

УДК 550.34

ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ПОД ВУЛКАНОМ ЭБЕКО (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ИЮЛЕ–АВГУСТЕ 2021 ГОДА

© 2024 г. Я. М. Бережнев^{1,2,*}, Н. Н. Беловежец^{1,2}, член-корреспондент РАН И. Ю. Кулаков^{1,2,3}, А. В. Яковлев⁴, М. С. Алажми⁵, академик РАН Е. И. Гордеев⁶

Поступило 13.11.2023 г.

После доработки 15.11.2023 г.

Принято к публикации 23.11.2023 г.

Представлены изменения сейсмических скоростей в северной части острова Парамушир (Курильские острова), где расположен действующий вулкан Эбеко. Были использованы данные сейсмической сети, функционировавшей в этом районе в 2021–2022 годах, с 1 июля по 15 августа 2021 года, когда работало большинство сейсмических станций сети. Изменения сейсмических скоростей были получены на основе функций взаимной кросс-корреляции сейсмического шума. Для выявления общих закономерностей в полученных кривых изменения скоростей был проведен кластерный анализ, в результате которого все кривые были разделены на две группы, имеющие схожую форму внутри каждой группы, но сильно различающиеся между группами. Изменения скорости в первой группе, соответствующей парам станций, охватывающим весь северный Парамушир, имеют некоторую запаздывающую корреляцию с интенсивностью осадков, что позволяет предположить, что эти изменения могут быть вызваны миграцией метеорных вод. Во второй группе, более сконцентрированной в районе вулкана Эбеко, изменения скорости, по-видимому, связаны как с внешними факторами (осадки и атмосферное давление), так и с внутренней деятельностью вулкана (фреатические взрывы, сейсмичность, термические аномалии и газовыделение).

Ключевые слова: вулкан Эбеко, Курильские острова, сейсмический шум, изменения сейсмической скорости, кластеризация

DOI: 10.31857/S2686739724030132

ВВЕДЕНИЕ

Действующие вулканы являются уникальными геологическими структурами, в которых значительные изменения физических свойств среды можно обнаружить инструментально различными геофизическими методами. Эти изменения в основном связаны с изменением

напряженно-деформированного состояния, миграцией флюидов, трещинообразованием и другими процессами, которые могут очень быстро происходить внутри действующих вулканов. Скорости сейсмических волн чувствительны к этим факторам [1], поэтому такие вариации сейсмических скоростей могут дать возможность идентифицировать предвестники предстоящих извержений.

В то же время определение изменений сейсмических скоростей является нестандартной задачей. Первые подобные исследования были основаны на проведении сейсморазведочных работ с контролируруемыми источниками. Такой подход может обеспечить высокую точность оценки изменений сейсмических свойств, но является дорогостоящим и сложным с точки зрения логистики. Другой способ – использование повторяющихся землетрясений, называемых дублетами, для исследования изменений скоростей между

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения наук Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³Институт земной коры Сибирского отделения наук Российской Академии наук, Иркутск, Россия

⁴Институт Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия

⁵Город науки и технологий имени короля Абдель Азиза, Эр-Рияд, Саудовская Аравия

⁶Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: BerezhnevYM@ipgg.sbras.ru

