ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМА АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА) НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

А.Л. Трифонов, И.Ю. Кулаков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
Новосибирский государственный университет, 630090, ул. Пирогова, 1, Россия
e-mail: TrifonovAL@ipgg.sbras.ru*

С использованием данных сейсмических станций, установленных на вулкане Камбальный в период с июля 2018 по июль 2019, были построены наборы корреляционных функций и проведена их первичная интерпретация. Проведены работы, нацеленные на контроль качества полученных функций кросс-корреляции. Выявлены изменения частотно-амплитудных характеристик кросс-корреляционных функций на малых временах, а также смещения выявленных фаз на больших временах. Такого рода вариации характера кросс-корреляции могут указывать на наличие периодов с существенно различным характером сейсмичности и значительными вариациями механических свойств пород под вулканом. Это, в свою очередь, говорит о продолжающейся активности магматической системы вулкана Камбальный.

Поверхностные волны; шумовая томография; кросс-корреляция; сейсмическая сеть; мониторинг

IDENTIFICATION OF CHANGES IN THE ACTIVITY OF KAMBALNY VOLCANO (SOUTH KAMCHATKA) BASED ON CORRELATION OF SEISMIC NOISE

A.L. Trifonov, I.Yu. Koulakov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia
e-mail: TrifonovAL@ipgg.sbras.ru*

Using experimental data obtained from the network of stations installed on Kambalny volcano in the period from July 2018 to July 2019, a set of correlation functions was obtained and its preliminary interpretation was carried out. Works aimed at quality control of the obtained cross-correlation functions have been performed. We have identified considerable variations of the frequency-amplitude characteristics of the cross-correlation functions at small times, as well as significant shifts of the derived phases in large correlation times. Such variations of the cross-correlation patterns may indicate the existence of distinct

time periods with different types of seismicity, as well as strong variations of mechanical properties of rocks. In turn, this might be an evidence for the ongoing activity of the magmatic system beneath the Kambalny volcano.

Surface waves; ambient noise tomography; cross-correlation; seismic network; monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Активно развиваемые в последние годы методы, основанные на корреляции сейсмического шума (интерферометрии), позволяют решить проблему источника сейсмического сигнала для глубинных исследований [Shapiro et al., 2005; Mordret et al., 2010]. В этом случае, корреляция шума по паре станций позволяет свести задачу к случаю, когда одна из станций выступает в качестве источника, а вторая – приемника [Shapiro et al., 2004; Brenguier et al., 2007]. Таким образом, с помощью методов интерферометрии возможно создать полностью контролируруемую систему наблюдения для изучения глубинного строения изучаемого региона, в которой расположение мнимых источников определяется исключительно геометрией сети.

Анализ шума по данным, записанным в течение длительного времени, позволяет получить серию коррелограмм в отдельные периоды, на базе которых возможно с большой точностью определить вариации скорости между станциями [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006; Brenguier et al., 2008]. Такого рода мониторинг региональных структур невозможен ни с помощью землетрясений (поскольку они редко повторяются в одном месте), ни с помощью активных источников (поскольку они не обладают достаточной мощностью и требуют больших затрат). Это открывает богатые возможности для разработки относительно дешевого и чрезвычайно эффективного метода изучения вариаций сейсмических скоростей в среде на базе корреляции сейсмического шума, который, в свою очередь, может оказаться полезным для выявления предвестников вулканических извержений и крупных землетрясений [Bensen et al., 2007; Brenguier et al., 2011].

