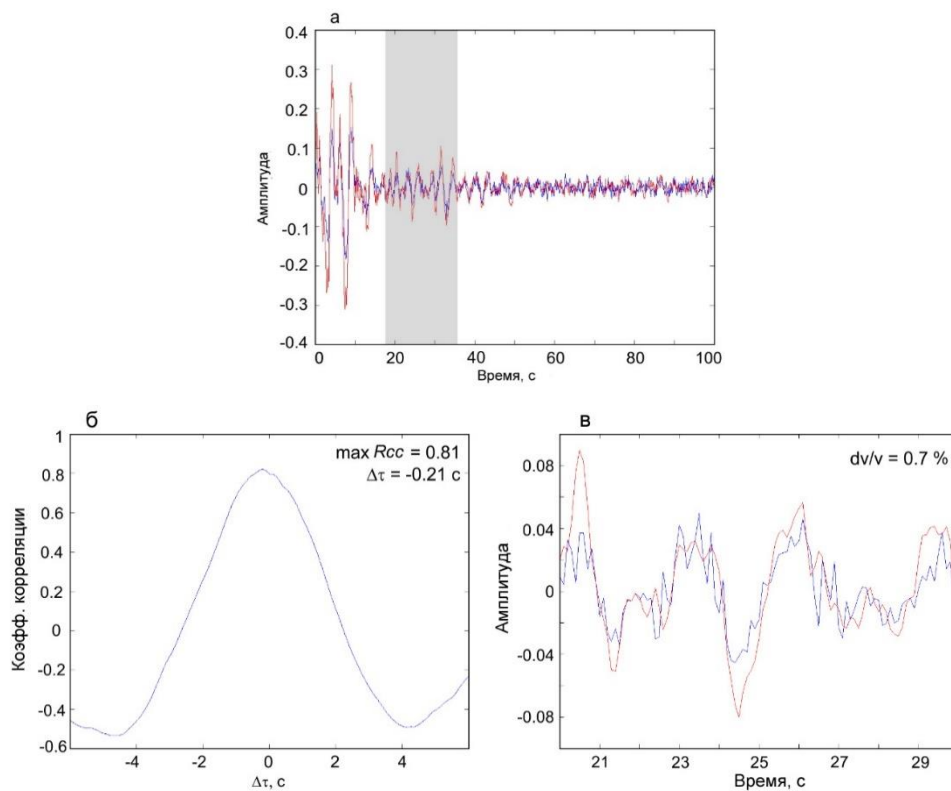


Рис. 3. Результаты применения алгоритма для пары станций RDN–RDT: а – положительные части кросс-корреляционных функций за 2008 (синяя $h(\tau)$) и 2009 (красная $h_{ref}(\tau)$) гг.; б – зависимость $R_{cc}(\Delta\tau)$ от степени растяжения; в – полезные части функций $h(\tau)$ и $h_{ref}(\tau)$ при наилучшем их совпадении

Для пары станций RDN–RDT максимальный коэффициент корреляции был достигнут при $\Delta\tau = -0.21$ с и составил $R_{cc} = 0.81$ (рис. 3, б). Относительное изменение скорости при этом составило 0.7 % (рис. 3, в).

Для пары станций RDT–RSO максимальный коэффициент корреляции между функциями кросс-корреляций был достигнут при $\Delta\tau = -0.09$ с. и составил $R_{cc} = 0.82$ (рис. 4, б), а вычисленное относительное изменение скорости составило 0.36 % (рис. 4, в). На рисунках 2, а–4, а представлены кросс-корреляционные функции, суммированные со значениями вдоль отрицательного временного сдвига, за 2008 (синяя линия) и за 2009 гг. (красная линия) для соответствующих пар станций. Серой областью выделена полезная часть кросс-корреляции, соответствующая поверхностной волне. На рисунке 5 для всех пар станций приведено схематичное представление скоростных вариаций.

Полученные результаты показывают, что в 2009 г. скорость под вершиной вулкана Редаут в среднем уменьшилась на 1.8 %, а за пределами вершины увеличилась менее, чем на 1 % (на 0.7 и 0.35 между приведенными на рис. 5 станциями). При этом можно достаточно точно указать, в какой период времени в 2009 г. был наибольший вклад в полученные изменения скоростей.

