

УДК 550.34

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЛН $PKiKP$ И PcP ПОД ВОСТОЧНОЙ АЗИЕЙ И ЗАПАДНОЙ ОКРАИНОЙ ТИХОГО ОКЕАНА

© 2022 г. В. М. Овчинников¹, О. А. Усольцева^{1*}¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: kriukova@mail.ru

Мы собрали 217 сейсмограмм с докритически отраженными волнами $PKiKP$ и PcP и получили представительные данные об их временах пробега и амплитудах. Эти волны зондируют границу между внешним и внутренним ядром Земли в 4-х районах под Восточной Азией: Дальний Восток, п-ов Камчатка, Японские о-ва и Берингово море – с пространственным распределением по долготе от 120° в.д. до 175° з.д. Все дифференциальные невязки времен пробега относительно трехмерной модели LLNL-3D в мантии и коре и модели ak135 в ядре имеют отрицательные значения от -2.0 до -0.6 с, что указывает на крупномасштабное изменение топографии внутреннего ядра. Внутригрупповые вариации дифференциальных невязок могут быть объяснены мелкомасштабными изменениями рельефа. Измеренные амплитуды волн $PKiKP$ во всех областях зондирования имеют более низкие значения, чем в стандартной модели ak135. Эти особенности, за исключением области под Беринговым морем, соответствуют синусоидальному изменению рельефа высотой менее 1 км, или же чередованию холмов высотой 2 км и линейных участков. Отношение амплитуд волн $PKiKP$ и PcP для всех групп данных, кроме станций на Аляске, соответствует в первом приближении скачку плотности 0.6 г/см^3 , как в модели ak135. Выявлено аномально низкое значение амплитуд PcP волн, отраженных от внешнего ядра вблизи координат 60°N и 180°E .

Ключевые слова: граница внутреннее-внешнее ядро; отраженные волны PcP и $PKiKP$; амплитудное отношение; дифференциальная невязка времени пробега; скачок плотности.

Для цитирования: Овчинников В.М., Усольцева О.А. Об особенностях волн $PKiKP$ и PcP под Восточной Азией и западной окраиной Тихого океана // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 1–9. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_1

Введение

На сегодняшний день общепринято считать, что и в мантии, и в ядре Земли существуют горизонтальные неоднородности как крупномасштабные, так и мелкомасштабные. Для мантии создан ряд трехмерных моделей распределения скоростей сейсмических волн и плотности. Одна из последних – модель LLNL-3D [Simmons et al., 2012]. Также предполагается наличие анизотропии упругих параметров в мантии. Внешнее ядро отвечает за структурную и тепловую конвекцию, связанную с генерацией магнитного поля Земли, и также имеет особенности пока плохо изученные.

Внутреннее ядро, вероятно, не только горизонтально неоднородно, но также является анизотропным и слоистым, но механизмы формирования этих характеристик еще не до конца исследованы [Овчинников, Краснощеков, 2021]. Происхождение анизотропии, слоистости и латеральной неоднородности имеет фундаментальное значение для понимания процессов роста и эволюции внутреннего ядра Земли. Считается, что анизотропия отражает предпочтительную ориентацию кристаллов, входящих в состав ядра, которая могла либо возникнуть во время кристаллизации ядра, либо развиться с течением времени в результате твердофазного течения; эти два механизма имеют совершенно разные последствия для эволюции ядра. Наблюдаемое расслоение могло быть вызвано изменениями химического состава, кристаллической структуры, предпочтительной ориентацией или некоторой комбинацией всех трех факторов. Опять же, они подразумевают очень разные

движущие процессы и эволюцию. Латеральная неоднородность может быть вызвана неравномерными процессами кристаллизации или даже поступательным движением самого внутреннего ядра.

Поскольку внутреннее ядро находится внутри жидкого внешнего ядра, оно изолировано от остальной части Земли; однако связь с внешним ядром и мантией (например, геомагнитная и гравитационная) не позволяет его движению быть полностью независимым, допуская только вращение и колебания. Таким образом, с одной стороны мантия, внешнее и внутреннее ядро – это одна система, в которой все процессы взаимосвязаны. С другой – наличие неоднородностей в мантии мешает провести правильный анализ особенностей, связанных только с внутренним ядром.

