

УДК 551.21

## СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ КОРЫ ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ШУМОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2021 г. Н. Н. Беловежец<sup>1,2,\*</sup>, Я. М. Бережнев<sup>1,2</sup>, член-корреспондент РАН И. Ю. Кулаков<sup>1,2,3</sup>,  
Н. М. Шапиро<sup>4,5</sup>, И. Ф. Абкадыров<sup>3</sup>, С. Н. Рычагов<sup>3</sup>, академик РАН Е. И. Гордеев<sup>3</sup>

Поступило 21.07.2021 г.

После доработки 22.07.2021 г.

Принято к публикации 22.07.2021 г.

Представлены результаты шумовой сейсмической томографии для вулкана Камбальный (Южная Камчатка), где в марте-апреле 2017 г. наблюдалось мощное фреатическое извержение, первое за всю историю наблюдений. Полученные результаты уточняют строение верхней части постройки вулкана Камбальный и согласуются с независимыми результатами по объемным волнам, а также с геологической информацией. В модели структуры постройки вулкана по сейсмотомографическим результатам по поверхностным волнам выделяются асимметрично расположенные относительно конуса вулкана низкоскоростные аномалии, приуроченные к рыхлым отложениям пироклаستيки прошлых извержений и к глубинным источникам гидротермальной активности. Возможно, именно миграция флюидов в этих гидротермальных источниках на севере и западе от вулкана и их взаимодействие с магматическим очагом в верхней коре стали причиной эксплозивного извержения.

*Ключевые слова:* сейсмический шум, поверхностные волны, шумовая томография, верхняя кора, скоростные аномалии, Камчатка, вулкан Камбальный

DOI: 10.31857/S2686739721110049

Камбальный является самым южным стратовулканом голоценового возраста на Камчатском полуострове. До недавнего времени данные о его исторических извержениях отсутствовали, в связи с чем этот вулкан относился к категории спящих. Возраст самых молодых пирокластических потоков оценивался примерно 600 лет [18]. 25 марта 2017 г. на вулкане Камбальный неожиданно началось извержение, которое сопровождалось интенсивной сейсмичностью [5] и мощной газовой эмиссией [1]. Так, первый взрыв выбросил облако газа и пепла на высоту более 5–6 км

[1], после чего в течение суток шлейф от извержения распространился в южном направлении на расстояние около 1000 км, создав определенный риск для воздушных перевозок в регионе [1]. До середины апреля 2017 г. произошло еще несколько взрывов, некоторые из которых превосходили по мощности первый выброс. После этого извержение постепенно завершилось, и дальнейшая активность Камбального проявлялась в умеренной фумарольной эмиссии, продолжавшейся еще несколько месяцев. По ходу этого извержения не были замечены лавовые потоки и какие-нибудь следы выброса ювенильного материала, в связи с чем считается, что это извержение имело фреатическую природу [4].

Вулкан Камбальный расположен на окончании субмеридионального одноименного хребта, который определяется как тектономагматическое поднятие средне-верхнечетвертичного возраста в Паужетской вулканотектонической депрессии [6]. Постройку вулкана слагают породы основного состава, а именно чередующиеся шлаковидные и массивные базальты, агломератовые лавы и пирокластические отложения [8]. Объем пироклаستيки на Камбальном примерно в два раза больше лавовых потоков, что типично для базальтовых стратовулканов [18]. На вершине вулкана

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>4</sup>Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт наук о Земле, CNRS, Университет Гренобль-Альпы, Гренобль, Франция

\*E-mail: BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru

находится кратер размером  $750 \times 550$  м, глубиной до 150 м, открытый на юго-запад. В юго-восточной части вершины к кратеру примыкает воронка взрыва глубиной 10–50 м и размером  $200 \times 100$  м. Данные структуры имеют позднеголоценовый возраст и образовались в результате одного или нескольких направленных взрывов [4]. По ходу недавнего извержения в 2017 г. в районе вершины образовался провал-воронка размером  $115 \times 100$  м.

