

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли

В.В. Кузнецов

*Явление анизотропии свойств внутреннего ядра состоит в том, что время прохождения сейсмических волн (travel-time) через ядро вдоль оси вращения Земли оказывается примерно на 1 % меньше, чем travel-time волн, проходящих в плоскости экватора. Это явление подтверждается данными по расщеплению (splitting) спектров собственных колебаний Земли. Кроме различий в скоростных свойствах ядра вдоль оси вращения Земли и поперек нее, обнаружена пространственная (латеральная) анизотропия свойств внутреннего ядра как по данным splitting-функций, так и по данным travel-time. Обсуждаются различные попытки объяснений обнаруженного явления.*

PACS numbers: 91.35.-x, 91.30.Dk

## Содержание

1. Введение (1001).
  2. Собственные колебания Земли (1002).
  3. Расщепление мод колебаний (1003).
  4. Анизотропия скоростей (1005).
  5. Splitting-функция (1006).
  6. Отбор данных (1007).
  7. Результаты (1007).
  8. Обсуждение проблемы (1009).
  9. Заключение (1010).
- Список литературы (1012).

## 1. Введение

60 лет тому назад (1936 г.) Инге Леман открыла существование внутреннего ядра Земли. В своей статье, посвященной этому событию [1], она писала о необходимости использования новых свойств материи при описании самых глубинных частей нашей планеты. Что изменилось во взглядах на природу внутреннего ядра за эти 60 лет, ведь и до Инге Леман ядро Земли принято было считать железным? Обнаруженная в последние 10 лет анизотропия свойств внутреннего ядра, о которой пойдет речь в настоящей работе, пока объясняется свойствами кристаллического железа, т.е. примерно так же, как это было и во времена открытия И. Леман.

После открытия И. Леман, некоторые сейсмологи, анализируя волны, проходящие через внутреннее ядро, еще продолжают сомневаться в том, твердое оно или

жидкое. Они практически убеждены в том, что внутреннее ядро (G-ядро, по модели Буллена) твердое, однако прямым доказательством этого была бы регистрация волны, проходящей через G-ядро как сдвиговая, так называемой РКЖР-волны (рис. 1). Единственная публикация, посвященная обнаружению этой волны [2], не получила признания у сейсмологов. Tromp (ссылаясь на Shearer) назвал проблему обнаружения РКЖР-волн и прямого доказательства твердого состояния внутреннего ядра Holy Grail (Святым Граалем) сейсмологии [3]. (Holy Grail — святая чаша, здесь имеется в виду не столько сама чаша с кровью Христа, якобы собранной при распятии одним из его учеников, сколько символ того, что эту чашу безрезультатно искали многие поколения странствующих средневековых рыцарей.)

Внутреннее ядро, вероятнее всего, твердое, однако однозначно ответить на вопрос, твердое оно или жидкое, тем не менее до сих пор не представляется возможным. В последнее время был проведен анализ колоссального количества сейсмических трасс (310 000 согласно данным [4]), проходящих через ядро, и выявлены поистине удивительные его особенности. Речь идет об обнаружении явления анизотропии волновых свойств внутреннего ядра, состоящего в том, что скорости волн, проходящих по Земле параллельно оси ее вращения, оказываются чуть-чуть больше, чем скорости тех же волн, но когда они распространяются в плоскости земного экватора. Самое приметное состоит в том, что полученные результаты по скоростям РКЖР-волн находятся в хорошем соответствии и согласии с результатами анализа спектров собственных колебаний.

У Земли, как и у любого упругого тела, можно возбудить характерные для нее колебания. Примерами вынужденных собственных колебаний могут служить колебания колокола, скрипичной струны или столба воздуха в трубе органа и т.п. В Земле в результате сильного землетрясения возбуждаются естественные (собственные) колебания, которые иной раз могут продолжаться в течение многих часов и даже дней. Напри-

В.В. Кузнецов. Институт геофизики СО РАН,  
630090 Новосибирск, Университетский просп. 3, Россия  
Тел. (3832) 35-59-16. Факс (3832) 35-01-32  
E-mail: kuz@geophysics.uiggm.nsc.ru  
kuz@observ.nsk.su

Статья поступила 20 марта 1997 г., после доработки 28 мая 1997 г.

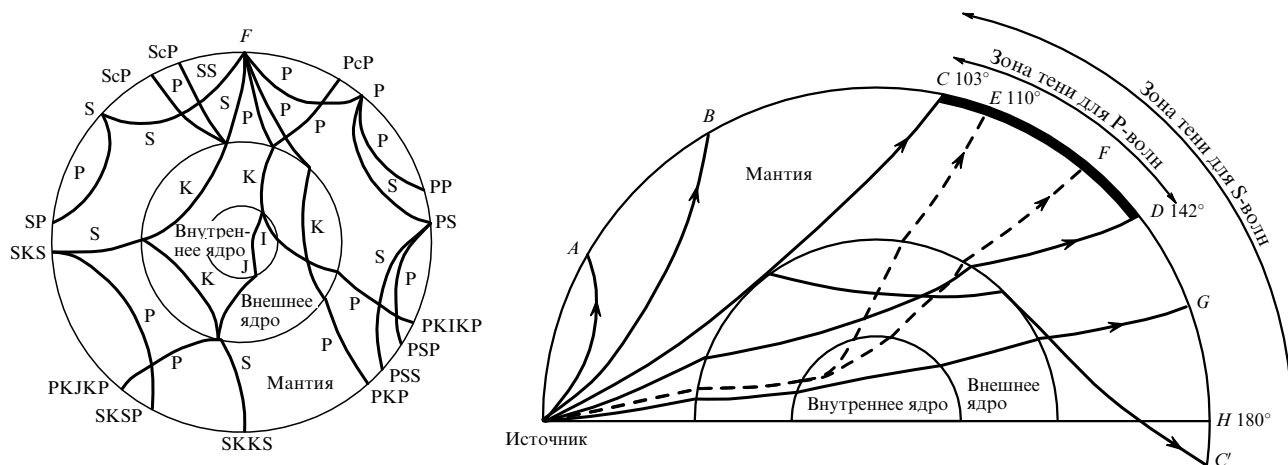


Рис. 1. Траектории сейсмических волн (и их обозначения), распространяющихся внутри Земли от источника  $F$  [25] (а). Выбранные лучи Р-волн [6] (б).

мер, длина записи колебаний после Чилийского землетрясения 1960 г. на сейсмографе станции "Изабелла" (Калифорния) составляла 16 000 мин [5]. Периоды собственных колебаний значительно различаются. Самые медленные колебания захватывают всю толщу Земли, неся информацию о составе и свойствах не только коры и мантии, но и ядра, как внешнего, так и внутреннего. Регистрируют эти колебания с помощью сети длиннопериодных сейсмографов — акселерометров, гравиметров и наклономеров. Вычисление спектров собственных колебаний представляет собой довольно сложную математическую процедуру.

Впервые собственные колебания Земли (СКЗ) были обнаружены в 1954 г. Беньоффом при анализе сейсмограмм Камчатского землетрясения 1952 г. Он отождествил основное сфероидальное колебание Земли с периодом 57 мин с соответствующим колебанием, выделенным при анализе сейсмограмм.

## 2. Собственные колебания Земли

Собственные колебания Земли можно характеризовать некоторой функцией и связанной с ней собственной частотой  ${}_n\omega_l^m$ . Число обертонов  $n$  (по аналогии с квантовой механикой — главное квантовое число), угловое (орбитальное) число  $l$  и азимутальное число  $m$  являются целыми числами, которые используются для обозначения конкретной моды колебания. Для каждого значения  $l$  существуют  $2l+1$  связанных значений  $m$ :  $m = -l, \dots, m = 0, \dots, m = l$ . Мультиплет  ${}_nS_l$  (сфероидальная мода) или  ${}_nT_l$  (тороидальная мода) представляют собой все  $2l+1$  собственных колебаний (синглетов) с одними и теми же квантовыми числами  $n$  и  $l$ . В модели сферически симметричной Земли все синглеты внутри данного мультиплета имеют одинаковую собственную частоту  ${}_n\omega_l$ . Синглеты  $2l+1$  вырожденные. Любое отклонение

Земли от сферичности убирает это вырождение и заставляет синглеты расщепляться таким образом, что каждый отдельный синглет имеет свою, отличную от других собственную частоту  ${}_n\omega_l^m$ .