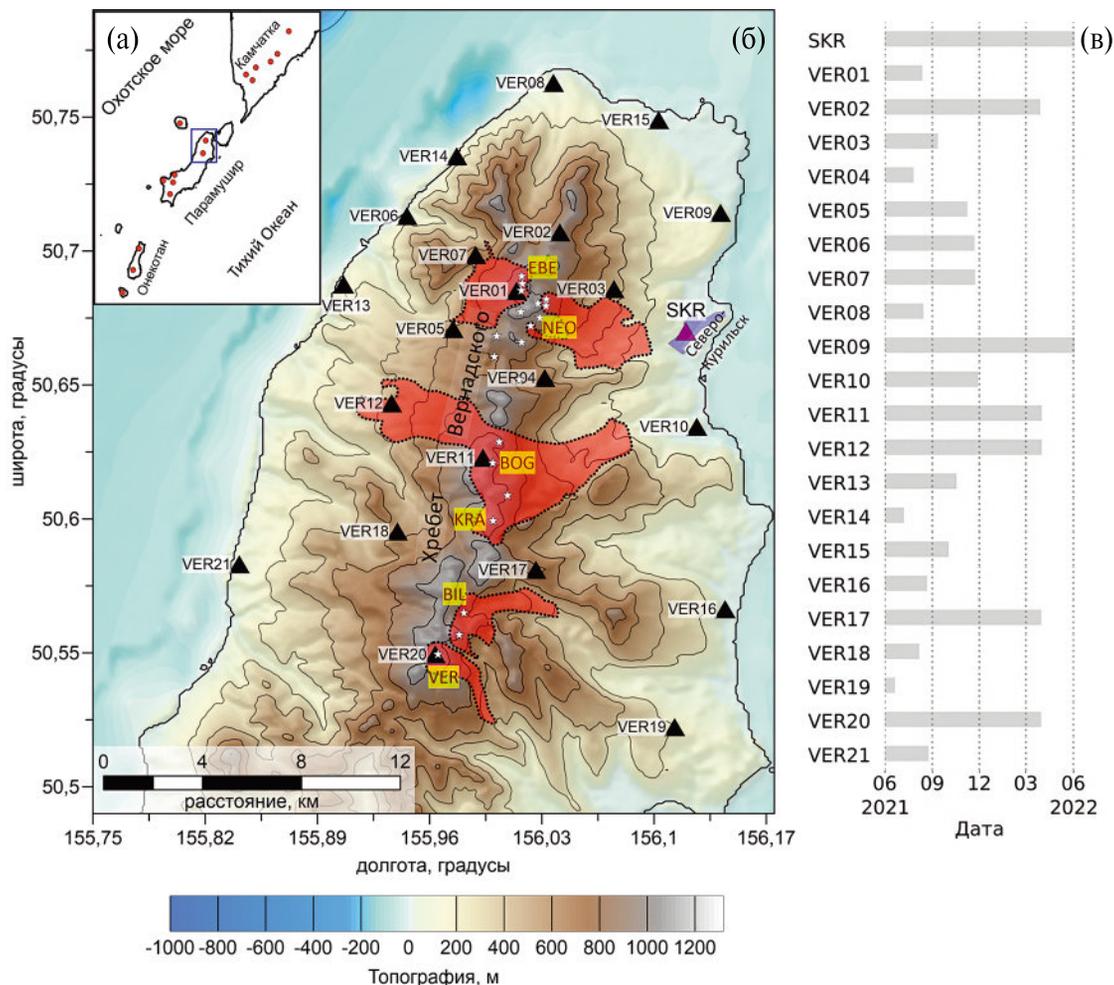


Рис. 1. Район исследования и распределение данных. (а) Карта северных Курильских островов и южной Камчатки с указанием района исследований (синий прямоугольник). Красные точки обозначают голоценовые вулканы. (б) Район исследований с отмеченными временными и постоянными сейсмическими станциями (черный и фиолетовый треугольники соответственно). На фоне изображен рельеф с интервалом в 200 м. Красные области изображают голоценовые потоки лавы. Белые звезды обозначают конусы. Коричнево-желтыми обозначены крупные вулканические центры: VER – Вернадский; BIL – Билибин; KRA – Крашенинников; BOG – Богданович; NEO – Неожиданный; EBE – Эбеко. (в) Графики времени регистрации сейсмических станций.

сейсмическими событиями [2]. Однако эти методы имеют ряд ограничений из-за неравномерного пространственно-временного распределения землетрясений. Также можно использовать повторяющуюся локальную томографию на землетрясениях [3]. Однако в этом случае надежная информация может быть получена только после тщательного отбора данных из большого набора и не может быть использована для целей краткосрочного прогнозирования. Альтернативный подход заключается в построении функции Грина между парой сейсмических станций

по сейсмическому шуму [4], что является эффективным методом мониторинга изменений сейсмических скоростей [5].

В работе была исследована северная часть острова Парамушир, который является самым северным и одним из крупнейших островов Курильской дуги на Дальнем Востоке России (рис. 1 а). В северной части острова Парамушир основной структурой является хребт Вернадского высотой около 1000 м, включающий цепь плейстоцен-голоценовых вулканов (рис. 1 б). Массивные голоценовые потоки лавы и десятки

моногенных конусов, наблюдаемые вдоль хребта Вернадского, демонстрируют большой потенциал вулканических извержений в этой зоне (рис. 1 б).

Ныне действующий вулкан Эбеко расположен на северной оконечности хребта Вернадского и состоит из ряда конусов и кратеров. В историческое время большинство извержений Эбеко были фреатическими и фреатомагматическими. В течение последнего десятилетия Эбеко проявляет вулканическую активность, состоящую из регулярных взрывов, некоторые из которых выбрасывали пепел на высоту до 5–7 км [6, 7]. Также существующая эпизодическая фумарольная активность на вулкане Крашенинникова свидетельствует о продолжающейся активности магмо- и гидротермальной системы в средней части хребта Вернадского [8].