В окрестности вулкана Камбальный находится множество ареалов гидротермальной активности, которые являются одними из наиболее значимых на Камчатке. Наиболее известным является Паужетское геотермальное поле, расположенное на юго-западе от вулкана на расстоянии около 20 км, где была построена первая в СССР геотермальная электростанция [7]. Мощные термопроявления, которые также рассматриваются высоко перспективными для промышленной эксплуатации, наблюдаются и в районе вулкана Кошелевского на западе от Камбального. Еще один ареал повышенной геотермальной активности обнаруживается на севере Камбального хребта [3].

До недавнего времени геофизическая изученность вулкана Камбальный и окрестностей была сильно ограничена в силу удаленности и труднодоступности данного региона. Так, в этом районе функционирует всего одна постоянная сейсмическая станция Паужетка (PAU) на расстоянии 22 км от вершины вулкана; остальные станции мониторинга расположены на расстояниях более 100 км. В связи с этим детали процесса сейсмической активизации во время извержения не могли быть определены с большой точностью. С целью изучения локальной сейсмичности и определения глубинной структуры под вулканом, с июля 2018 г. по июль 2019 г. на склонах вулкана и его окрестностях была установлена временная сейсмическая сеть, состоящая из десяти трехкомпонентных широкополосных станций (рис. 1). В данной статье представлены первые результаты изучения строения верхней коры под вулканом, полученные методом шумовой томографии.

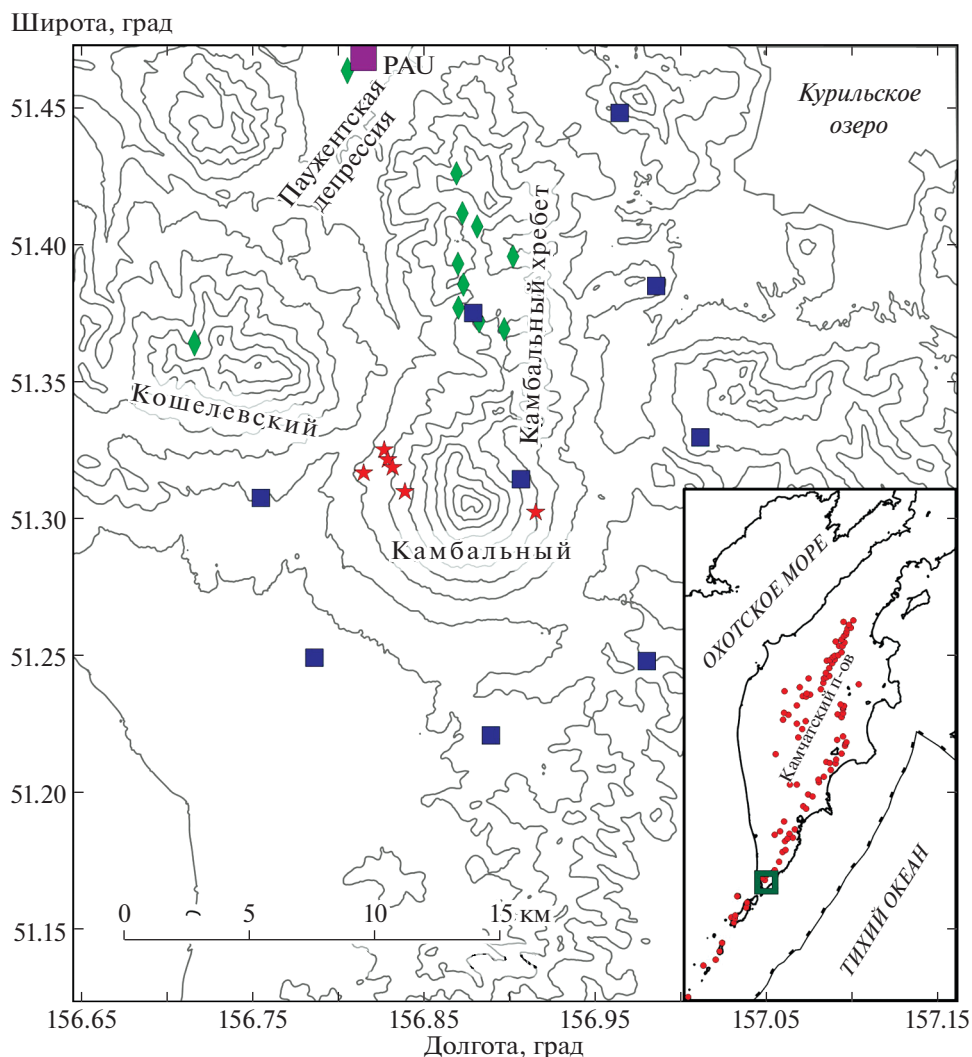
Сейсмическая шумовая томография – это относительно недавно возникший метод [19], который активно развивался в течение последних 15 лет, и теперь применяется для изучения геологических структур в самых разных масштабах [20]. В частности, он регулярно применяется для изучения приповерхностных слоев в вулканических системах [11, 13, 15]. Основная идея этого метода состоит в том, что кросс-корреляция случайного сейсмического шума, создаваемого равномерно распределенными в пространстве источниками и записанного на двух приемниках, сходится к функции Грина (импульсному отклику среды) между этими двумя приемниками [12]. Таким образом, вычисление кросс-корреляций