В последние годы проводится ряд исследований, направленных на использование методов интерферометрии для выявления изменений в геологических средах, связанных с различными тектоническими и вулканическими процессами. Одним из удачных примеров является выявление вариаций сейсмических скоростей в зоне разлома Сан Андреас в работе [Brenguier et al., 2008]. Аналогичное исследование по обнаружению изменений в структуре коры на базе корреляции шума выполнено для района Венчуанского землетрясения в Китае (Liu et al., 2014). С помощью повторной шумовой томографии в работе [Brenguier et al., 2014] удалось выявить понижение скорости в коре под вулканическим поясом по ходу землетрясения Тохоку в Японии в марте 2011 г., что связывают с более активным выделением флюидов, вызванным землетрясением. Метод корреляции сейсмического шума также успешно применяется для мониторинга изменений внутри вулканов. Несколько работ по выявлению вариаций сейсмической скорости во время извержений было выполнено для вулкана Ля Питон де ля Фурнез на о. Реюньон [Brenguier et al., 2008; Duputel et al., 2009]. Сезонные вариации структуры были выявлены на вулкане Мерапи (Индонезия) с использованием этого же метода [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006]. Аналогичная работа была выполнена для вулкана Руапеху в Новой Зеландии [Mordret et al., 2010].

Выделение поверхностных волн из записей шума является основным инструментом, применяемым в шумовой томографии. Изучение набора кросскорреляционных функций даже для одной пары станций дает информацию о внутренних изменениях в вулкане, что может предоставить важный материал для прогнозирования будущих извержений.

Объектом изучения настоящего исследования является Камбальная сопка (высота 2161 м.) – самый южный вулкан Камчатки. После 600 лет молчания 24 марта 2017 г. произошло сильное извержение, породившее пепловый шлейф длиной более 1000 км [Гирина и др., 2017]. Изучив литературу, мы обнаружили, что работ по геофизическому исследованию вулкана Камбальный было проведено критически мало. Лишь в 2017 г. впервые была произведена наземная геофизическая съемка методом магнитометрии [Нуждаев и др., 2017]. Больше никаких данных о глубинном строении и процессах под этим вулканом не имеется. Ближайшая постоянная сейсмическая станция Паужетка, обслуживаемая КФ ФИЦ ЕГС, была расположена в десятках километрах от вулкана и не позволяла в полной мере изучать сейсмичность, связанную с вулканической активностью. Установка временной сейсмической сети в 2018–2019 гг. открыло новые возможности для изучения процессов под вулканом. Вместе с тем, обработка сейсмических данных – это трудоемкий рутинный процесс, который занимает длительное время. По этой причине, на текущий момент пока никаких результатов с использованием этих данных не получено. Настоящая работа представляет предварительные результаты обработки этих данных, которые впервые дают сейсмологическую информацию о вулкане Камбальный.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЕТЬ

Данные для исследования получены с сети станций, установленной на вулкане Камбальный, в период с июля 2018 по июль 2019 при участии ИНГГ СО РАН (рис. 1).

Рис. 1. Сеть станций, установленная на вулкане Камбальный. Квадраты – станции временной сети, треугольник – постоянная станция Паужетка

Всего было установлено 10 широкополосных станций, из которых одна была уничтожена медведем. Стоит отметить, что из-за различных обстоятельств, на начало сентября из строя вышли три станции, а на начало ноября сеть состояла лишь из трех станций. В качестве сенсора станции использовали Guralp CMG-6T или Guralp CMG-6TD.

ОБРАБОТКА И ИНТЕПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

В рамках настоящего исследования был воссоздан алгоритм проведения процедур обработки данных и корреляции шума, с описанием основных этапов в работах других авторов (например, Bensen et al., 2007). Ниже приводится описание основных процедур, использованных при анализе данных.

Прежде чем приступить к выделению поверхностной волны из записей сейсмического шума, необходимо подготовить данные. Исходные записи со станций были поделены на равные временные промежутки. В нашем случае, этот промежуток составляет 30 минут. Затем все временные отрезки формировались в один файл формата «mseed», с общим временем начала записи.