На рисунках 2, 3 и в табл. 1–3 приведены структура и периоды некоторых типов СКЗ основных тонов и обертонов.

Таблица 1. Периоды собственных колебаний Земли [6]

Сфероидальные колебания		Тороидальные (крутильные) колебания	
Тип	Период, мин	Тип	Период, мин
${}_0S_0$	20,46	${}_0T_2$	43,94
${}_0S_2$	53,83	${}_0T_3$	28,37
${}_0S_3$	35,56	${}_0T_4$	21,72
${}_0S_4$	25,76	${}_0T_{10}$	10,31
${}_0S_{10}$	9,67	${}_0T_{20}$	5,993
${}_0S_{20}$	5,792	${}_0T_{40}$	3,333
${}_0S_{40}$	3,538		

Колебания типа  ${}_0S_1$  не образуются, так как при этом вся Земля должна была бы двигаться взад-вперед, а это невозможно, как невозможно поднять самого себя, потянув за шнуры собственных ботинок [6]. По мнению другого автора, это колебание не удалось зарегистрировать потому, что смещения на поверхности Земли почти горизонтальны и сравнительно малы. Теоретический период  ${}_0S_1$  составляет около 42 мин [7].

В таблице 2 приведены глубины проникновения некоторых колебаний основных тонов.

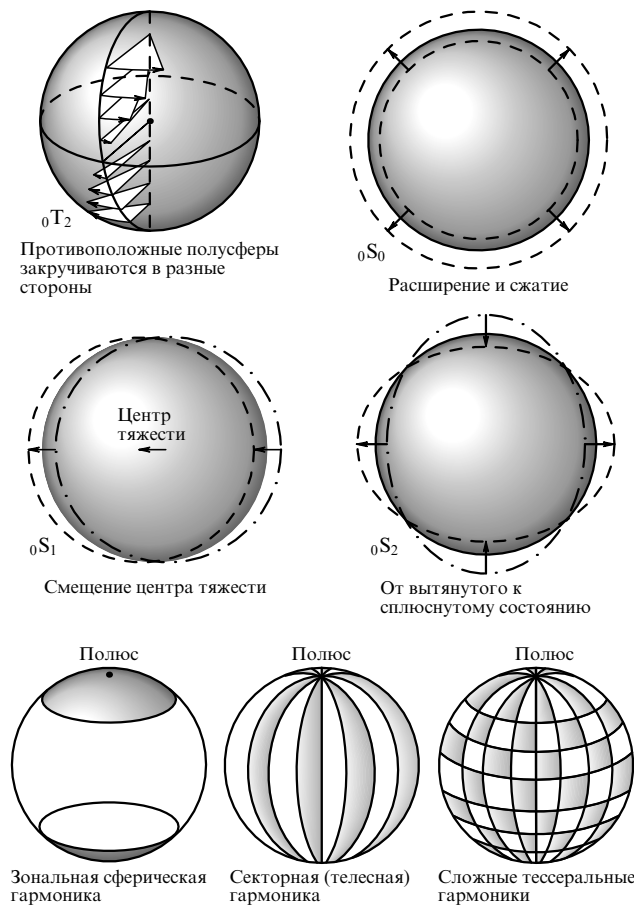
Альтерман, Ярош и Пекерис [8] привлекли внимание к классу сфероидальных колебаний, названных ими ядерными колебаниями (core oscillation). Теоретически такой тип колебаний оказался особо чувствительным к изменениям в строении центрального ядра. Амплитуды

Таблица 2. Наблюдаемые периоды основных тонов СКЗ и глубина их проникновения [7]

Тип	${}_0S_0$	${}_0S_2$	${}_0S_3$	${}_0S_4$	${}_0S_5$	${}_0S_6$	${}_0S_{10}$	${}_0S_{20}$	${}_0S_{40}$
Период, с	1227,7	3233,1	2139,2	1546,0	1188,4	962,3	579,3	347,3	212,2
Глубина, км	6370	5850	5500	5270	5090	4630	3940	2600	1400

**Таблица 3.** Наблюдаемые периоды некоторых обертонов сфероидальных СКЗ [7]

Период, с	2477,9	1470,8	904,2	804,2	724,9	613,6	398,5	305,8	243,6
Тип	${}_1S_1$	${}_1S_2$	${}_2S_2$	${}_2S_3$	${}_2S_4$	${}_1S_0$	${}_2S_0$	${}_3S_0$	${}_4S_0$

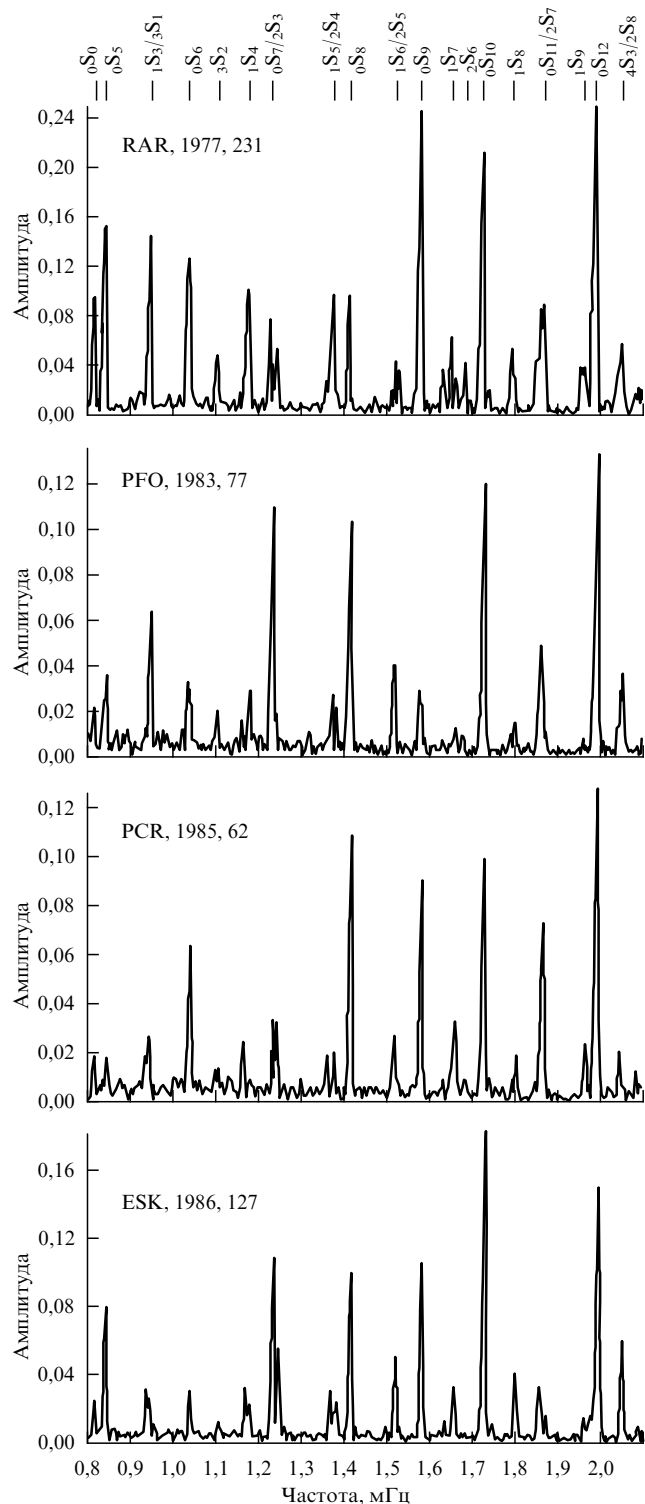


**Рис. 2.** Движения разных участков поверхности Земли при некоторых свободных (собственных) колебаниях Земли [6].

колебаний существенны только в ядре, а в мантии они пренебрежимо малы. Надо сказать, что ядерное колебание присуще только модели "В" Буллена и отсутствует во всех остальных рассмотренных авторами моделях. Напомню, что согласно модели "В" Буллена плотность вещества внутреннего ядра была примерно в 1,5 раза выше, чем ее общепринятое значение. Эта модель была признана неправомочной, однако идея ядерных колебаний в несколько искаженном виде осталась. Как будет показано ниже, в широком наборе мод СКЗ существуют колебания, обладающие повышенной чувствительностью к свойствам ядра (в том числе внутреннего) относительно свойств вещества мантии.

