

## ПРИМЕНЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЛУБОКИХ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА (КАМЧАТКА, РОССИЯ)

© 2025 А.А. Шакирова, П.А. Малютин, В.А. Салтыков, А.С. Чемарев

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,  
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: shaki@emsd.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2024; после доработки 29.10.2025; принята в печать 25.12.2025

Ключевской вулкан (Россия, п-ов Камчатка) с 2003 г. практически непрерывно находится в состоянии извержения. Прогнозирование его извержений до сих пор является серьезной научной и технической проблемой. Одним из перспективных направлений при ее решении представляется использование методики оценки состояния сейсмоактивных объектов по уровню сейсмичности СОУС'09. Для выявления прогнозных параметров на основе этой методики необходимо определить наиболее сейсмоактивные объемы среды под вулканом. Ключевской вулкан является одним из самых интенсивных в мире источников вулканических глубоких длиннопериодных землетрясений, которые регистрируются на границе кора–мантия на глубине 20–40 км. Как правило, зона 20–40 км рассматривается как единая структура. В данном исследовании на основе когерентного анализа волновых форм глубоких длиннопериодных землетрясений показано, что механизм их возникновения различен для глубин ~20 км и ~28 км, что позволяет выделить две разных сейсмогенерирующих области, на глубинах 20–25 км и 26–34 км.

*Ключевые слова: Ключевской вулкан, глубокое длиннопериодное землетрясение, когерентность.*

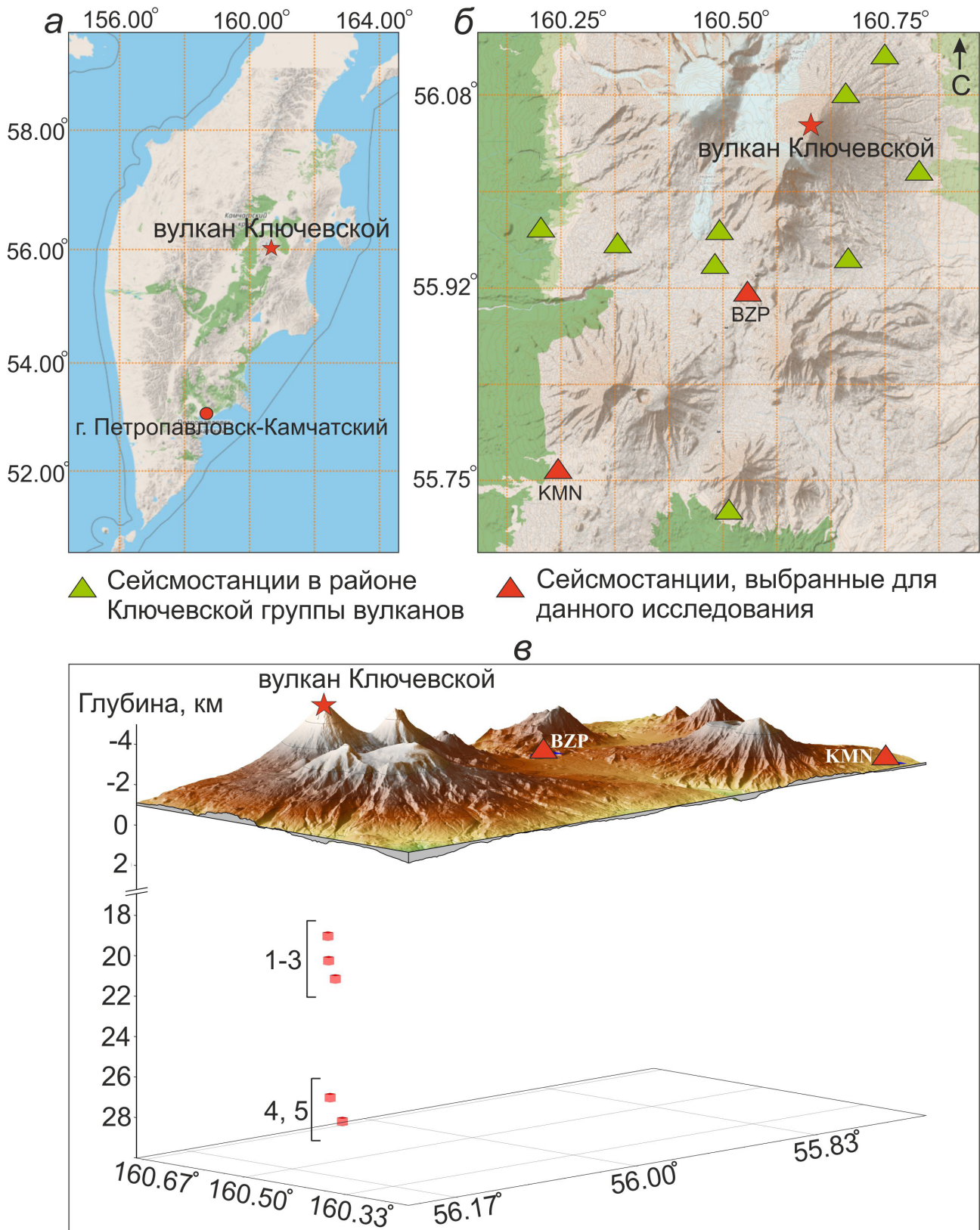
### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические сигналы являются одним из основных источников информации о глубинных вулканических процессах, результаты их анализа очень важны для мониторинга вулканической активности и ее прогноза. Среди различных типов вулканических землетрясений (Токарев, 1966; Zobin, 2017) особый интерес представляют длиннопериодные землетрясения. Их, как правило, связывают с такими процессами, как движение магмы по каналам, дегазация или взаимодействие горячей магмы с гидротермальными флюидами (Chouet, Matoza, 2013). Особый интерес у ученых вызывают глубокие длиннопериодные землетрясения (ГДЗ), так как они отражают состояние глубинных магматических очагов и могут быть предвестниками извержений (Озеров, 2019; Melnik et al., 2020; Sevilla et al., 2020). ГДЗ представляют собой загадочный тип сейсмичности: они происходят как в районе действующих вулканов (Nichols et al., 2011; Okubo, Wolfe, 2008), так и под потухшими вулканами (Wech et al., 2020).

Единственный вулкан на п-ве Камчатка (Россия) в районе которого регистрируются ГДЗ — вулкан Ключевской (рис. 1а) (Горельчик, Сторчеус, 2001; Melnik et al., 2020). Это самый высокий действующий вулкан Евразии, его абсолютная высота над уровнем моря составляет ~4800 м. Возраст Ключевского вулкана ~7000 лет, он находится в начальной стадии своего развития (Федотов и др., 1988). Ключевской вулкан относится к одному из самых интенсивных мировых источников вулканических ГДЗ, которые регистрируются на границе кора–мантия с глубин 20–40 км (рис. 1б) (Горельчик и др., 2004; Горельчик, Сторчеус, 2001; Shapiro et al., 2017). Предположительно, на глубинах ~20–35 км находится система заполненных магмой мелких трещин, являющихся верхней частью диапира, расположенного глубже 35 км в асейсмичной области на границе земной коры и верхней мантии (Горельчик и др., 2001).

