

УДК 550.344.64

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА ЗЕМЛИ ПО КОДЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В МЬЯНМЕ 28 МАРТА 2025 г.

© 2025 г. О. А. Усольцева*, В. М. Овчинников

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: kriukova@idg.ras.ru*

В работе представлены результаты экспресс-анализа поздней коды землетрясения в Мьянме методом сейсмической интерферометрии. В рассчитанных коррелограммах по данным 880 станций, расположенных по всему миру, наблюдаются аномалии, соответствующие волнам $I1^*$, $I2^*$, c^* , ScS^* . Показано, что особенности времени пробега волны $I2^*$ соответствуют анизотропии с быстрой осью в направлении оси вращения Земли. На коррелограммах станций для района Аляски волна $I2^*$ слабо выражена, что возможно связано с затуханием во внутреннем ядре.

Ключевые слова: сейсмическая интерферометрия, поздняя кода, $PKIKP$, $PKIKPPKIKP$, анизотропия внутреннего ядра.

Для цитирования: Усольцева О.А., Овчинников В.М. Структурные особенности внутреннего ядра Земли по коде землетрясения в Мьянме 28 марта 2025 г. // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 3. С. 69–77. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_3_69

Введение

Исследование внутреннего ядра Земли (IC) – одно из фундаментальных геофизических направлений, важность которого неоспорима из-за тесной связи с эволюцией и поддержанием за счет динамических процессов во внешнем ядре магнитного поля, формирующего магнитосферу планеты, защищающую нас от космического излучения.

Основные проблемы изучения свойств IC, в особенности его центральной части, с помощью сейсмических волн $PKIKP$ связаны с пространственным расположением очагов землетрясений и сейсмических станций, позволяющим зондировать только отдельные области IC. Кроме того, трудно отделить в наблюдаемых особенностях волн $PKIKP$ влияние верхних оболочек – земной коры и мантии.

Сейсмическая интерферометрия (СИ) – новейшая стратегия, предложенная в [Wang et al., 2015; Tkalčić et al., 2020] для исследования центральной части IC и опирающаяся на кросс-корреляционный анализ поздней многочасовой коды сильных землетрясений. Суть метода заключается в интерпретации колебания, зафиксированного одним из приемников, как если бы источник располагался в месте расположения другого приемника, и при этом географическая привязка самого землетрясения не важна. На сегодняшний день с использованием метода СИ получены количественные характеристики анизотропии центральной части внутреннего ядра [Wang et al., 2015; Lima et al., 2022], выдвинута гипотеза о существовании низкоскоростной тороидальной структуры во внешнем ядре [Ma, Tkalčić, 2024].

Согласно [Tkalčić, Pham, 2020] четкость кросс-корреляционной картины, полученной в результате использования метода СИ для отдельного события, зависит от его магнитуды, длительности подвижки в очаговой зоне и механизма очага. Наилучшим образом подходят для обработки землетрясения с магнитудой более 7, длительностью подвижки менее 20 с и фокальными механизмами типа надвига или взброса, то есть угол подвижки $Rake$ близок к вертикальному (90° или 270°). Землетрясение в Мьянме 28.03.2025 с магнитудой 7.7 удовлетворяет основному из требований, предъявляемых методом СИ, к магнитудам анализируемых землетрясений, но не соответствует предпочтительным рекомендациям по длительности временной функции источника (STF) и углу подвижки по разлому ($Rake$).

В настоящей работе представлены результаты использования метода сейсмической интерферометрии для землетрясения в Мьянме, произошедшего на малой глубине с необычно длинной STF, и афтершоковой активностью, которая влияет на сейсмические колебания во временном диапазоне поздней коды основного события.

Терминология

Коррелограмма или кросс-корреляционное волновое поле – функция от расстояния между станциями и временем, полученная в результате кросс-корреляционной обработки коды после сильного землетрясения длительностью 7 часов с началом через 3 часа после землетрясения для пары сейсмических станций.

$I1$ (аналог $PKIKP$) – продольная рефрагированная волна, прошедшая через внутреннее ядро и регистрируемая на расстояниях от 110° .

$I2$ (аналог $PKIKPPKIKP$) – продольная волна, которая проходит через всю Землю насквозь, отражается от свободной поверхности вблизи антипода и возвращается обратно. Наблюдается на расстояниях 0° – 70° .