Короткопериодные волны *PKiKP*, отраженные от границы между внешним и внутренним ядром, являются средством, позволяющим с высоким пространственным разрешением исследовать тонкую структуру внутреннего ядра. Обычно они используются совместно с волнами *PcP*, отраженными от границы между мантией и внешним ядром. Несмотря на значительные успехи в использовании этих волн в последние 20 лет, география детального исследования областей внутреннего ядра остается недостаточной. В недавно опубликованной работе [Wang, Vidale, 2022] авторы представили начальную карту пространственного распределения мелкомасштабных неоднородностей во внутреннем ядре по коде волн *PKiKP*, наблюдаемой на расстояниях 40° – 70° .

Задача настоящей работы расширить географию исследуемых районов внутреннего ядра на новом наборе экспериментальных данных, полученных на расстояниях менее 40° , продемонстрировать различия в структуре границы внутреннего ядра под различными регионами и дать интерпретацию этих особенностей в контексте некоторых геодинамических моделей.

Данные

Для исследования используются данные от глубокофокусного землетрясения в Охотском море, зарегистрированные короткопериодными и широкополосными сейсмическими станциями на эпицентральных расстояниях 3° – 44° (рис. 1). По данным Международного сейсмологического центра

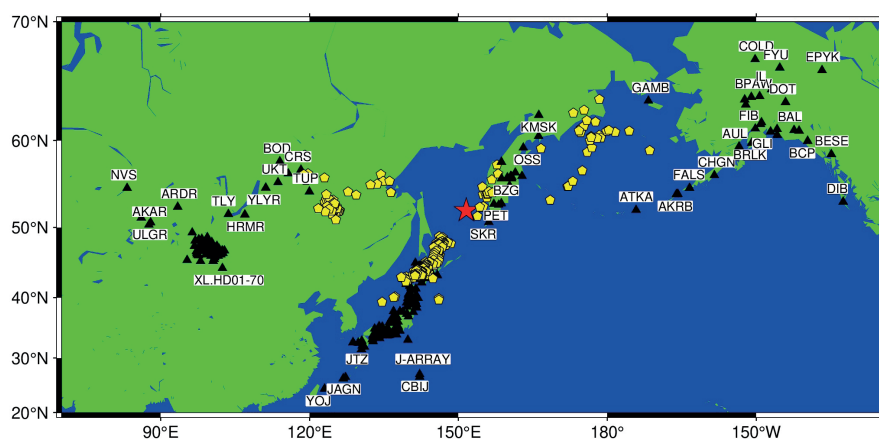


Рис. 1. Карта расположения станций (черные треугольники), землетрясения (звезда) и проекций точек отражения волны *PKiKP* от внутреннего ядра на земную сферу (желтые пятиугольники)

(ISC) координаты гипоцентра землетрясения: широта – $52^\circ.136$ с.ш., долгота – $151^\circ.569$ в.д., глубина – 632 км, время в источнике 24 мая 2013 года 14:56:31.60 (UTC), магнитуда $m_b = 6.8$. База данных включает сейсмограммы пяти групп сейсмических станций. Первая группа – 56 временных станций (сеть XL), установленных при проведении Центрального Монгольского Сейсмического эксперимента [Meltzer, 2012] на территории Хангайского горного свода в Монголии. Сейсмометры расположены с высокой плотностью на площади 440×550 км² на эпицентральных расстояниях 33° – 37° . Вторая группа – 101 станция (сеть *J-array*) Института исследования землетрясений при Университете в Токио,

расположенные в Японии (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>). Третья группа – 17 станций Камчатского филиала Единой геофизической службы РАН (ГС РАН1). Четвертая группа – 13 станций Байкальского, Алтае-Саянского и Бурятского филиалов ГС РАН и станция TLY (ГС РАН2), расположенные на севере и юге озера Байкал и в Алтае-Саянской горной области. Станции Байкальского филиала расположены на эпицентральных расстояниях 18° – 24° , Алтае-Саянского – 34° – 40° . Пятая группа – 25 станций в основном региональной сети АК [Alaska, 1987] и сейсмическая группа ILAR. Эти станции расположены на п-ове Аляска и прилегающих территориях (эпицентральных расстояния – 20° – 44° , азимутальный охват 39° – 76°).

Мы отобрали 217 сейсмограмм, на которых визуально обнаружены отраженные от поверхности внутреннего ядра волны *PKiKP* и отраженные от поверхности внешнего ядра волны *PcP* (рис. 2), и провели измерения времен вступления и максимальных амплитуд. Характеристики зарегистрированных волн *PKiKP* и *PcP* несут информацию о региональных особенностях поверхностей внутреннего и внешнего ядра под Восточной Азией, Камчаткой и западной окраиной Тихого океана (рис. 1).