С 2003 г. Ключевской вулкан практически непрерывно находится в состоянии извержения.

В целом, прогнозирование вулканических извержений до сих пор остается серьезной



**Рис. 1.** Вулкан Ключевской на п-ове Камчатка (*а*); локальная сейсмическая сеть в окрестности вулкана (*б*); гипоцентры глубоких длиннопериодных землетрясений 2023 г. с  $6.9 \leq K_s \leq 7.5$  (1–5 — порядковый номер землетрясений согласно таблице) в 3D представлении (*в*).

**Fig. 1.** Klyuchevskoy Volcano on the Kamchatka Peninsula (*a*); local seismic network near the volcano (*b*); hypocenters of deep long-period earthquakes of 2023 with  $6.9 \leq K_s \leq 7.5$  (1–5 — serial numbers of earthquakes according to the table) in 3D representation (*v*).

научной и технической проблемой (Sparks, 2003; Tilling, 1989; Tokarev, 1985; Zobin, Jiménez, 2008). В частности, в полной мере это верно и для Ключевского вулкана. Существует несколько методик прогноза его извержений (Иванов, 2011; Сеньюков и др., 2006), основанных на подсчете количества землетрясений и оценке их энергии, усилении фумарольной активности, появлении вулканического дрожания, увеличении частоты парогазовых взрывов в центральном кратере вулкана и т. д. Описанные в цитируемой литературе (Иванов, 2011; Сеньюков и др., 2006) методики прогноза нельзя назвать формализованными, что существенно влияет на возможности их широкого систематизированного использования. Предложенная в работе (Салтыков, 2011) методика оценки состояния сейсмоактивных объектов по уровню сейсмичности СОУС'09, в принципе, применима и для вулканических структур. В частности, для Безымянного вулкана (п-ов Камчатка, Россия) на основе этой методики выделен предвестник извержения и разработана формализованная методика прогноза извержений вулкана (Салтыков, 2016, 2022).

Первые результаты выявления предвестника извержения Ключевского вулкана, основанного на использовании методики СОУС'09, представлены в работе (Шакирова, Салтыков, 2024). Они показали, что извержение Ключевского вулкана предваряется статистически значимым повышением уровня сейсмичности до высокого и экстремально высокого за год и более.

Возможный предвестник извержения оценивается по вариациям уровня сейсмичности в наиболее сейсмоактивных объемах среды под вулканом при сопоставлении с эпизодами зафиксированной вулканической активности. В связи с чем возникает важная задача — корректно выделить упомянутые наиболее сейсмоактивные объемы среды. От выбора этих параметров будут зависеть дальнейшие результаты расчетов уровней сейсмичности и поиска прогностического параметра извержений Ключевского вулкана.

В настоящей работе приводятся результаты изучения сейсмичности сейсмоактивного слоя,

в котором генерируются ГДЗ (слой в диапазоне глубин 20–34 км). По результатам применения когерентного анализа выявлялась идентичность землетрясений с глубин ~20 км и ~28 км (рис. 1а). Результаты расчетов когерентности дадут ответы на вопросы: генерируются ли эти землетрясения одним источником из одной области или вызваны источниками разной природы, и можно ли выделить единую область с общей структурой среды на глубинах 20–34 км под Ключевским вулканом, или это две разных сейсмогенерирующих области с глубинами ~20–25 км и ~26–34 км.

## АНАЛИЗ ДАННЫХ

Существующая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН позволяет проводить детальный сейсмический мониторинг вулканических областей, в том числе Ключевского вулкана (Чебров и др., 2013), локализуя землетрясения в районе вулкана с минимальным энергетическим классом  $K_s = 1.8$  (Чеброва и др., 2020). В районе вулкана функционирует одиннадцать сеймостанций (с/ст) (рис. 1б), для анализа были выбраны с/ст ВЗР («Безымянный-перевал») и КМН («Каменистая») (<https://www.emsd.ru/rtss/stations>).

Нами рассматривались землетрясения, произошедшие в 2023 г., предварявшие и сопровождавшие извержение Ключевского вулкана. Это было одно из его сильнейших извержений с 2004 г. Для анализа были отобраны самые сильные ГДЗ под вулканом, все они произошли 11 ноября 2023 г. (таблица, рис. 1а). То, что землетрясения произошли в течение одного дня, должно, по нашему мнению, минимизировать вероятность изменений свойств среды как на трассах прохождения сейсмических волн, так и в очаге землетрясений.

Все данные о землетрясениях в районе Ключевского вулкана взяты из Единой информационной системы сейсмологических данных (ЕИССД) КФ ФИЦ ЕГС РАН (Чеброва и др., 2020). Для локализации очагов землетрясений применяется уточненный годограф для Северной группы вулканов, позволяющий получать

Сильнейшие глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом в 2023 г.

The strongest deep long-period earthquakes under Klyuchevskoy Volcano in 2023.

№ землетрясения	Дата и время землетрясения (UTC)	Широта $\varphi$ , ° с.ш.	Долгота $\lambda$ , ° в.д.	Глубина $H$ , км	Ошибка по глубине $\sigma_H$ , км	Энергетический класс $K_s$
1	2023-11-01 01:24	56.073	160.597	22	1.3	7.0
2	2023-11-01 04:14	56.070	160.615	20	1.4	7.3
3	2023-11-01 06:17	56.075	160.604	21	1.0	6.9
4	2023-11-01 04:52	56.078	160.576	29	0.9	7.4
5	2023-11-01 06:15	56.062	160.624	28	1.0	7.5

корректные данные (Сенюков, 2004). Средняя ошибка в определении глубины очагов ГДЗ составила  $\sigma H = 1.1$  км (таблица).

Для дальнейшего спектрального анализа были выбраны волновые формы землетрясений на с/ст ВЗР и КМН с вертикальной компоненты Z канала SH (рис. 2), так как на этой компоненте наиболее отчетливо проявляются сигналы ГДЗ. Частота дискретизации 200 Гц. Времена вступлений продольных P- и поперечных S-волн на с/ст ВЗР и КМН взяты из ЕИССД.

Были выбраны следующие длины сейсмических записей землетрясений (рис. 2): на с/ст ВЗР для  $H = 20\text{--}22$  км P-интервал длительностью 4 с, S-интервал — 4 с; для  $H = 28$  км P-интервал — 5 с, S-интервал — 13 с. На с/ст КМН для  $H = 20\text{--}22$  км P-интервал — 7 с, S-интервал — 16 с; для  $H = 28$  км P-интервал — 6 с, S-интервал — 18 с. При расчете когерентности сигналов с разных глубин использовались наименьшие длины сейсмических записей фаз P- и S-волн (рис. 2).