$I1^*$, $I2^*$ – возмущения, наблюдаемые на коррелограмме и соответствующие по времени и эпицентральному расстоянию сейсмическим фазам $I1$ и $I2$.

c^* , ScS^* – возмущения на коррелограмме, соответствующие отраженным от поверхности внешнего ядра волнам PcP и ScS .

Используемые данные

Землетрясение с магнитудой M_s 7.7 в г. Мандалае (Мьянма) зарегистрировано 28 марта 2025 г. в 06:20:24 (UTC) с координатами центроида, соответствующего основной фазе разрывообразования, 22.12° N, 95.98° E и глубиной 20.1 км по данным GCMT каталога (www.globalcmt.org). Размер очаговой зоны, оцененный по афтершоковой активности, равен ~ 460 км вдоль меридионального простирания по информации из (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000pn9s/finite-fault>). Согласно данным Сейсмологического центра развития геонаук (SAGE) (https://ds.iris.edu/wilber3/find_event) землетрясение в Мьянме – одно из пяти мелкофокусных землетрясений с $M > 7$, произошедших с января по май 2025 г.

Информация о длительности STF, полученная из разных источников, а также направление смещения по разлому (угол подвижки $Rake$) для землетрясения 28 марта 2025 г. представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Длительность подвижки и значение угла подвижки $Rake$, полученные из разных источников

Источник	Потсдамский центр наук о Земле (geofon.gfz-potsdam.de/eqexplorer/events/gfz2025gbpv/7)	Геологическая служба США (earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000pn9s/finite-fault)	Австралийская геофизическая служба (www.ga.gov.au)	GCMT каталог (www.globalcmt.org)
Длительность подвижки (с)	80 ^a	82 ^a , 77.0 ^b	Нет данных	42.2 ^b
Угол подвижки ($Rake$), градус	-179(-37)*	-174(-8)*	-41(-178)*	175(30)*

Примечание: ^a – длительность для модели очага с конечными размерами, ^b – длительность для точечного источника, * – в скобках значения для вспомогательной плоскости

Из таблицы видно, что у землетрясения достаточно продолжительная функция источника, угол подвижки близок к горизонтальному направлению. Также известно, что через 11 мин после максимального возмущения произошло землетрясение с $M_s = 6.4$ (www.globalcmt.org) на той же глубине, разделенное с главным всего шестью километрами.

Для изучаемого землетрясения из центров обработки FDSN (США), GEOFON (ФРГ) и Hi-net (Япония) были получены десятичасовые сейсмограммы вертикального широкополосного канала BHZ с 880 сейсмических станций, расположенных по всему миру. Из них было сформировано 386760 пар для расчета кросс-корреляционных функций. Наибольшее число пар соответствует расстояниям между станциями 0° – 10° и 40° – 130° . Карта с расположением станций и эпицентра землетрясения представлена на рис. 1. Первичная обработка сейсмограмм включала учет характеристик сейсмических каналов, устранение линейного тренда, смещение среднего уровня к нулевой линии и уменьшение частоты дискретизации до 10 Гц.