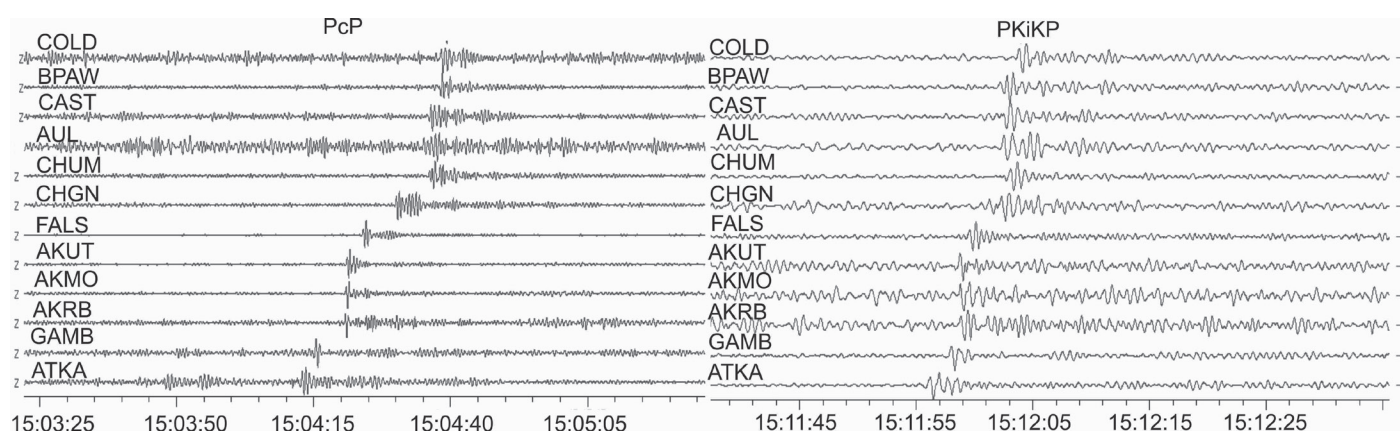


Рис. 2. Пример сейсмограмм землетрясения в Охотском море на сейсмических станциях на п-ове Аляска в диапазоне частот 1.5–6 Гц. Каждая трасса нормирована на максимальную амплитуду

Часть отобранных для анализа данных использовалась ранее для оценки скачка плотности [Krasnoshchekov et al., 2019] и возможного влияния на скачок плотности анизотропии среды под станцией [Краснощечков, 2019], а также для анализа рельефа поверхности внутреннего ядра Земли [Овчинников, Усольцева, 2021]. Новые данные сейсмических станций на Аляске, в Монголии, в Алтай-Саянах и на Байкале примерно в 2 раза расширяют базу имеющихся данных.

Анализ невязок времен пробега и амплитуд

Одна из основных трудностей использования волн *PKiKP* для исследования свойств внутреннего ядра состоит в том, что оно изолировано от прямых наблюдений неоднородными земной корой и мантией, проходя через которые свойства волн *PKiKP* окрашиваются свойствами вышележащих оболочек. Обычная практика хотя бы частичного исключения особенностей мантии и коры достигается двумя способами. Во-первых, можно использовать трехмерные модели коры и верхней мантии для корректировки времен пробега. Во-вторых, использовать дифференциальные характеристики двух сейсмических волн *PcP* и *PKiKP*, пути которых в коре и мантии находятся в пределах зон Френеля.

Для всех станций были получены невязки времен пробега $\delta t = t_{\text{измеренное}} - t_{\text{модельное}}$ волн *PKiKP* и *PcP* относительно составной модели LLNL-3D [Simmons et al., 2012] в коре и мантии и ak135 [Kennett et al., 1995] в ядре. Применение трехмерной модели скоростного строения коры и мантии Земли LLNL-3D для расчета $t_{\text{модельное}}$ позволяет учесть влияние неоднородностей в мантии. Предпочтение модели LLNL-3D, из имеющихся моделей, например, MIT-P08 [Li et al., 2008] или HMSL-S06&P06

[Houser et al, 2008] отдано потому, что в ней учитываются неровности границы раздела между нижней мантией и внешним ядром высотой порядка 1 км. Чтобы выделить в измеренных параметрах влияние только свойств внутреннего ядра, дополнительно используются дифференциальные невязки $\delta t_{\text{диф}} = \delta t_{PKiKP} - \delta t_{PcP}$. Зависимость $\delta t_{\text{диф}}$ от эпицентрального расстояния для пяти групп наблюдения показана на рис. 3.

