

УДК 550.311:550.341

ВАРИАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ВРЕМЕН ПРОБЕГА ВОЛН РКР В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗЕМНОГО ЯДРА

В.М. Овчинников, П.Б. Каазик

e-mail: ovtch@idg.chph.ras.ru

Исследованы вариации невязок дифференциальных времен пробега (ДВП) волн РКР_{DF} и РКР_{BC} , зондирующих восточную часть земного ядра на полярных (угол между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли $\xi < 35^\circ$) и экваториальных трассах ($\xi > 35^\circ$), относительно ДВП в стандартной модели Земли ак135 на эпицентральных расстояниях $147\text{--}155^\circ$. Отклонение ДВП от стандартной модели ак135 на экваториальных трассах в среднем составляет 0,4 с для глубины погружения сейсмического луча во внутреннее ядро от 140 до 235 км, затем следует переходная зона толщиной около 40 км, в которой невязки ДВП уменьшаются до 0,2 с, оставаясь на этом уровне до глубины 350 км.

Сравнение невязок на полярных и экваториальных трассах показывает, что на профиле к северу от Австралии по наблюдениям на временной сети наблюдений Lapnet невязки ДВП статистически неразличимы до глубины 190 км, то есть верхняя часть внутреннего ядра изотропна. В интервале от 190 до 300 км происходит относительно быстрый рост невязок, который можно рассматривать как переход от изотропии к анизотропии. На другом профиле по данным станции SYO верхняя часть внутреннего ядра в районе под Австралией до глубины порядка 220–240 км характеризуется изотропией. На большей глубине отмечаются признаки анизотропии. На южном профиле по данным станции SNAA каких-либо проявлений сейсмической анизотропии не установлено – невязки ДВП на экваториальных и полярных трассах неразличимы до глубины 350 км.

Введение

Одним из проявлений динамических процессов, протекающих во внутреннем ядре Земли, является анизотропия сейсмических скоростей. Важным аспектом, определяющим динамику процессов во внутреннем ядре, является характер перехода от изотропии к анизотропии – постепенный или в виде границы 1-го рода, который соответствуют разным физическим процессам. Указанная характеристика представляет также значительный интерес для верификации двух недавно предложенных динамических моделей [Monnereau et al., 2010; Gubbins et al., 2011], в ко-

торых основными процессами, формирующими свойства внутреннего ядра, являются плавление ядра на востоке и кристаллизация на западе.

Полученные ранее для этого региона результаты [Tanaka, Hamaguchi, 1997; Garcia, Souriau, 2000; Garcia, 2002; Isse, Nakanishi, 2002; Niu, Wen, 2001; Овчинников, 2004; Leykam et al., 2010] указывают, что в восточном полушарии верхняя часть внутреннего ядра изотропна. Признаки анизотропии проявляются только на глубине больше 200 км от поверхности внутреннего ядра, величина анизотропии составляет около 0,5%. Эти результаты основаны на небольшом объеме экспериментального материала, особенно для глубин от 200 до 350 км от поверхности внутреннего ядра, и не дают полного представления о структурных особенностях восточной части внутреннего ядра. Например, в работе [Irving, Deuss, 2011] полярные трассы, зондирующие восточную часть внутреннего ядра, представлены только несколькими измерениями. Более того, в большинстве работ новые данные используются совместно с ранее полученными измерениями ДВП, техника измерений которых различна. Вследствие этого ряды измерений не могут считаться однородными. В частности, это относится к работе [Isse, Nakanishi, 2002], в которой использованы измерения ДВП корреляционным методом и методом измерения временного положения максимальной амплитуды в волнах PKP_{DF} и PKP_{BC} , а в работе [Sun, Song, 2008] собраны все доступные измерения ДВП.

В настоящей работе представлены результаты исследования вариаций ДВП волн внутреннего ядра на глубинах 140–350 км от его поверхности на основе ряда измерений ДВП, проведенных по единой методике. Кроме того, существенно расширен ряд измерений для полярных трасс, выполненных на станциях в Фенноскандии, действовавших во время международного эксперимента LAPNET – POLNET в 2007–2008 гг., а также получено небольшое число измерений на сейсмических станциях в Антарктиде по землетрясениям в Восточной Сибири и в Северном Ледовитом океане для $2^\circ < \xi < 10^\circ$.