Частые извержения вулкана Эбеко создают серьезные проблемы для города Северо-Курильска с населением 3000 человек, расположенного на расстоянии всего 6–7 км от него. Облака пепла, выброшенные извержениями Эбеко, могут нарушать маршруты авиации, которые очень активны в этой части Тихого океана. Все эти факторы определяют важность мониторинга этого вулкана для предоставления надежных и своевременных предостережений о его извержениях.

В 2021–2022 годах на северной части острова Парамушир была установлена временная сейсмическая сеть, состоящая из 20 сейсмических станций (рис. 1 б, в). Во время работы сейсмической сети вулкан Эбеко производил несколько эксплозивных извержений за сутки, особенно в течение июля-августа 2021 [7]. Такого рода вулканическая активность неизбежно вызывает изменения механических свойств пород под вулканом. Наличие сейсмических станций в этом районе дает уникальную возможность выявить эти изменения.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для данного исследования были использованы трехкомпонентные непрерывные сейсмические данные, зарегистрированные временной сейсмической сетью, функционировавшей на хребте Вернадского с июня 2021 по июнь 2022 года, и одной постоянной сейсмической станцией, расположенной вблизи города Северо-Курильск (SKR) (рис. 1 б). Следует отметить, что на некоторых станциях были проблемы с синхронизацией часов станции (VER02, VER11,

VER12). В предыдущих исследованиях на основе данных этой сейсмической сети дрейф часов уже был определен и учтен [9]. К сожалению, большинство временных станций постепенно вышло из строя из-за суровых климатических условий и нападений животных. Поэтому в данном исследовании был рассмотрен период времени с 30 июня по 14 августа 2021 года, когда большая часть записей была доступна и имела удовлетворительное качество.

Были построены функции взаимной кросс-корреляции сейсмического шума в диапазонах частот 0.125–0.25 Гц и 2–4 Гц, следуя процедуре, описанной Bensen et al. [10]. Чтобы подавить случайный шум, дневные кросс-корреляции были усреднены в скользящем окне длиной 5 дней. Изменения сейсмических скоростей были определены с помощью кросс-спектрального анализа в скользящем окне без использования эталонного сигнала [11], который представляет собой анализ оконных сигналов в частотной области, основанный на линейной зависимости между фазовыми сдвигами на каждой частоте и задержками времени прихода между оконными сигналами, и на линейной зависимости временных задержек от относительного изменения скорости, справедливой для равномерного изменения скорости во всей среде. Пример полученных изменений сейсмических скоростей показан на рис. 2.

Для выделения различных закономерностей был проведен двухэтапный кластерный анализ методом самоорганизующейся карты и кластеризации k -средних [12]. Самоорганизующаяся карта (SOM) – это метод машинного обучения без учителя для преобразования входных данных большой размерности в двумерные выходные карты [13]. Следуя Brentan et al. [12], выходные карты были использованы в качестве входных данных для алгоритма k -средних для укрупнения полученных групп. В результате было выделено 2 группы кривых для обоих исследуемых диапазонов частот, которые показаны на рис. 3.

На рис. 4 а и б представлены распределения пар станций, соответствующих этим двум группам. На первый взгляд может показаться, что они охватывают в основном одни и те же территории, однако более внимательное рассмотрение показывает, что вторая группа более сконцентрирована в северной части исследуемой области вокруг вулкана Эбеко, а первая в основном охватывает всю исследуемую область.