сейсмического шума теоретически может быть использовано для эмпирического синтеза виртуальных точечных сейсмических источников, находящихся в местоположении каждого из используемых приемников. С учетом реальных свойств сейсмического шума, регистрируемого на поверхности земли [9], восстановление объемных сейсмических волн из кросс-корреляций шума [16] может быть получено только в определенных благоприятных условиях. В то же время фундаментальные моды поверхностных волн могут быть достаточно легко восстановлены для почти всех пар станций. Поэтому в нашей работе мы применяем наиболее разработанный метод поверхностно-волновой шумовой томографии [20].

Выделение записей поверхностных волн из непрерывных сейсмических записей проводилось согласно схеме, предложенной в работе [10]. Основными источниками шума являются приборные волны Тихого океана и Охотского моря, а также в меньшей степени Северного Ледовитого океана. Обработка данных включала в себя предварительную фильтрацию, внесение инструментальной поправки, удаление среднего, линейного и полиномиальных трендов, полосовую фильтрацию в окне 0.06–4 Гц, понижение частоты дискретизации со 100 до 10 Гц, однобитную нормализацию и спектральное отбеливание в окне фильтрации до и после нормализации во временной области. Далее производилась кросс-корреляция в скользящем окне сейсмических записей на вертикальных компонентах по всем парам станций, имеющихся в наличии. Пример развертки по времени результатов корреляции с августа 2018 г. до середины января 2019 г. для одной пары станций (KM01-KM05) показан на рис. 2а. Далее полученные значения функции корреляции осреднялись по всему периоду наблюдения, как показано для выделенной пары станций на рис. 2б.

Полученные корреляционные функции являются аналогами записей поверхностных волн Рэлея, пробегающих от одной станции к другой. Для этих записей проводился спектрально-временной анализ СВАН (FTAN) [14], суть которого состояла в их фильтрации в серии узких последовательных полос частот. Поиск максимума огибающей по полученным сигналам для каждой частоты дает дисперсионные кривые, показывающие зависимость групповой скорости волны Рэлея от частоты. Поскольку количество пар станций было невелико, построение дисперсионных кривых производилось вручную.