Общая характеристика данных

Полярные данные были собраны со станций SYO, SNAA, DRV, MAW, P061, LONW в Антарктиде и 60 станций сети LAPNET в Фенноскандии, показанных на рис. 1. Основным условием отбора сейсмограмм служили простота зарегистрированного сигнала, позволяющая легко идентифицировать сейсмические фазы и проводить измерения дифференциальных времен. Сейсмические источники расположены на Алеутских, Курильских островах, в Восточной Сибири, Северном Ледовитом Океане, районе Новой Зеландии и о. Фиджи, на архипелаге Новая Земля. Сейсмические лучи от этих землетрясений и взрывов зондируют область внутреннего ядра под Австралией и Юго-Восточной Азией. На рис. 1 показаны проекции сейсмических лучей во внутреннем ядре на поверхность Земли. Они занимают область между 30° и 160° в.д., которую называют «квазивосточным» полушарием внутреннего ядра Земли [Tanaka, Hamaguchi, 1997; Irving, Deuss, 2011].

Для экваториальных трасс было проведено 133 измерения ($50^\circ < \xi < 65^\circ$) ДВП на сейсмограммах глубоководных землетрясений в районе островов Фиджи, зарегистрированных сейсмическими станциями в Европе (рис. 1, б).

Примеры типичных сейсмограмм на полярных трассах для некоторых станций сети LAPNET показаны на рис. 2. На нем видны отчетливые вступления трех типов волн, распространяющихся в земном ядре – PKP_{DF} , PKP_{BC} , PKP_{AB} . Из рисунка

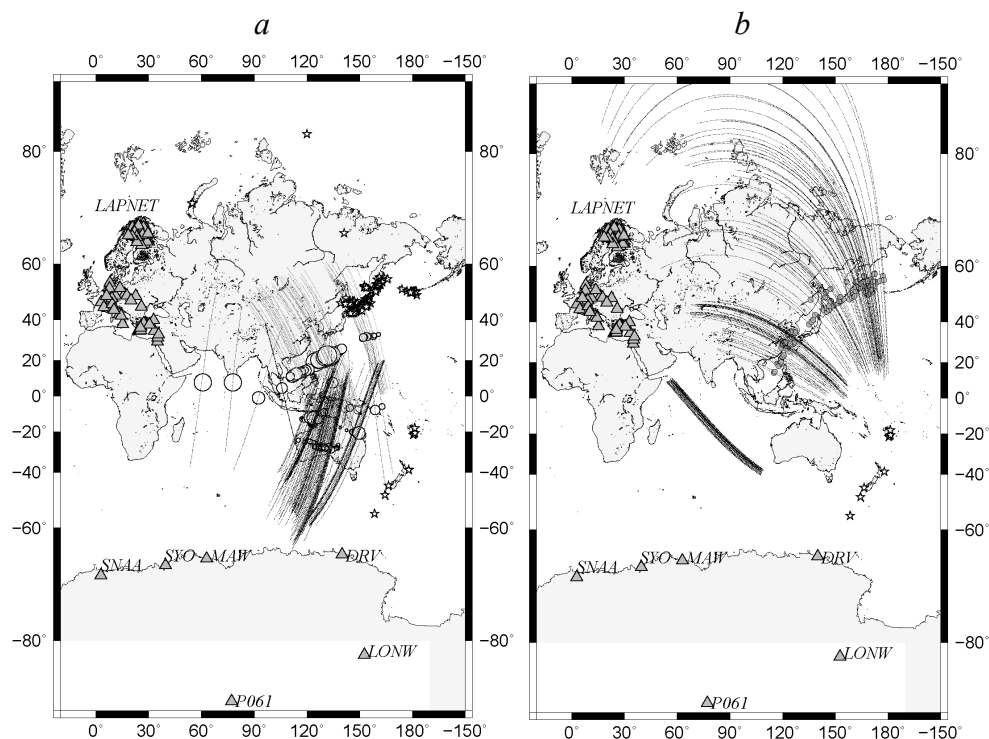


Рис. 1. Расположение сейсмических станций (серые треугольники) и сейсмических источников (звездочки): *a* – полярные трассы, *b* – экваториальные трассы. Светлые кружки на рис. 1, *a* – координаты точек максимального погружения сейсмического луча во внутреннее ядро на полярных трассах; радиус окружности пропорционален величине дифференциальной невязки времени пробега волн PKP_{DF} и PKP_{BC} . Серые кружки на рис. 1, *b* – координаты точек максимального погружения сейсмического луча во внутреннее ядро на экваториальных трассах. Линии на рисунке – проекции пути сейсмической волны во внутреннем ядре на поверхность Земли