Волновые формы ГДЗ с  $H \sim 20$  км характеризуются более четкими вступлениями P- и S-волн (рис. 2, землетрясения № 1–3), чем

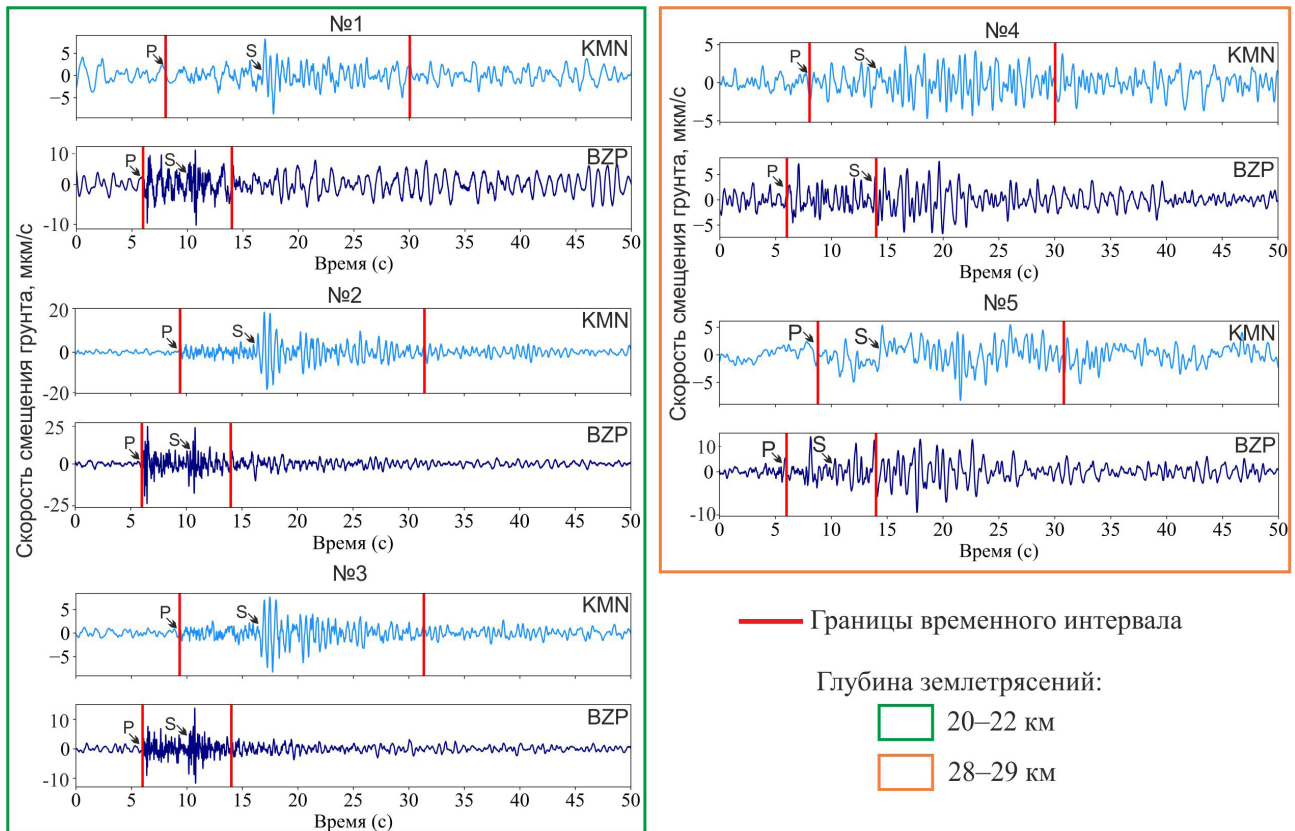
землетрясений с  $H \sim 29$  км (рис. 2, землетрясения № 4 и 5). Частоты сейсмических волн заключены в пределах  $f = 0.5\text{--}10$  Гц (рис. 3). Землетрясения на глубине  $H = 20\text{--}22$  км — более высокочастотные по сравнению с землетрясениями с  $H = 28\text{--}29$  км. Так как частотный диапазон сейсмических волн заключен в пределах  $f = 0.5\text{--}10$  Гц (рис. 3), обсуждается когерентность в этом частотном диапазоне.

Далее оценивалась взаимосвязь сигналов друг с другом в определенном частотном диапазоне. Под когерентностью двух волновых процессов понимается их согласованное протекание, степень синхронизации их частотных составляющих, что указывает на общие источники или механизмы, генерирующие эти сигналы.

Когерентность двух сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$  представляет собой действительную функцию (Bendat, Piersol, 2011), которая определяется как:

$$C_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)},$$

где  $G_{xy}(f)$  — кросс-спектральная плотность мощности между  $x$  и  $y$ ,  $G_{xx}(f)$ ,  $G_{yy}(f)$  — авто-спектральная плотность мощности  $x$  и  $y$ .



**Рис. 2.** Волновые формы глубоких длиннопериодных землетрясений с с/ст КМН (Z) и ВЗР (Z) с  $6.9 \leq K_s \leq 7.5$  с указанием выбранного временного интервала для спектрального анализа. Сейсмограммы отфильтрованы широкополосным фильтром в полосе частот 0.5–25 Гц для удаления вклада океанических микросейсм.

**Fig. 2.** Waveforms of deep long-period earthquakes recorded by KMN (Z) and BZP (Z) stations with  $6.9 \leq K_s \leq 7.5$  with the selected time interval for spectral analysis. Seismograms are filtered with a broadband filter in the frequency band 0.5–25 Hz to remove the contribution of oceanic microseisms.