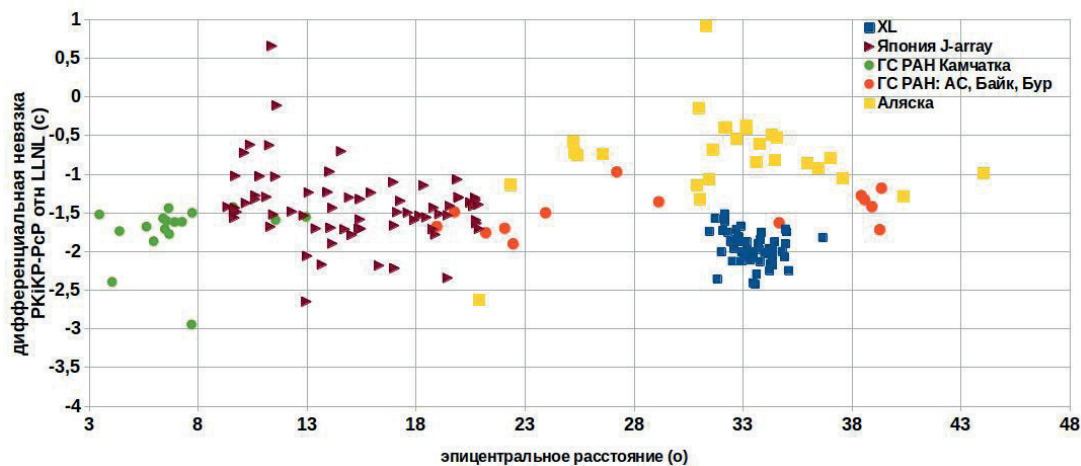
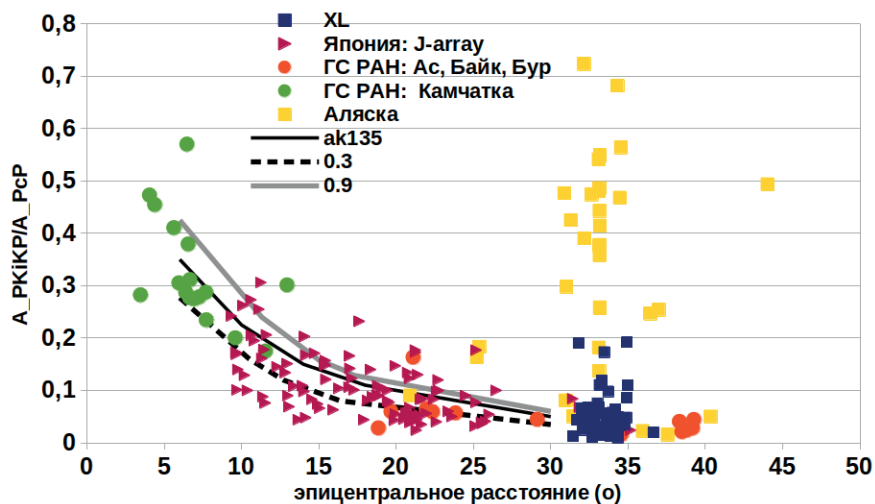


Рис. 3. Зависимость дифференциальных невязок $PKiKP$ и PcP волн $\delta t_{\text{диф}}$ от эпицентрального расстояния

Средняя невязка для станций ГС РАН2 (4 группа) равна -1.5 ± 0.3 с, а для монгольской сети XL – 2.0 ± 0.2 с, для региональной сети на Аляске -0.6 ± 0.6 с, для Камчатской сети -1.7 ± 0.4 с, для японских станций -1.4 ± 0.4 с. Самая большая средняя невязка наблюдается на западе исследуемого района внутреннего ядра, самая маленькая – на востоке. Эти данные могут указывать на существование крупномасштабного изменения рельефа (радиуса) поверхности внутреннего ядра в меридиональном направлении. Другим возможным объяснением наблюдаемых невязок является более высокая скорость распространения продольных волн во внешнем жидком ядре. При анализе пространственного распределения дифференциальных невязок, соотнесенных с точкой отражения волны $PKiKP$, выделяются зоны с повышенными и пониженными значениями относительно среднего внутри каждой группы данных. Например, для четвертой группы данных между меридианами 132°E и 136°E преобладают невязки с отрицательными значениями относительно среднего в группе, а между меридианами 118°E и 121°E – с положительными. Для данных сейсмической сети на Аляске на широте 61°N близ континента отмечается область отрицательных невязок относительно среднего, южнее преобладают положительные невязки. В области, зондированной волнами $PKiKP$, наблюдаемыми на японских станциях, на юге значения невязок меньше, чем на севере.

