

О ВОЗМОЖНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЕ АНИЗОТРОПИИ СКОРОСТИ ВО ВНУТРЕННЕМ ЯДРЕ ЗЕМЛИ

В.М. Овчинников, П.Б. Каазик, Д.Н. Краснощекоев

В работе представлены новые экспериментальные данные о дифференциальных временах пробега $t_{BC}-t_{DF}$ сейсмических волн PKP_{DF} и PKP_{BC} в земном ядре. Невязки дифференциальных времен в узком диапазоне углов от 20 до 30° между направлением сейсмического луча в ядре и осью вращения Земли имеют специфическую особенность в форме «ковша», которая не согласуется с цилиндрической анизотропией внутреннего ядра Земли. Предложена модель с аномалией скорости продольных волн в 0,8% в цилиндрической области радиусом 1375 км во внешнем ядре, которая хорошо описывает экспериментальные данные.

Введение

В начале 90-х годов прошлого столетия сложилось представление, подкрепленное данными о расщеплении собственных частот мод собственных колебаний Земли, что особенности разности времен пробега волн PKP_{DF} и PKP_{BC} связаны с анизотропией внутреннего ядра Земли [Shearer et al., 1988; Creager, 1992; Tromp, 1993]. Вместе с тем, накопленные к настоящему времени экспериментальные факты [Song, 1997; Tanaka & Hamaguchi, 1997; Creager, 1999] так и не нашли своего объяснения в рамках предложенных физических механизмов возникновения анизотропии. В основе последних лежит упорядочение кристаллов железа либо за счет деформации внутреннего ядра, вызванной неоднородным ростом ядра на полюсах и экваторе, либо дендритного роста, либо деформации ядра за счет максвелловских напряжений. В данной работе приведены результаты наблюдений, которые также не могут быть объяснены моделью анизотропии внутреннего ядра Земли. Мы предлагаем модель ядра Земли с аномалией скорости цилиндрической формы во внешнем ядре, которая хорошо описывает особенности новых экспериментальных данных. Характерный радиус аномалии 1375 км и относительная вариация скорости 0,5–0,8%.

1. Данные. Для изучения строения земного ядра использовались дифференциальные времена пробега волн PKP_{DF} и PKP_{BC} , возбужденных сейсмическими источниками на Ю. Сандвичевых о-вах, южной оконечности Ю. Америки, о. Новая Земля и Алеутских о-вах. Расположение станций и районы сейсмических источников показаны на рис. 1.

Измерения дифференциальных времен проводились по времени максимальных амплитуд в волнах PKP_{DF} и PKP_{BC} . Для этого все сейсмограммы с помощью деконволюции и последующей фильтрации были приведены к стандартному виду, соответствующему характеристике сейсмометрического канала станции NRI. Пример сейсмограммы и измерения дифференциального времени $\tau = t_{BC} - t_{DF}$ показан на рис. 2.

Расстояние между сейсмическими лучами волн PKP_{DF} и PKP_{BC} в коре и мантии меньше первой зоны Френеля, вследствие чего дифференциальные времена τ оказываются слабо чувствительными к неоднородностям среды в коре и мантии, а также к ошибкам в координатах гипоцентра.