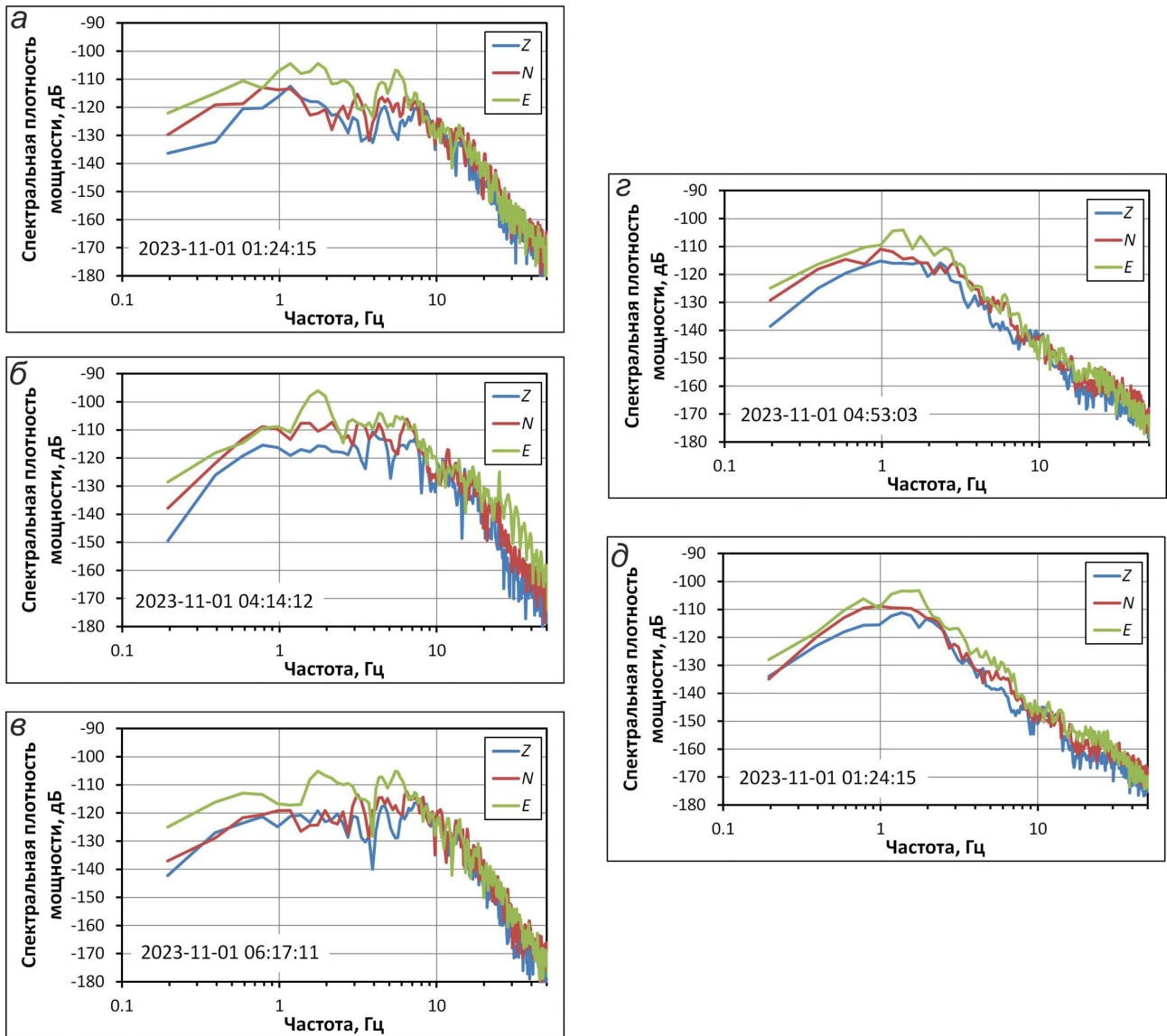


Рис. 3. Спектральная плотность мощности глубоких длиннопериодных землетрясений, зарегистрированных с/ст ВЗР 1 ноября 2023 г., с  $H = 20\text{--}21$  км (а–в), с  $H = 28$  км (г, д). Здесь 0 дБ соответствует  $1 \text{ м}^2/\text{с}^2/\text{Гц}$ .

Fig. 3. Spectral power density of deep long-period earthquakes recorded by BZP station on November 1, 2023, with  $H = 20\text{--}21$  km (a–в), with  $H = 28$  km (г, д). Here 0 dB corresponds to  $1 \text{ м}^2/\text{с}^2/\text{Hz}$ .

Функция когерентности вычисляется для каждой частоты и оценивает степень, в которой  $y(t)$  может быть предсказана из  $x(t)$  с помощью оптимальной линейной функции наименьших квадратов. Данные показатели согласованности всегда будут находиться в пределах от 0 до 1 (Горшенков, Кликушин, 2011). Значение 0 указывает на отсутствие связи между сигналами, тогда как значение 1 говорит о полной предсказуемости одного сигнала на основе другого (функциональная связь).

В результате применения когерентного анализа ожидается, что сейсмические сигналы, имеющие близкое местоположение и одинаковую природу происхождения, покажут схожую картину волновых форм на наблюдательных стан-

циях, подтвержденную высокими значениями спектра когерентности, близкими к 1.

Обработка сейсмических записей производилась с использованием библиотеки ObsPy (Krischer et al., 2015) и SciPy (Virtanen et al., 2021), которые предназначены для обработки данных и метаданных сейсмических сигналов на основе языка программирования Python. Для записей каждого землетрясения на станциях ВЗР и КМН когерентность вычислялась по следующей схеме: сначала производился расчет когерентности сигнала во временных окнах без перекрытия размером 256 точек (2.56 с) с последующим осреднением по времени полученных спектров когерентности, затем выполнялось сглаживание спектра по частоте окном шириной 5 точек (соот-

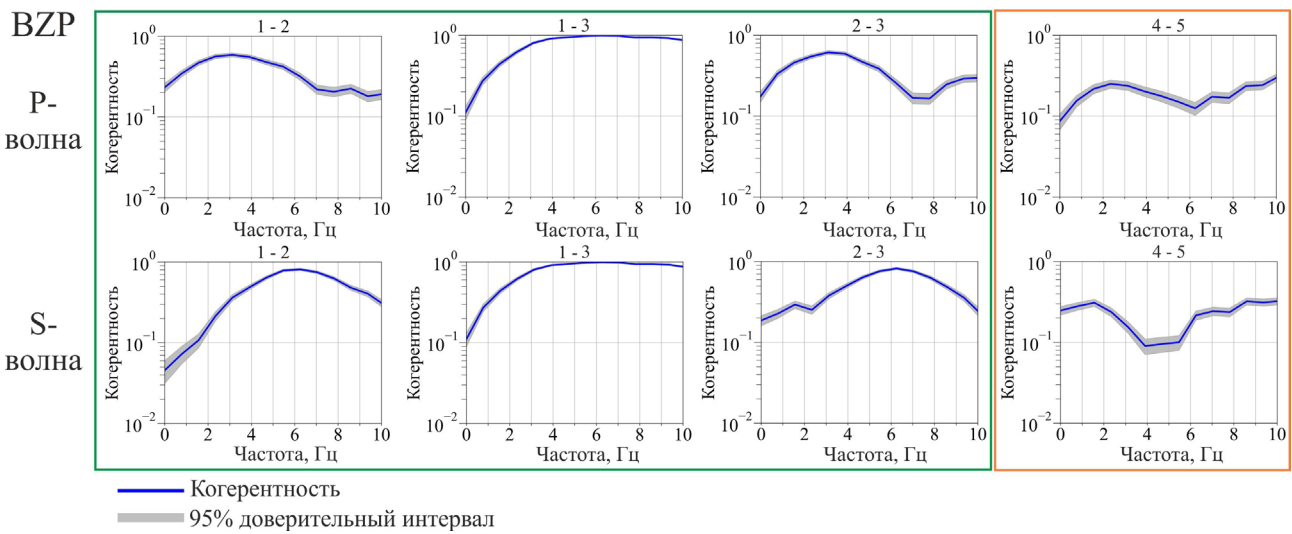
ветствует 1.6 Гц от центральной точки в каждую сторону по частоте). Также вычислялись стандартная ошибка и верхний и нижний пределы 95 % доверительного интервала сглаженной когерентности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного анализа установлено, что у ГДЗ со схожей глубиной и близким энергетическим классом наблюдается высокая когерентность в рассмотренном диапазоне частот при относительно «узком» доверительном интервале, что указывает на единый механизм их возникновения (рис. 4). Лучшая когерентность