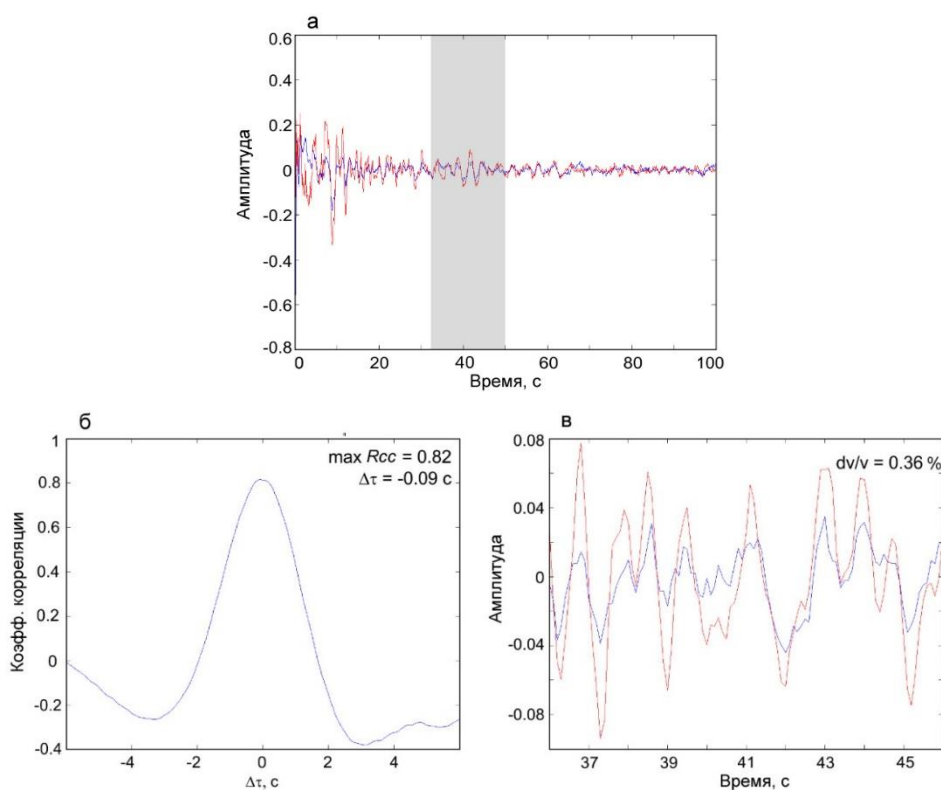


Рис. 4. Результаты применения алгоритма для пары станций RDT–RSO: а – положительные части кросс-корреляционных функций за 2008 (синяя $h(\tau)$) и 2009 (красная $h_{ref}(\tau)$) гг.; б – зависимость $R_{cc}(\Delta\tau)$ от степени растяжения; в – полезные части функций $h(\tau)$ и $h_{ref}(\tau)$ при наилучшем их совпадении

Можно предположить, что уменьшение скорости под вершиной вулкана связано с сильным насыщением всей вулканической постройки флюидами, поступившими с глубины в момент извержения по раскрывшимся трещинам и порам. Изменения кажущихся скоростей показывают относительное понижение скорости под вершиной вулкана, и ее повышение вне вулканической постройки. В целом, данные выводы успешно согласуются с результатами томографии по объемным волнам [Kasatkina et al., 2014], особенно в области вершины вулкана.