Исходная запись имела высокоамплитудную низкую частоту, которая скрывала весь полезный сигнал. Поэтому к исходной записи на предварительном этапе были применены низкочастотные фильтры, позволяющие избавиться от колебаний с периодом более 10 секунд (так называемый *detrending*). Далее был применен полосовой фильтр с частотой пропускания в диапазоне от 0.02 до 10 Гц. Поскольку каждая станция имела особенные амплитудно-частотные характеристики, отличные от других станций, которые определенным образом искажали выполненные на ней записи, в сеймотрассы вносилась известная инструментальная поправка с целью привести сигналы к единой амплитуде. Поскольку в дальнейшем анализе рассматривается низкочастотный сигнал с частотой менее 1 Гц, для уменьшения скорости расчетов корреляционных функций, частота дискретизации сейсмических записей была уменьшена со 100 до 10 Гц.

Имея данные после первичной обработки, можно приступить к фильтрации во временной области. Чтобы минимизировать эффект от высокоамплитудного сигнала от сильных событий, сейсмические записи проходили через процедуру однобитной нормализации, которая представляет собой приведение сейсмограммы к записи, состоящей из двух значений: 1, если сигнал выше нуля и -1 , если сигнал ниже нуля. Далее применялся частотный фильтр, характеристики которого определялись с помощью расчета спектра сигнала и тестовых корреляционных функций.

Для всех пар станций были построены функции кросс-корреляции как для отдельных периодов в режиме плавающего окна, так и суммарные коррелограммы для полного периода наблюдений. С целью контроля качества выполнения кросс-корреляции, полученные за весь период, функции ранжировались в зависимости от расстояния между станциями (рис. 2). Такой вид представления позволяет выявить и отбраковать результаты кросс-корреляции, для которых кажущаяся скорость распространения волны находится вне диапазона разумных значений, ожидаемых для данного региона. Такого рода результаты могут быть связаны с ошибкой в записи данных или в графе предобработки и должны быть отбракованы перед выполнением дальнейшего анализа. В нашей ситуации пики кросс-корреляций равномерно увеличиваются по времени в зависимости от расстояния между станциями, что свидетельствует о том, что полученные корреляционные функции найдены корректно.

Рис. 2. Кросскорреляционные функции в зависимости от расстояния между станциями

На рис. 3 приведен пример корреляции сейсмического шума по одной паре станций КМ01 и КМ07 на вертикальной компоненте записи. В результате независимой корреляции получасовых отрезков для данной пары станций было получено 1342 функции, что соответствует, приблизительно, месяцу непрерывных данных. Просуммировав набор корреляций, была получена функция кросс-корреляции с хорошо выраженной поверхностной волной Рэлея. Время сдвига, при котором огибающая функции кросс-корреляции достигает максимума, составляет примерно 4.9 секунд. Расстояние между станциями, с учетом разницы в превышении, приблизительно равно 10.5 километров. Таким образом, скорость распространения этого максимума приблизительно равна 2.14 км/с, что соответствует ожидаемому значению групповой скорости волны Рэлея для данного региона.

Если посмотреть на набор корреляционных функций на рис. 3, то можно заметить, что поверхностная волна в положительной области, амплитудно выражена сильнее, чем в отрицательной. Это связано с тем, что основным источником поверхностных волн в данном регионе являются прибойные

волны на побережьях Камчатки. На западе от вулкана Камбальный расположено Охотское море, на востоке – Тихий океан. Поверхностная волна от более шумного Тихого океана мощнее и более постоянна в отличие от волны, приходящей с более спокойного Охотского моря, с чем и связано такое различие в амплитуде корреляционных функций.

Рис. 3. Полный набор кросскорреляционных функций для пары станций KM01 и KM07. Снизу изображен набор корреляционных функций по получасовым интервалам в течение примерно одного месяца; сверху – суммарная кросскорреляционная функция

Для более достоверного выделения периодов сейсмической активности, набор функций кросс-корреляции был просуммирован в окне длиной 12 часов и с шагом 6 часов (рис. 4). Такое представление помогает выделить периоды, имеющие общий генезис на протяжении длительного промежутка времени. Набор состоит из 110 просуммированных кросскорреляционных функций.