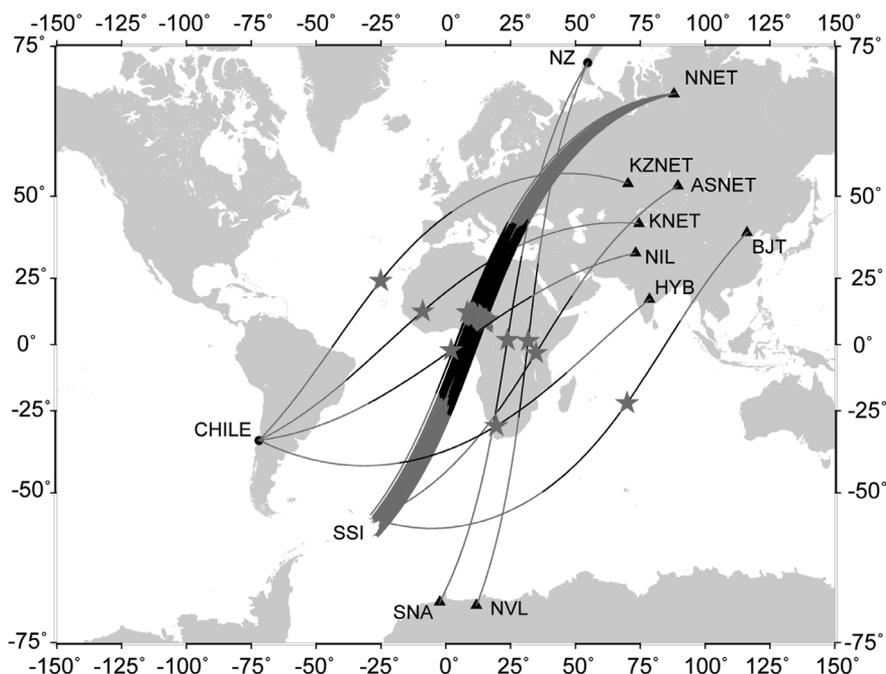


Рис. 1. Сейсмические станции (треугольники) и сейсмические источники, соединенные дугами большого круга.

Звёздочки на дугах – проекции точек максимального погружения сейсмического луча PKP_{DF} на дневную поверхность. Черная часть дуги соответствует проекции дуги между точками входа и выхода луча PKP_{DF} в твердое ядро.

Обозначения ASNET, KNET, KZNET, NNET использованы для групп станций, расположенных, соответственно на Алтае, в Киргизии, Казахстане и около г. Норильска

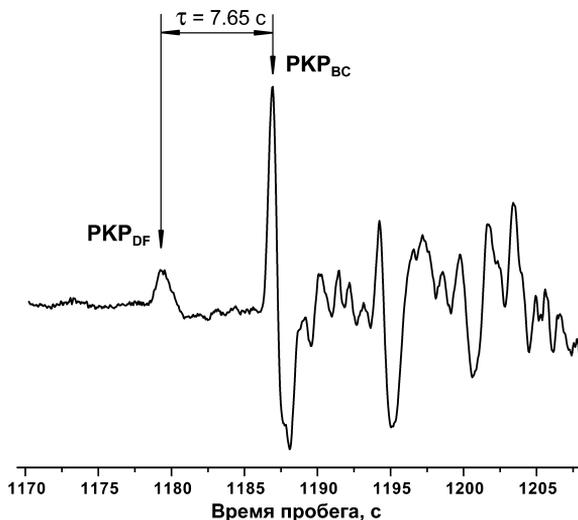


Рис. 2. Пример измерения дифференциального времени пробега на станции NRIL для землетрясения на Ю. Сандвичевых о-вах

Чтобы исключить влияние на дифференциальные времена различий в эпицентральных расстояниях и глубине сейсмических источников, вычислялись невязки между измеренными значениями и дифференциальными временами относительно референсной модели Земли: $\delta\tau = \tau - \tau_{ak135}$, где τ_{ak135} – дифференциальное время пробега по модели АК135. Использование модели АК135 позволяет избежать систематических ошибок (положительный линейный тренд невязок с расстоянием), возникающих при использовании модели PREM [Creager, 1999], а также провести прямое сравнение с результатами других работ.

2. Аномалии скорости в земном ядре. Для малых величин невязок времен пробега связь со скоростными аномалиями в ядре определяется соотношением $\delta\tau/t = \delta v/v$, где t – время пробега сейсмической волны по аномальной области в невозмущенной среде, а δv – аномалия скорости.

Чтобы получить относительные значения невязок, необходимо определить к какой части внутреннего ядра относятся наблюдаемые аномалии дифференциальных времен пробега. Вначале предположим, как это обычно делается, что внешнее ядро имеет сферически симметричное распределение скорости продольных волн, а все особенности в $\delta\tau$ связаны с внутренним ядром.

2.1. Анизотропия внутреннего ядра

Рассмотрим зависимость относительных невязок от угла ξ между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли, которая является одним из основных признаков анизотропии скорости во внутреннем ядре. Кроме того, будем считать, что верхняя часть твердого ядра толщиной 100 км является изотропной [Souriau & Poupinet, 2003]. Построенная при этих предположениях зависимость $\delta\tau/t = \delta v/v$ как функция от ξ показана на рис. 3.