Рис. 4. Зависимость отношения амплитуд $PKiKP$ и PcP волн от эпицентрального расстояния для пяти групп наблюдения и трех моделей на основе ak135 с разными скачками плотности 0.6 (ak135), 0.3 и 0.9 г/см³



Рассмотрим теперь особенности амплитудного отношения A_{PKiKP}/A_{PcP} в зависимости от эпицентрального расстояния, представленные на рис. 4. Наложённые на экспериментальные данные теоретические амплитудные кривые соответствуют скачкам плотности 0.3, 0.6 (ak135) и 0.9 г/см³. За исключением пятой группы данных отношения A_{PKiKP}/A_{PcP} , как измеренных, так и теоретически рассчитанных, имеют общую тенденцию относительно быстрого уменьшения при увеличении расстояния от 5° до 30° с последующим медленным спадом на больших расстояниях.

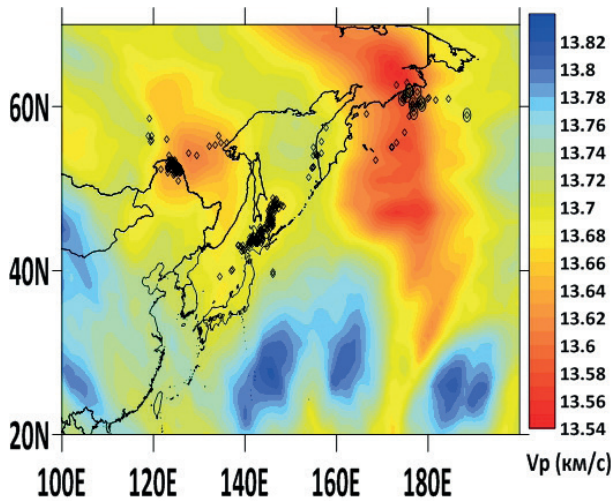
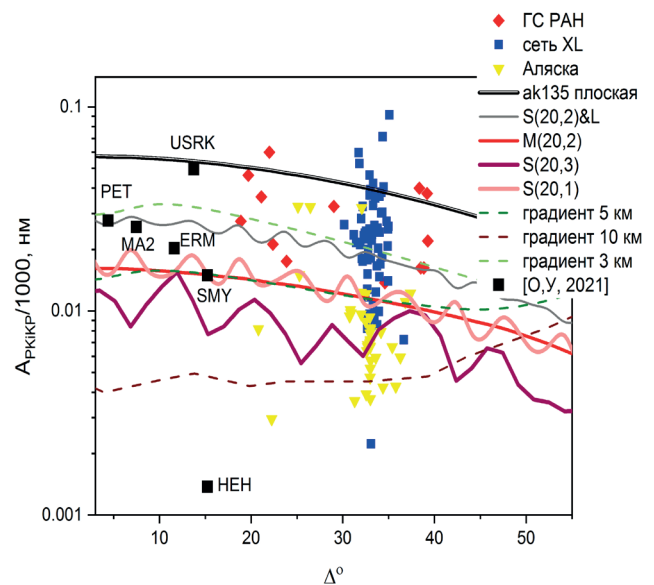


Рис. 6. Абсолютные амплитуды волн PKiKP для данных ГС РАН2 (4 группа), сети XL (1 группа), станций на Аляске (5 группа) и данных из работы [Овчинников, Усольцева, 2021], наложенные на теоретические амплитудные кривые для стандартной модели ak135 с гладкой границей внутреннее-внешнее ядро, границей с рельефом ($S(20.2)$ & L , $M(20.2)$, $S(20.3)$, $S(20.1)$) и с наличием градиентной переходной зоны различной толщины в подошве внешнего ядра. $S(20.1)$ и $S(20.3)$ – синусоидальные границы с периодом 20 км и амплитудой 1 и 3 км соответственно. $M(20.2)$ – граница, состоящая только из холмов в форме синуса с периодом 20 км и амплитудой 2 км. $S(20.2)$ & L – граница, состоящая из холмов в форме синуса с периодом 20 км и амплитудой 2 км, разделенных гладкими участками