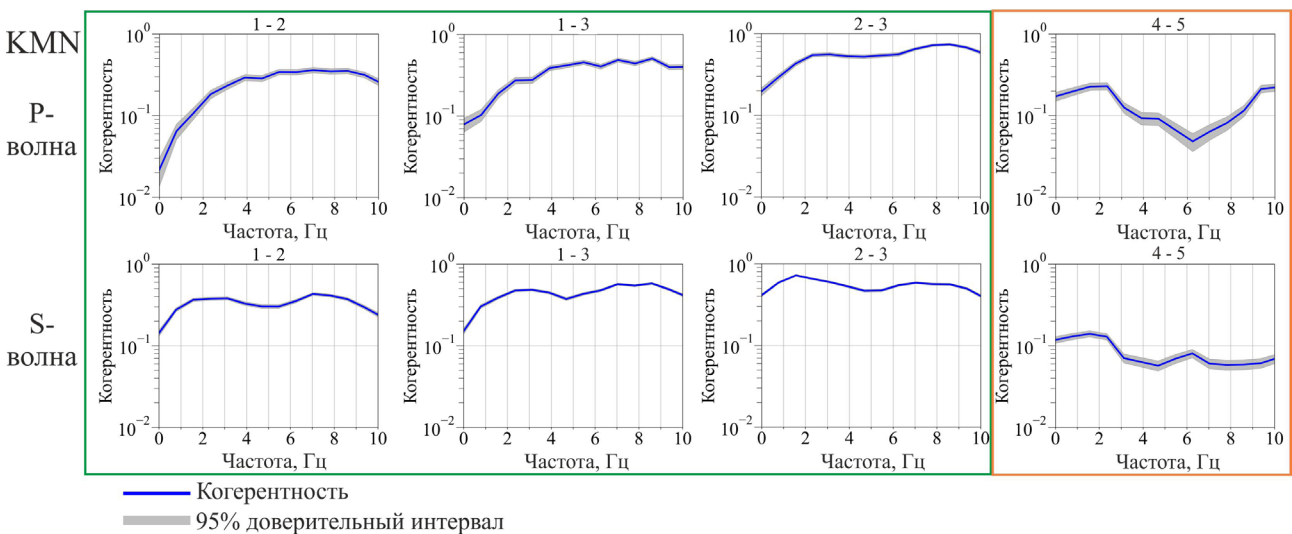
~0.9–1 по записям с с/ст BZP оказалась для пары землетрясений №№1, 3 с глубиной  $H = 21–22$  км, как для Р-волн, так и для S-волн, в частотном диапазоне  $f \sim 4–9$  Гц (рис. 4). Для землетрясений №№1, 2 и №№2, 3 когерентность ~0.6 наблюдается для Р-волн в диапазоне  $f = 2–4$  Гц, для S-волн ~0.8 в диапазоне  $f = 5–7$  Гц. Для пары землетрясений с  $H = 28–29$  км (№№4, 5) когерентность их сейсмических записей на с/ст BZP (рис. 4) хуже, чем землетрясений с  $H = 20–22$  км, и составляет =0.3 для Р-волны на частоте  $f = 2.5$  Гц при средней =0.21 для всего частотного диапазона и =0.3 для S-волны на частоте  $f = 1.5$  Гц, =0.11.

По записям с с/ст KMN (рис. 5) лучшая когерентность наблюдается также для пар



**Рис. 4.** Когерентность Р- и S-волн глубоких длиннопериодных землетрясений с глубиной  $H = 20–22$  км (№№1, 3) и  $H = 28–29$  км (№№4, 5), зарегистрированных с/ст BZP.

**Fig. 4.** Coherence of P- and S-waves of deep long-period earthquakes with depths  $H = 20–22$  km (№№1, 3) and  $H = 28–29$  km (№№4, 5), recorded by the BZP station.



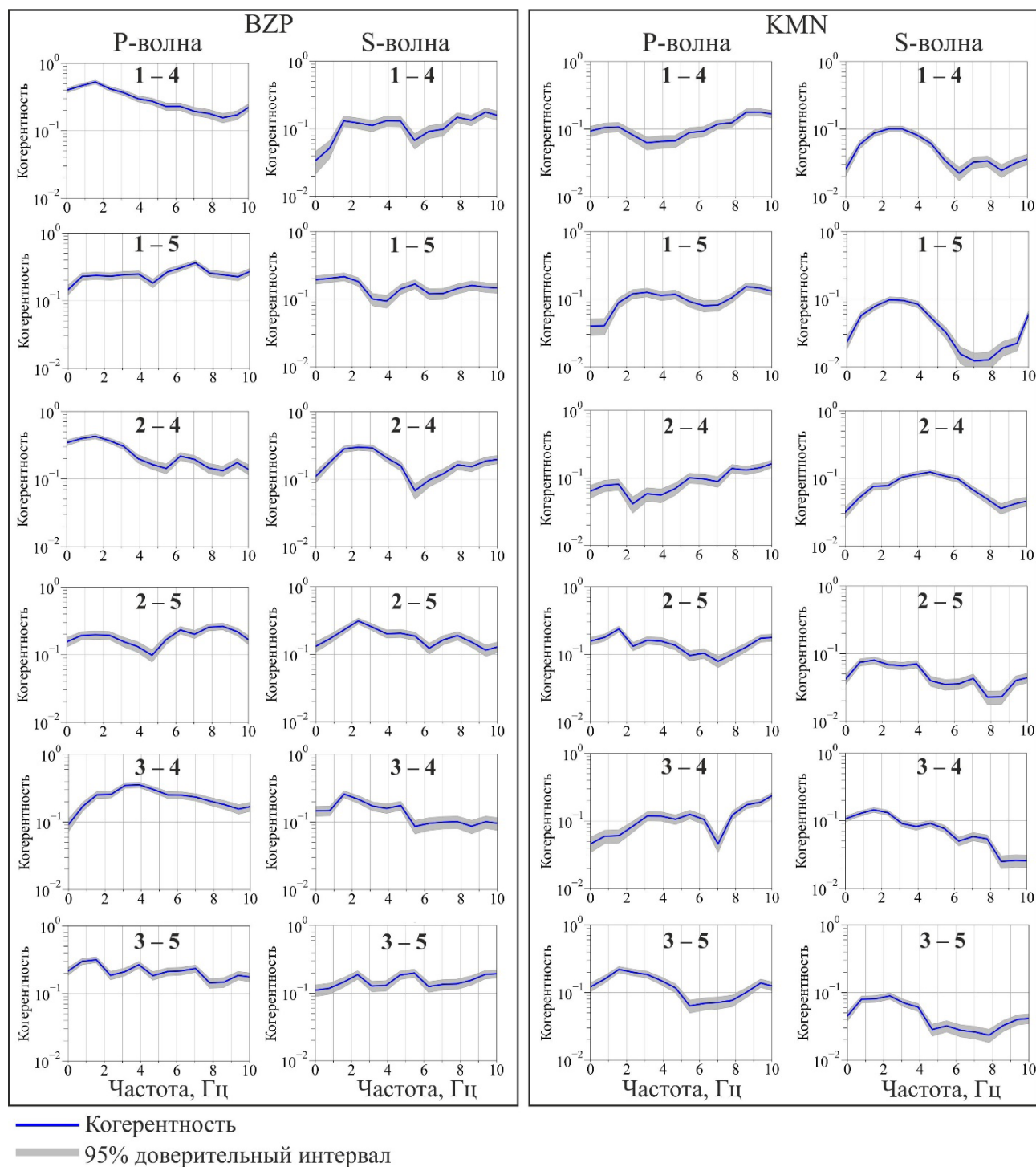
**Рис. 5.** Когерентность Р- и S-волн глубоких длиннопериодных землетрясений с глубиной  $H = 20–22$  км (№№1, 3) и  $H = 28–29$  км (№№4, 5), зарегистрированных с/ст KMN.