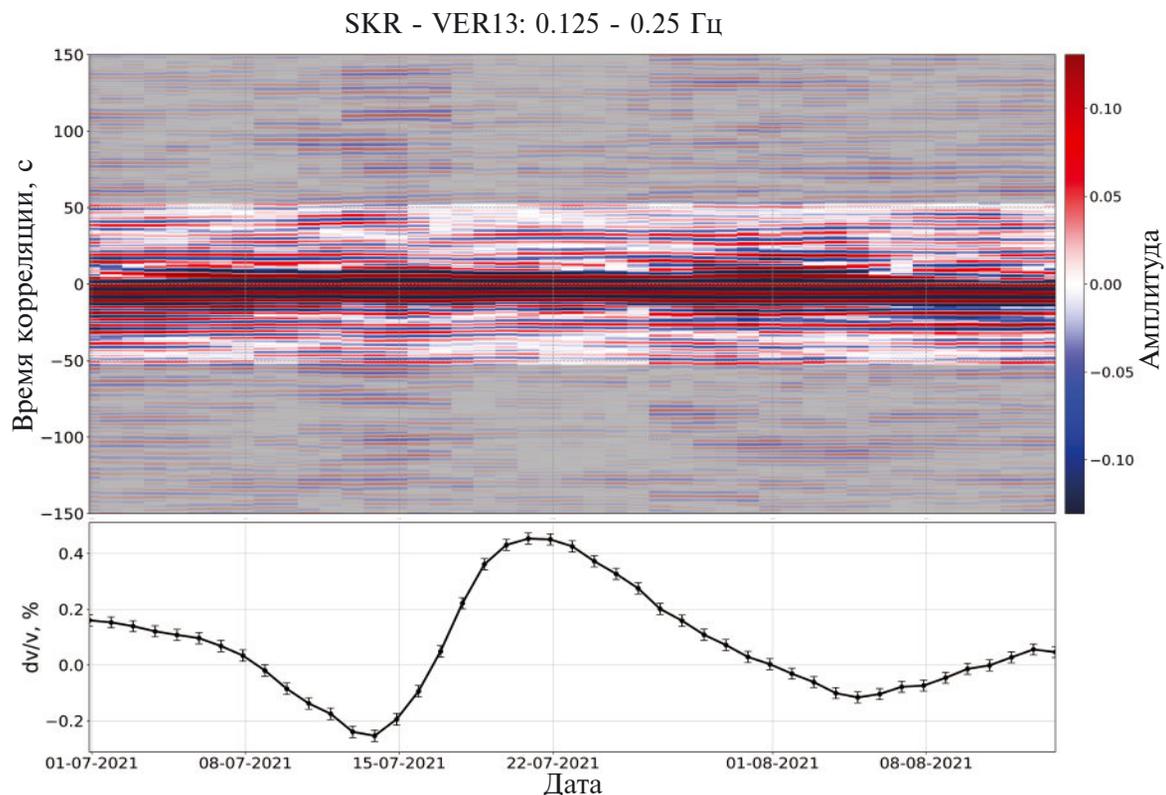


Рис. 2. Верхняя часть представляет собой пример суточных кросс-корреляций по парам станций SKR-VER13 в полосе частот 0.125–0.25 Гц после усреднения по скользящему окну. Серые части обозначают времена корреляции, которые не были использованы для оценки изменений скорости. Полученные изменения скорости для этой коррелограммы показаны на нижней панели.

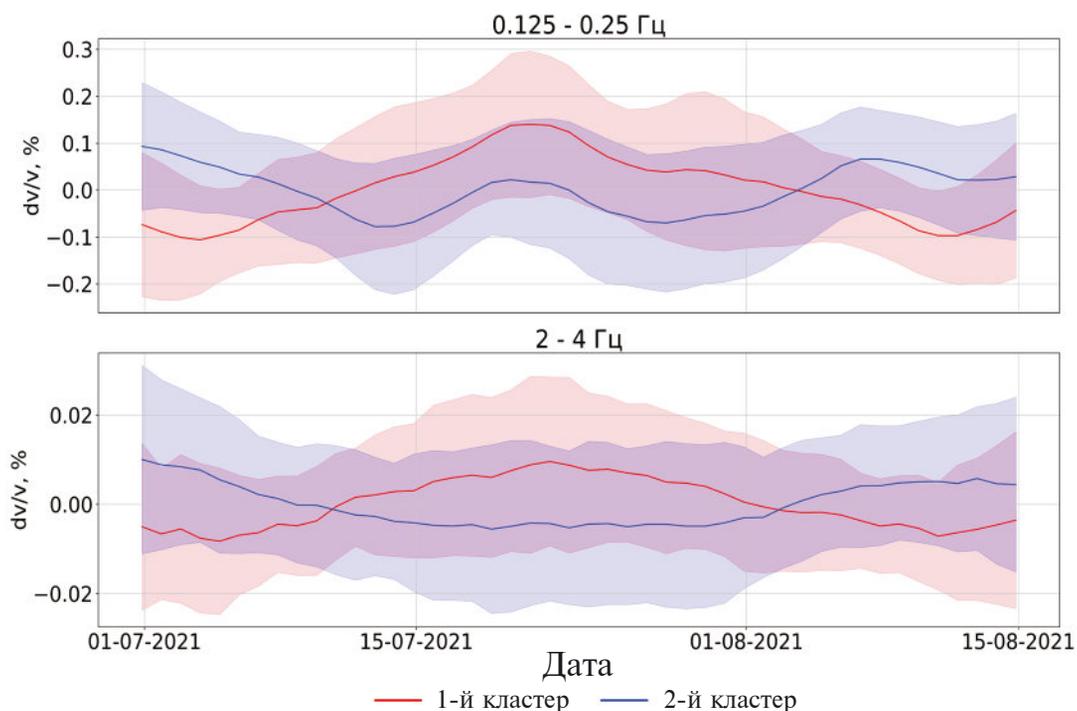


Рис. 3. Средние кривые изменения скоростей и их стандартные отклонения для диапазонов частот 0.125–0.25 Гц и 2–4 Гц для 1-й и 2-й группы, обозначенные розовым и синим цветами соответственно.