Можно видеть, что на полученных функциях кросс-корреляции на малых временах наблюдается достаточно сильный регулярный сигнал. Колебания на этих участках, расположенных до прихода

высокоамплитудной волны Рэлея, можно связать с сейсмической активностью между станциями, т. е. непосредственно под вулканом. В этих участках четко прослеживаются периоды с разными частотно-амплитудными характеристиками колебаний. Области с доминирующими низкочастотными сигналами, выделенные желтым пунктиром, возможно, отражают наличие длиннопериодной сейсмичности и треморов, связанных с процессами в активной магматической камере. Интервалы, выделенные черным пунктиром, где доминирует сигнал с большей частотой, могут быть связаны с периодами наибольшего распространения вулcano-тектонических и гибридных землетрясений.

Вместе с тем, необходимо также иметь в виду, что другими факторами, оказывающими влияние на уровень коррелированного шума на малых временах, могут быть сильные штормы и другие источники сейсмического шума в областях, расположенных перпендикулярно отрезку, соединяющему станции.

Рис. 4. Набор функций кросс-корреляции для пары станций KM01 и KM07, просуммированных в окне

На участках коррелограммы с большими временами, расположенных за пределами прихода волны Рэлея, выделяемый сигнал, по-видимому, связан с рассеянными волнами, составляющими коду волны. В этих участках также наблюдаются существенные временные вариации расположения амплитудных пиков. В некоторых случаях они существенно сдвигаются в области больших времен, причем, это происходит симметрично для положительной и отрицательной половин коррелограммы. Это может свидетельствовать о достаточно сильных изменениях в среде по ходу наблюдения, вызывающих или изменение сейсмической скорости, или расположение рассеивающих площадок. В обоих случаях такого рода быстрые вариации можно связать с изменением напряженно-деформированного состояния вулкана и миграцией флюидов в магматической системе.

Также было проведено сравнение двух наборов корреляционных функций, полученных с помощью двух пар станций, КМ01-КМ07 и КМ05-КМ10 (рис. 5). Данное изображение отчетливо показывает синхронность различных периодов, которые могут быть вызваны как внешними факторами, так и изменениями внутреннего строения вулкана.

Рис. 5. Сравнение двух наборов корреляционных функций для двух пар станций

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулкан Камбальный, который извергся в 2017 г., до настоящего момента практически не был изучен геофизическими методами. Наше исследование, основанное на данных сейсмической сети, установленной в 2018 г., является первым шагом к решению задачи по построению модели глубинного

строения этого вулкана. Вместе с тем, полученные в данной работе предварительные результаты корреляции сейсмического шума, неожиданно для нас позволили выявить некоторую важную информацию о процессах внутри постройки вулкана.

Выполнение процедуры кросс-корреляции сейсмического шума по парам станций за весь период наблюдения позволило выделить достаточно надежную волну Рэлея, которая наблюдается как на отрицательной, так и положительной частях коррелограммы. Это важно для обоснования проведения дальнейших работ по построению дисперсионных кривых поверхностных волн и выполнения на их основе томографии. Важной особенностью является то, что надежные регулярные сигналы выделяются и без суммирования на длительном участке времени: взаимно согласованные фазы наблюдаются даже при проведении корреляции по коротким участкам длиной 30 минут. Это говорит о высоком качестве данных и надежности выделения полезного сигнала. Главным образом, это связано с высоким уровнем фонового (в данном случае, полезного) шума, идущего от достаточно близких к вулкану западного и восточного побережий Камчатки.

Регулярные особенности выявлены на участках малых времен коррелограмм, где наблюдается чередование периодов с высоко- и низкочастотными колебаниями. Поскольку эти колебания находятся вблизи нулевого времени корреляции, они могут быть связаны с источниками шума, расположенными между станциями, т. е. внутри постройки вулкана. Можно предположить, что низкочастотные участки отражают периоды с доминирующими треморами и низкочастотными событиями, что, в свою очередь, может иметь отношение к перемещению магмы в канале под вулканом. С другой стороны, высокочастотный сигнал, доминирующий в отдельные периоды времени, может свидетельствовать о наличии вулcano-тектонических и гибридных землетрясений, связанных с хрупкими разрушениями в постройке вулкана. Такого рода процессы наблюдаются при наличии быстрого перемещения флюидов в магматической системе и дегазации.