Построение распределения глубинного строения под сетью станций по имеющемуся набору дисперсионных кривых производилось на основе двухэтапного алгоритма поверхностно-волновой томографии SURF\_TOMO [17]. На первом этапе



**Рис. 1.** Район вокруг вулкана Камбальный. Рельеф показан изолиниями через 200 м. Фиолетовый квадрат – постоянная станция Паужетка; синие квадраты показывают положение станций временной сети, установленной в 2018–2019 гг. Зеленые ромбы – ареалы геотермальной активности; красные звезды – моногенные конусы. Вкладка показывает положение района исследований (зеленый квадрат) и вулканы Камчатки (красные точки).

строились двумерные карты групповых скоростей для отдельных частот (рис. 3) путем выполнения нескольких итераций с учетом искривления лучей на полученных сейсмических неоднородностях. После этого в каждой точке области строилась локальная дисперсионная кривая, которая в результате итеративной линейаризованной инверсии трансформировалась в одномерное распределение скорости поперечных волн,  $V_s$ . Проведение этой процедуры во всех точках области позволило построить трехмерное распределение  $V_s$ , которое показано на рис. 4 на четырех горизонтальных сечениях на глубинах от 0.5 до 2.5 км.

К сожалению, из-за малого количества станций и низкой плотности данных разрешение томографической модели оказалось не слишком

высоким. Тем не менее был проведен ряд синтетических тестов, который показал, что на качественном уровне имеющаяся система наблюдений дает возможность восстанавливать крупные аномалии со сменой знака в районе хребта и вершины вулкана Камбальный, что, в целом, соответствует тем результатам, которые получены после инверсии экспериментальных данных. Следует также отметить, что на качественном уровне распределение скоростных аномалий в настоящем исследовании согласуется с результатами, полученными из томографической инверсии по объемным волнам, построенными по временам вступления от локальной сейсмичности.

Полученные результаты уточняют строение верхней части постройки вулкана Камбальный и, в целом, согласуются с геологическими данными.

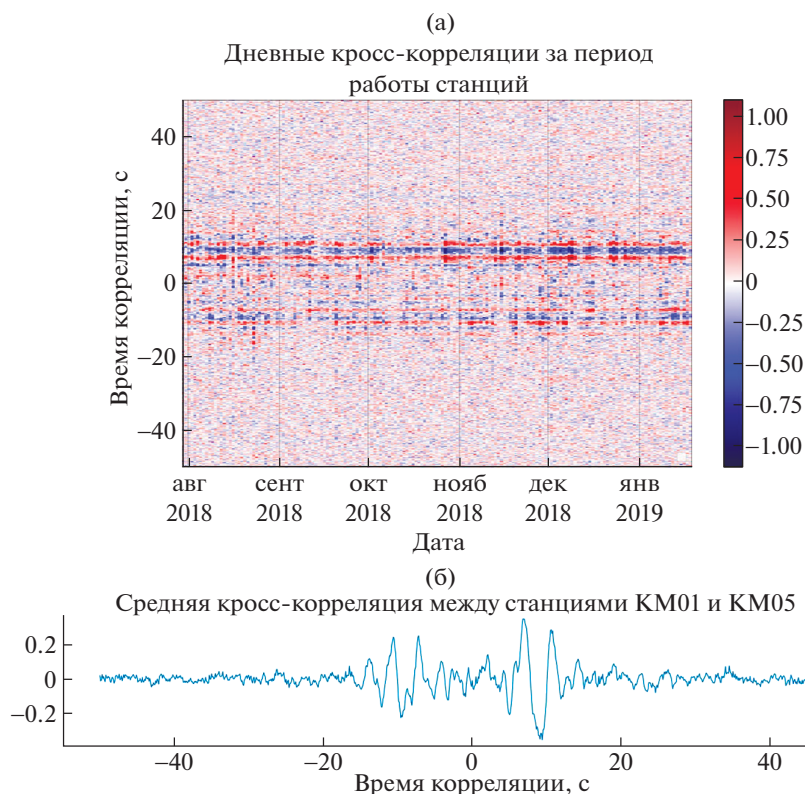


Рис. 2. Пример выполнения кросс-корреляции по паре станций КМ01 и КМ05 в скользящих окнах (а) и результат осреднения для всего периода наблюдений (б).