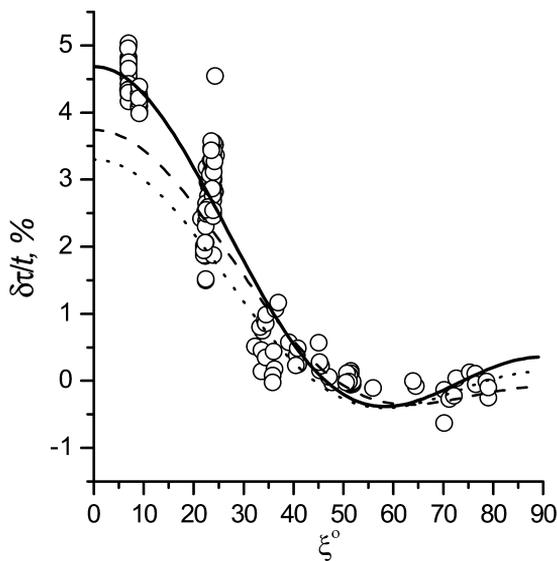


Рис. 3. Зависимость относительной невязки дифференциального времени от угла между направлением сейсмического луча во внутреннем ядре и осью вращения Земли.

Кружки – экспериментальные данные; сплошная кривая – модель анизотропии, полученная по экспериментальным данным; штриховая линия – модель анизотропии из [Creager, 1999]; пунктирная линия – модель анизотропии из [Souriau & Poupinet, 2003]

Экспериментальные данные описываются моделью следующего вида:

$$\delta\tau/t = 0,3535 \pm 0,1826 + (-5,3506 \pm 0,6989)\cos^2\xi + (9,6816 \pm 0,6058)\cos^4\xi \quad (1)$$

Без детального рассмотрения, приведенные на рис. 3 данные не противоречат сложившимся представлениям об анизотропии внутреннего ядра Земли, которая проявляется в зависимости невязок от угла ξ . Величина анизотропии составляет 4,33%. Свободный член 0,3535 в формуле (1) характеризует поправку к референсной радиально симметричной модели АК135. Новые экспериментальные данные при малых углах ξ отличаются на 0,5% от модели анизотропии из работы [Creager, 1999] и на 1,17% от модели анизотропии под Африкой, полученной в [Soufiau & Poupinet, 2003]. Другими существенными особенностями экспериментальных данных на рис. 3 являются, во-первых, быстрый переход от больших значений относительных невязок для $\xi \approx 24^\circ$ к малым значениям при $\xi \approx 35^\circ$ и, во-вторых, большие вариации относительных дифференциальных времен при $21,5^\circ < \xi < 24,5^\circ$, которые требуют рассмотрения других факторов, объясняющие эти особенности.

2.2. Аномалия скорости во внешнем ядре

На рис. 4 приведен фрагмент экспериментальных невязок для $\xi < 24,5^\circ$, которые, в частности, включают 83 измерения на станциях NRI, NRIL, NRIS (группа NNET) в диапазоне углов ξ от $21,5^\circ$ до $24,5^\circ$. В отличие от предсказываемого моделью анизотропии монотонного убывания, измеренные невязки имеют форму «ковша» в виде выраженной тенденции к росту в диапазоне $21,5^\circ < \xi < 23^\circ$ и последующих вариаций с амплитудой порядка 2 с.

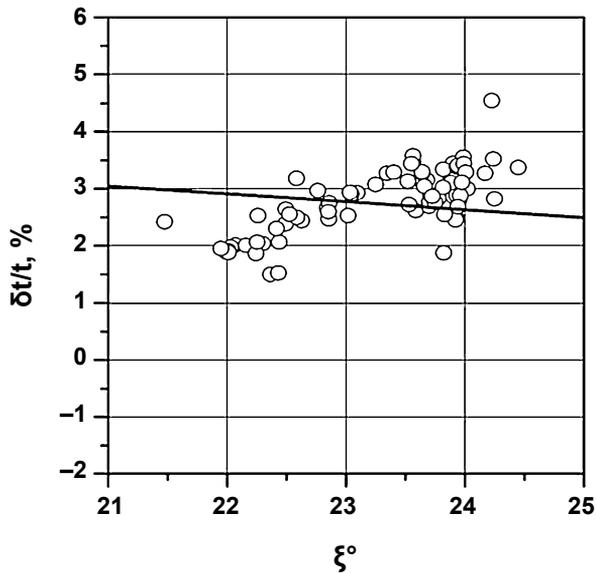


Рис. 4. Зависимость дифференциальных невязок времен пробега от угла между осью вращения Земли и направлением сейсмического луча в точке максимального погружения во внутреннее ядро на сейсмических станциях сети NNET.