На больших временах кросс-корреляции, расположенных за пределами участка прихода поверхностной волны Рэлея, также наблюдаются регулярные фазы, которые могут являться проявлениями кода-волны и порождаться рассеиванием сейсмического сигнала внутри постройки вулкана. Можно видеть, что такого рода фазы прослеживаются достаточно регулярно на всем периоде наблюдения. Вместе с тем на некоторых участках наблюдается достаточно сильный сдвиг этих фаз в сторону увеличения или уменьшения времени. При этом эти сдвиги выглядят синхронно на левой и правой половине коррелограммы. Это говорит о том, что такого рода вариации могут отражать изменения физических свойств пород внутри вулкана. Например, это может быть связано с существенными изменениями сейсмической скорости или геометрии рассеивающих площадок в среде. В обоих случаях такого рода вариации могут быть связаны с быстрой миграцией флюидов и дегазацией, которые могут значительно менять физические свойства пород внутри постройки вулкана.

На данном этапе интерпретация результатов анализа сейсмического шума производится на качественном уровне. Надо также иметь в виду, что на основании имеющихся данных пока достаточно трудно разделить внешние и внутренние факторы, оказывающие влияние на различные участки коррелограмм. Более точная информация будет получена после проведения шумовой томографии, которая позволит выявить основные особенности строения постройки вулкана Камбальный.

ЛИТЕРАТУРА

Гирин О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А. Первое историческое извержение вулкана Камбальный // Во все концы достигнет россов слава: Материалы XXXIV Крашенинниковских чтений. – Петропавловск-Камчатский: ККНБ им. С.П. Крашенинникова, 2017. – С. 260–261.

Нуждаев И.А., Феофилактос С.О., Денисов Д.К. Магнитометрические исследования на геотермальных месторождениях Южной Камчатки // Материалы девярых научных чтений памяти Ю.П. Булашевича. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2017. – С. 310–314

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, No. 3. – P. 1239–1260. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.

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 Letter*. – 2007. – Vol. 34, Article L02305, doi:10.1029/2006GL028586.

Brenguier F., Shapiro N.M., Campillo M., Ferrazzini V., Duputel Z., Coutant O., Nercessian A. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise // *Nature Geoscience*. – 2008. – Vol. 1, No. 2. – P. 126–130.

Brenguier F., Clarke D., Aoki Y., Shapiro N.M., Campillo M., Ferrazzini V. Monitoring volcanoes using seismic noise correlations // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2011. – Vol. 343, Issues 8–9. – P. 633–638. doi:10.1016/j.crte.2010.12.010.

Brenguier F., Campillo M., Takeda T., Aoki Y., Shapiro N.M., Briand X., Emoto K., Miyake H. Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops // *Science*. – 2014. – Vol. 345, Issue 6192. – P. 80–82, doi:10.1126/science.1254073.

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. – 184 (1–2). – P. 164–173, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.11.024.

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, No. 1. – P. 46–59.

Liu Z., Huang J., Peng Z., Su J. Seismic velocity changes in the epicentral region of the 2008 Wenchuan earthquake measured from three-component ambient noise correlation techniques // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41, Issue 1. – P. 37–42, doi:10.1002/2013GL058682.

Sens-Schönfelder C., Wegler U. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33, Issue 21, Article L21302, doi:10.1029/2006GL027797.

Shapiro N.M., Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31, Issue 7, Article L07614, doi:10.1029/2004GL019491.

Shapiro N.M., Campillo M.H., Stehly L., Ritzwoller M.H. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise // *Science*. – 2005. – Vol. 307. – P. 1615–1618.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ТРИФОНОВ Александр Леонидович – инженер лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: поверхностные волны, шумовая томография.

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмической томографии ИНГГ СО РАН, член корреспондент РАН. Область научных интересов: сейсмическая томография, строение магматических систем под вулканами.