В распределении групповых скоростей волн Рэлея и скоростей S-волн на юге и западе от вулкана Камбальный расположен сегмент с доминирующими низкими скоростями. Наиболее высокоамплитудная отрицательная аномалия расположена под западным склоном Камбального и под седловиной по направлению к вулкану Кошелева. Низкие скорости там могут соответствовать отложениям слабо сцементированной пирокластики, которая накопилась там по ходу извержений обоих вулканов. Другим вариантом интерпретации в этом случае может быть наличие глубинных гидротермальных процессов на участке между двумя вулканами, которые ответственны за мощные гидротермальные проявления в районе Кошелевского вулкана. Следует отметить, что именно над этой низкоскоростной аномалией расположены моногенные конуса на западном склоне Камбального, что дает основание предположить, что эта аномалия может быть связана с верхней частью магматического канала, ответственного за извержения вулкана в голоцене. В этом случае взаимодействие магматического тела с метеорными водами является причиной гидротермальной активности, а также эпизодических фреатических извержений Камбального, как, например, того, которое случилось весной 2017 г.

На севере от вулкана Камбальный вдоль одноименного хребта также наблюдается низкоско-

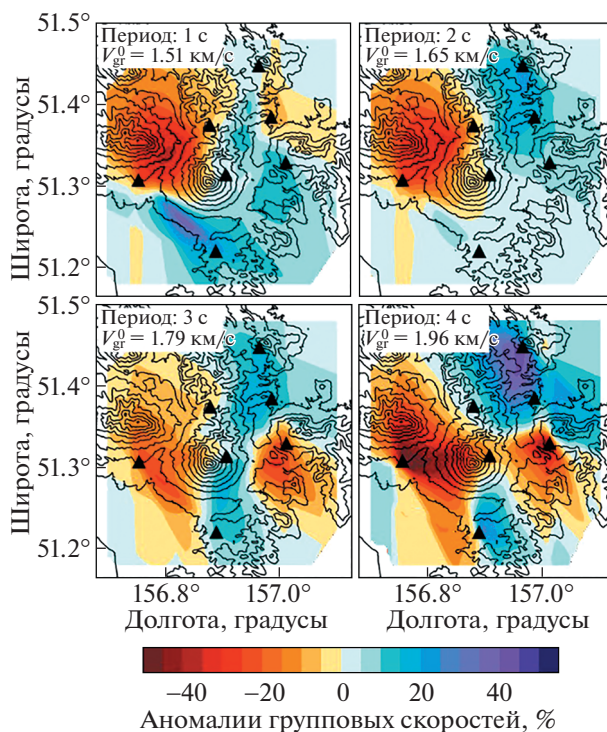
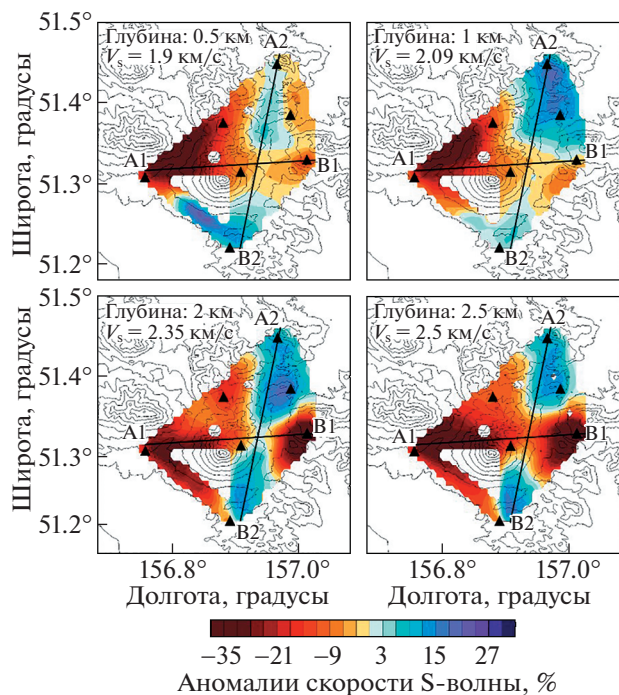


