

УДК 550.34+551.16

О МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ПОВЕРХНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА ЗЕМЛИ

© 2024 г. В. М. Овчинников*, О. А. Усольцева**

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 30.01.2024 г.

Поступило 31.01.2024 г.

После доработки 09.04.2024 г.

Принято к публикации 15.04.2024 г.

Анализ дифференциальных невязок времён пробега отражённых волн РсР и РКіКР, зондирующих области ядра под Евразией, Юго-Восточной Азией и Южной Америкой указывает на мозаичную картину свойств поверхности внутреннего ядра, включающую крупномасштабные и мелкомасштабные латеральные неоднородности. Сильная аномалия обнаружена под Каспийским морем.

Ключевые слова: внутреннее ядро Земли, отражённые волны РсР и РКіКР, латеральные неоднородности

DOI: 10.31857/S2686739724080127

Твёрдое внутреннее ядро Земли (IC) остаётся одной из самых загадочных частей нашей планеты, несмотря на многочисленные исследования в области сейсмологии, геодинамики, геохимии, физики твёрдого тела и материаловедения. Начиная с открытия Инге Леман в 1936 г., внутреннее ядро в течение 50 лет рассматривалось как шар, лишённый каких-либо существенных особенностей. Однако с середины 80-х годов наши представления о структуре, текущей динамике и эволюции IC изменились (см. например, [1, 2]). В частности, это касается представления о геодинамике земного ядра, без которой биологическая жизнь была бы невозможна в том виде, в каком мы её знаем сегодня. На основе сейсмических данных были предложены новые геодинамические модели формирования структуры IC со всё возрастающей сложностью распределения скоростей распространения и поглощающих свойств сейсмических волн, структурными особенностями перехода от внешнего к внутреннему ядру и рельефа поверхности IC. Одна из таких гипотетических моделей, основанная на анализе изменения амплитуды отражённых от поверхности внутреннего ядра сейсмических волн РКіКР, возбуждённых ядерными взрывами, предполагает мозаичную структуру

поверхности внутреннего ядра [3, 4]. Однако современное представление о свойствах поверхности IC по-прежнему ограничено несколькими отдельными участками из-за недостаточного охвата данными.

В настоящей работе мы существенно расширили набор данных о параметрах волн РКіКР и РсР, возбуждённых землетрясениями, и построили начальную карту мозаичности поверхности внутреннего ядра под Евразией и Юго-Восточной Азией в терминах дифференциальных времён пробега сейсмических волн РКіКР и РсР.

ДАнные И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Докритическая волна РКіКР, отражённая от IC, является инструментом высокого разрешения для исследования тонких структур IC вследствие её более высокочастотного состава, чем рефрагированная волна РКіКР, наиболее широко используемая в изучении свойств IC. Обычно РКіКР используется совместно с волной РсР для ослабления влияния особенностей вышележащих оболочек Земли, неточностей в определении координат эпицентра и в особенности глубины землетрясений. Докритическая пара волн РКіКР–РсР позволяет избежать также влияния внутренних структур ядра по сравнению с пост-критической парой РКіКР–РКіКР [5], предоставляя необходимую информацию

Институт Динамики Геосфер имени академика М.А. Садовского
Российской Академии наук, Москва, Россия