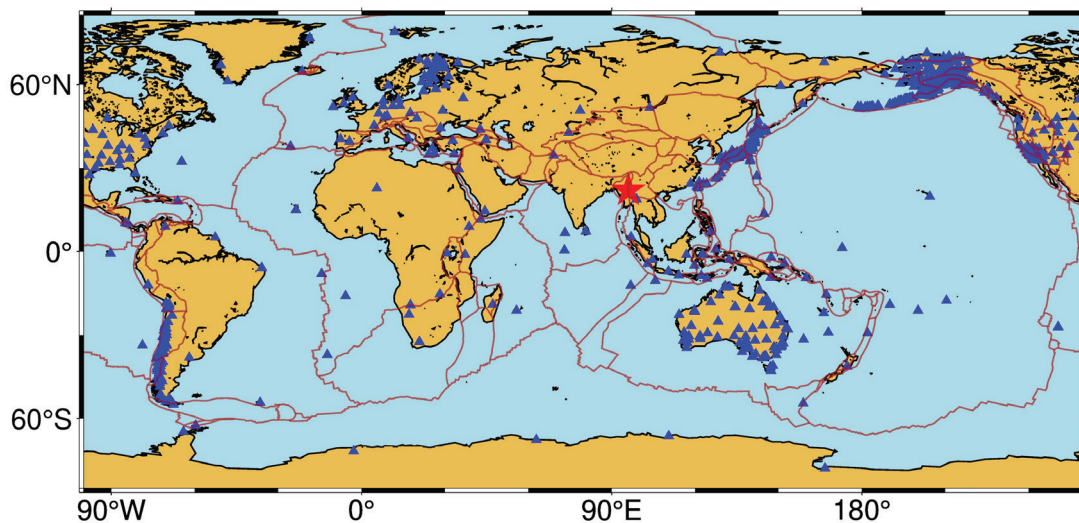


Рис. 1. Взаимное расположение эпицентра землетрясения (красная звезда) и сейсмических станций (синие треугольники). Красные линии – границы литосферных плит (включая микроплиты), тектонических провинций и деформационных зон [Hasterok et al., 2022]

Результаты и обсуждение

Для расчета коррелограмм мы использовали процедуру, описанную в [Ma, Tkalčić, 2024; Lima et al., 2022; Усольцева, Овчинников, 2025] и программный алгоритм, предложенный в [Tkalčić et al., 2020]. Обработка сейсмограмм включала в себя фильтрацию в полосе периодов 15–50 с, амплитудную и частотную нормализацию, вычисление кросс-корреляционной функции волновых форм для всех пар станций и суммирование этих кросс-корреляционных функций для заданного диапазона расстояний. На рис. 2а представлены теоретические коррелограммы, полученные для модели ak135 [Kennett et al., 1995] с учетом затухания P - и S -волн из [Montagner, Kennett, 1996] с помощью расчета поздней сейсмической коды методом *Axisem* [Nissen-Meyer et al., 2014]. Экспериментальная коррелограмма для землетрясения в Мьянме, построенная по собранным данным, представлена на рис. 2б.

В отличие от рис. 2а, изображение на рис. 2б более зашумленное, особенно на расстояниях между станциями 0° – 50° . В то же время присутствуют возмущения I_1^* , I_2^* , c^* , ScS^* , $cK2^*$, $K3^*$, соответствующие волнам $PKIKP$, $PKIKPPKIKP$, проходящим через внутреннее ядро, PcP , ScS , отраженным от границы внешнее–внутреннее ядро, а также проходящим в мантии и во внешнем ядре волн $PcPPKPPKP$ и $PKPPKPPKP$. Причем на расстояниях 0° – 10° аномалии более четко выражены на коррелограмме, построенной по реальным данным, чем по модельным. Интересно

отметить, что для другого мелкофокусного землетрясения в Новой Зеландии 30.09.2007 05:23:51 (UTC), анализируемого авторами в [Усольцева, Овчинников, 2025] с $M_s = 7.4$, углом $Rake = 123^\circ$ (69°) (www.globalcmt.org), которому предшествовало за 3 ч 15 мин событие с $M_s = 7.1$ и сопровождаемое через 4 ч 24 мин событием с $M = 6.7$, не выявлено схожих с теоретической коррелограммой закономерностей ни для одной из перечисленных волн. Возможное объяснение этому факту состоит в наличии более позднего и более раннего событий с большим энергетическим вкладом, на фоне которых формируется интерпретируемая сейсмическая кода.