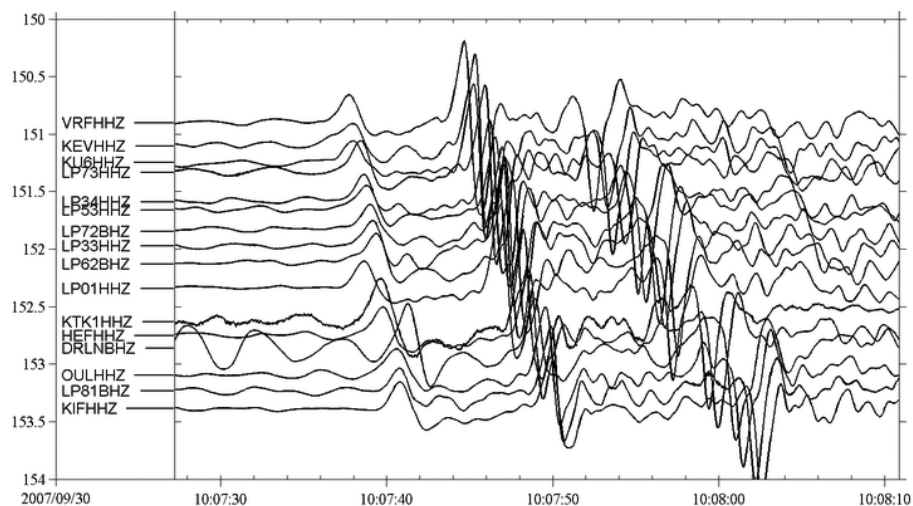


Рис. 2. Монтаж сейсмограмм землетрясения в Новой Зеландии, зарегистрированного станциями сети LAPNET. Идентификация волн PKP_{DF} , PKP_{BC} и PKP_{AB} не представляет каких-либо затруднений

также видно, что использование абсолютных времен пробега волн может приводить к ошибочным результатам из-за некорректной привязки станционного времени к единому мировому времени. Сейсмограммы станций DRLN и LP01 иллюстрируют этот фактор. На первой станции все три волны имеют запаздывание на 2 с, а на второй опережают на 1,5 с.

Общее число измерений ДВП на полярных трассах составило 292, из них основная часть приходится на интервал $26^\circ < \xi < 33^\circ$ и $2^\circ < \xi < 15^\circ$. При этом следует отметить, что профиль, отвечающий данным, полученным на сети LAPNET, пересекается с профилем экваториальных данных, то есть имеется небольшая область ($100^\circ < \lambda < 120^\circ$) внутреннего ядра, которая освещается как экваториальными ($\xi \sim 40-65^\circ$), так и полярными сейсмическими лучами ($\xi \sim 26-33^\circ$).

Результаты измерений дифференциальных невязок ДВП волн PKP_{DF} и PKP_{BC}

Для каждой сейсмограммы были измерены дифференциальные времена пробега волн PKP_{DF} и PKP_{BC}

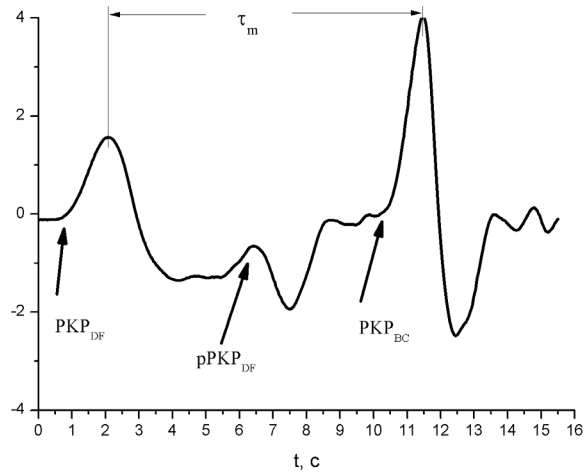
$$\tau_m = t_{\text{BC}} - t_{\text{DF}},$$

где t_{BC} и t_{DF} – временное положение максимальной амплитуды в волнах PKP_{BC} и PKP_{DF} (см. рис. 3), а также невязка дифференциальных времен пробега

$$\tau = \tau_m - \tau_{ak} + \tau_{mantle},$$

где τ_{ak} – дифференциальное время, соответствующее стандартной модели ак135, τ_{mantle} – поправка, учитывающая влияние мантии.