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

**Email: kriukova@mail.ru

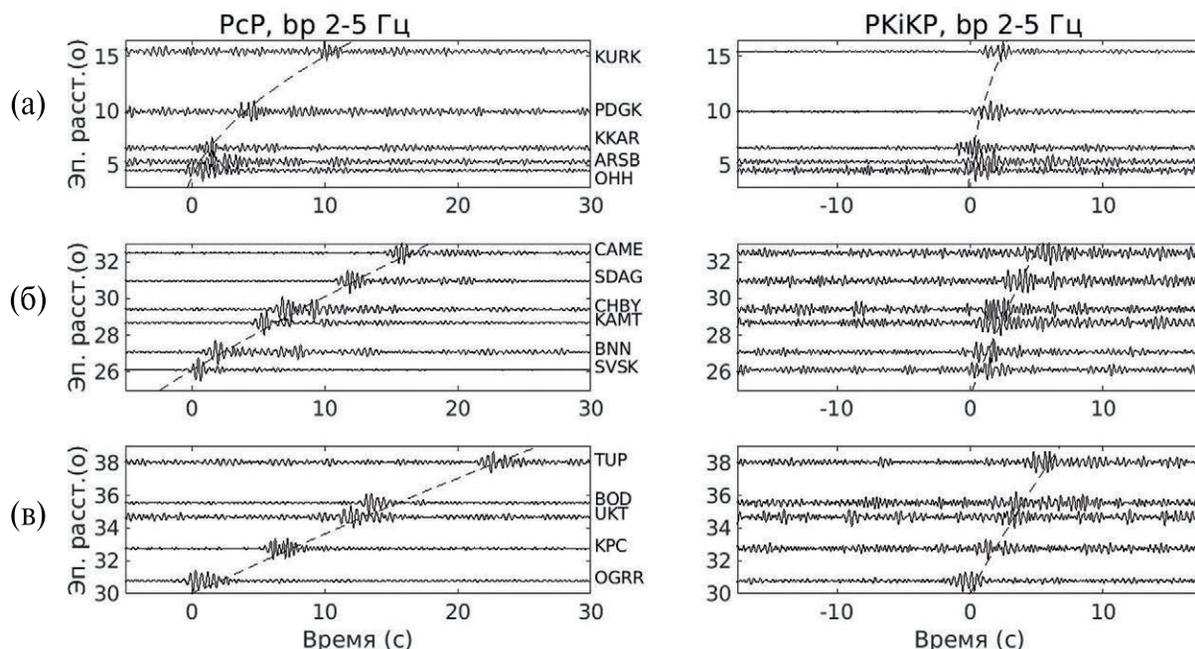


Рис. 1. Фрагменты сейсмограмм Памиро-Гиндукушского землетрясения 8 августа 2019 г на сейсмических станциях: (а) в Казахстане и Киргизии, (б) в Турции, (в) в Восточной Сибири.

о геометрии структурных особенностей поверхности, а также о контрасте плотности на границе ИС.

Мы провели систематический анализ сейсмограмм глубокофокусных ($h > 100$ км) землетрясений для обнаружения пары волн РКiKP и PcP на более 1000 сейсмических станциях в Скандинавии, Турции, России, Казахстане, Киргизии, Израиле, Корее, Китае, Австралии, США и Аргентине. Обнаружение указанных волн проводилось с использованием полосовой нуль-фазовой частотной фильтрация для улучшения отношения сигнал-шум в основном в полосе 2–5 Гц и виртуального группирования сейсмоприемников, позволяющего обнаружить пространственную синфазность вступлений волн на различных станциях. Пример такой обработки показан на рис. 1.

Сейсмограммы, использованные для анализа, уникальны по своим высоким качествам, хорошо видимым на рис. 1, где приведены фрагменты сейсмограмм Памиро-Гиндукушского землетрясения 8 августа 2019 г.

Всего было обнаружено 1235 пар волн РКiKP и PcP. Взаимное расположение сейсмических станций, землетрясений и точек отражения от границы внутреннего ядра показано на рис. 2. Точки отражения в значительной степени закрывают “белые пятна” в Евразии и Юго-Восточной

Азии. Следует заметить, что в бюллетенях Международного сейсмологического центра (www.isc.ac.uk) за 2002–2019 гг. были опубликованы данные о параметрах волн РКiKP и PcP только для 10% измерений, представленных в данном исследовании.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ НЕВЯЗКИ ВРЕМЕН ПРОБЕГА

Для анализа были использованы дифференциальные невязки времён пробега волн PcP и РКiKP

$$ddt = (t(\text{PKiKP}) - t(\text{PcP}))_m - (t(\text{PKiKP}) - t(\text{PcP}))_{ref},$$

где индекс m соответствует значению дифференциального времени пробега, измеренного по временному положению максимальных амплитуд волн РКiKP и PcP, а второе слагаемое с индексом ref – аналогичное значение для некоторой стандартной модели Земли. В качестве референсной модели использовано сочетание трёхмерной модели LLNL-3D [6] для коры и мантии и Ak135 [7] для ядра. Модель LLNL-3D учитывает эллиптичность Земли и неровности границы раздела между нижней мантией и внешним ядром высотой порядка 1 км.

Пространственное распределение измеренных дифференциальных невязок времен пробега