**Fig. 5.** Coherence of P- and S-waves of deep long-period earthquakes with depths  $H = 20–22$  km (№№1, 3) and  $H = 28–29$  km (№№4, 5), recorded by the KMN station.

землетрясений с  $H=20-22$  км — №№ 2, 3:  $\sim 0.6-0.8$  на частоте  $f = 6-10$  Гц для Р-волны и  $\sim 0.7$  на  $f = 1.5$  Гц для S-волны. Когерентность для пар землетрясений №№ 1, 2 и №№ 1, 3 по записям с/ст KMN лучшая в полосе частот  $f=5-9$  Гц, для Р-волны и на частотах  $f \sim 2-3$  и 7 Гц для S-волны. Когерентность пар землетрясений с большей

глубины хуже, и составляет для Р-волны  $=0.25$  на частоте  $f = 2.3$  Гц при средней  $=0.19$ , для S-волны  $=0.12$  на  $f = 1.5$  Гц,  $=0.18$ .

При сравнении пар землетрясений с разных глубин когерентность Р- и S-волн на обеих с/ст показала худший результат (рис. 6) по сравнению с когерентностью Р- и S-волн пар землетрясений



**Рис. 6.** Когерентность Р- и S-волн по записям с/ст BZP и KMN для пар глубоких длиннопериодных землетрясений с разных глубин ( $H = 20-22$  км (№№ 1, 3) и  $H = 28-29$  км (№№ 4, 5)).

**Fig. 6.** Coherence of P- and S-waves from BZP and KMN seismic records for pairs of deep long-period earthquakes from different depths ( $H = 20-22$  km (№№ 1, 3) and  $H = 28-29$  km (№№ 4, 5)).

с глубины  $H = 20\text{--}22$  км. В большинстве случаев можно говорить об отсутствии когерентности. Для пар землетрясений с разных глубин средняя когерентность равна  $=0.23$  для Р-волн и  $=0.13$  для S-волн на с/ст ВЗР; на с/ст КМН  $=0.14$  для Р-волн и  $=0.1$  для S-волн.

Идея использования когерентности волн заключается в том, что, если волны излучаются одним источником, будет наблюдаться согласованность двух волн в точке наблюдения, что мы и видим для сейсмических волн от землетрясений с  $H = 20\text{--}22$  км (рис. 4). Самая лучшая когерентность у ГДЗ №№ 1, 3 на с/ст ВЗР ( $=0.47$  для Р-волн и  $=0.74$  для S-волн) и №№ 2, 3 на с/ст КМН ( $=0.35$  для Р-волн и  $=0.48$  для S-волн). Исходя из представлений о спектрах когерентности двух сигналов высокая степень когерентности подтверждает общий механизм их возникновения.

Волновые формы двух землетрясений с  $H = 28\text{--}29$  км имеют меньшие значения когерентности, несмотря на то, что они произошли на одной глубине, что позволяет предположить, что генерация этих землетрясений обусловлена большим числом факторов, определяющих природу их возникновения.

Также высокие значения когерентности не наблюдаются при сравнении землетрясений с разных глубин ( $H = 20\text{--}22$  км и  $H = 28\text{--}29$  км).

Отметим визуальные различия записей землетрясений с с/ст ВЗР и КМН с разных глубин. Для землетрясений № 1–3 ( $H = 20\text{--}22$  км) в отличие от землетрясений с  $H = 28\text{--}29$  км характерны более четкие вступления Р-волн (рис. 2), что говорит о накоплении напряжений на этих глубинах согласно (Roman, Cashman, 2006), а также о вероятном добавлении хрупкого разрушения в момент возникновения землетрясения (Tuffen et al., 2008). Более глубокие землетрясения, отобранные для анализа, наиболее сильные (их  $K_s$  максимален для всей выборки), и, скорее всего, отличие их волновых форм от волновых форм землетрясений с  $H = 20\text{--}22$  км связано не с затуханием волн, а с разной структурой среды, в которой генерируются эти землетрясения. Структура среды зависит от множества параметров: температуры, трещиноватости, наличия расплавленных магматических образований, регионального поля тектонических напряжений и пр.

Предполагается (Горельчик, Сторчеус, 2001), что на  $H = 20\text{--}40$  км располагается не сплошная магматическая колонна, а среда с системой трещин, в которой могут образовываться и через которую могут проходить поперечные сейсмические волны, так как на записях ГДЗ они четко прослеживаются.

Физический механизм возникновения ГДЗ до конца не установлен. Существует несколько

гипотез об их возникновении (Горельчик и др., 2001; Aso, Tsai, 2014; Shapiro et al., 2018). ГДЗ могут быть вызваны быстрыми изменениями давления в магматических системах (Shapiro et al., 2018), быстропротекающими фазовыми переходами в ограниченных объемах метастабильной магмы (Горельчик и др., 2001), либо термическими напряжениями в остывающих магматических телах (Aso, Tsai, 2014). Так, гипоцентры ГДЗ в районе вулканов штатов Вашингтон и Орегон (США) совпадают с крупными структурными разломами на больших глубинах, возникновение ГДЗ в этих областях связывается с переносом жидкости и/или магмы вдоль ранее существовавших тектонических структур в средней и нижней части земной коры на  $H = 10\text{--}50$  км (Nichols et al., 2011). Такие глубины обычно считаются лежащими ниже хрупко-пластичного перехода (ХПП). Ниже ХПП хрупкие породы становятся пластичными и способны деформироваться без разрывов сплошности среды. В простой реологической модели принято, что верхняя хрупкая зона отделена от нижнего пластического слоя резким ХПП, который, как предполагается, индексируется нижним пределом сейсмичности (Scholz, 1988). В реальности между этими зонами лежит широкое переходное поле полухрупкого поведения.