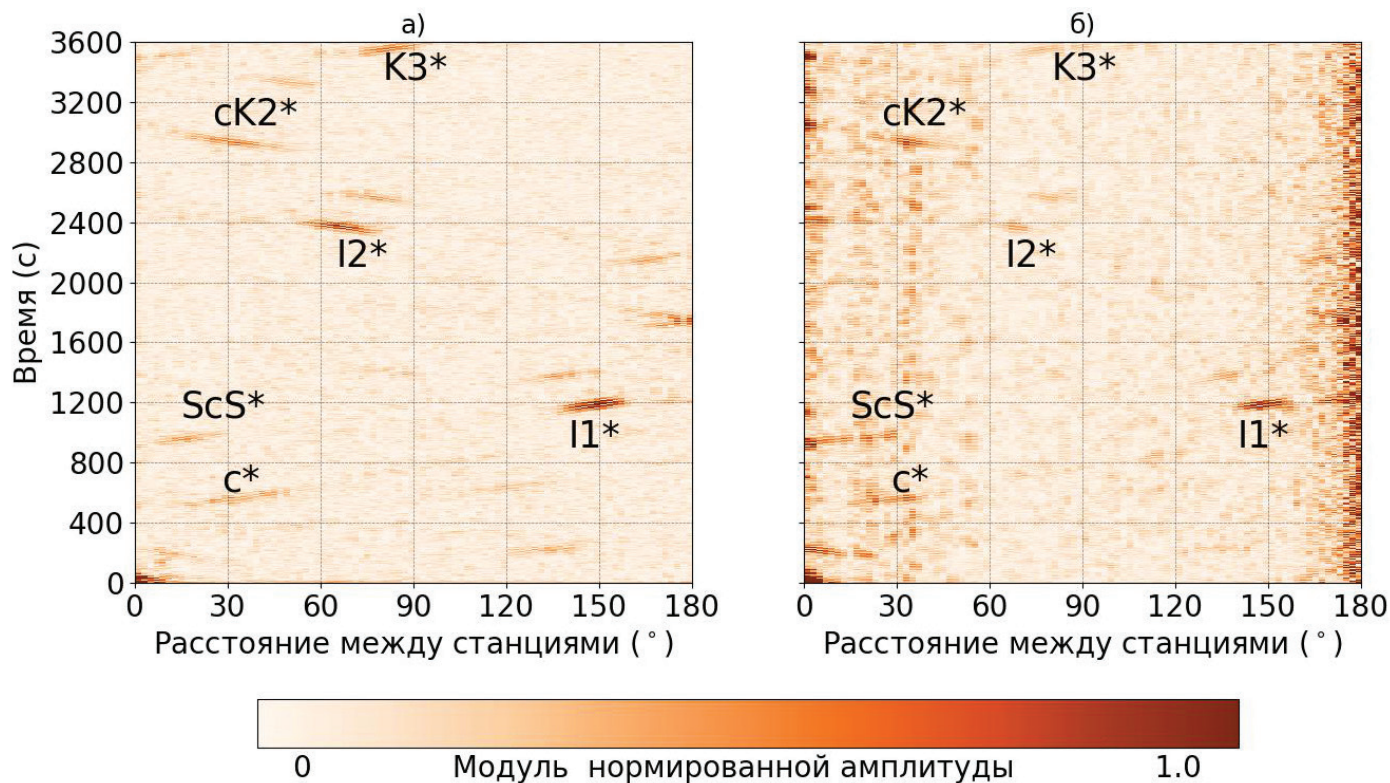


Рис. 2. Синтетическая коррелограмма для модели ak135 (а) и экспериментальная коррелограмма для землетрясения в Мьянме (б). Фильтрация в полосе периодов 15–50 с, длительность коды 10000–35000 с

При исследовании местоположения $I2^*$ на коррелограмме в зависимости от широт станций получены результаты, аналогичные [Усольцева, Овчинников, 2025] для Охотского землетрясения 24.05.2013 г. Разбиение на три группы: полярные, среднеширотные и экваториальные станции проводилось с введением границ на параллелях 50° с.ш., 50° ю.ш., 20° с.ш., 20° ю.ш. Распределение количества станций в зависимости от расстояния на рис. 3 демонстрирует существенный недостаток станций в экваториальном поясе. Соответствующая коррелограмма (рис. 3в, снизу) имеет дискретный вид, что указывает на прямую связь между качеством коррелограммы и количеством использованных пар станций. Без учета поправок на эллиптичность в группе на рис. 3а (широты станций $50^\circ < \lambda_c < 90^\circ$, $-90^\circ < \lambda_c < -50^\circ$) время пробега меньше, чем в группе на рис. 3б ($20^\circ < \lambda_c < 50^\circ$, $-50^\circ < \lambda_c < -20^\circ$) на ~ 8 с, а с учетом поправок на ~ 11.5 с. Таким образом, наблюдаемые особенности времени пробега волны $I2^*$ указывают на анизотропию с быстрой осью, параллельной оси вращения Земли. Аналогичное рассмотрение для расстояний 130° – 180° в районе фиксации волны $I1^*$ не показало различия во времени пробега волны $I1^*$ для полярных, среднеширотных и экваториальных станций. По логике при наличии анизотропии, которая обнаруживается на малых расстояниях при наблюдениях $I2^*$, задержка на расстояниях 170° – 180° для среднеширотных станций должна составлять ~ 4 с. Возможно, отсутствие