### 3. Расщепление мод колебаний

При анализе записей сейсмограмм катастрофического Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г. впервые был обнаружен эффект расщепления (раздвоения) частот СКЗ. Тогда же было высказано предположение, что это раздвоение вызвано вращением Земли. На основе известных классических результатов была выдвинута гипотеза о том, что во вращающемся круговом бассейне волны, бегущие по отношению к воде в направлении вращения,



**Рис. 3.** Моды собственных колебаний Земли для четырех землетрясений [24]. Запись колебаний продолжалась 75 ч.

имеют более длинные периоды, чем волны, движущиеся в противоположную сторону. Основы теории этого явления применительно к расщеплению мод СКЗ, свя-

занных с ее вращением, были заложены Пекерисом, Альтерманом и Ярошем [9]. Впоследствии было показано, что вращение Земли — не единственная причина расщепления. Необходимо учитывать также эллиптичность Земли и ее ядра, в частности.

Наибольшие отклонения Земли от сферичности обязаны ее вращению и эллиптичности. Связанное с этими явлениями расщепление представляется в виде

$$\omega^m = \omega_l(1 + bm + cm^2),$$

где индексы  $n$  и  $l$  опущены для ясности. Параметр  $\omega_l$  — центральная частота мультиплета. Эффекты первого порядка, обусловленные вращением Земли, отражает параметр  $b$ , а линейное расщепление — функция  $m$ . Эллиптичность Земли и эффекты второго порядка отражает параметр  $c$  и квадратичное расщепление —  $m^2$ .

Masters и Gilbert [10] первыми обнаружили, что величина расщепления значительно превышает теоретическую оценку, основанную на учете вращении и эллиптичности Земли. В последние годы количество аналогичных наблюдений возросло до 20 [11]. Поначалу предполагалось, что причина несогласия наблюдаемого расщепления с теоретическими оценками кроется в особенности строения границы ядро–мантия, которая, в свою очередь, как предполагалось, должна быть симметрична относительно оси вращения. Для объяснения аномального расщепления были выдвинуты три механизма. Первый основывался на учете латеральной неоднородности ядра, пропорциональной сферической гармонике  $Y_2^0$ . Такая модель, по-видимому, воспроизводит большую часть наблюдаемого расщепления, однако автор этой работы полагает, что необходимая для наблюдаемого расщепления неоднородность нереальна. Второй механизм строится на том, что учитывает пространственные неоднородности на границе внутреннего ядра и границе ядро–мантия [11]. Третий механизм учитывает аномалии времени распространения РКІР-волн и предполагает, что связанная с этим анизотропия свойств внутреннего ядра проявляет цилиндрическую симметрию относительно оси вращения Земли. Автор [11] считает, что наличием латеральных неоднородностей нельзя объяснить наблюдаемые эффекты, связанные с расщеплением.

Рассмотрим цилиндрическую анизотропию внутреннего ядра как возможную причину расщепления мод СКЗ. Простейший тип анизотропии, которая обладает цилиндрической симметрией относительно оси вращения Земли, — это поперечная изотропия, включающая пять упругих параметров:  $A$ ,  $C$ ,  $F$ ,  $L$  и  $N$  [12]. Эти параметры связаны с тензором поля, имеющим декартовы компоненты. Третья ось — это ось вращения Земли. Параметры  $C$  и  $A$  связаны со скоростью Р-волн ( $v_P^2\rho$ ), которые распространяются соответственно параллельно и перпендикулярно оси вращения Земли. Параметры  $L$  и  $N$ , в свою очередь, связаны с величинами скоростей S-волн ( $v_S^2\rho$ ), которые, аналогично предыдущему, распространяются параллельно и перпендикулярно оси вращения. Параметр  $F$  соответствует скоростям волн, распространяющихся под другими углами к оси вращения. Этот тип анизотропии, так же как вращение и эллиптичность, вызывает расщепление мод колебаний. Учет анизотропии приводит к некоторому изменению вида  $\omega^m$ :

$$\omega^m = \omega_l'(1 + bm + c^2m + c'm^2 + dm^4). \quad (1)$$

Коэффициенты  $c'$  и  $d$  описывают эффекты, связанные с анизотропией внутреннего ядра, и определяются тремя параметрами:

$$\alpha = \frac{C - A}{A_0}, \quad \beta = \frac{L - N}{A_0}, \quad \gamma = \frac{A - 2N - F}{A_0},$$

где  $A_0 = k + (4/3)\mu$  — функция объемного модуля  $k$  и модуля сдвига  $\mu$  имеет смысл квадрата скорости Р-волн. Когда  $\alpha > 0$ , Р-волны во внутреннем ядре распространяются медленнее в экваториальной плоскости, чем вдоль оси вращения Земли. Аналогично, когда  $\beta > 0$ , S-волны внутреннего ядра распространяются медленнее вдоль экватора, чем вдоль оси вращения. Третий параметр  $\gamma$  оказывает влияние на Р- и S-волны, распространяющиеся в других направлениях.

Авторы [13] на основе данных семи мультиплетов получили следующие значения коэффициентов:  $\alpha = 6,7\%$ ,  $\beta = 0,7\%$ ,  $\gamma = -2,7\%$ . Используемая авторами модель предсказывала разницу во времени распространения РКІР-волн между экваториальными и полярными путями примерно 8 с. Наблюдаемая величина составляет 2,2 с. Расхождение во времени распространения волн может быть уменьшено, если в модель ввести зависимость анизотропии от радиуса внутреннего ядра. Используя зависимость, пропорциональную  $r^2$ , авторы получили  $\alpha = 10,4\%$ ,  $\beta = 1,9\%$ ,  $\gamma = -3,3\%$  на границе внутреннего ядра, что давало 4,1 с вместо 8 с.

Распределение по радиусу внутреннего ядра трех модальных параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  представлено на рис. 4а [11]. Tromp [11] обосновывал поведение этих параметров по глубине G-ядра новыми данными по наблюдениям времени распространения Р-волн, особенно под углами  $130 - 136^\circ$ . Заметим, что он же в своей следующей работе [3] приводит уже несколько отличное от этого распределение практически тех же параметров (рис. 4б). Действительно, параметры, представляющие для нас наибольший интерес,  $\alpha = (C - A)/A_0$  и  $\varepsilon = (C - A)/2A_0$  отличаются в 2 раза, характер их поведения вдоль радиуса внутреннего ядра несколько различается, но в области границы ( $R = 1200$  км) в обоих случаях наблюдаются особенности. Это говорит, с одной стороны, о том, что анизотропия волновых свойств внутреннего ядра проявляется вблизи границы, и, с другой, о том, что знание

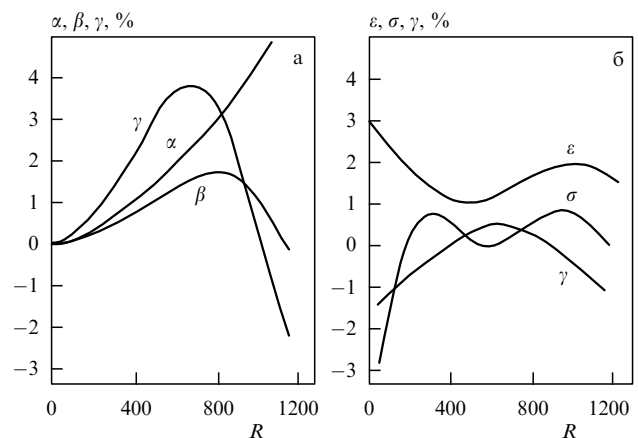


Рис. 4. Распределение модальных параметров по радиусу внутреннего ядра: (а)  $\alpha = (C - A)/A_0$ ;  $\beta = (L - N)/A_0$ ;  $\gamma = (A - 2N - F)/A_0$  [11], (б)  $\varepsilon = (C - A)/2A_0$ ;  $\sigma = (L - N)/2A_0$ ;  $\gamma = (1/2A + 1/2C - 2L - F)/4A_0$  [3].