Рис. 3. Фрагмент сейсмограммы с волнами PKP_{DF} и PKP_{BC} . Измеряемый параметр – время между максимумами волн



Дифференциальная невязка τ связана с вариацией скорости некоторой области внутреннего ядра соотношением

$$\tau = t \delta v / v,$$

t – время пробега сейсмической волны по возмущенной области земного ядра, δv – абсолютное значение вариации скорости, v – невозмущенное значение скорости.

Полученные экспериментальные невязки ДВП τ показаны на рис. 4. Мантийные поправки рассчитаны с использованием блочной 3D модели мантии MITP08 [Li et al., 2008]. Данные на рис. 4 демонстрируют сложную зависимость от угла ξ . На экваториальных трассах ($\xi > 35^\circ$) вариации ДВП составляют от 0,2 до 1 с. Среднее значение ДВП на экваториальных трассах, представленных на рис. 4, a ($35^\circ < \xi < 65^\circ$), имеют существенное, около 0,4 с, смещение относительно модели ак135.

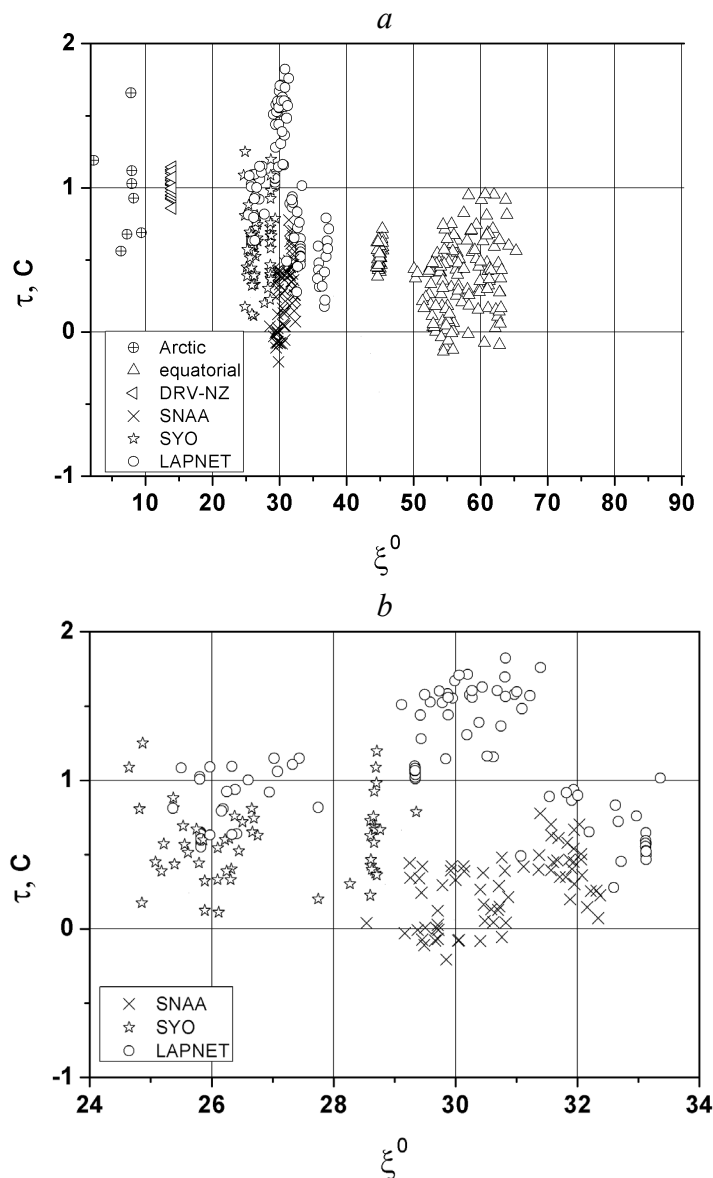


Рис. 4. Дифференциальные невязки времен пробега на полярных и экваториальных трассах в зависимости от угла между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли.

a – полный набор данных для $2^\circ < \xi < 66^\circ$; b – фрагмент с ДВП на полярных трассах для $24^\circ < \xi < 32^\circ$

На полярных трассах имеются измерения ДВП с максимальными значениями 1,8 с, превосходящими вариации на экваториальных трассах. Приведенные данные трудно описать, следуя общепринятой модели однородной анизотропии внутреннего ядра. Наиболее отчетливо это видно на рис. 4,б, где наблюдается существенная разность между невязками на станции SNAA (крестики) и станциях сети LAP-NET (светлые кружки) при $29^\circ < \xi < 31^\circ$. Кроме того, большие невязки при $\xi \sim 30^\circ$ по сравнению с невязками ДВП при меньших углах ξ указывают, что, если они обусловлены анизотропией внутреннего ядра, то направление оси анизотропии не совпадает с осью вращения Земли.