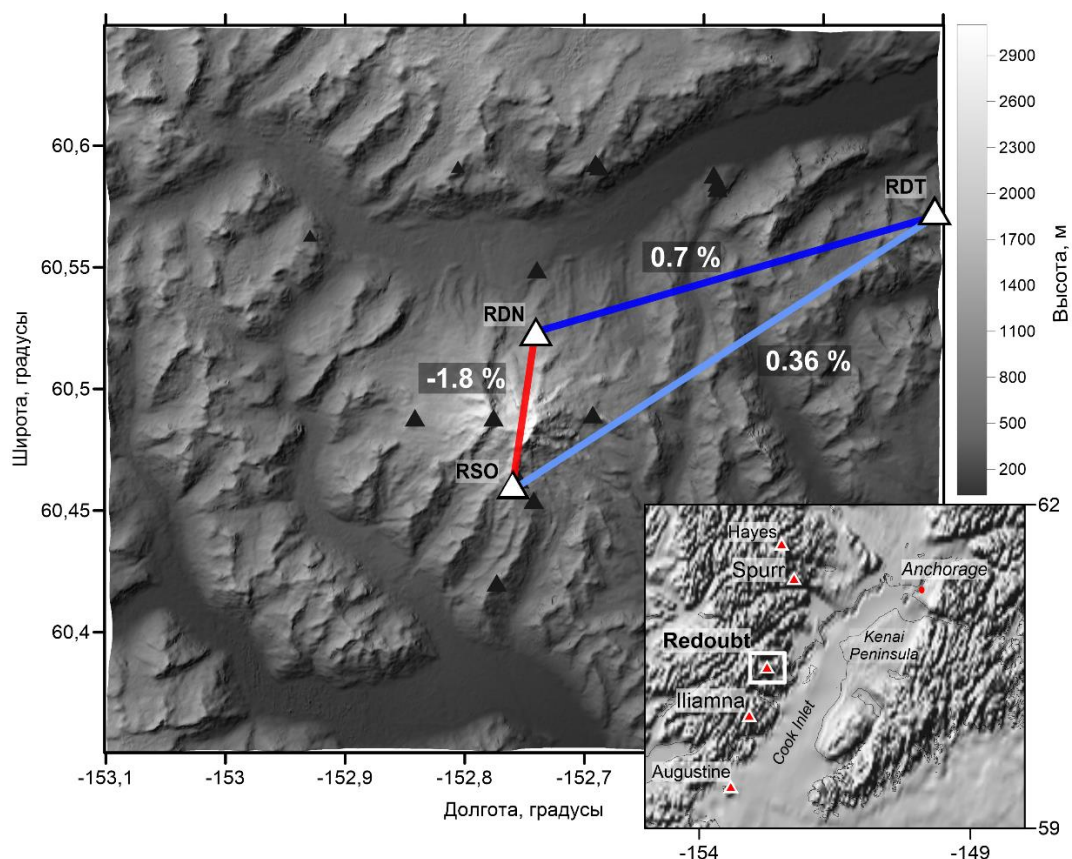


Рис. 5. Сеть сейсмических станций на вулкане Редаут. Относительные изменения скорости между соответствующими станциями в 2009 г. по сравнению с 2008 г.