Рис. 5 Скоростная модель LLNL-3D для P волн на границе ядро-мантия (глубина от поверхности Земли 2891 км). Черные ромбы — координаты точек отражения от поверхности внешнего ядра волны PcP для имеющегося набора данных. Дополнительно оконтурены в овал точки с амплитудным отношением более 0.4



На станциях ГС РАН2 амплитудное отношение A_{PKiKP}/A_{PcP} лежит в пределах от 0.02 до 0.06 и имеется одно аномальное значение 0.16. На станциях сети XL в Монголии A_{PKiKP}/A_{PcP} находится в диапазоне от 0.01 до 0.2. Как отмечается в [Краснощев, 2019], разброс значений может быть связан со скоростной структурой под станцией до глубин 300 км, а также с использованием различных сейсмометров: короткопериодных и широкополосных. Амплитудные отношения нескольких станций сети XL и станций Аляскинской региональной сети на эпицентральных расстояниях 32°–35° существенно отличаются и не укладываются в общую картину. В этом узком диапазоне эпицентральных расстояний A_{PKiKP}/A_{PcP} изменяется от 0.1 до 0.8. Как видно из рис. 5, местоположение почти всех точек отражения с амплитудным отношением более 0.4 близко к максимуму зоны пониженных скоростей, расположенному в северо-западном направлении, в подошве нижней мантии согласно модели LLNL-3D. Сопоставление экспериментальных данных и модели LLNL-3D дает возможность предположить, что увеличение амплитудного отношения A_{PKiKP}/A_{PcP} связано с уменьшением амплитуды волны PcP при отражении в высокотемпературной расплавленной зоне на границе мантия-ядро. Однако величина уменьшения

акустического импеданса, обусловленного более низкой скоростью, недостаточна, чтобы обеспечить уменьшение амплитуды отраженной волны PcP . Более того, проведенное в [Tkalčić et al., 2010], хотя и в диапазоне частот менее 1 Гц, моделирование волновых форм для PcP и $PKiKP$, прошедших через зону пониженных скоростей в нижней мантии, не выявило каких-либо существенных особенностей для амплитудного отношения на эпицентральных расстояниях 32° – 35° .

Диапазон изменения абсолютных амплитуд для четвертой группы данных от 11 до 48 нм, для первой группы от 6 до 73 нм, для пятой группы 3–25 нм. Амплитуды, наложенные на теоретические амплитудные кривые, представлены на рис. 6. В основном, измеренные амплитуды для всех групп данных меньше, чем предсказаны стандартной моделью ak135. Значения абсолютных амплитуд $PKiKP$ волн для станций Аляскинской сети показывают, что высокие амплитудные отношения A_{PKiKP}/A_{PcP} от 0.1 до 0.8 (рис. 4) не связаны с границей внешнее-внутреннее ядро.

Дискуссия

Дифференциальные невязки $PKiKP$ и PcP относительно LLNL-3D в коре и мантии и ak135 в ядре для всех групп данных отрицательные. И если часть невязки (0.7 с), а для пятой группы данных всю, возможно объяснить увеличением радиуса внутреннего ядра на 4 км, как в модели PREM, по сравнению с моделью ak135 (1217.5 км), то другая часть, вероятно, связана с неучтенными скоростными особенностями во внешнем ядре или мантии в этих районах. Если отнести рассчитанные значения невязок к изменению скорости продольных волн, вытекающему из модели генерации и поддержания магнитного поля Земли, в которой предполагается существование во внешнем ядре цилиндрической области (Тейлоровский цилиндр) с плотностью среды ниже, чем вне ее [Carrigan, Busse, 1983, Cardin, Olson, 1994], то тогда относительная вариация скорости во внешнем ядре может быть оценена по формуле $\delta V_p/V_p \approx \delta t_{\text{диф}}/(t_{PKiKP} - t_{PcP})$, где $t_{PKiKP} - t_{PcP}$ – время пробега волны во внешнем ядре. Для региона под Камчаткой получаем $\delta V_p/V_p \approx 0.35\%$, под Японией – 0.29%, под Восточной Азией – 0.45%. 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 [Stevenson, 1987], для жидкого ядра, полностью вовлеченного в конвекцию, изменение плотности должно быть на три порядка меньше. Вместе с тем, обнаруженная частичная стратификация верхней 300 км части внешнего ядра [Helffrich, Kaneshima, 2010], как и результаты настоящей работы, свидетельствуют об отклонениях от простой модели гидростатического сжатия и адиабатического состояния вещества, слагающего внешнее ядро.