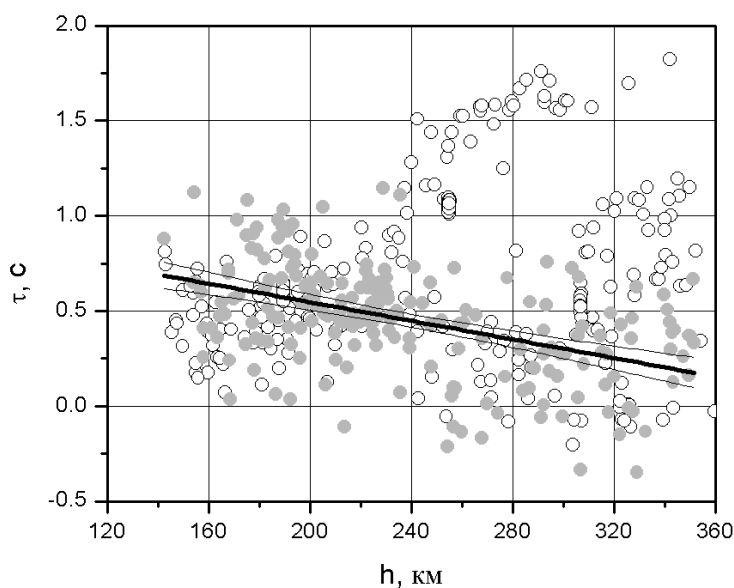


Рис. 5. Зависимость дифференциальных невязок от глубины. Серые кружки – измерения на экваториальных трассах, светлые – на полярных. Черная линия – линейная регрессия невязок на экваториальных трассах

Рассмотрим зависимость невязки ДВП от другого параметра – глубины погружения сейсмического луча во внутреннее ядро. На рис. 5 показаны невязки ДВП в зависимости от глубины h , отсчитываемой от поверхности внутреннего ядра. Из рис. 5 следует, что экваториальные невязки неотличимы от полярных на глубине от 140 до 190 км, то есть эту часть внутреннего ядра следует считать изотропной. Изменение невязок с глубиной для экваториальных трасс описывается линейной зависимостью

$$\tau = (1.036 \pm 0.775) - (0.0024 \pm 0.003)h.$$

Несмотря на то, что угол наклона в полученной линейной зависимости статистически значим, можно видеть, что экспериментальные точки визуально могут быть разделены на 2 группы по глубине с $h < 250$ км и $h > 250$ км.

Более детальные особенности невязок на экваториальных трассах показаны на рис. 6, где приведены результаты усреднения невязок по 20 км интервалу глубины.

На экваториальных трассах на глубинах от 150 до 235 км невязка имеет практически постоянное значение 0,45 с, то есть на указанной глубине изотропная ско-

рость сейсмических волн больше, чем в модели ак135, и соответствующая вариация скорости на этом интервале уменьшается с глубиной, так как при этом увеличивается время пробега сейсмической волны во внутреннем ядре. Далее величина невязки почти линейно уменьшается до 0,1 с на глубине 315 км и, соответственно, более быстро уменьшается вариация скорости. Затем невязка снова возрастает до 0,4 с на глубине 355 км.