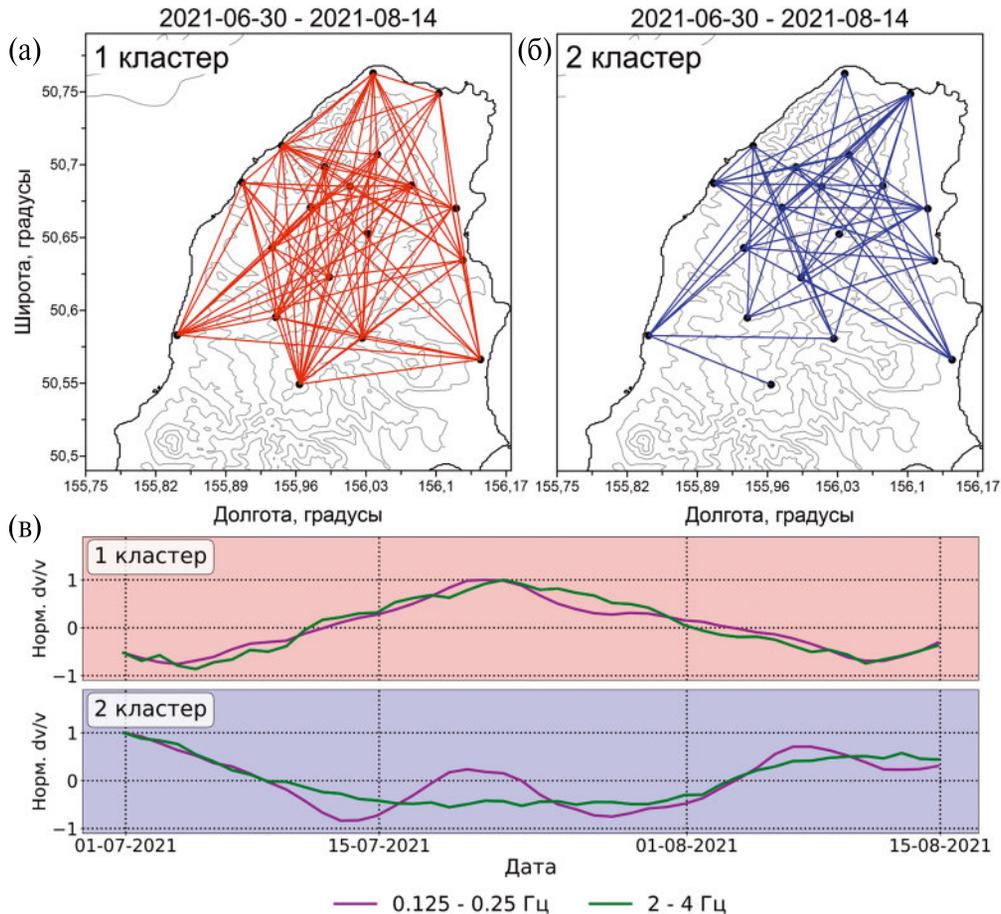


Рис. 4. Результаты кластеризации. (а), (б) Пары станций (черные точки), соответствующие группам 1 и 2 (красные и синие линии соответственно). (в) Средние кривые изменений скорости для диапазонов частот 0.125–0.25 Гц и 2–4 Гц (фиолетовая и зеленая линии соответственно) для групп 1 и 2, обозначенных розовым и синим фоном соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Простейшая модель описывает кода-волны как смесь рассеянных объемных и поверхностных волн [14]. Так как кода-волны являются результатом сложного рассеяния, конкретное местоположения объектов, влияющих на них, довольно трудно определить в сложной геологической обстановке [15]. Поэтому пространственное распределение областей, где произошли изменения скорости, не может быть напрямую определено на основе геометрии пар станций, используемых для кросс-корреляции. По этой причине на рис. 4 а и б не наблюдается четкого разделения пар станций в пространстве, соответствующих двум группам. Глубинная чувствительность кода-волновой части кросс-корреляций в первом приближении может быть описана ядрами чувствительности фундаментальной моды поверхностной волны Релея. Согласно имеющимся ядрам чувствительности для

исследуемой области для низкочастотного диапазона максимум чувствительности располагается на глубине 3–5 км, а для высокочастотного — в первых сотнях метров от дневной поверхности [9].