Кружки – экспериментальные данные; сплошная линия – анизотропия внутреннего ядра (формула (1))

В качестве объяснения полученных особенностей невязок была рассмотрена модель с присутствием цилиндрической области во внешнем ядре с осью, совпадающей с осью вращения Земли, и повышенной скоростью распространения продольных волн. Дифференциальные невязки времен пробега рассчитывались для различных радиусов цилиндра в диапазоне от 1325 до 1450 км и величины скоростной аномалии в пределах 0,5–1%. Как видно из рис. 5, рассчитанные невязки дифференциальных времен пробега для модели с радиусом цилиндрической области 1375 км и $\delta v/v = 0,8\%$ хорошо согласуются с экспериментальными данными, передавая специфическую ковшеобразную форму невязок.

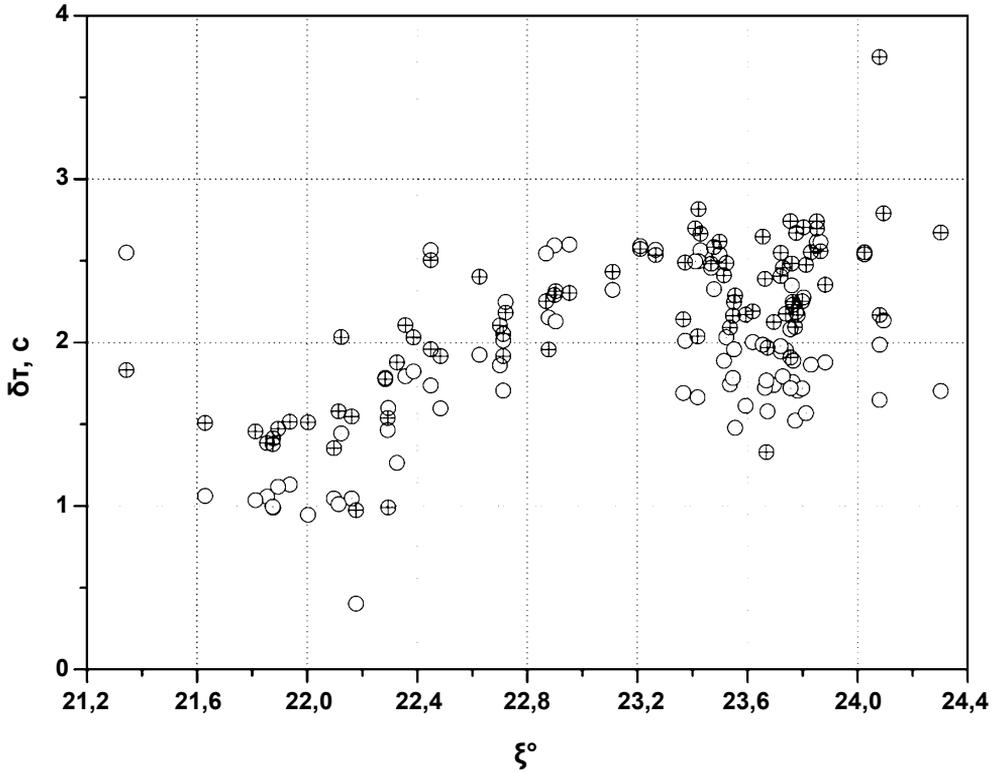


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных дифференциальных времен пробега сейсмических волн, измеренных на станциях NNET (кружки с крестиками), и теоретические расчеты для модели с цилиндрической аномалией скорости во внешнем ядре (кружки)

Чтобы проверить реальность существования рассмотренной аномалии скорости во внешнем ядре, мы протестировали ее на независимых данных, в качестве которых использованы дифференциальные невязки, измеренные на сейсмограммах станций в Антарктиде NVL и SNA для взрывов, проведенных на о. Новая Земля. Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены на рис. 6, 7. Данные на рис. 6 для станции NVL и на рис. 7 для станции SNA имеют узкий диапазон изменения угла ζ и хорошо согласуются с теоретическими расчетами, полученными для параметров аномалии скорости во внешнем ядре, определенным по данным станций NNET.