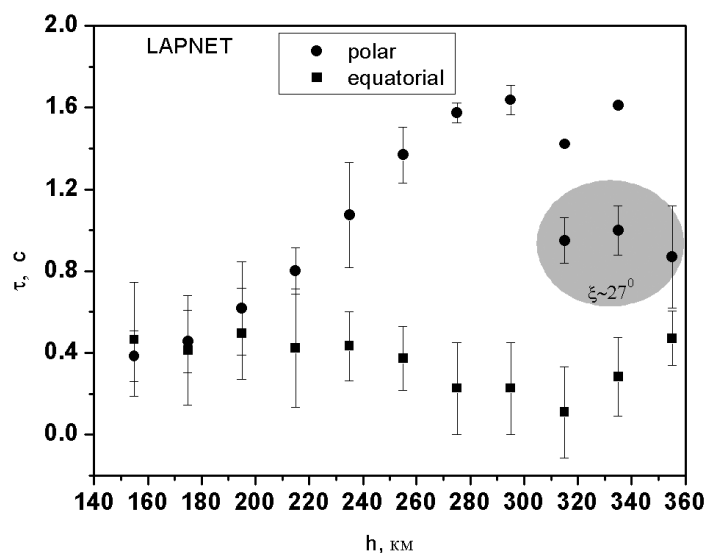


Рис. 6. Усредненные значения ДВП на экваториальных трассах (квадраты) и полярных трассах (кружки). Вертикальными черточками обозначены погрешности среднего значения

На рис. 6 также приведены данные для полярных трасс, полученные на станциях сети LAPNET. На глубинах от 145 до 190 км невязки не отличаются от невязок на экваториальных трассах. Следуя результатам предшествующих работ, в которых ДВП на полярных трассах интерпретируются как проявление анизотропии внутреннего ядра, можно сделать вывод, что верхняя часть внутреннего ядра на глубинах до 190 км является изотропной. На глубинах от 140 до 230 км скорость роста ДВП, измеренных на станциях сети LAPNET, составляет 0,007 с/км. В интервале от 240 до 260 км наблюдается более быстрый рост невязки, составляющий 0,025 с/км. Далее при $h > 260$ км происходит замедление роста невязок до 0,008 с/км. На глубине от 290 до 360 км наблюдается две группы данных – с большой величиной невязок около 1,5 с и несколько меньшей порядка 1 с. Таким образом, данные на рисунках 5 и 6 позволяют сделать два вывода: 1) ДВП на полярных и экваториальных трассах статистически неразличимы на глубинах, не превышающих 190 км, то есть эта область внутреннего ядра характеризуется изотропией скорости распространения сейсмических волн; 2) большой градиент невязки, составляющий 0,025 с/км, позволяет предположить наличие фазового перехода на глубине от 240 до 260 км (возможный вариант – изменение кристаллической структуры железа с гексагональной симметрией на центрированную кубическую [Belonoshko et al., 2008]).

Измерения невязок на станции SNAА, показанные на рис. 7, удивительно хорошо согласуются с измерениями на экваториальных трассах.

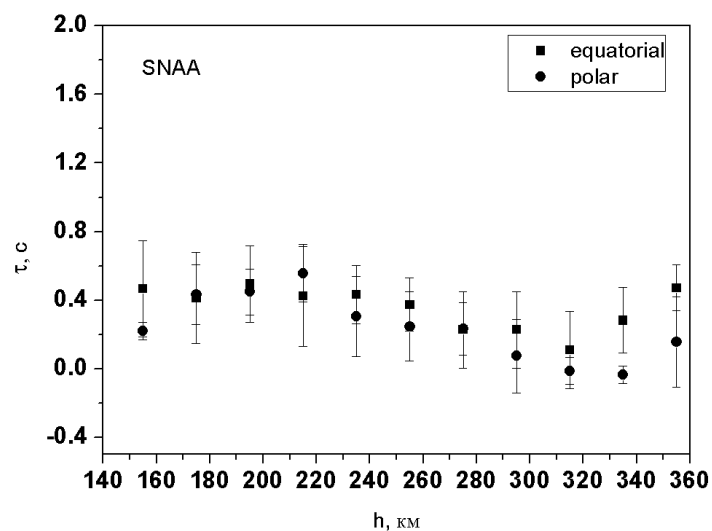


Рис. 7. Усредненные значения ДВП на экваториальных трассах (квадраты) и полярных трассах (кружки). Вертикальными черточками обозначены погрешности среднего значения. Измерения на станции SNAA в Антарктиде

Таким образом, в этой области верхняя часть внутреннего ядра изотропна до глубины, по крайней мере, 315 км. На станции SYO невязки, показанные на рис. 8, статистически неразличимы с данными на экваториальных трассах до глубины 220 км.