картины распространения скоростей волн во внутреннем ядре играет решающую роль в понимании явления анизотропии.

#### 4. Анизотропия скоростей

Скорость Р-волны может быть получена из выражения

$$v_P^2 \rho = A \sin^4 \xi + C \cos^4 \xi + 2(2L + F) \sin^2 \xi \cos^2 \xi, \quad (2)$$

где  $\xi$  — угол между направлением распространения Р-волны и N–S-осью. В случае изотропии  $A = C = 2L + F$ . Авторы [14] рассмотрели анизотропию скоростей сейсмических волн как возмущение к изотропному полю. Основанием к подобному подходу может служить то, что величина возмущения не превышает единиц процентов от целого. Обозначая  $\varepsilon$  и  $\sigma$  как возмущения, получаем

$$C = (1 + 2\varepsilon)A; \quad 2L + F = (1 + \sigma)(AC)^{1/2}.$$

С учетом этого выражение для скорости Р-волны записывается в виде

$$v_P = v_{eq}(1 + \varepsilon \cos^2 \xi + \sigma \cos^2 \xi \sin^2 \xi), \quad (3)$$

где  $v_{eq} = (A/\rho)^{1/2}$  — экваториальная скорость. В этой модели предполагалось, что величины возмущений возрастают пропорционально  $r^2$  таким образом, что они максимальны на границе внутреннего ядра. Максимальные значения параметров анизотропии:  $\varepsilon = 0,032 \pm 0,005$  и  $\sigma = -0,064 \pm 0,015$  для углов  $\xi = 170-180^\circ$ .

Авторы одной из первых работ этого цикла [20], изучая анизотропию скоростей Р-волн во внутреннем ядре, определяли разность времен распространения (travel-time) РКІКР- и Р-волн (см. рис. 1). Анализ 400 наблюдений  $143^\circ$ -трасс РКІКР-волн показал, что разница в прохождении их в направлении вдоль оси вращения и поперек нее составляет примерно  $1,5 \pm 0,5$  с. Чуть медленнее волны распространяются вблизи экватора по

сравнению с волнами, регистрируемыми вблизи Северного и Южного полюсов.

Для иллюстрации эффекта в этой работе приводится пространственное распределение задержек по поверхности Земли (рис. 5). Авторы выделяют два "медленных" региона в Тихом океане с "захватом" части Южной Америки и Атлантического океана. "Быстрые" регионы располагаются на материках Северной Америки, северо-восточной части Азии, а также Австралии, Новой Зеландии и Антарктиды. Разница между "медленными" и "быстрыми" регионами составляет примерно 2 с (20 ед. на рис. 5). Изучение трасс РКІКР-волн, распространяющихся под другими углами, показало, что основная неоднородность, которая дает задержку во времени, распределена не равномерно по радиусу внутреннего ядра, а сосредоточена вблизи ее границы. Специальное уточнение этого результата было сделано в более поздней работе [22]. Здесь использовались сейсмические трассы не только от землетрясений, но и от взрывов атомных зарядов. Авторы пришли к однозначному выводу относительно того, что анизотропия волновых свойств внутреннего ядра сосредоточена вблизи его границы с внешним ядром. (Заметим, что эту точку зрения, как будет показано ниже, разделяют далеко не все авторы.) Внешнее ядро вклада в анизотропию не дает. В уже упоминавшейся нами работе [14] приведен рисунок (рис. 6), на котором показано, как изменяется латеральная анизотропия G-ядра в зависимости от угла "зрения", т.е. от угла сейсмической трассы. Группа трасс, распространяющихся под углами  $170-180^\circ$  (рис. 6а), оказывается наиболее чувствительной к цилиндрической анизотропии. Авторы [14] инвертировали эти данные для  $\varepsilon$  и  $\sigma$  и затем использовали их для коррекции других данных, изображенных на рис. 6б, в. Картина полностью изменяется на обратную, если такой коррекции не вводить. Steeger приходит к заключению, что некоторый слой толщиной примерно в 70 км, расположенный на глубине 100–300 км от границы внутреннего ядра вглубь, "отвечает" за анизотропию его волновых свойств [25]. По его мнению, цилиндрическая асиммет-

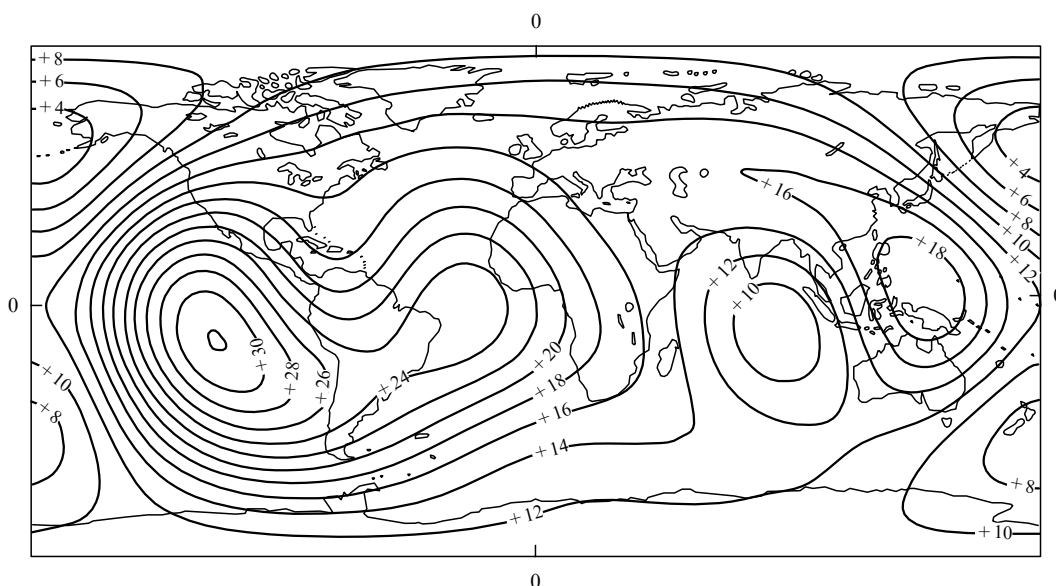


Рис. 5. Различия во времени прохождения РКІКР- и Р-волн [20]. Времена задержек приведены в десятых долях секунды. Малая величина соответствует большей скорости.