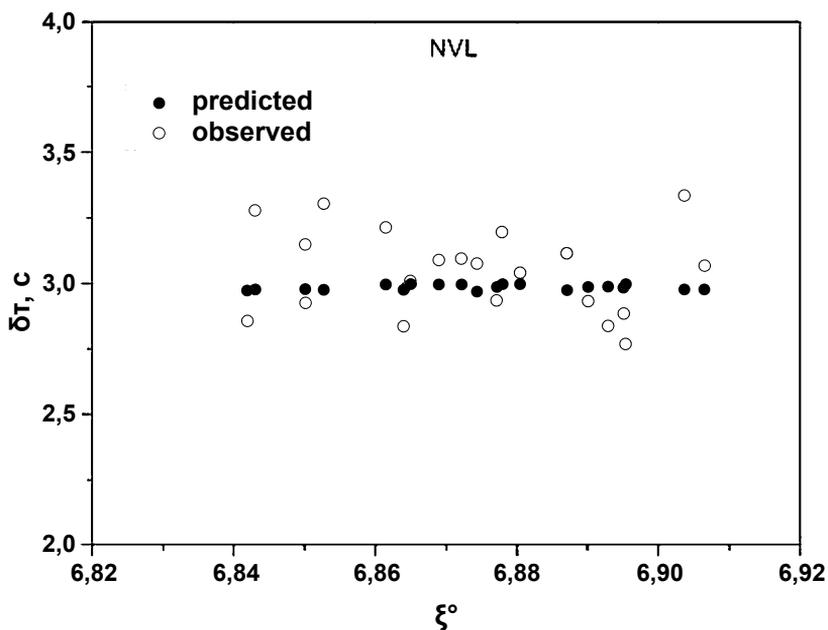


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных дифференциальных времен пробега сейсмических волн, измеренных на станциях NVL (черные кружки), и теоретические расчеты для модели с цилиндрической аномалией скорости во внешнем ядре (светлые кружки)

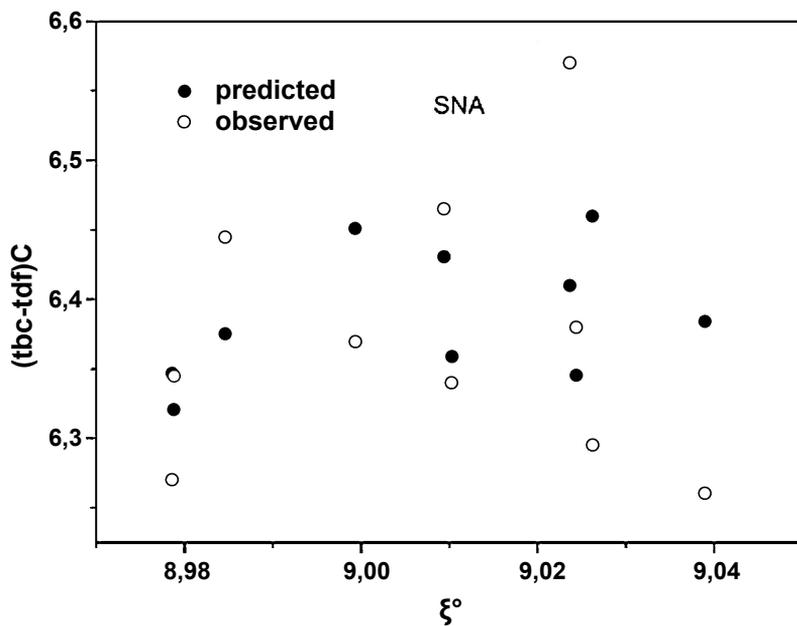


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных дифференциальных времен пробега сейсмических волн, измеренных на станциях SNA (черные кружки), и теоретические расчеты для модели с цилиндрической аномалией скорости во внешнем ядре (светлые кружки)

На рис. 8 представлены экспериментальные данные станции SYO для землетрясений на Алеутских о-вах и результаты теоретических расчетов для 0,5% цилиндрической аномалии скорости. Алеутские землетрясения имеют очень сложную форму записи в отличие от землетрясений на Ю. Сандвичевых о-вах, поэтому измерения дифференциальных невязок имеют более низкую точность, что видно из значительного разброса экспериментальных данных. Вместе с тем, экспериментальные данные состоят из двух групп. В первой, в диапазоне $25^\circ < \xi < 27^\circ$, наблюдается тенденция к росту дифференциального времени с увеличением угла ξ . Теоретические расчеты имеют такую же тенденцию. Во второй группе, в диапазоне $28^\circ < \xi < 30^\circ$, теоретические расчеты прогнозируют слабую зависимость от угла ξ , что также согласуется с экспериментальными данными. Следует отметить, что величина аномалии скорости, которая согласуется с экспериментальными данными, составляет 0,3–0,5%. Таким образом, несмотря на различие в количественной оценке величины аномалии скорости, данные станции качественно согласуются с результатами, полученными на станциях NNET.