Изменения скорости, выявленные в результате анализа, могут быть вызваны рядом различных факторов. Во-первых, как было обнаружено Sens-Schoenfelder & Weggler [5], кросс-корреляции сейсмического шума очень чувствительны к погодным условиям. Это может быть справедливо для случая Парамушира, где климат чрезвычайно влажный и подвержен сильным циклонам. Во-вторых, вулканическая деятельность является важным фактором, который также может изменять механические свойства горных пород. Кроме того, могут существовать некоторые другие внешние факторы, такие как атмосферное давление, которые могут повлиять на свойства резервуаров подземных вод [16]. Поэтому при интерпретации вариаций

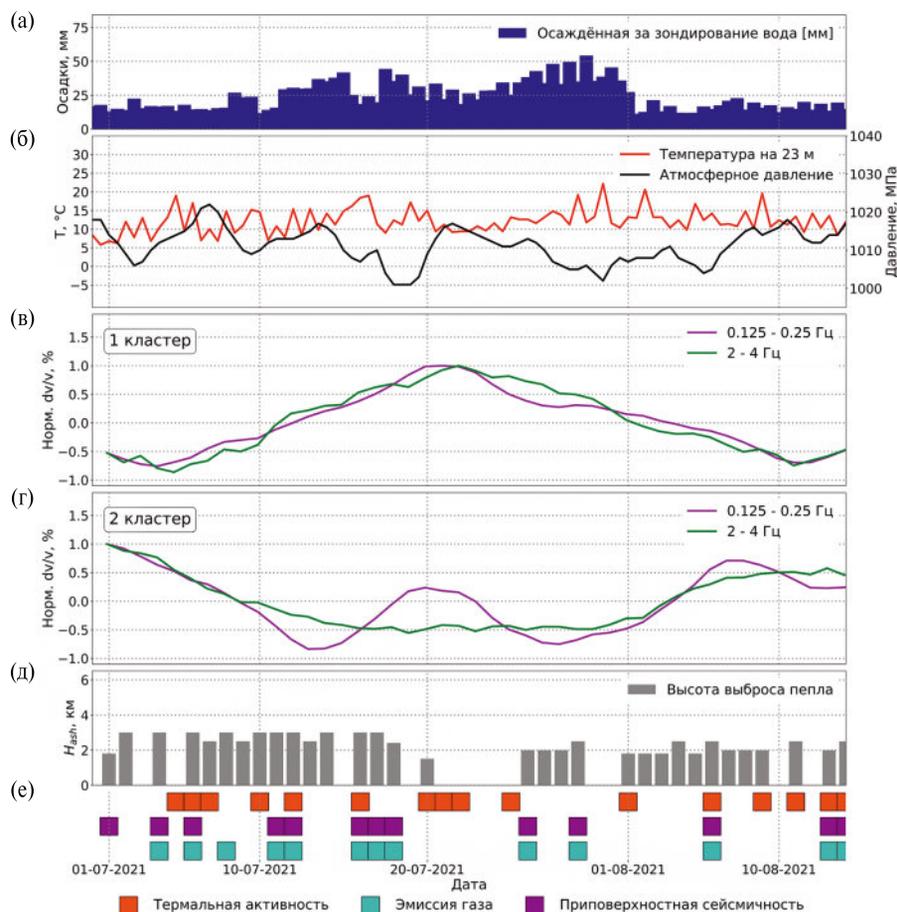


Рис. 5. Нормированные средние кривые изменений скорости в сравнении с метеорологическими данными и активностью вулкана Эбеко. Суточная активность Эбеко определялась по данным КФ ГС РАН [17] и KVERT [19].

скорости, полученных в этом исследовании, были учтены различные типы данных, включая метеорологические и вулканологические наблюдения (рис. 5).

На рис. 5 можно наблюдать, что две группы кривых демонстрируют почти противоположную корреляцию: для первой группы кривые имеют четкие максимумы в средней части рассматриваемого периода времени, тогда как кривые во второй группе имеют тенденцию к более низким значениям в одно и то же время. В первой группе низкочастотные и высокочастотные кривые практически идентичны. Напротив, во второй группе кривые выглядят иначе: высокочастотная кривая имеет один широкий минимум в средней части рассматриваемого интервала времени, тогда как низкочастотная кривая имеет более сложную форму и имеет локальный максимум примерно в то же время, что и максимум в первой группе.