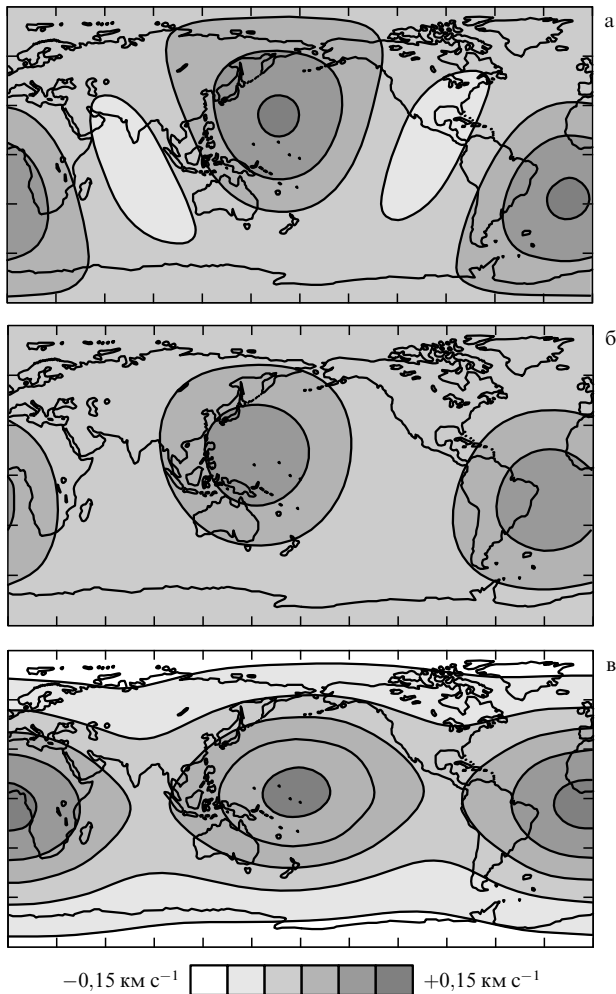


Рис. 6. Распределение латеральной анизотропии скорости Р-волн во внутреннем ядре под углами 170–180° (а), 155–170° (б), 120–135° (в). Вся шкала  $\pm 0,15$  км/с. Чем светлее, тем выше скорость Р-волн [14].

рия не является самым лучшим приближением теоретической модели и получаемых результатов наблюдений. Для лучшего совпадения автор работы [25] перемещает ось анизотропии на  $5^\circ$  относительно оси вращения Земли и помещает ее в точку (\*) с координатами  $85^\circ$  S и  $300^\circ$  E (рис. 9а). Анизотропия внутреннего ядра, несмотря на эти приемы, обладает неоднородным распределением по долготе. Однако, к примеру, в другой работе [23], выполненной на несколько лет раньше, ее авторы заранее ограничивают себя рассмотрением только цилиндрической анизотропии и приходят к выводу, что она равномерно распределена по радиусу внутреннего ядра, что, как было выяснено рядом других авторов, не совсем верно.

## 5. Splitting-функция

В ряде работ [3, 13, 15] и особенно в [16], которой мы будем в основном придерживаться, развита техника синтеза спектра колебаний и оценки величины коэффициентов  $c_{st}$ , которые полностью характеризуют расщепление данного мультиплета ( $s = 0, 2, 4, \dots, 2l$ ;  $-s \leq t \leq s$ ). Наглядное представление этих коэффициентов дается с помощью специальной функции расще-

пления (splitting-функции)  $\eta(\theta, \varphi)$ . Выясним физический смысл этой функции и входящего в нее коэффициента  $c_{st}$ .

Вклад отдельного изолированного мультиплета в наблюдаемую сейсмограмму записывается как функция времени  $t$ :

$$u(t) = \text{Re}[\exp(i\omega t) \mathbf{r} \exp(i\mathbf{H}t) \mathbf{s}], \quad (4)$$

$\mathbf{r}$  — функция (вектор) приемников,  $\mathbf{s}$  — функция (вектор) источника,  $\omega$  — частота мультиплета. Векторы  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{s}$  выражаются формулами

$$\mathbf{r}_m = R_k^m(\theta_r, \varphi_r), \quad \mathbf{s}_m = S_k^m(\theta_s, \varphi_s),$$

где  $k$  — индекс мультиплетности (объединение  $l, m$  и  $n$ );  $\theta_r, \varphi_r; \theta_s, \varphi_s$  — широта и долгота приемника и источника. Вектор  $\mathbf{s}$  зависит от тензора момента источника (землетрясения),  $\mathbf{r}$  — от ориентации сейсмографа.

Матрицу расщепления  $\mathbf{H}$  можно записать в виде

$$H_{mm'} = \Omega \beta_m \delta_{mm'} + \omega_0 \sum_{s=0} \sum_{t=-s} \gamma_{es} c_{st}. \quad (5)$$

Здесь первый член правой части уравнения характеризует вклад в расщепление сил Кориолиса:  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли, а  $\beta_m$  — параметр Кориолиса расщепления мультиплета. Коэффициент  $c_{st}$  линейно зависит от внутренней неоднородности Земли;  $\gamma_{es}$  полностью определяется  $Y_s^t(\theta, \varphi)$  — сферической гармоникой степени  $s$  и порядка  $t$ . Согласно [16] коэффициент  $c_{st}$  может быть выражен в виде

$$c_{st} = \delta_{s2} \delta_{t0} c^{\text{ell}} + \int \delta m_{st}(r) M_s(r) dr + \sum \delta h_{st} H_s, \quad (6)$$

где  $M_s(r)$ ,  $H_s$  — известные функции распределения интенсивности мультиплетов СКЗ по радиусу Земли (kernels),  $\delta m_{st}(r)$  — гармонические коэффициенты неоднородности Земли. Под неоднородностью Земли в работах по анизотропии ядра понимается относительное возмущение скоростей Р-, S-волн и плотности  $\rho$ :

$$\delta m_{st}(r) = \left( \frac{\delta v_{Pst}}{v_{Po}}, \frac{\delta v_{Sst}}{v_{So}}, \frac{\delta \rho_{st}}{\rho_o} \right), \quad (7)$$

где подстрочный индекс "о" означает отнесение данного параметра к стандартной модели Земли. Первый член выражения для  $c_{st}$  показывает вклад в расщепление гидростатической эллиптичности Земли, последний характеризует вклад в расщепление разрывов непрерывности параметров модели Земли. Заметим, что они оба обладают осевой симметрией и не должны давать латеральной анизотропии в расщеплении.

Изучение анизотропии расщепления мультиплетов СКЗ и построение splitting-функции сводится, в конечном счете, к тому, чтобы, используя набор сейсмограмм и вычисляя спектры, определить  $\delta m_{st}(r)$ . По известной  $\delta m_{st}(r)$ , зная параметры источника и приемника, находят коэффициенты  $c_{st}$ . Например, предположим, что неоднородность приводит к возникновению максимального количества мультиплетов  $s_{\text{max}} \leq 2l$ . Тогда число коэффициентов  $s_{\text{max}} = (1/2)(s_{\text{max}} + 1)(s_{\text{max}} + 2)$ . Так, для моды степени 2, для которой  $s_{\text{max}} = 4$ , имеется только 15 коэффициентов  $c_{st}$ , и они представляют все спектры этой моды (рис. 7).

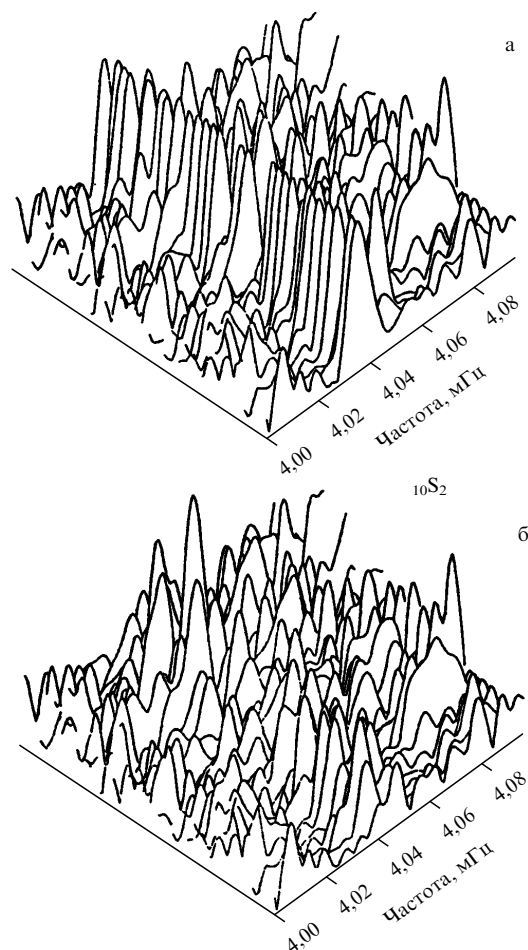


Рис. 7. Амплитуды исходного спектра колебаний моды  $_{10}S_2$  (а) и после вычитания из него синтезированного спектра колебаний этой моды (б) [24].