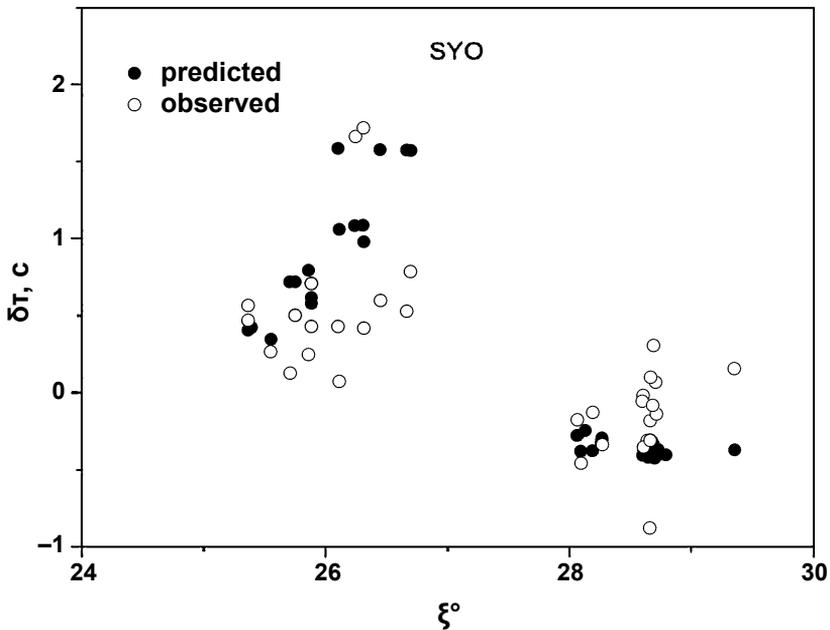


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных дифференциальных времен пробега сейсмических волн, измеренных на станциях SYO (черные кружки), и теоретические расчеты для модели с цилиндрической аномалией скорости во внешнем ядре (светлые кружки)

Таким образом, получены согласованные результаты для трех сейсмических станций SNA, NVL, NNET. Для них сейсмические лучи от рассмотренных сейсмических источников зондируют область земного ядра под Африкой. Для области земного ядра под Австралией получено качественное согласие по данным станции SYO. Из этого следует, что предложенная цилиндрическая аномалия скорости вероятно носит глобальный характер и может рассматриваться как альтернатива анизотропии внутреннего ядра.

Выбор цилиндрической формы аномалии связан с особенностями динамических процессов в жидком ядре, создаваемых совместным действием внутреннего ядра и вращением Земли, которое приводит к разделению внешнего ядра на три части: цилиндрические области в полярных областях (касательный цилиндр) и область вне касательного цилиндра. Теоретические и экспериментальные исследования [Cardin & Olson, 1994; Carrigan & Busse, 1983] показывают, что касательный цилиндр является как бы резервуаром, который обеспечивает рост внутреннего ядра за счет отвода тепла. Следует отметить, что, несмотря на хорошую согласованность экспериментальных данных с модельными расчетами, вопрос о физическом механизме возникновения и поддержания аномалии скорости во внешнем ядре остается открытым.

Экспериментальные оценки аномалии скорости, полученные в настоящей работе, на три порядка больше, чем оценки, полученные в теоретических расчетах [Stevenson, 1987] для внешнего ядра, полностью вовлеченного в конвекцию. Для любой частичной стратификации внешнего ядра наблюдаемые аномалии также значительно превышают теоретические оценки [Stevenson, 1987].

Согласование экспериментальных данных с теорией возможно, если отказаться от связи между плотностью и модулем всестороннего сжатия. Однако для изотропных материалов это приводит к исключительной реологии [Widmer et al., 1992], при которой $\partial \ln v / \partial \ln \rho > 75$. Для жидкого ядра, находящегося в гидростатическом равновесии и адиабатическом состоянии, эта величина порядка 3 [Widmer et al., 1992].