Рассматривая связь изменений скорости с осадками, важно иметь в виду, что изменение скорости может произойти не сразу после изменения

режима осадков, так как метеорной воде нужно некоторое время, чтобы проникнуть в горные породы. Если предположить, что фактор осадков существенен, то разница в характере изменений скорости для групп 1 и 2 может быть связана с разным распределением пар станций в этих двух случаях: пары станций в группе 2 занимают более локальную зону вокруг вулкана Эбеко, где, считается, что породы более проницаемы. При сравнении с количеством осадков для группы 2 наблюдается тесная связь между интенсивностью дождя и уменьшением скорости. Это может свидетельствовать о том, что в этом случае метеорная вода сразу проникает в земную кору и влияет на ее упругие свойства. Для группы 1 в тот же период с 1 по 20 июля наблюдается постепенное увеличение скорости. Эта разница может быть связана со значительно более низкой проницаемостью пород, препятствующей проникновению воды на более глубокие горизонты. Увеличение скорости в данном случае может быть отсроченной реакцией на высыхание почвы после таяния снега в июне. Начиная с 20 июля по 10 августа

уменьшение скорости в группе 1 может быть связано с отсроченным действием дождей, прошедших с начала июля.

Помимо осадков, может быть рассмотрена связь между полученными изменениями скорости и атмосферным давлением. На рис. 5 низкочастотная кривая в группе 2 имеет некоторую очевидную связь с изменением атмосферного давления. Два локальных пика изменения скорости 13 июля и 7 августа соответствуют локальным минимумам давления. Можно предположить, что снижение атмосферного давления может вызвать подъем уровня грунтовых вод, как это было предложено в [19]. В связи с этим перераспределение порового давления в гидротермально-магматической системе Эбеко может привести к подъему флюидов из магматического очага. Этот процесс может вызвать повышение давления в магматическом очаге, уплотнение горных пород и соответствующее увеличение сейсмической скорости. Отметим, что такая связь наблюдается только для низкочастотной кривой скорости в группе 2, соответствующей району Эбеко.

Изменения скорости в группе 2 также можно сравнить с информацией об активности вулкана Эбеко (фреатические извержения, сейсмичность, эмиссия газа и термические аномалии), представленной на рис. 5. Общее снижение скорости на кривых совпадает с разрывом или уменьшением фреатических извержений с 19 по 25 июля, низким уровнем сейсмичности и пониженной эмиссии газа. С другой стороны, этому перерыву эруптивной активности предшествует локальный максимум низкочастотной кривой, который во время перерыва снижается. Как показала численная модель на примере вулкана Безымянный, подобные особенности могут быть вызваны подъемом флюида перед эксплозивным извержением [20]. Таким образом, наблюдаемые изменения скорости в группе 2 можно объяснить как внешними (осадки и атмосферное давление), так и внутренними (миграция флюидов) механизмами. Для группы 1 не наблюдается связи с глубинными процессами, а лишь некоторые замедленные реакции на изменение интенсивности осадков.

Размещение сейсмических станций вокруг вулкана Эбеко дало нам уникальную возможность выявить изменения скорости в период его активной вулканической деятельности. Кластерный анализ позволил выявить и разделить скрытые закономерности, обусловленные различными процессами. Следовательно, такой анализ может быть полезен для изучения вулканической активности в сложных условиях, когда наблюдается несколько