Амплитуды на большинстве используемых станций ниже стандартной модели. Понижение амплитуды кроме неровностей рельефа для докритических $PKiKP$ волн может быть связано с наличием градиентного слоя между жидким и твердым ядром [Овчинников, Усольцева, 2021]. Представленные в [Овчинников, Усольцева, 2021] измерения амплитуд $PKiKP$ на широкополосных станциях РЕТ (Петропавловск), МА2 (Магадан), ERM (о. Хоккайдо) и SMY (Аляска), расположенных на расстояниях от 4° до 15° от эпицентра землетрясения, также отличались пониженными значениями и близки к теоретической амплитудной кривой, соответствующей изменению рельефа на 1 км при синусоидальной топографии (рис. 6). Амплитуды $PKiKP$ на станциях сети XL и станциях Алтае-Саянской, Байкальской и Бурятской региональных сетей соответствуют синусоидальному изменению рельефа высотой менее 1 км, или же чередованию холмов высотой 2 км и линейных участков, или же пониженные амплитуды связаны с существованием переходной зоны толщиной 3 км. Отношение амплитуд волн $PKiKP$ и PcP для всех групп данных, кроме станций на Аляске, соответствует в первом приближении модели ak135.

Самая восточная пятая группа данных выделяется и значениями временных невязок, и абсолютными амплитудами, и относительными амплитудами A_{PKiKP}/A_{PcP} . Точки отражения для этой группы данных расположены восточнее п-ва Камчатки. В этой области не исключено изменение высоты рельефа внутреннего ядра на 2 или 3 км, но более вероятно наличие переходной градиентной зоны толщиной от 5 до 10 км. Предпочтение градиентному варианту отдано из-за частотных характеристик волн $PKiKP$.

Они не отличаются повышенной спектральной амплитудой в диапазоне 3–5 Гц, а при синусоидальном рельефе вероятны колебания именно на этих частотах как показывает численное моделирование. Для группы ILAR и некоторых других аляскинских станций малая амплитуда волны PcP возможно связана с неоднородностями и неровностями рельефа в зоне D'' (рис. 5). В исследовании [Tian, Wen, 2017] выявлено наличие «мягкой» зоны под Охотским морем на границе внешнее-внутреннее ядро. «Мягкой» зоной назван переходный слой толщиной 4–8 км со свойствами материала средними между жидким и твердым ядром. Район $50^{\circ}N$ – $60^{\circ}N$, $165^{\circ}E$ – $180^{\circ}E$, зондированный станциями на Аляске, возможно, является северо-восточным продолжением этой зоны или ее аналогом.

Выводы

1. Дифференциальные невязки времен пробега волн PcP и $PKiKP$ относительно трехмерной модели LLNL-3D, зондирующих 4 области внутреннего ядра под восточной Азией, изменяются от -0.6 с на востоке до -2 с на западе и могут быть проинтерпретированы как крупномасштабное изменение рельефа поверхности внутреннего ядра.
2. Большая часть измеренных абсолютных амплитуд $PKiKP$ волн соответствует неровностям на поверхности внутреннего ядра в виде рельефа высотой 1–2 км и латеральным масштабом порядка 10–20 км.
3. Аномально низкие значения амплитудных отношений A_{PKiKP}/A_{PcP} под Беринговым морем частично объясняются неоднородностями на границе мантия-ядро, но условия полного согласования теоретических и измеренных амплитудных отношений на эпицентральных расстояниях 32° – 35° пока не найдены. Эта аномалия – одна из тем будущих исследований.
4. Представленный в работе набор данных расширяет области исследования внутреннего ядра, зондированные $PKiKP$ волнами, и дополняет начальную карту мелкомасштабных неоднородностей по коде волн $PKiKP$, предложенную в [Wang, Vidale, 2022].

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122040400015-5).