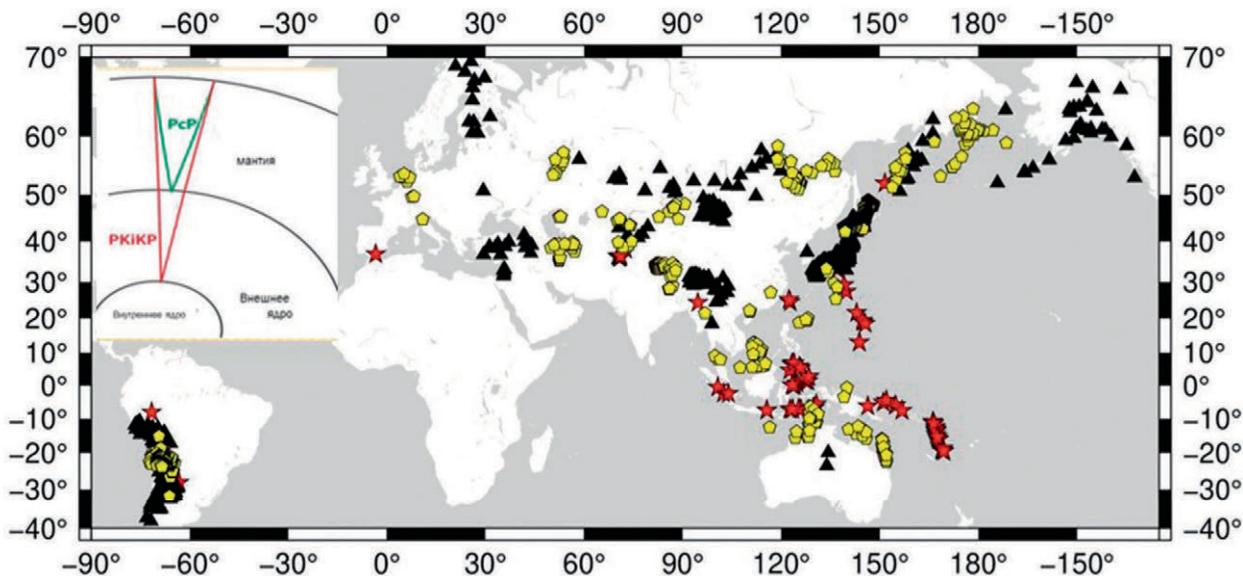


Рис. 2. Карта расположения очагов землетрясений (красные звёздочки), сейсмических станций (треугольники) и проекции точек отражения (жёлтые шестиугольники) от внутреннего ядра волн PKiKP. На врезке приведена схема лучей для PcP- и PKiKP-волн.

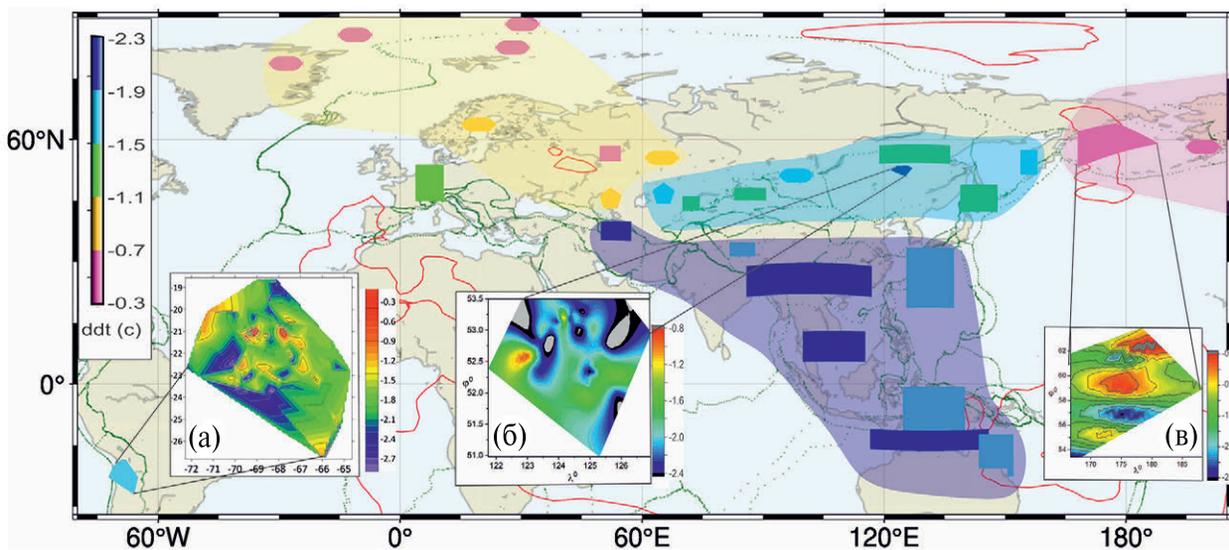


Рис. 3. Пространственное распределение ddt на крупномасштабной карте мира и мелкомасштабные детали на трёх врезках регионов: (а) в Аргентине, (б) в Монголии, (в) на Чукотке. Красными линиями обозначены зоны низких скоростей в слое D'' нижней мантии, а зелёными – зоны тектонических нарушений в земной коре. Овалами обозначены данные по ядерным взрывам [8].