значительных источников изменения скорости (например, метеорологические условия, вулканическая и гидротермальная активность и т.д.).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-27-00374.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ratdomopurbo A., Poupinet G.* Monitoring a Temporal Change of Seismic Velocity in a Volcano: Application to the 1992 Eruption of Mt. Merapi (Indonesia) // *Geophysical Research Letter.* 1995. V. 22. P. 775–778.
2. *Poupinet G., Ellsworth W.L., Frechet J.* Monitoring Velocity Variations in the Crust Using Earthquake Doublets: An Application to the Calaveras Fault, California // *Journal Geophysical Research.* 1984. V. 89. P. 5719–5731.
3. *Vargas C.A., Koulakov I., Jaupart C., Gladkov V., Gomez E., El Khrepy S., Al-Arifi N.* Breathing of the Nevado Del Ruiz Volcano Reservoir, Colombia, Inferred from Repeated Seismic Tomography // *Scientific Reports.* 2017. V. 7. P. 46094.
4. *Shapiro N.M., Campillo M.* Emergence of Broadband Rayleigh Waves from Correlations of the Ambient Seismic Noise // *Geophysical Research Letter.* 2004. V. 31. P. 2004GL019491.
5. *Sens-Schönfelder C., Wegler U.* Passive Image Interferometry and Seasonal Variations of Seismic Velocities at Merapi Volcano, Indonesia // *Geophysical Research Letters.* 2006. V. 33. P. 2006GL027797.
6. *Belousov A., Belousova M., Auer A., Walter T.R., Kottenko T.* Mechanism of the Historical and the Ongoing Vulcanian Eruptions of Ebeko Volcano, Northern Kuriles // *Bulletin of Volcanology.* 2021. V. 83. P. 4.
7. *Kottenko T.A., Smirnov S.Z., Timina T.Yu.* The 2022 Activity of Ebeko Volcano: The Mechanism and Ejecta // *Journal of Volcanology and Seismology.* 2023. V. 17. P. 259–277.
8. *Котенко Т.А., Котенко Л.В.* Гидротермальные проявления и тепловой поток вулканов Эбеко и Крашенинникова (о. Парамушир, Курильские о-ва) // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле.* 2006. № 1. Вып. 7. С. 129–137.
9. *Belovezhets N., Berezhev Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abramov S., Smirnov S.Z., Abkadyrov I.* Magma and Hydrothermal Sources below the Northern Part of Paramushir Island (Kuril Arc) Inferred from Ambient Noise Tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2023. V. 443. P. 107931.
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 broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophysical Journal International*. 2007. V. 169. P. 1239–1260.
11. *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. V. 345. P. 80–82.
 12. *Brentan B., Meirelles G., Luvizotto E., Izquierdo J.* Hybrid SOM+k-Means Clustering to Improve Planning, Operation and Management in Water Distribution Systems // *Environmental Modelling & Software*. 2018. V. 106. P. 77–88.
 13. *Li K., Sward K., Deng H., Morrison J., Habre R., Franklin M., Chiang Y.Y., Ambite J.L., Wilson J.P., Eckel S.P.* Using Dynamic Time Warping Self-Organizing Maps to Characterize Diurnal Patterns in Environmental Exposures // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. P. 24052.
 14. *Obermann A., Planès T., Hadziioannou C., Campillo M.* Lapse-Time-Dependent Coda-Wave Depth Sensitivity to Local Velocity Perturbations in 3-D Heterogeneous Elastic Media // *Geophysical Journal International*. 2016. V. 207. P. 59–66.
 15. *Van Dinther C., Margerin L., Campillo M.* Implications of Laterally Varying Scattering Properties for Subsurface Monitoring With Coda Wave Sensitivity Kernels: Application to Volcanic and Fault Zone Setting // *Journal Geophysical Research. Solid Earth*. 2021. V. 126. P. e2021JB022554.
 16. *Gradon C., Brenguier F., Stammeijer J., Mordret A., Hindriks K., Campman X., Lynch R., Boué P., Chmiel M.* Seismic Velocity Response to Atmospheric Pressure Using Time-Lapse Passive Seismic Interferometry // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2021. V. 111. P. 3451–3458.
 17. KBGS. Daily Activity Level Color Codes for Kamchatka Volcanoes (in Russian). Available online: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.
 18. KVERT. Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS. Available online: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>.
 19. *McMillan T.C., Rau G.C., Timms W.A., Andersen M.S.* Utilizing the Impact of Earth and Atmospheric Tides on Ground-water Systems: A Review Reveals the Future Potential // *Reviews of Geophysics*. 2019. P. 57. P. 281–315.
 20. *Berezhnev Y., Belovezhets N., Shapiro N., Koulikov I.* Temporal Changes of Seismic Velocities below Bezymianny Volcano Prior to Its Explosive Eruption on 20.12.2017 // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. V. 433. P. 107735.

SEISMIC VELOCITY CHANGES BENEATH EBOKO VOLCANO (KURIL ISLANDS) BASED ON OBSERVATIONS IN JULY-AUGUST 2021

Ya. M. Berezhnev^{a,b,#}, N. N. Belovezhets^{a,b},

Corresponding Member of the RAS I. Yu. Koulikov^{a,b,c}, A. V. Jakovlev^d, M. S. Alajmi^e,

Academician of the RAS E. I. Gordeev^f

^a*Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russian Federation*

^c*Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^d*Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven, Germany*

^e*KingAbdulaziz City of Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia*

^f*Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

[#]*E-mail: BerezhnevYM@ipgg.sbras.ru*

Here we present seismic velocity changes in the northern part of Paramushir Island, where presently active Ebeko Volcano is located. We use the data of a seismic network that operated in this area in 2021–2022 during a continuous eruption activity of Ebeko. We selected the data from July 1 to August 15, when most stations of the network provided prompt recording of seismic signals. The velocity changes were derived from the ambient noise cross-correlation functions. To identify common features in the obtained velocity variation curves, we have performed the cluster analysis and separated all the curves in two groups having similar shapes within each group, but strongly different between the groups. Velocity changes in Cluster 1 corresponding to the station pairs covering the entire Northern Paramushir have some delayed correlation with the precipitation intensity, implying that these changes might be caused by meteoric fluid migration. In Cluster 2, which is more concentrated in the area of Ebeko Volcano, the velocity changes are apparently connected with both external factors (precipitation and atmospheric pressure) and internal indicators of volcano activity (phreatic explosions, seismicity, thermal anomalies and gas emission).

Keywords: Ebeko volcano, Kuril Islands, ambient noise, seismic velocity variation, clustering