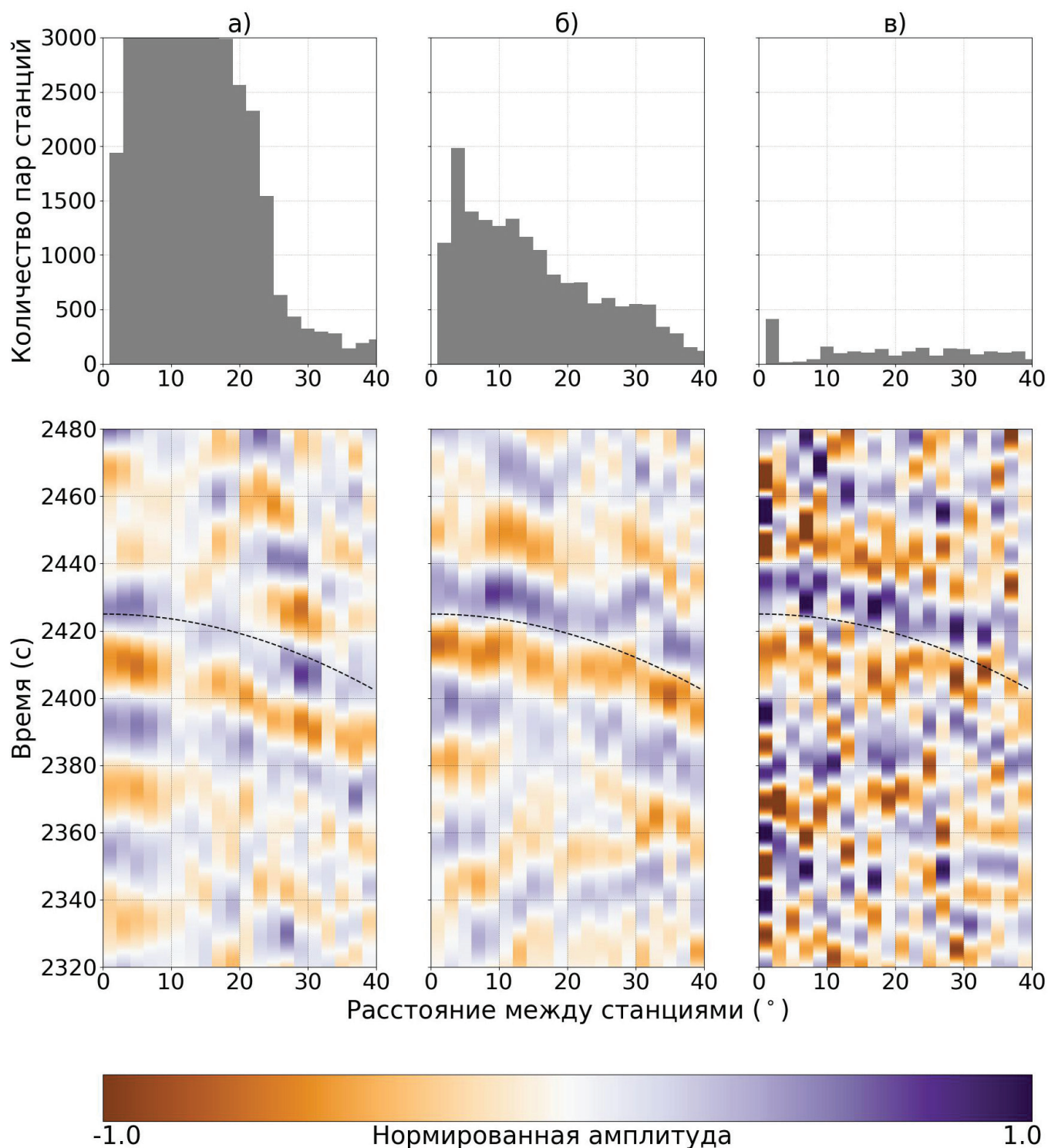


Рис. 3. Распределение количества пар станций в зависимости от расстояния с шагом 2.0° (сверху) и фрагменты коррелограмм с волной I_2^* (снизу) по данным землетрясения 28.03.2025 г. для полярных станций (а), среднеширотных (б) и экваториальных (в). Черная пунктирная линия – годограф волны I_2 в модели ak135

проявления анизотропии во временах для I_1^* связано с малым количеством станций, удаленных друг от друга на антиподальные расстояния, либо с влиянием скоростных аномалий в мантии.