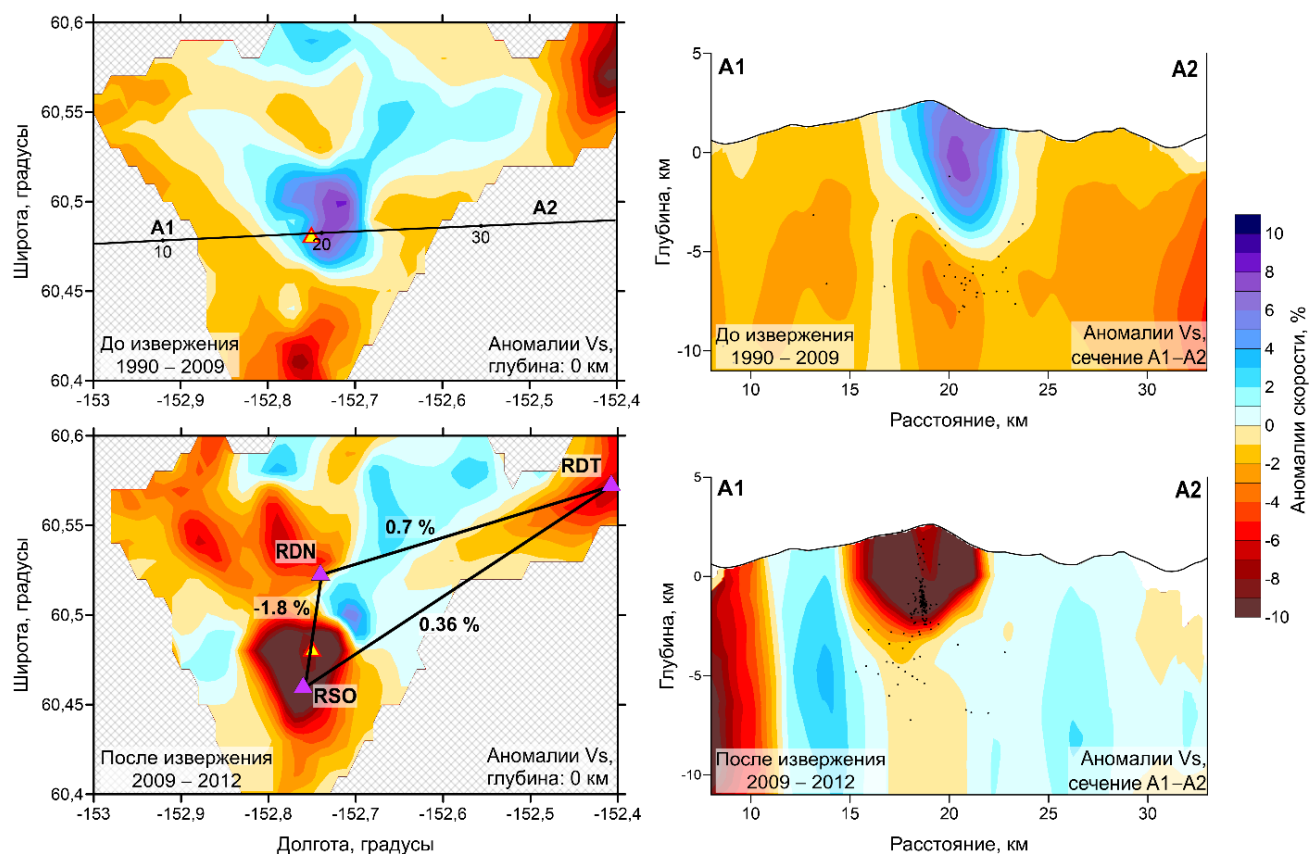


Рис. 6. Аномалии скоростей S-волн в периоды до (вверху) и после (внизу) извержения 2009 г. с локацией станций и вариацией сейсмических скоростей по результатам [Kasatkina et al., 2014]

В работе [Kasatkina et al., 2014] авторы получили изменения скоростей за два временных периода: с 1990 по 2009 и с 2009 по 2012 гг. (22458 *P*-волн, 18742 *S*-волн). Аномалии скоростей объемных волн (рис. 6) в периоде до извержения под вершиной вулкана варьировались от 1 до 8 % для *S*- и *P*-волн, в периоде с 2009 г. аномалии *S*-волн достигали около –10 %, при почти неизменившихся скоростях *P*-волн. В области вне вершины в период до 2009 г. аномалии скорости составляли от –2 до –1 % для обоих типов волн, а после 2009 г. от –2 до –1 % для *P*-волн и для *S*-волн от 1 до 2 %. На рисунке 6 представлены результаты двух работ: по объемным волнам для аномалий скоростей *S*-волн, аномалии скорости *P*-волн в оба периода практически не изменились; вариации сейсмических скоростей по району расположения трех станций.

Исходя из полученных результатов в 2014 г., авторы сделали вывод о сильных изменениях во внутренней структуре вулкана в момент извержения, связанных с насыщением его мантийным расплавленным веществом.