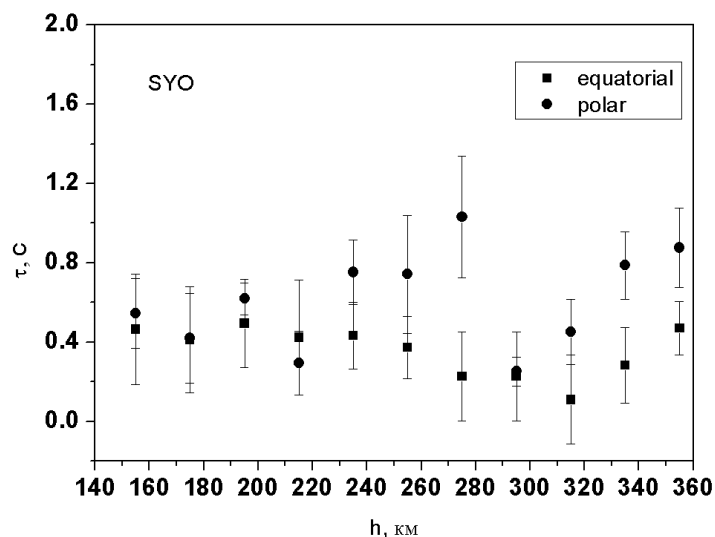


Рис. 8. Усредненные значения ДВП на экваториальных трассах (квадраты) и полярных трассах (кружки). Вертикальными черточками обозначены погрешности среднего значения. Измерения на станции SYO в Антарктиде

На большей глубине различие статистически значимо и увеличивается до 0,8 с на глубине 280 км. Затем на глубине 290–310 км различие становится снова ста-

статистически незначимо, а на глубине от 310 до 360 км значимое различие составляет 0,4 с.

Таким образом, полученные данные ДВП указывают на увеличение глубины изотропного слоя в юго-восточном направлении.

Выводы

1. Неразличимость дифференциальных невязок для полярных и экваториальных трасс на глубинах меньше 190 км указывает на изотропию этой части внутреннего ядра и его химическую однородность.
2. Большой градиент изменения ДВП по глубине, наблюдаемый на станциях сети LAPNET, возможно связан с фазовым переходом на глубине от 240 до 260 км.
3. Глубина изотропного слоя в исследованной области увеличивается в юго-восточном направлении от 190 до 350 км.

Литература

- Овчинников В.М.* Об анизотропии внутреннего ядра // Сб. научных трудов ИДГ РАН. 2004. С. 123–127.
- Belonoshko A.B., Skorodumova N.V., Rosenberg A., Johansson B.* Elastic anisotropy of Earth's inner core // *Science*. 2008. V. 319. P. 797–800.
- Garcia R., Souriau A.* Inner core anisotropy and heterogeneity level // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3121–3124.
- Garcia, R.* Constraints on uppermost inner core structure from waveform inversion of core phases // *Geophys. J. Int.*, 2002, V. 150 (3), P. 651–664.
- Gubbins D., B. Sreenivasan, J. Mound, S. Rost.* Melting of the Earth's inner core. *Nature*. 2011. V. 473. P. 361–363, doi:10.1038/nature10068.
- Irving J., Deuss A.* Hemispherical structure in inner core velocity anisotropy // *J. Geophys. Res.* 2011, V. 116, B04307, P. 1–17. doi:10.1029/2010JB007942.
- Isse T., Nakanishi I.* Inner core anisotropy beneath Australia and differential rotation // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 151. P. 255–263.
- Leykam D., Tkalcic H., Reading A.M.* Core structure re-examined using new teleseismic data recorded in Antarctica: evidence for, at most, weak cylindrical seismic anisotropy in the inner core // *Geophys. J. Int.* .2010. V. 180. P. 1329–1343. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04488.x.
- Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S.* A new global model for P wave speed variations in the Earth's mantle // *Geochim. Geophys. Geosyst.* 2008. V. 9. № 5, P. 1–21. Q05018, doi:10.1029/2007GC001806.
- Monnereau M., Calver M., Margerin L., Souriau A.* Lopsided growth of Earth's inner core // *Scienceexpress* / [www.sciencexpress.org/15 april 2010](http://www.sciencexpress.org/15%20april%202010).
- Niu, F., L. Wen.* Hemispherical variations in seismic velocity at the top of the Earth's inner core // *Nature*. 2001, V. 410, P. 1081–1084.
- Sun X., Song X.* Tomographic inversion for three-dimensional anisotropy of the Earth's inner core // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2008, V. 167, P. 53–70.
- Tanaka S., Hamaguchi H.* Degree one heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP(BC)-PKP(DF) times // *J. Geophys. Res.* 1997, V. 102. № B2, P. 2925–2938.