Для 6-и разных районов: США (без Аляски), Аляска, Австралия, Финляндия, Южная Америка, Япония, построены коррелограммы, которые показаны на рис. 4 для волны I_2^* . Данные о количестве используемых для построения коррелограмм станций приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Количество используемых для СИ станций для каждого района и присутствие в этих районах различных волн на малых расстояниях

Район	США (без Аляски)	Аляска	Австралия	Финляндия	Южная Америка	Япония
Кол-во	84	298	116	21	75	69
I_2^*	+	+/-	+	+	-	+
ScS^*	+	+	+	-	+	+
c^*	-	-	+/-	-	-	-

Мы сравнили качество аномалий I_2^* , ScS^* , c^* для каждого района на рис. 4, ранжировав их по трем категориям (табл. 2): «+» (плюс) – отчетливо видимая аномалия с нормированной амплитудой, близкой к 1, «+/-» (плюс/минус) категория – слабо видимая аномалия с нормированной амплитудой около 0.3 и третья категория – аномалия отсутствует, обозначена знаком «-» (минус).

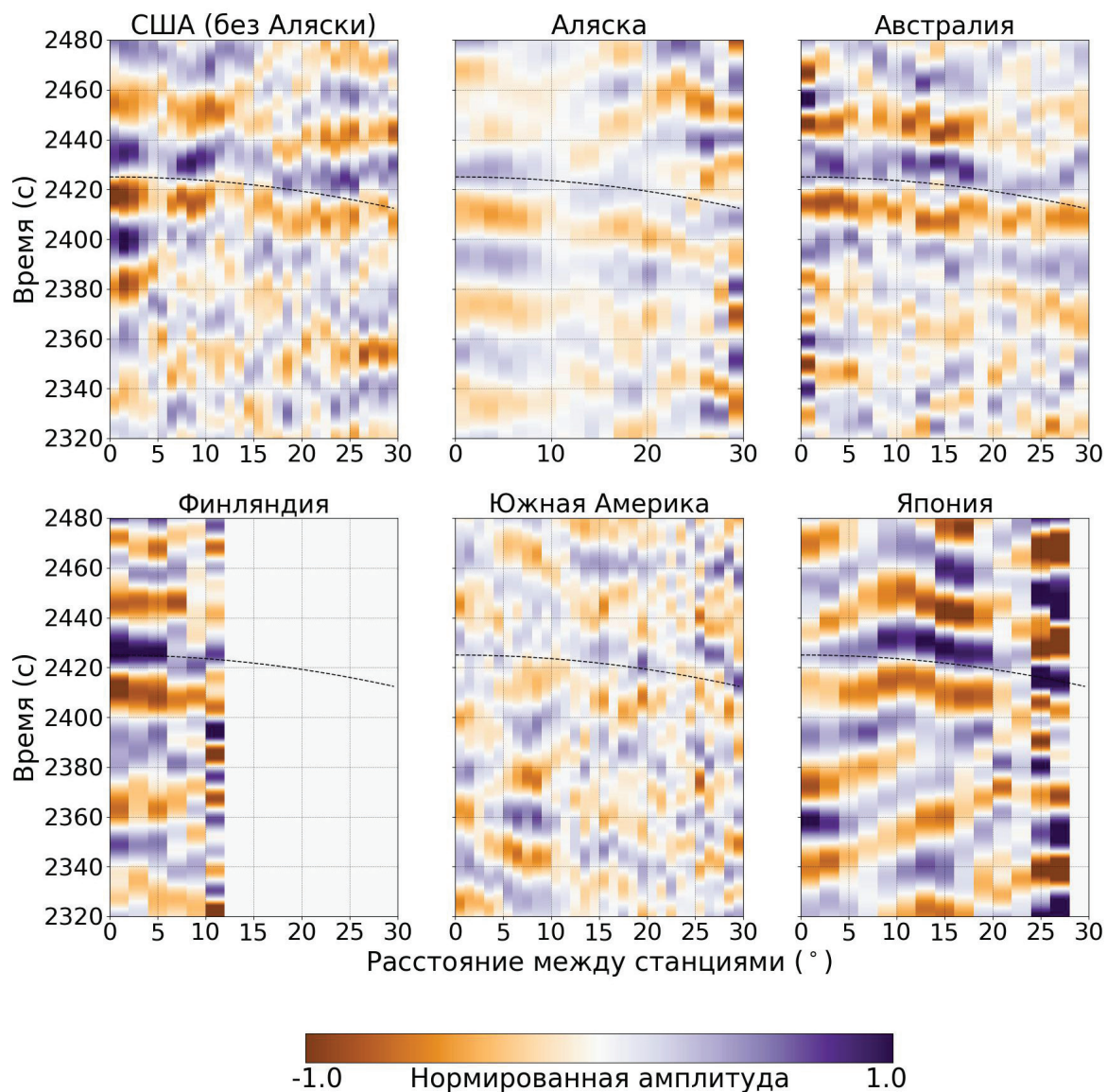


Рис. 4. Фрагменты коррелограмм с волной I_2^* по данным землетрясения 28.03.2025 г. для 6-и районов. Черная пунктирная линия – годограф волны I_2 в модели ak135

Соответствующее волне PcP возмущение c^* на кросс-корреляционном волновом поле почти не отличимо от шума. Возможная причина – период волны PcP меньше нижней границы полосового фильтра 15–50 с, использованного при построении коррелограмм. Следует также отметить, что в каталоге Международного сейсмологического центра [Inter. Seis. Centre, 2025] ни на одной из сейсмических станций волна PcP не идентифицирована.

В региональном исследовании наилучшее качество имеет волна ScS^* (рис. 4), что отмечалось также по наблюдениям на станциях в районах Китая, Европы и США (без Аляски) [Wang et al., 2014]. Отсутствие этой аномалии для района Финляндии в нашем исследовании связано с малым количеством использованных пар станций. Хорошее качество аномалии ScS^* отмечено в [Spica et al., 2017] по данным станций в Центральной Америке и объясняется не только условиями в точке отражения от поверхности внешнего ядра, но и наличием границ между океанской литосферной плитой Наска, Южноамериканской деформационной зоной и континентальной плитой близ мест установки сейсмических станций.