Можно предположить, что под Ключевским вулканом на  $H = 20\text{--}25$  км находится поле с неким полухрупким поведением, а  $H \sim 25\text{--}28$  км ограничивают верхнюю часть мантийного магматического канала, питающего Ключевской вулкан. Подтверждением тому служит аномалия с чрезвычайно высоким отношением  $V_p/V_s$ , отмеченная ниже 25 км, которая может маркировать верхнюю часть канала (Добрецов и др., 2012).

По изучению мантийных характеристик Камчатского региона (Колосков и др., 2014) астеносферный диапир проникает в низы литосферной мантии до глубин порядка 40 км, а верхней частью диапира может являться система заполненных магмой мелких трещин (Горельчик, Сторчеус, 2001). Дополнительным аргументом в пользу этого является отсутствие землетрясений большей энергии (наблюдаемые энергетические классы ГДЗ не превышают  $K_s = 7.6$ ), что свидетельствует о том, что под Ключевским вулканом в нижних слоях земной коры за счет свойств среды не происходит интенсивного накопления напряжений. Следовательно, эта среда более пластична, по-видимому, за счет теплового потока от магматического очага (Горельчик, Сторчеус, 2001).

Исходя из полученных результатов нельзя говорить о единой структуре среды на глубине 20–40 км в районе Ключевского вулкана, хотя именно в этом диапазоне глубин происходят ГДЗ, что предполагает близкий, в целом, механизм их

генерации. Однако, только в верхней части этого диапазона — 20–22 км, наблюдается единый механизм согласно высокой степени когерентности волновых форм землетрясений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К глубоким длиннопериодным землетрясениям Ключевского вулкана применен когерентный анализ с целью установления связи между землетрясениями с глубин ~20 км и ~28 км. В результате анализа установлено, что высокая когерентность в определенном диапазоне частот наблюдается только для пар ГДЗ с глубины ~20 км, что указывает на общую природу их возникновения. Для пары ГДЗ с глубин ~28 км и с различных глубинных интервалов наблюдается низкая когерентность, что говорит о различных механизмах возникновения таких землетрясений. Низкая когерентность волновых форм землетрясений с  $H = 28\text{--}29$  км указывает на то, что генерация землетрясений на таких глубинах обусловлена большим числом факторов, определяющих природу их возникновения, нежели на  $H \sim 20$  км.

Исходя из полученных результатов сделан вывод, что землетрясения в районе Ключевского вулкана с глубин ~20 км и ~28 км относятся к различным сейсмогенерирующим областям и при построении методик мониторинга состояния вулкана Ключевской, включая прогноз его извержений, в частности, на основе «Статистической оценки уровня сейсмичности» (СОУС'09), следует рассматривать каждую область в отдельности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20019, <https://rscf.ru/project/24-17-20019/> и при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) с использованием данных с УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

## Список литературы [References]

Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Сторчеус А.В. Глубинные вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21–34 [Gorel'chik V.I., Garbuzova V.T., Storcheus A.V. Deep volcanic processes under Klyuchevsky volcano on seismological data // Vulkanologiya i seismologiya. 2004. № 6. P. 21–34].

Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. 2001 г. С. 373–389 [Gorel'chik V.I., Storcheus A.V. Glubokie dlinnoperiodnye zemletryaseniya pod Klyuchevskim vulkanom, Kamchatka // Geodinamika i vulkanizm

Kurilo-Kamchatskoj ostrovoduzhnoj sistemy. 2001. P. 373–389 (in Russian)].

Горшенков А.А., Кликушин Ю.Н. Некоторые закономерности идентификационных измерений спектров сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 2. С. 1–16 [Gorshenkov A.A., Klykushin Yu.N. Nekotorye zakonomernosti identifikacionnykh izmerenij spektrov signalov // Zhurnal radioelektroniki. 2011. № 2. P. 1–16 (in Russian)].

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика, 2012. Т. 53. № 12. С. 1633–1661 [Dobretsov N.L., Kulakov I.Yu., Litasov Yu.D. Puti migracii magm i flyuidov i sostavy vulkanicheskikh porod Kamchatki // Geologiya i geofizika, 2012. V. 53. № 12. P. 1633–1661 (in Russian)].

Иванов В.В. Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания): Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с. [Ivanov V.V. Sejsmologicheskie predvestniki verшинnykh izverzenij Klyuchevskogo vulkana na Kamchatke (na primere vulkanicheskogo drozhanija): Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Irkutsk, 2011. 13 p. (in Russian)].

Колосков А.В., Гонтовая Л.И., Попруженко С.В. Верхняя мантия Камчатки в изотопно-геохимических и геофизических аномалиях. Роль астеносферного диапиризма // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 3. С. 3–13 [Koloskov A.V., Gontovaya L.I., Popruzenko S.V. The upper mantle of Kamchatka in isotopic-geochemical and geophysical anomalies: The role of asthenospheric diapirism // Tihookeanskaya geologiya. 2014. V. 8. № 3. P. 151–162].

Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель // М.: ГЕОС, 2019. 306 с. [Ozerov A.Yu. Klyuchevskoy volcano: rocks, dynamics, model // Moskau: GEOS, 2019. 306 p. (in Russian)].

Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59. <https://doi.org/10.31857/S0203030622060074> [Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2011. V. 5. № 2. P. 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>].

Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 3. С. 45–59. <https://doi.org/10.21455/gr2016.3-4> [Saltykov V.A. Formalizovannaya metodika prognoza izverzenij vulkana Bezymannyj (Kamchatka) na osnove statisticheskoy ocenki urovnya sejsmichnosti // Geofizicheskie issledovaniya. 2016. V. 17. № 3. P. 45–59 (in Russian)].