Наглядное представление коэффициентов расщепления  $c_{st}$  дается функцией расщепления

$$\eta(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{t=-s}^s c_{st} Y_s^t(\theta, \varphi). \quad (8)$$

## 6. Отбор данных

При отборе мод СКЗ для анализа величины расщепления авторами работ использовались только те, которые не перекрывались с другими модами, имеющими близкие частоты. Авторы реферируемых работ при отборе мод стремились также к тому, чтобы распределение максимумов интенсивности мод по радиусу Земли (kernels) максимально возможно перекрывало все глубины, захватывая мантию, внешнее и внутреннее ядра. Исследовались моды с периодами от 200 до 2000 с. В таблице 4 для шести сфероидальных мод (из 27 в [16]) кроме частоты  $f$  приведены добротность  $Q$  и коэффициенты расщепления, связанные с эллиптичностью ( $A$ ) и вращением Земли ( $B$ ), вычисленные по модели стандартной Земли (PREM). Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются следующим образом:

$$A = \frac{\alpha \varepsilon_k + \alpha' \Omega^2 / \omega^2}{2\pi}; \quad B = \frac{\beta \Omega}{2\pi},$$

Таблица 4. Параметры некоторых мультиплетов, взятых из работы [16]

Мода	$f$ , мГц	Добротность	$A$ , мГц	$B$ , мГц
$_{0}S_7$	1231,8	342	0,585	0,227
$_{1}S_8$	1799,3	379	0,960	0,771
$_{2}S_4$	1370,2	380	0,873	0,392
$_{5}S_5$	2703,3	502	1,734	0,654
$_{10}S_2$	4032,3	192	1,807	0,788
$_{11}S_4$	4766,8	702	2,787	0,055

где  $\alpha, \beta$  — параметры расщепления. Моды охватывают интервал от 0,5 до 5 мГц и демонстрируют преобладание расщепления за счет вращения ( $B$  выше, чем  $A$ ) на низких частотах и за счет эллиптичности ( $A > B$ ) на высоких.

Анализ длиннопериодных СКЗ требует использования очень долговременных записей событий, зарегистрированных инструментами с высокой чувствительностью. Весьма редкая сеть цифровых сейсмостанций начала постоянную запись сейсмической информации примерно в 1976 г. Сейсмические события большой интенсивности, достаточной для анализа расщепления мод, случаются в среднем не чаще одного события в год. Таким образом, исходного материала, пригодного для анализа, не очень много.

Для записей СКЗ, в основном, использовались вертикальные акселерометры сети International Deployment of Accelerometers (IDA), которые позволяют обнаруживать СКЗ на частотах ниже 1 мГц для достаточно сильных землетрясений, а также данные сетей Global Digital Seismograph Network (GDSN) и Geoscope. Авторы предпочитают данные IDA. Как правило, для анализа выбирались землетрясения, свободные от мощных близких повторных ударов, которые значительно усложняют картину СКЗ. В конечном счете, из исходного материала были отобраны 20 пар событий (трасс) "источник — приемник" [16], которых хватило для анализа splitting-функций всех интересующих мод. Каждое сейсмическое событие, используемое при анализе, прослеживается в течение 6 дней до события и 6 дней после него. При этом "вычищаются" форшоки и афтершоки. Каждая трасса представляется в виде цуга колебаний общей длительностью 192 ч, и затем с ней проводится фурье-анализ. Для того чтобы избежать любые возможные искажения, для каждой моды колебаний строятся синтезированные сейсмограммы и частные производные во временной области. К синтезированным функциям применяются те же фильтрация и фурье-анализ, что и для наблюдаемых. Большое внимание в работе [16] уделяется исследованию природы шумов (как естественных, так и вычислительных).

## 7. Результаты

Значение splitting-функции в географической точке с координатами  $(\theta, \varphi)$  может быть записано как

$$\eta(\theta, \varphi) = \mathbf{m} \mathbf{a}(\theta, \varphi), \quad (9)$$

где  $\mathbf{m}$  — вектор коэффициентов  $c_{st}$ , а вектор  $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$  содержит сферические гармоники для точки  $(\theta, \varphi)$ . Как и построенная карта анизотропии скоростей (см. рис. 5, 6), splitting-функция демонстрирует неоднородность строения Земли, просуммированную по ее глубине и домноженную на соответствующий kernels-коэффициент. Авторы работ по анизотропии расщепления мод СКЗ

используют относительную (нормализованную) шкалу, в которой максимальное возмущение составляет  $\pm 0,2\%$  для любой из мод. Оценка максимальных значений погрешностей показывает, что они не превышают  $40\%$  максимальных значений splitting-функции и составляют доли микрогерца (можно сравнить с величинами  $A$  и  $B$  в табл. 4). Следует заметить, что погрешность в  $0,1$  мкГц может дать фазовую разбалансировку в  $10^\circ$  после  $10$  ч накопления синтезированного сигнала. Учет погрешностей позволяет более точно измерить центральную частоту и определить splitting-функцию.

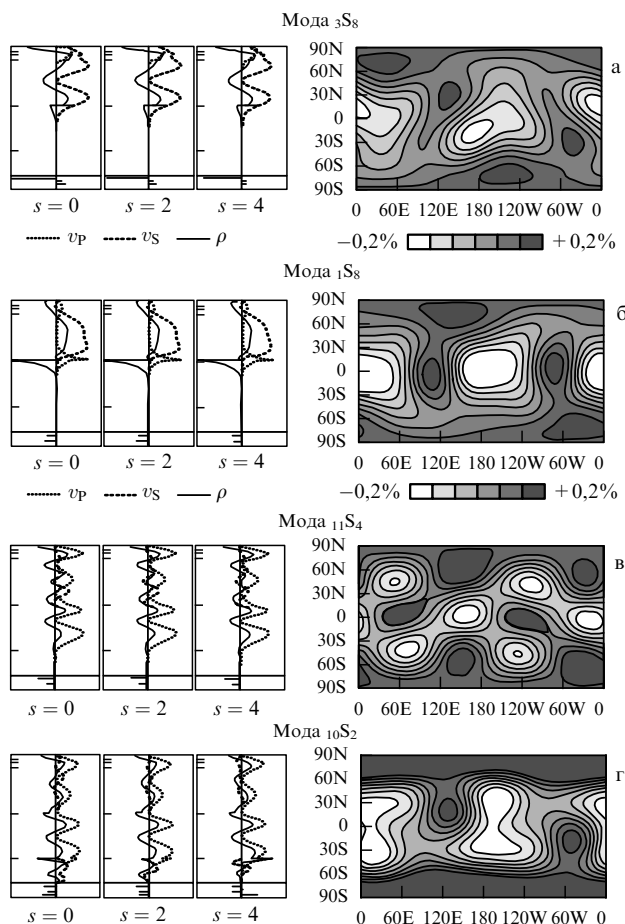
Распределение splitting-функции по глубине (kernels) и земной поверхности достаточно точно отражает трехмерную структуру Земли. К настоящему времени построены картины (patterns-образы) таких распределений для широкого набора мультиплетов, каждый из которых имеет свое распределение интенсивности по глубине (свой kernels). На рисунке 8 показаны несколько картин, каждая из которых дает вариации splitting-функции на глубинах мантии, внешнего и внутреннего ядер. Сама функция нормирована на  $1\%$  возмущения плотности ( $\rho$ ) и скоростей P- и S-волн. Слева от картин изображено распределение возмущения  $d\rho/dr$ ,  $dv_p/dr$  и  $dv_s/dr$  по глубине (kernels). Выделены: свободная (днев-

ная) граница, 670-километровый разрыв в мантии, граница ядро–мантия и граница внешнего и внутреннего ядра.