Если для поперечных волн помеха из-за близости края тектонической плиты или деформационной зоны вызывает увеличение амплитуды, то для продольных волн наиболее вероятно уменьшение амплитуды при прохождении через границы тектонической структуры. Сравнивая местоположение границ литосферных плит, тектонических провинций и деформационных зон и координат станций (рис. 1) можно отметить возможное влияние на коррелограммы тектонических элементов в Южной Америке, Японии и частично на Аляске на аномалию $I2^*$ (рис. 4). $I2^*$ видна достаточно хорошо для всех районов, кроме Аляски и Южной Америки.

Скорее всего, величина амплитуды волны $I2^*$ зависит от четырех факторов: во-первых, от количества используемых пар станций, во-вторых, от расположения тектонических структур рядом с сейсмическими станциями, в-третьих, от свойств среды в точке отражения (для $I2^*$ на свободной поверхности в антиподальной зоне) и в-четвертых, от затухания во внутреннем ядре.

Отсутствие возмущения $I2^*$ на коррелограмме станций в Южной Америке можно связать со всеми четырьмя факторами. В данном случае точки отражения $I2^*$ находятся под континентом Евразия, характеризующимся разнообразными геолого-геофизическими характеристиками среды. В условиях Аляски ситуация другая. Слабая выраженность волны $I2^*$ может быть частично связана с тектонической раздробленностью Североамериканской плиты на микроплиты и деформационные зоны в этом районе, но более вероятно ослабление волны $I2^*$ за счет затухания во внутреннем ядре. Сильное затухание $I2^*$ под Аляской согласуется с результатом в [Усольцева, Овчинников, 2025] о слабой волне $I2^*$ для станций севернее широты 60° по данным землетрясения 24.05.2013.

Выводы

1. Землетрясение в Мьянме является исключительным, так как несмотря на большую длительность STF и угол подвижки (*Rake*), близкий к горизонтальному, в коррелограммах мы наблюдаем аномалии $I1^*$, $I2^*$, c^* , ScS^* .

2. Особенности времени пробега волны $I2^*$ на коррелограмме для землетрясения в Мьянме подтверждают наличие в IC анизотропии с быстрой осью, параллельной оси вращения Земли.

3. Устойчивые возмущения $I2^*$ на расстояниях 0° – 20° соответствуют наблюдениям на сейсмических станциях США (без Аляски) и Австралии.

4. На коррелограммах станций для районов Южной Америки и Аляски волна $I2^*$ слабо выражена по данным землетрясения в Мьянме. Объяснение этому факту для наблюдений в Южной Америке скорее всего связано с малым количеством используемых станций, близко расположенным тектоническим элементом и условиями в точке отражения. Для Аляски более вероятно затухание во внутреннем ядре.