оказано на рис. 3. Полный набор измерений дифференциальных невязок времен пробега и другие дополнительные данные, использованные при расчётах, доступны по ссылке (<https://idg.ras.ru/upload/medialibrary/017/mjfvz3si8y56or gov3dbn3fq54vc2kcy.xls>).

На глобальной карте (рис. 3) цветом выделены 5 градаций невязок ddt от -2.3 с до -0.3 , представляющих средние значения по областям

зондирования IC (многоугольники и овалы различного цвета). Значения невязок демонстрируют мозаичную структуру (текстуру), отражающую локальные свойства поверхности IC латерального масштаба 200–600 км. На карте также выделены две крупные области (южная – фиолетовый цвет и северная – светло-голубой цвет), протянувшиеся в долготном направлении от 60° до 170° в.д. В южной области среднее $ddt = -1.91 \pm 0.21$ с, а в северной $ddt = -1.63 \pm 0.22$ с. Полученные

значения для этих областей статистически значительно различаются. На северо-западе Евразии к ним примыкает светло-жёлтая область с более высокими, в 4–5 раз, значениями $ddt = -0.4 \pm 0.26$ с, а на востоке розовая область с $ddt = -0.6 \pm 0.29$ с. Выделенные области характеризуются латеральным размером 2000–2500 км на поверхности IC.

Более детальное рассмотрение особенностей ddt на меньшем пространственном масштабе для трёх локальных областей на глобальной карте с плотным распределением точек отражения показаны на врезках рис. 3. Карты вариаций ddt под Аргентиной (врезка а)) и Монголией (врезка б)) соответствуют латеральному масштабу 10–30 км, под Чукоткой (врезка с)) 50–150 км. В вариациях ddt в явном виде признаки полусферного масштаба изменения свойств среды в интервале долгот 30° – 50° и 170° – 180° в.д., полученные из поглощающих [9] и анизотропных [10] свойств внутреннего ядра, не обнаружены.

Сейсмические данные не дают однозначного ответа о природе вариаций дифференциальных невязок времен пробега ddt . Часть невязок ddt порядка 0.6–0.7 с может быть объяснена большим радиусом внутреннего ядра 1221.5 км [11], как в модели PREM, в отличие от использованной в настоящей работе $Ak135$ с радиусом IC 1217.5 км.

Если отнести измеренные невязки времен пробега к возможным вариациям скорости во внешнем ядре, то относительная вариация скорости продольных волн во внешнем ядре может быть оценена по формуле $\delta V_p/V_p \approx ddt / (t_{PKiKP} - t_{PcP})$, где $t_{PKiKP} - t_{PcP}$ – время пробега волны PKiKP во внешнем ядре. Откуда $0.06\% < \delta V_p/V_p < 0.55\%$. Для упругой среды вариация плотности $\delta \rho/\rho \approx -2\delta V_p/V_p$, то есть относительная вариация плотности во внешнем ядре имеет тот же порядок, что и относительная вариация скорости. Однако, как следует из работы [12], для жидкого ядра, полностью вовлечённого в конвекцию, изменение плотности должно быть на три порядка меньше.

Резкое изменение ddt примерно на 1 с при переходе с запада к северо-восточной области (светло-розовый цвет) на Чукотке может быть связано с зоной низких скоростей на границе нижней мантии и внешнего ядра, выделенная на рис. 3 красной кривой. Однако различие в невязках времени составит только 0.19 с при толщине слоя в 200 км и вариации скорости продольных волн в нём $13.56 \text{ км/с} < V < 13.74 \text{ км/с}$ [6], а не -0.6 , как на рис. 3.

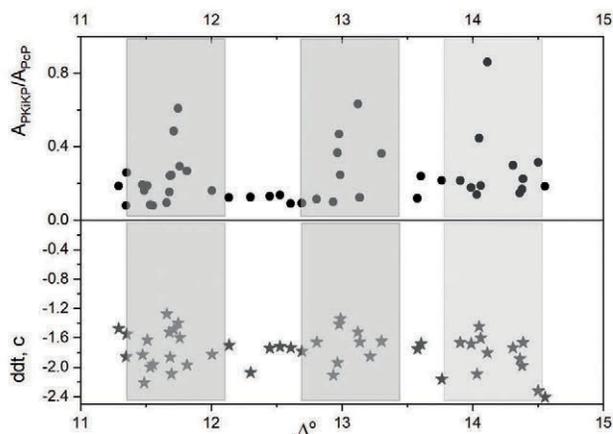


Рис. 4. Вариации дифференциальных времён пробега и отношения амплитуд волн PKiKP и PcP, наблюдаемые на сейсмических станциях в Японии при землетрясении в Охотском море 24 мая 2013 г. Кружки – вариации отношения амплитуд, звёздочки – вариации дифференциальных невязок времён пробега.