В результате проведенных исследований было выяснено, что моды  $4S_3$ ,  $5S_4$ ,  $5S_5$ ,  $5S_6$ , которые имеют периоды СКЗ от 488 до 332 с, обладают повышенной чувствительностью к неоднородности скорости P-волн. В свою очередь, моды  $1S_5$ ,  $1S_6$ ,  $2S_4$ ,  $3S_8$  ведут себя точно так же, хотя их kernels захватывает большие глубины мантии. Авторы делают вывод, что в расщеплении мод решающую роль играет сама мантия, а не какая-либо из ее границ. Это подкрепляется анализом мультиплетов  $0S_6$ ,  $0S_7$ ,  $1S_7$ ,  $1S_8$ , периоды СКЗ которых составляют от 963 до 555 с. Здесь для их kernels преобладает высокая чувствительность к неоднородности в скорости S-волн по всей глубине мантии и неоднородности в распределении  $v_p$  и  $\rho$  на границе внешнего ядра. При сравнении картин пространственного распределения splitting-функций, построенных по данным расщепления этих мультиплетов, явно заметна их схожесть (рис. 8а, б). Количественно это выражается в коэффициентах корреляции между модами  $0S_6$ ,  $1S_7$ ,  $1S_8$ , близкими к  $0,9$  и выше. Это еще раз убеждает в том, что "работает" вся мантия.

Совершенно другая картина наблюдается для мультиплетов, kernels которых приходится на внешнее ядро (рис. 8в). Анализ спектров мод  $6S_3$ ,  $11S_4$ ,  $13S_2$ ,  $13S_3$ , которые являются модами РККР-типа со слабой чувствительностью в мантии и продолжающимися во внешнее ядро, показывает, что распределение splitting-функций этих мультиплетов заметно отличается от аналогичных изображений, характерных для мантии. Периоды их СКЗ составляют от 354 до 192 с. Рисунок 8в в явном виде демонстрирует, что во внешнем ядре можно выделить шесть "светлых" и шесть "темных" областей, симметрично расположенных друг относительно друга. Строгий порядок светлых и темных пятен, показывающий распределение плотности по объему внешнего ядра, может свидетельствовать о возникновении здесь 12-ячейковой конвективной структуры, типа тессеральной гармоник  $T_4^3$ .

Splitting-функция и kernels моды  $10S_2$  показаны на рис. 8г. Эта мода занимает особое положение в истории изучения структуры внутреннего ядра [10]. Величина расщепления и характер распределения интенсивности моды по глубине для нее в большей степени, чем для других мультиплетов, зависит от того, какая используется модель Земли. (Мы уже упоминали об этой особенности так называемого ядерного колебания.) Действительно, реально наблюдаемая центральная частота и добротность этой моды много больше полученных теоретически, например, наблюдаемая величина  $Q = 800$ , тогда как расчетное значение  $Q = 192$  (см. табл. 4). Имеется по крайней мере два различных объяснения обнаруженного несоответствия. Одного из них мы уже ранее касались: хорошее совпадение эксперимента с теорией наблюдается в том случае, если допустить плотность вещества внутреннего ядра примерно в  $1,5$  раза выше, чем сейчас принято (как это следует из соответствующей модели "В" Земли Буллена), либо, как это предлагается в [16], в модели Земли несколько увеличить скорость P-волн во внутреннем ядре. Оказывается, что увеличение скорости P-волн всего на  $2\%$  приводит к тому, что теоретическая добротность согласуется со спектральными наблюдениями. Какое из этих



**Рис. 8.** Splitting-функции для различных мод СКЗ (справа). Интенсивность функции меняется от  $-0,2\%$  (белый цвет) до  $+0,2\%$  (черный). Распределение интенсивности собственных колебаний по глубине (радиусу Земли) для трех различных  $S$  ( $0, 2, 4$ ) (kernels) — слева. Kernels-функция представлена в виде изменения по глубине скоростей P- и S-волн и плотности  $\rho$ . Приведены splitting- и kernels-функции мантии (а, б), внешнего ядра (в) и внутреннего ядра (г).



решений адекватно реальной ситуации, пока не совсем понятно. Ясно одно, что расщепления скорости Р-волн и плотности внутреннего ядра заметно отличаются от структуры внешнего и больше напоминают строение мантии (рис. 8б, г).

Одним из способов проверки, насколько метод построения splitting-функции верно характеризует пространственную картину распределения неоднородности в строении Земли, служит сравнение результатов, полученных здесь, с аналогичной картиной, полученной при анализе топографии инверсий данных по времени распространения Р-волн. Для построения splitting-функции, так как свойства расщепления нормальных мод зависят от неоднородности  $\rho$ ,  $v_P$  и  $v_S$  в их сочетании, необходимо предположить закон пропорциональности между их асферическими возмущениями:

$$\frac{\delta v_S}{v_{S0}} = \alpha_{SP} \frac{\delta v_P}{v_{P0}}, \quad \frac{\delta \rho}{\rho_0} = \alpha_{\rho P} \frac{\delta v_P}{v_{P0}}. \quad (10)$$

Коэффициенты пропорциональности по данным лабораторных экспериментов [16] равны  $\alpha_{SP} = 1,25$ ,  $\alpha_{\rho P} = 0,5$ . В результате численного моделирования расщепления для нескольких мод достигается большее соответствие модельных и экспериментальных результатов, если эти коэффициенты примерно удваиваются. Надо заметить, что в результате исследования влияния асферических возмущений плотности и скоростей сейсмических волн было выяснено, что в целом изменение скорости S-волн "имеет преимущество" над возмущениями  $\rho$  и  $v_P$ . Однако это не выполняется для некоторых конкретных мод. Одни моды СКЗ наиболее чувствительны к возмущениям плотности, другие — к возмущениям Р-волн и т.п. Подбор соответствующих параметров позволяет получить для некоторых мод очень хорошее подобие splitting-функций, измеренных и синтезированных. Коэффициенты корреляции приближаются к 0,9.

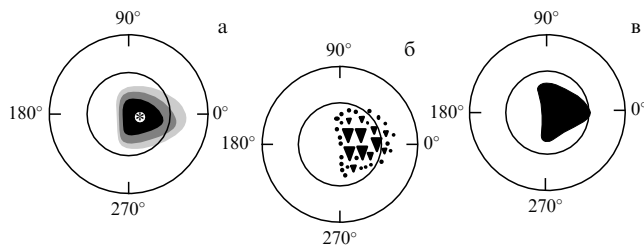
## 8. Обсуждение проблемы

Как считает J. Tromp, автор нескольких работ по splitting-функциям [3, 11], особое значение в этой проблеме придается данным, полученным после двух очень сильных землетрясений 1994 г.: 9 июня в Боливии и 4 октября на Курилах. Высококачественные данные по скоростям РКІКР-волн и splitting-функциям, полученные после этих землетрясений, послужили основой уточнения и подкрепления всего предшествующего материала. Аномальное расщепление мод СКЗ, чувствительных к структуре внутреннего ядра, подтверждено данными по скоростям прохождения РКІКР-волн и объяснено в рамках так называемой цилиндрической анизотропии внутреннего ядра. Объяснения обнаруженного явления базируются на представлении о химическом и минералогическом составе вещества внутреннего ядра. Согласно общепринятым представлениям оно состоит из гексагонально плотно упакованного железа. Это железо, находясь при  $pT$ -условиях внутреннего ядра, якобы может проявлять свойства цилиндрической анизотропии, аналогичные тем, которые выявлены сейсмическими наблюдениями. Абсолютно ясно, что такие свойства железа может проявлять, если оно находится в виде монокристалла или в состоянии, подобном ему. Ряд авторов полагают, что анизотропия свойств вещества внутреннего ядра обязана возникновению в нем конвекции. При

этом вещество ядра должно двигаться в его центре вдоль оси вращения, "вытекая" из одного полюса, и затем двигаться таким образом, чтобы "втечь" в другой. Авторы полагают, что вещество (монокристаллическое железо) должно находиться в ядре в частично расплавленном (?) состоянии. Karato предположил, что свойства цилиндрической анизотропии железо может приобрести, если на него окажет воздействие магнитное поле Земли [18]. Естественно, автор этой работы предполагал, что такое воздействие возможно, если железо во внутреннем ядре обладает магнитной (парамагнитной) восприимчивостью. Наконец, рассматривалась и третья возможность объяснения. Суть ее состоит в преимущественной ориентации железных минералов из-за вращения и самогравитации во время кристаллизации и роста внутреннего ядра. Tromp полагает, что "пока не является совсем невероятным то, что внутреннее ядро представляет собой один-единственный большой кристалл".