Заключение

Изучение внутреннего ядра с помощью сейсмической интерферометрии – это достаточно молодое направление исследований, поэтому не все обнаруживаемые особенности находят геофизическую интерпретацию. На данном этапе развития немаловажен процесс накопления данных и создание большего количества примеров как с положительными, так и отрицательными результатами использования метода СИ.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200561-3).

Благодарности

В работе использованы данные Международной федерации цифровых сейсмологических сетей (FDSN Web Service client), службы Geofon (<http://geofon.gfz-potsdam.de/eidaws/>), Центра управления данными Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям (Япония, NIED F-net. <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>).

Список литературы

- Усольцева О.А., Овчинников В.М. Применение метода сейсмической интерферометрии для исследования внутреннего ядра Земли // Физика Земли. 2025. № 2. С. 3–18. <https://doi.org/10.31857/S0002333725020012>
- Hasterok D., Halpin J., Collins A., Hand M., Kreemer C., Gard M.G., Glorie S. New maps of global geologic provinces and tectonic plates // Earth Science Reviews. 2022. Vol. 231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104069>
- International Seismological Centre. 2025. On-line bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical Journal International. 1995. Vol. 122. № 1. P. 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>
- Lima Costa de T., Tkalčić H., Waszek L. A new probe into the innermost inner core anisotropy via the global coda-correlation wavefield // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022. Vol. 127. P. E2021JB023540. <https://doi.org/10.1029/2021JB023540>
- Ma X., Tkalčić H. Seismic low-velocity equatorial torus in the Earth's outer core: Evidence from the late-coda correlation wavefield // Sci. Adv. 2024. Vol. 10. P. Eadn5562. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adn5562>
- Montagner J.-P., Kennett B.L.N. How to reconcile body-wave and normal-mode reference earth models // Geophysical Journal International. 1996. Vol. 125. № 1. P. 229–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06548.x>
- Nissen-Meyer T., van Driel M., Stähler S.C., Hosseini K., Hempel S., Auer L., Colombi A., Fournier A. AxiSEM: broadband 3-D seismic wavefields in axisymmetric media // Solid Earth. 2014. Vol. 5. P. 425–445. <https://doi.org/10.5194/se-5-425-2014>
- Spica Z., Perton M., Beroza G.C. Lateral heterogeneity imaged by small-aperture ScS retrieval from the ambient seismic field // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44 (16). P. 2017GL073, 230. <https://doi.org/10.1002/2017GL073230>
- Tkalčić H., Pham T.-S. Excitation of the global correlation wavefield by large earthquakes // Geophysical Journal International. 2020. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa369>
- Tkalčić H., Pham T.-S., Wang S. The Earth's coda correlation wavefield: Rise of the new paradigm and recent advances // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 208. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103285>
- Wang K., Luo Y., Zhao K., Zhang L. Body waves revealed by spatial stacking on long-term cross-correlation of ambient noise // J. Earth Sci. 2014. Vol. 25 (6). P. 977–984. <https://doi.org/10.31223/X5TD1C>
- Wang T., Song X., Xia X.X. Equatorial anisotropy in the inner part of Earth's inner core from autocorrelation of earthquake coda // Nature geoscience. 2015. Vol. 8 (3). P. 224–227. <https://doi.org/10.1038/ngeo235>

STRUCTURAL FEATURES OF THE EARTH INNER CORE ON THE BASE OF LATE CODA AFTER THE MYANMAR EARTHQUAKE ON 28 MARCH 2025

© 2025 O. A. Usoltseva*, V. M. Ovtchinnikov

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kriukova@idg.ras.ru*

The paper presents the results of express analysis of the late coda of the Myanmar earthquake by seismic interferometry method. Anomalies corresponding to waves $I1^*$, $I2^*$, c^* , ScS^* , are observed in the calculated correlograms based on data from 880 world stations. It is shown that the travel time features of the $I2^*$ correspond to anisotropy with a fast axis in the direction of the Earth rotation axis. On the correlograms of the stations for the Alaska region, the $I2^*$ wave is weakly expressed, which is probably related to attenuation in the inner core.

Keywords: seismic interferometry, late coda, $PKIKP$, $PKIKPPKIKP$, inner core anisotropy.