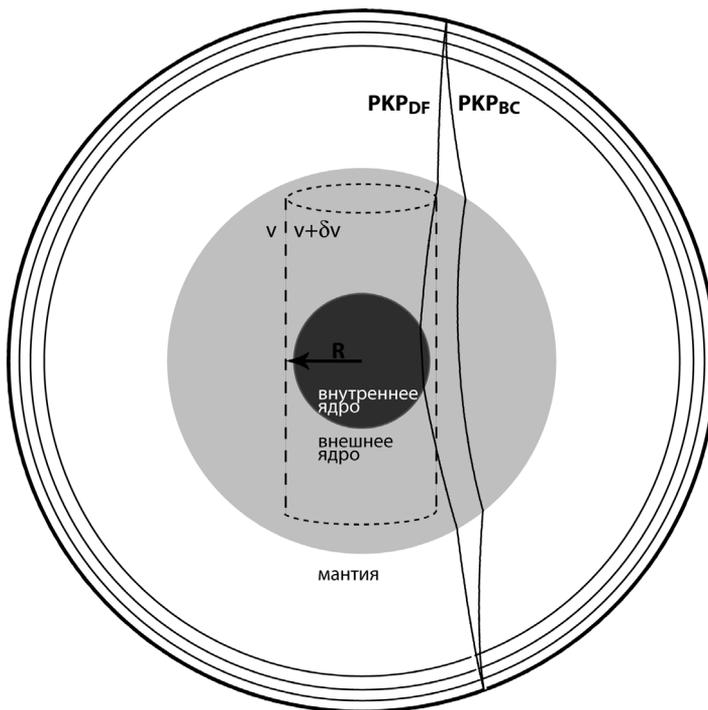


Рис. 9. Схема цилиндрической аномалии скорости и сейсмических лучей во внутреннем ядре Земли

Выводы

На станциях NRI, NRIS, NRIL наблюдается особенность изменения невязок, выражающаяся в специфической форме в виде «ковша» зависимости невязок от угла между осью вращения Земли и направлением сейсмического луча в точке максимального погружения во внутреннее ядро. Предложена модель Земли с аномалией скорости продольных волн в 0,8% в цилиндрической области радиусом 1375 км во внешнем ядре, для которой теоретические невязки дифференциальных времен пробега хорошо согласуются с экспериментальными. Схема модели приведена на рис. 9.

Прогностическая сила модели проверена на независимых данных о дифференциальных временах пробега сейсмических волн, измеренных на станциях NVL, SNA, SYO в Антарктиде. Хорошая согласованность результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет выдвинуть альтернативное объяснение невязок дифференциальных времен пробега на полярных трассах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00434).

Литература

Shearer P.M., Toy K.M., Orcutt J.A. Axi-symmetric Earth models and inner core anisotropy // *Nature*, Vol. 333. P. 228–232, 1988.

Creager, K.C. Anisotropy in the inner core from differential travel times of the phases PKP and PKIKP // *Nature*, Vol. 356, P. 309–314, 1992.

Tromp J. Support for anisotropy of the Earth's inner core from free oscillations // *Nature*, Vol. 366. P. 678–681, 1993.

Song X. Anisotropy of the Earth's inner core // *Rev. Geophys.* Vol. 35. P. 297–313, 1997.

Tanaka S., H. Hamaguchi. Degree one heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP (BC)-PKP (DF) times // *J. Geophys. Res.* Vol. 102, P. 2925–2938, 1997.

Creager K.C. Large-scale variations in inner core anisotropy // *J. Geophys. Res.* Vol. 104, P. 23127–23139, 1999.

Souriau A., and G. Poupinet. Inner core rotation: A critical appraisal, in *Earth's Core: Dynamics, Structure, Rotation. Geodynamics 31*, edited by V. Dehant, K. Creager, S. Zatman, and S.-I. Karato, p. 65–82, 2003.

Cardin P., Olson P. Chaotic thermal convection in the outer core // *Phys. Earth Planet. Int.* Vol. 82, P. 235–259, 1994.

Carrigan C.R., Busse F.H. An experimental and theoretical investigation of onset of convection in rotating spherical shells // *J. Fluid Mech.* Vol. 126, P. 287–305, 1983.

Stevenson D.J. Limits of lateral density and velocity variation in the Earth's outer core // *Geoph. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 88. P. 311–319, 1987

Widmer R., Masters G., Gilbert F. Observably split multiplets – data analysis and interpretation in terms of large-scale aspherical structure // *Geophysical Journal Int.* Vol. 111. P. 559–576, 1992.