В заключение приведём, не вполне очевидный результат, о связи наблюдаемых особенностей дифференциальных времён пробега с вариациями отношения амплитуд (рис. 4). Из рисунка видно, что вариации амплитуды и ddt наблюдаются на одних и тех же эпицентральных расстояниях.

Латеральный размер мозаики здесь, как и на рис. 3 а, б, также составляет 10–20 км, что следует из ширины области вариаций параметров $\sim 0.54^\circ$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Впервые построена крупномасштабная карта пространственной мозаичности поверхности IC по дифференциальным временам пробега докритически отражённых волн PKiKP и PcP на основе более 1200 измерений. Из неё следует существование в IC двух крупных областей с латеральным масштабом 2000–2500 км, в которых наблюдаются области с масштабом 200–600 км и более мелкие элементы мозаики с размером 10–20 км и 50–150 км.

По данным сейсмических станций в Японии на расстояниях меньше 15° от землетрясения в Охотском море 24 мая 2013 г. установлена пространственная корреляция вариаций дифференциальных невязок времён пробега и отношения амплитуд отражённых волн. Это первые экспериментальные данные, указывающие, что два типа вариаций параметров – дифференциальные

невязки времён пробега и отношение амплитуд волн PKiKP и PcP – связаны с одним источником.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке по Госзаданию № 122040400015-5. Используются данные, полученные на уникальной научной установке “Сейсмоинфраструктурный комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”, в Центре управления данными IRIS, в Центре управления данными Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям (Япония) и Института исследований землетрясений Токийского университета (Япония), doi: 10.17598/NIED.0003

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tkalčić H.* The Earth’s Inner Core Revealed by Observational Seismology. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2017. <https://doi.org/10.1017/9781139583954>
2. *Овчинников В. М., Краснощекоев Д. Н.* Сейсмические исследования ядра Земли // *Физика Земли*. 2021. № 2. С. 3–26. DOI: 10.31857/S0002333721020083.
3. *Адушкин В. В., Овчинников В. М.* О мозаичности отражающих свойств поверхности внутреннего ядра Земли // *ДАН*. 2004. Т. 397. № 6. С. 815–817.
4. *Krasnoshchekov D. N., Kaazik P. B., Ovtchinnikov V. M.* Seismological evidence for mosaic structure of the surface of the Earth’s inner core // *Nature*. 2005. V. 435. P. 483–487.
5. *Niu F., Wen L.* Hemispherical variations in seismic velocity at the top of the Earth’s inner core // *Nature*. 2001. V. 410. P. 1081–1084.
6. *Simmons N. A., Myers S. C., Joannesson G. M., Matzel E.* LLNL-G3Dv3: global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2012. 117 (B10). 189–200.
7. *Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R.* Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // *Geophys. J. Int.* 1995. 122(1). 108–124. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.
8. *Souriau A., Souriau M.* Ellipticity and density at the inner core boundary from subcritical PKiKP and PcP data // *Geophys. J. Int.* 1989. V. 98. P. 39–54.
9. *Oreshin S., Vinnik L.* Heterogeneity and anisotropy of seismic attenuation in the inner core // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L02613.
10. *Tanaka S., Hamaguchi H.* Degree one heterogeneity and hemispherical variation in anisotropy in the inner core from PKP(BC) – PKP(DF) times // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. P. 2925–2938.
11. *Koper D. K., Pyle M. L., Franks J. M.* Constraints on aspherical core structure from PKiKP-PcP differential travel times // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2003. V. 108. P. 2168. <https://doi.org/10.1029/2002JB002750>
12. *Stevenson D. J.* Limits of lateral density and velocity variation in the Earth’s outer core // *Geoph. J. R. Astron. Soc.* 1987. V. 88. P. 311–319.

MULTISCALE INHOMOGENEITIES ON THE SURFACE OF THE EARTH'S INNER CORE

V. M. Ovtchinnikov[#], O. A. Usoltseva^{##}

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Russia

[#]*E-mail: ovtch@idg.ras.ru*

^{##}*Email: kriukova@mail.ru*

The analysis of differential travel-time residuals of reflected PcP and PKiKP waves that probe the core regions under Eurasia, Southeast Asia, and South America indicates a mosaic picture of the surface properties of the inner core, including large-scale and small-scale lateral inhomogeneities. A strong anomaly has been discovered under the Caspian Sea.

Keywords: Earth's inner core, reflected PcP and PKiKP waves, lateral inhomogeneities