Несмотря на различный методологический подход к исследованию, по объемным продольным и поперечным волнам в работе 2014 г. и по поверхностным волнам с частичным влиянием поперечных волн в настоящей работе, можно сказать, что сам факт вариаций сейсмических скоростей имеет место, то есть при длительном мониторинге с 1990 по 2009 гг. в районе вулкана Редаут наблюдаются изменения физических свойств среды, которые выражаются в вариациях групповых скоростей поверхностных волн, выделяемых из корреляции шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы позволили выявить относительное изменение сейсмических скоростей в районе вулкана Редаут, имеющем достаточно сложную геологическую структуру, с точностью до долей процента. Надежность полученных результатов обеспечивается достаточно длительным периодом суммирования. Предложенный в работе алгоритм может применяться к различным геологическим объектам и геодинамическим обстановкам. Принимая во внимание, что поверхностные волны обладают свойством дисперсии, то есть на разных частотах они имеют разную чувствительность к распределению скорости на различных глубинах, дальнейшее развитие данного метода позволит получать не только изменения скоростей между парами станций, но и выполнять инверсию для получения 4D моделей вариаций скорости. Применение такой методики к данным в режиме реального времени позволит наиболее качественно определять состояние того или иного геологического объекта и увеличивать шансы на прогноз сильных извержений вулканов на стадии их подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Aki K.** Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1957. – Vol. 35. – P. 415–456.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.** Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // Geophysical Journal International. – 2007. – Vol. 169 (3). – P. 1239–1260, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.

- Benz H.M., Chouet B.A., Dawson P.B., Lahr J.C., Page R.A., Hole J.A.** Three-dimensional P and S wave velocity structure of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal Geophysical Research*. – 1996. – Vol. 101 (B4). – P. 8111–8128, doi: 10.1029/95JB03046.
- Brenguier F., Shapiro N.M., Campillo M., Nercessian A., Ferrazzini V.** 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Vol. 34 (2). – L02305, doi: 10.1029/2006GL028586.
- Brenguier F., Campillo M., Hadziioannou C., Shapiro N.M., Nadeau R.M., Larose E.** Post-seismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations // *Science*. – 2008a. – Vol. 321. – P. 1478–1481, doi: 10.1126/science.1160943.
- Brenguier F., Shapiro N. M., Campillo M., Ferrazzini V., Duputel Z., Coutant O., Nercessian A.** Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise // *Nature Geoscience*. – 2008b. – Vol. 1 (2). – P. 126–130, doi: 10.1038/ngeo104.
- Bull K.F., Buurman H.** An overview of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 259. – P. 2–15, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.024.
- Campillo M., Paul A.** Long-range correlations in the diffuse seismic coda // *Science*. – 2003. – Vol. 299 (5606). – P. 547–549, doi: 10.1126/science.1078551.
- Claerbout J.F.** Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response // *Geophysics*. – 1968. – Vol. 33 (2). – P. 264–269, doi: 10.1190/1.1439927.
- Clarke D., Lucia Z., Shapiro N.M., Brenguier F.** Assessment of resolution and accuracy of the Moving Window Cross Spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise // *Geophysical Journal International*. – 2001. – Vol. 186. – P. 867–882, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05074.x.
- Coombs M.L., Sisson T.W., Bleick H.A., Henton S.M., Nye C.J., Payne A.L., Cameron C.E., Larsen J.F., Bull K.F.** Andesites of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 259. – P. 349–372, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.002.
- DeShon H.R., Thurber C.H., Rowe C.** High-precision earthquake location and three-dimensional P wave velocity determination at Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112 (B7). – B07312, doi: 10.1029/2006JB004751.
- Duputel Z., Ferrazzini V., Brenguier F., Shapiro N., Campillo M., Nercessian A.** Real time monitoring of relative velocity changes using ambient seismic noise at the Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion) from January 2006 to June 2007 // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2009. – Vol. 184 (1). – P. 164–173, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.024.
- Godin O.A.** Emergence of the acoustic Green's function from thermal noise // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2007. – Vol. 121. – P. EL96–EL102, doi: 10.1121/1.2430764.
- Gouedard P., Stehly L., Brenguier F., Campillo M., Colin de Verdiere Y., Larose E., Margerin L., Roux P., Sánchez-Sesma F.J., Shapiro N., Weaver R.** Cross-correlation of random fields: mathematical approach and applications // *Geophysical Prospecting*. – 2008. – Vol. 56. – P. 375–393, doi: 10.1111/j.1365-2478.2007.00684.x.
- Grapenthin R., Freymueller J.T., Kaufman A.M.** Geodetic observations during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 259. – P. 115–132, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.04.021.
- Grêt A., Snieder R., Aster R.C., Kyle P.R.** Monitoring rapid temporal changes in a volcano with Coda Wave Interferometry // *Geophysical Research Letters*. – Vol. 32 (6). – L06304, doi: 10.1029/2004GL021143.