Рис. 3. Аномалии групповых скоростей волны Рэлея на периодах 1–4 с. Черными треугольниками обозначены сейсмические станции. Рельеф изображен с помощью изолиний, проведенных через каждые 200 м.



**Рис. 4.** Аномалии скоростей S-волны на четырех горизонтальных сечениях на глубинах от 0.5 до 2.5 км. Черными треугольниками обозначены сейсмические станции. Рельеф изображен с помощью изолиний, проведенных через каждые 200 м.

ростная аномалия, которая также может ассоциироваться с распределением геотермальных источников в верхах коры, формирующих крупный ареал гидротермальных проявлений Камбального и Паужетского полей. Повышенные значения скорости S-волны в западной части стратовулкана и хребта Камбального на глубинах порядка 1 км и ниже, скорее всего, приурочены к высокоскоростному фундаменту, сложенному основными породами.

Данная статья представляет первые результаты изучения глубинного строения в окрестностях вулкана Камбальный, который в 2017 г. пережил мощное фреатическое извержение. Хотя данные о поверхностных волнах, полученные с помощью кросс-корреляции сейсмического шума, не способны обеспечить высокое разрешение полученных сейсмических моделей, на качественном уровне они позволяют выделить низкоскоростной сегмент на юге и западе от Камбального вулкана, с которым могут быть связаны гидротермальные проявления и магматическое тело в верхней коре.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-17-00075 и гранта Министерства образования и науки

№ 075-15-2021-628 “Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А.* Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 263–267.
2. *Левина В.И., Фирстов П.П., Зобин В.М.* Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1980. № 2. С. 81–98.
3. *Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нурдаев А.А.* Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41–56.
4. *Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нурдаев И.А.* Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 13–27.
5. *Сенюков С.Л., Нурдина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В., Должикова А.Н. и др.* Сейсмичность в районах вулканов Камбальный, Желтовский, Ксудач, Крашенникова и Большой Семячик в 2009–2017 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. 2017. С. 73–77.
6. Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов и И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
7. *Сугробов В.М., Карпов Г.А., Рычагов С.Н.* 50 лет со дня пуска Паужетской геотермальной электрической станции // Научная конференция, посвященная дню вулканолога ИВиС ДВО РАН “Вулканизм и связанные с ним процессы” ([http://kcs.dvo.ru/ivs/publication/volc\\_day/2016/art52.pdf](http://kcs.dvo.ru/ivs/publication/volc_day/2016/art52.pdf)). 2016.
8. *Сывороткин В.Л.* Современный вулканизм Южной Камчатки и гидротермальный процесс // Структура гидротермальной системы / Отв. ред. Белоусов В.И. и Ломоносов И.С. М.: Наука, 1993. С. 19–38.
9. *Ardhuin F., Gualtieri L., Stutzmann E.* Physics of Ambient Noise Generation by Ocean Waves. // Book chapter in *Seismic Ambient Noise*, N. Nakata, L. Gualtieri and A. Fichtner (eds.), Cambridge University Press. 2019.
10. *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 Broadband Surface Wave Dispersion Measurements // *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 169. P. 1239–1260.
11. *Brenguier F., Shapiro N.M., Campillo M., Nercissian A., Ferrazzini V.* 3-D Surface Wave Tomography of the Piton de la Fournaise Volcano Using Seismic Noise Correlations // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, L02305. <https://doi.org/10.1029/2006GL028586>
12. *Gouédard P., Stehly L., Brenguier F., Campillo M., Colin de Verdière Y., Larose E., Margerin L., Roux P., Sánchez-Sesma F.J., Shapiro N.M., Weaver R.L.* Cross-correlation of Random Fields: Mathematical Approach