Салтыков В.А. Прогнозирование извержений вулкана Безымянный (Камчатка) 2015–2020 гг.: результаты использования методики на основе СОУС'09, верификация параметров // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 76–86 <https://doi.org/10.31857/S0203030622060074>

- [*Saltykov V.A.* Predicting the 2015–2020 Eruptions of Bezymianni Volcano, Kamchatka: The Results of a Procedure Based on the SESL'09, Verification of the Parameters // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. V. 16 № 6. P. 462–471. <https://doi.org/10.1134/S0742046322060069>].
- Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными методами // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. 2004. С. 279–291 [*Senyukov S.L.* Monitoring aktivnosti vulkanov Kamchatki distancionnymi metodami // *Kompleksnyye sejsmologicheskie i geofizicheskie issledovaniya Kamchatki*. 2004. P. 279–291 (in Russian)].
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами в 2001–2005 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции, 17–18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова. Петропавловск-Камчатский: «Геофизическая служба РАН», 2006. С. 94–100 [*Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Nuzhdina I.N. et al.* Issledovaniya aktivnosti vulkana Klyuchevskoy distancionnymi metodami v 2001–2005 gg. // *Geofizicheskij monitoring Kamchatki. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii, 17–18 yanvarya 2006 g., Petropavlovsk-Kamchatskij* / Отв. ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова. Петропавловск-Камчатский: «Геофизическая служба РАН», 2006. P. 94–100 (in Russian)].
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М: Наука, 1966. 104 с. [*Tokarev P.I.* Izverzheniya i sejsmicheskij rezhim vulkanov Klyuchevskoy gruppy (1949–1963 gg.). Moscow: Nauka, 1966. 104 p. (in Russian)].
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // *Вулканология и сейсмология*. 1988. № 2. С. 4–42 [*Fedotov S.A., Zharinov N.A., Gorel'chik V.I.* Deformacii i zemletryaseniya Klyuchevskogo vulkana, model' ego deyatel'nosti // *Vulkanologiya i sejsmologiya*. 1988. № 2. P. 4–42 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 1. С. 18–40. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021> [*Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Y.A. et al.* The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. № 7. P. 16–36. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>].
- Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А. и др.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // *Геофизические исследования*. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5> [*Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A. et al.* Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions // *Geophysical Research*. 2020. V. 21. № 3. P. 66–91 (in Russian)].
- Шакирова А.А., Салтыков В.А.* Анализ активности Ключевского вулкана в 2023 году на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 // *Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога 27–29 марта 2024 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН*, 2024. С. 144–147 [*Shakirova A.A., Saltykov V.A.* Analiz aktivnosti Klyuchevskogo vulkana v 2023 godu na osnove statisticheskoy ocenki urovnya sejsmichnosti SOUS'09 // *Materialy XXVII ezhegodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj Dnyu vulkanologa 27–29 marta 2024 g. Petropavlovsk-Kamchatskij: IViS DVO RAN*, 2024. P. 144–147 (in Russian)].
- Aso N., Tsai V.C.* Cooling magma model for deep volcanic long-period earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. V. 119. № 11. P. 8442–8456. <https://doi.org/10.1002/2014JB011180>
- Bendat J.S., Allan G.P.* Random data: analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, 2011. 640 p.
- Chouet B.A., Matoza R.S.* A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 252. P. 108–175. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013>
- Krischer L., Megies T., Barsch R. et al.* ObsPy: A bridge for seismology into the scientific Python ecosystem // *Computational Science & Discovery*. 2015. V. 8. № 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003v>
- Melnik O., Lyakhovskiy V., Shapiro N.M. et al.* Deep long period volcanic earthquakes generated by degassing of volatile-rich basaltic magmas // *Nature communications*. 2020. V. 11. № 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17759-4>
- Nichols M.L., Malone S.D., Moran S.C. et al.* Deep long-period earthquakes beneath Washington and Oregon volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2011. V. 200. № (3–4). P. 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.12.005>
- Okubo P.G., Wolfe C.J.* Swarms of similar long-period earthquakes in the mantle beneath Mauna Loa Volcano // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2008. V. 178. № 4. P. 787–794. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.09.007>
- Roman D.C., Cashman K.V.* The origin of volcano-tectonic earthquake swarms // *Geology*. 2006. V. 34. № 6. P. 457–460. <https://doi.org/10.1130/G22269.1>
- Sevilla W.I., Jumawan L.A., Clarito C.J. et al.* Improved 1D velocity model and deep long-period earthquakes in Kanlaon Volcano, Philippines: Implications for its magmatic system // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. V. 393. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106793>
- Shapiro N.M., Droznin D.V., Droznina S.Y. et al.* Deep and shallow long-period volcanic seismicity linked by fluid-pressure transfer // *Nature Geoscience*. 2017. V. 10. № 6. P. 442–445. <https://doi.org/10.1038/NGEO2952>
- Shapiro N., Campillo M., Kaminski E. et al.* Low-Frequency Earthquakes and Pore Pressure Transients in Subduction Zones // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. № 20. P. 11–083. <https://doi.org/10.1029/2018GL079893>

- Scholz C.H.* The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting // *Geologische Rundschau*. 1988. V. 7. P. 319–328.
- Sparks R.S.J.* Forecasting volcanic eruptions // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 210. № 1–2. P. 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00124-9)
- Tilling R.I.* Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems // *Reviews of Geophysics*. 1989. V. 27. № 2. P. 237–269.
- Tokarev P.I.* The prediction of large explosions of andesitic volcanoes // *Journal of geodynamics*. 1985. V. 3. № 3–4. P. 219–244.
- Tuffen H., Smith R., Sammonds P.R.* Evidence for seismogenic fracture of silicic magma // *Nature*. 2008. V. 453. № 7194. P. 511–514. <https://doi.org/10.1038/nature06989>
- Virtanen P., Gommers R., Burovski E. et al.* Scipy/scipy: SciPy 1.6.0. Zenodo, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4406806>
- Wech A.G., Thelen W.A., Thomas A.M.* Deep long-period earthquakes generated by second boiling beneath Mauna Kea volcano // *Science*. 2020. V. 368. № 6492. P. 775–779. <https://doi.org/10.1126/science.aba4798>
- Zobin V.M., Jiménez Z.* Some regularity in the process of re-awakening of andesite and dacite volcanoes: specific features of the 1982 El Chichón volcano, México reactivation // *Journal of volcanology and geothermal research*. 2008. V. 175. № 4. P. 482–487. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.022>
- Zobin V.M.* Introduction to volcanic seismology. Elsevier: Amsterdam, 2017. Third edition. 559 p.

## APPLICATION OF COHERENT ANALYSIS IN STUDYING DEEP LONG-PERIOD EARTHQUAKES OF KLYUCHEVSKOY VOLCANO (KAMCHATKA, RUSSIA)

**A.A. Shakirova, P.A. Malyutin, V.A. Saltykov, A.S. Chemarev**

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

Received October 14, 2024; revised October 29, 2025; accepted December 25, 2025

Klyuchevskoy Volcano (Russia, Kamchatka Peninsula) has been in a state of almost continuous eruption since 2003. Forecasting its eruptions is still a serious scientific and technical problem. One of the promising approaches for solving it is the use of the SESL'09 seismicity assessment method. To identify predictive parameters based on this method, it is necessary to determine the most seismically active volumes of the environment beneath the volcano. Klyuchevskoy Volcano is one of the sources of most intense sources of volcanic deep long-period earthquakes in the world, which are recorded at the crust-mantle boundary in a depth of 20–40 km. As a rule, this zone is considered as a single structure. In this study, based on the coherence analysis of waveforms of deep long-period earthquakes, it is shown that the mechanism of their occurrence is different for depths of ~20 km and ~28 km, which allows us to identify two different seismogenerating volumes at depths of 20–25 km and 26–34 km.

*Keywords: Volcano Klyuchevskoy, deep long-period earthquake, coherence.*