- Hadziioannou C., Larose E., Coutant O., Roux P., Campillo M.** Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation: laboratory experiments // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2009. – Vol. 125 (6). – 3688, doi: 10.1121/1.3125345.
- Hadziioannou C., Larose E., Baig A., Roux P., Campillo M.** Improving temporal resolution in ambient noise monitoring of seismic wave speed // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2011. – Vol. 116 (B7). – B07304, doi: 10.1029/2011JB008200.
- Jaxybulatov K., Shapiro N. M., Koulakov I., Mordret A., Landès M., Sens-Schönfelder C.** A large magmatic sill complex beneath the Toba caldera // *Science*. – 2014. – Vol. 346 (6209). – P. 617–619, doi: 10.1126/science.1258582.
- Kasatkina E., Koulakov I., West M., Izbekov P.** Seismic structure changes beneath Redoubt Volcano during the 2009 eruption inferred from local earthquake tomography // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – Vol. 119 (6). – P. 4938–4954, doi: 10.1002/2013JB010935.
- Mordret A., Jolly A. D., Duputel Z., Fournier N.** Monitoring of phreatic eruptions using interferometry on retrieved cross-correlation function from ambient seismic noise: Results from Mt. Ruapehu, New Zealand // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2010. – Vol. 191 (1), 46–59, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.01.010.
- Mordret A., Mikesell T.D., Harig C., Lipovsky B.P., Prieto G.A.** Monitoring southwest Greenland's ice sheet melt with ambient seismic noise // *Science Advances*. – 2016. – Vol. 2 (5), doi: 10.1126/sciadv.1501538.
- Power J.A., Stihler S.D., Chouet B.A., Haney M.M., Ketner D.M.** Seismic observations of Redoubt Volcano, Alaska –1989 –2010 and a conceptual model of the Redoubt magmatic system // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 259. – P. 31–44, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.014.
- Shapiro N.M., Campillo M.** Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31 (7), doi: 10.1029/2004GL019491.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.** High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science*. – 2005. – Vol. 307 (5715). – P. 1615–1618, doi: 10.1126/science.1108339.
- Sens-Schönfelder C., Wegler U.** Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33 (21), doi: 10.1029/2006GL027797.
- Snieder R., Grêt A., Douma H., Scales J.** Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity // *Science*. – 2002. – Vol. 295. – P. 2253–2255, doi: 10.1126/science.1070015.
- Stehly L., Campillo M., Shapiro N.M.** A study of the seismic noise from its long-range correlation properties // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2006. – Vol. 111 (B10), doi: 10.1029/2005JB004237.
- Till A.B., Yount M.E., Bevier M.L.** The geologic history of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1994. – Vol. 62 (1–4). – P. 11–30, doi: 10.1016/0377-0273(94)90026-4.
- Wapenaar K.** Retrieving the elastodynamic Green's Function of an arbitrary in-homogeneous medium by cross-correlation // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 93 (25). – 254301, doi: 10.1103/PhysRevLett.93.254301.
- Werner C., Kelly P.J., Doukas M., Lopez T., Pfeffer M., McGimsey R., Neal C.** Degassing of CO₂, SO₂, and H₂S associated with the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 259. – P. 270–284, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.04.012.
- Yang Y., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Shapiro N.M.** Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe // *Geophysical Journal International*. – 2007. – Vol. 168 (1). – P. 259–274, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03203.x.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КАСАТКИНА Екатерина Владимировна – научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методы сейсмической томографии.

СТУПИНА Татьяна Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геостатистика, обработка и анализ сейсмических данных, методы построения оценок качества моделей.

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решения прямых и обратных задач геофизики, методы сейсмической томографии.

*Статья поступила в редакцию 20 декабря 2021 г.,
принята к публикации 31 января 2022 г.*