- and Applications // *Geophysical Prospecting*. 2008. V. 56. P. 375–393.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00684>
13. *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. V. 346. P. 617.  
<https://doi.org/10.1126/science.1258582>
  14. *Levshin A.L., Yanovskaya T.B., Lander A.V., Bukchin B.G., Barmin M.P., Ratnikova L.I., Its E.N.* Seismic Surface Waves in a Laterally Inhomogeneous Earth / ed. Keilis-Borok V.I. D.: Springer. 1989. P. 304.
  15. *Mordret A., Rivet D., Landès M., Shapiro N.M.* Three-dimensional Shear Velocity Anisotropic Model of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island) from Ambient Seismic Noise // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. V. 120.  
<https://doi.org/10.1002/2014JB011654>
  16. *Nakata N., Nishida K.* Body Wave Exploration // Cambridge: Cambridge University Press. In N. Nakata, L. Gualtieri, and A. Fichtner (Eds.), *Seismic Ambient Noise*. 2019. P. 239–266.  
<https://doi.org/10.1017/9781108264808.010>
  17. *Koulakov I.Y., Maksotova G., Jaxybulatov K., Kasatkina E., Shapiro N.M., Luehr B.G., El Khrepy S., Al-Arif N.* Structure of Magma Reservoirs beneath Merapi and Surrounding Volcanic Centers of Central Java Modeled from Ambient Noise Tomography // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2016. V. 17 (10). P. 4195–4211.
  18. *Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector Collapses and Large Landslides on Late Pleistocene–Holocene Volcanoes in Kamchatka, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. V. 158. № 1–2. P. 117–138.
  19. *Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High Resolution Surface Wave Tomography from Ambient Seismic Noise // *Science*. 2005. V. 307. P. 1615–1618.
  20. *Shapiro N.M.* Applications with Surface Waves Extracted from Ambient Seismic Noise // *Seismic Ambient Noise*, eds: N. Nakata, L. Gualtieri, and A. Fichtner, Cambridge University Press. 2019.

## STRUCTURE OF THE UPPER CRUST BENEATH THE KAMBALNY VOLCANO (SOUTH KAMCHATKA) REVEALED FROM AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY

N. N. Belovezhets<sup>a,b,#</sup>, Y. M. Berezhnev<sup>a,b</sup>, Corresponding Member of the RAS I. Yu. Koulakov<sup>a,b,c</sup>, N. M. Shapiro<sup>d,e</sup>, I. F. Abkadyrov<sup>c</sup>, S. N. Rychagov<sup>c</sup>, and Academician of the RAS E. I. Gordeev<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum–Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

<sup>d</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>e</sup> *Centre National de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes (UGA), Grenoble, France*

<sup>#</sup> *E-mail: BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru*

The paper presents result of ambient noise tomography for the Kambalny volcano (South Kamchatka), where the first in the entire history of observations, powerful phreatic eruption was observed in March–April 2017. The obtained results clarify the structure of the upper part of the edifice of Kambalny Volcano and are consistent with independent results on body waves, as well as with geological information. In the model of the structure of the volcanic edifice, according to seismotomographic results from surface waves, low-velocity anomalies are distinguished asymmetrically relative to the volcano's cone, confined to loose pyroclastic deposits of past eruptions and to deep sources of hydrothermal activity. Perhaps the migration of fluids in these hydrothermal vents to the north and west of the volcano and their interaction with the magma chamber in the upper crust caused the explosive eruption.

**Keywords:** seismic noise, surface waves, ambient noise tomography, upper crust, velocity anomalies, Kamchatka, Kambalny volcano