Благодарности

Авторы выражают благодарность заместителю директора по научной работе Единой геофизической службы РАН Р. А. Дягилеву и сотрудникам Алтае-Саянского, Байкальского и Бурятского филиалов за предоставление волновых форм с региональных станций.

Список литературы

- Краснощечков Д.Н. О смещении оценок скачка плотности на границе внутреннего ядра земли по амплитудному отношению // Динамические процессы в геосферах, вып. 11: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : ИДГ РАН. 2019, с. 43–47.
- Овчинников В.М., Краснощечков Д.Н. Сейсмические исследования ядра Земли // Физика Земли, 2021, № 2, с. 3–26.
- Овчинников В.М., Усольцева О.А. О рельефе поверхности внутреннего ядра Земли // Динамические процессы в геосферах, вып. 13: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : Графитекс. 2021, с. 73–81.
- Alaska Earthquake Center, Univ. of Alaska Fairbanks. (1987). Alaska Regional Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/AK>.
- Carrigan C.R., Busse F.H. An experimental and theoretical investigation of onset of convection in rotating spherical shells // J. Fluid Mech. 1983. V. 126. P. 287–305.
- Cardin P., Olson P. Chaotic thermal convection in the outer core // Phys. Earth Planet. Int. 1994. V. 82. P. 235–259.

Helffrich G., Kaneshima S. Outer core compositional stratification from observed core wave speed profiles // *Nature*. 2010. V. 468. P. 407–410.

Houser, C., G. Masters, P. Shearer, and Laske V. Shear and compressional velocity models of the mantle from cluster analysis of long-period waveforms // *Geophys. J. Int.*, 2008, 174. P. 195–212, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03763.x.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // *Geophysical Journal International*, Volume 122, Issue 1 p. 108–124, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>

Krasnoshchekov D., Ovtchinnikov V., Polishchuk V. Dissimilarity of the Earth's Inner Core Surface Under South America and Northeastern Asia Revealed by Core Reflected Phases//*J.Geoph. Res.-SOLID EARTH*, 2019, vol. 124, No. 5, p. 4862–4878.

Li C.R.D., van der Hilst E.R. Engdahl and Burdick S. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, 9, Q05018, doi:10.1029/2007GC001806.

Meltzer Anne (2012). Central Mongolia Seismic Experiment [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/XL_2012.

Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E. LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction // *J. Geophys. Res.*, 2012. 117, B10302, doi:10.1029/2012JB009525.

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.

Tian D., Wen L. Seismological evidence for a localized mushy zone at the Earth's inner core boundary, 2017.DOI: 10.1038/s41467-017-00229-9.

Tkalčić H.V., Cormier B. Kennett and He K. Steep reflections from the Earth's core reveal small-scale heterogeneity in the upper mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2010, 178, 80–91

Wang W., Vidale J.E. An initial map of fine-scale heterogeneity in the Earth's inner core // *Nat. Geosci.* 2022, 15, 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00903-8>.

ON PECULIARITIES OF PKiKP AND PcP WAVES UNDER EAST ASIA AND THE WESTERN PACIFIC OCEAN

V. M. Ovtchinnikov¹, O. A. Usoltseva^{1*}

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

We collected 217 seismograms with precritical reflected *PKiKP* and *PcP* waves and obtained representative data on their travel times and amplitudes. These waves probe the boundary between inner and outer Earth's core in 4 areas beneath East Asia – Far East, Kamchatka Peninsula, Japanese Islands and Bering Sea – with spatial distribution by longitude from 120°E to 175°W. All differential travel time residuals relative to the three-dimensional LLNL-3D model in the mantle and crust and the ak135 model in the core have negative values from -2.0 s to -0.6 s, indicating a large-scale change in the inner core topography. The within-group variations in the differential residuals can be explained by small-scale changes in topography. The measured *PKiKP* wave amplitudes in all sounding regions have lower values than in the standard ak135 model. These features, except for the area below the Bering Sea, correspond to sinusoidal changes in the relief with a height of less than 1 km, or an alternation of hills with a height of 2 km and linear sections. The amplitude ratios of *PKiKP* and *PcP* waves for all groups of data, except for stations in Alaska, correspond in the first approximation to a density jump of 0.6 g/cm³, as in the ak135 model. Anomalously low *PcP* amplitudes of waves reflected from the outer core near coordinates 60°N and 180°E are revealed.

Keywords: inner-outer core boundary; reflected *PcP* and *PKiKP* waves; amplitude ratio; differential travel time residuals; density jump.