Обратим внимание на то, что большинство попыток объяснения обнаруженного явления ориентированы исключительно на объяснение цилиндрической анизотропии. Авторы практически всех работ как будто "не замечают" латеральной анизотропии и тем более ее похождение у внутреннего ядра и у мантии. Отчасти это утверждение не относится к работе [19], в которой Morelli и Dziewonski обсуждают проблему отсутствия латеральной неоднородности у внешнего ядра, естественно, на фоне отмеченной асферической структуры Земли во всем диапазоне глубин от центра до поверхности. Здесь в [19] отмечается особая ("драматическая", по утверждению авторов) роль границ ядро–мантия и внешнего и внутреннего ядер как своеобразных разрывов в анизотропии. Значительно большее внимание авторы уделяют особенностям распространения волн на первой границе. По их мнению, именно на границе ядро–мантия наблюдается крупномасштабная латеральная неоднородность и ее нет в самом внешнем ядре. Полученный результат подтверждает ранние предположения об отсутствии во внешнем ядре крупномасштабных неоднородностей плотности. К. Creager [25] подчеркивает, что анизотропия свойств внутреннего ядра сосредоточена на его границе, более того, анизотропия кроме свойств цилиндрической симметрии имеет явную долготную, т.е. латеральную, неоднородность. Выводы автора [25] основаны на так называемом ручном отборе данных (hand-picked), который дает лучшее (чем машинный отбор) их качество. Его результаты были подтверждены в работах [26–28]. В более поздних работах [29, 30] авторы несколько изменили представление об уровне анизотропии внутреннего ядра. Su и Dziewonski [30] использовали данные по travel-time 313 422 трасс РКІКР-волн, зарегистрированных 2 335 сейсмостанциями от 26 377 землетрясений. Здесь впервые представлено трехмерное изображение анизотропии внутреннего ядра, из которого следует, что она составляет несколько процентов и сосредоточена в слое толщиной 200–300 км на границе ядра<sup>1</sup>. Латеральное распределение анизотропии, полу-

<sup>1</sup> По полученным недавно оценкам российских геофизиков (Авдушкин В В и др. ДАН 334 382 (1997)), толщина слоя значительно меньше (2–4 км). Они использовали информацию, полученную при регистрации РКІКР-волн от ядерных взрывов, на малых эпицентральных расстояниях.



**Рис. 9.** Латеральная анизотропия скоростей РКІКР-волн во внутреннем ядре (вид со стороны Северного полушария). Чем темнее, тем выше скорости волн: черный цвет соответствует 70 %-ному отклонению от цилиндрической анизотропии, белый — 40 %-ному, промежуточные — каждый по 10 % [25]. Точка (\*) — "центр тяжести" анизотропии (а). Цилиндрическая анизотропия РКІКР-волн (вид, аналогичный виду на рис а). Различия в величине travel-time составляют большие треугольники (большая скорость) —  $-3$  с; средние треугольники —  $-2$  с; точки —  $0$  с [30] (б). Размещение материков по поверхности Земли (вид, аналогичный виду на рис. а). По углу отложена величина площади материков в процентах (в интервале  $15^\circ$  по долготу) (в).

ченное в [30], в значительной степени совпадает с данными, приведенными в [25] (рис. 9б). В обоих случаях анизотропия наблюдается в области долгот, противоположных положению Тихого океана (аналогично рис. 8г, где это можно наблюдать в распределении splitting-функции).

В последние годы наметилась тенденция по некоторому уточнению выявленных ранее особенностей анизотропии внутреннего ядра в области его исследований по расщеплению собственных колебаний. Так, например, авторы [31] пришли к заключению, что наблюдаемое расщепление может быть локализовано во внешнем (а не во внутреннем, как было принято считать) ядре. Однако чуть позже эти сомнения были отвергнуты, и в работе Gilbert [32] показано, что гидродинамические течения, существующие во внешнем ядре, не могут быть причиной наблюдаемого расщепления.

В ряде работ [33, 34 и др.] обсуждалась очень интересная проблема величины добротности колебаний  $Q$  для Р- и S-волн. В [33] была оценена добротность для Р-волн верхних 320 км внутреннего ядра как  $Q = 360$ . Добротность на S-волнах при этом оказывается порядка 50. Авторы [34] оценивают эту величину как  $110 \pm 25$ . Другие авторы оценивают добротность внутреннего ядра на Р-волнах, равной примерно 940, при этом добротность на S-волнах всегда значительно ниже. Обсуждаются различные причины таких расхождений, однако общего мнения по этому поводу пока не находится.

В [35] авторы отмечают латеральную неоднородность внутреннего ядра вблизи его границы в интервале 300 км и высокую гомогенность внешнего ядра. Сравнение проводилось по изучению разностей travel-time трасс  $BC$  и  $DF$  ( $BC = 148^\circ$ ,  $DF = 152^\circ$ , см. рис. 1), а также по сравнению амплитуд  $A_{BC}/A_{DF}$ . Большинство авторов работ по анизотропии внутреннего ядра указывают на то, что это свойство присуще сравнительно тонкому слою вблизи его границы. Напомним, что из результатов исследований пространственного распределения splitting-функций следует, что главную роль играют не границы, а сами объемы мантии и ядра. Этот вопрос специально никем не исследовался и остался пока окончательно не выясненным.

Очень важные вопросы о значении плотности внутреннего ядра и наличии РКІКР-волн также не нашли убедительной интерпретации в обсуждаемом нами цикле работ.

## 9. Заключение

По мнению большинства авторов, исследующих проблему анизотропии свойств внутреннего ядра, основной результат этих работ состоит в обнаружении различия в скорости распространения сейсмических волн, имеющих направление вдоль оси вращения и поперек нее, вдоль плоскости экватора. Величина его невелика (1 %), тем не менее различие четко выявляется на большой статистике travel-time сейсмических трасс и при анализе расщепления (splitting) мод собственных колебаний. Обратим внимание на то, что в первом случае мы имеем дело с колебаниями примерно герцового диапазона, в то время как при анализе СКЗ частоты на два-три порядка ниже. Тем не менее обнаружено очень хорошее сходство в пространственной структуре анизотропии внутреннего ядра, полученной при построении splitting-функции и при построении картины временных задержек (travel-time) РКІКР-волн. Надо заметить, что, анализируя результаты этих исследований, авторы буквально всех реферируемых работ отмечают практически только тот факт, что во внутреннем ядре наблюдается анизотропия свойств вдоль оси вращения Земли и поперек нее, в плоскости экватора. Практически не обсуждаются другие, не менее удивительные результаты. Во-первых, это то, что кроме отмеченной анизотропии четко наблюдается особенность в пространственной структуре внутреннего ядра: и splitting-функция, и временная задержка во внутреннем ядре несколько различаются для материков и океанов (в большей степени это относится к Тихому океану, см. рис. 9). Во-вторых, похожая ситуация наблюдается в мантии. Таким образом, "земная география" как бы запечатлена как в мантии, так и во внутреннем ядре (!). Причем и в том, и в другом случаях это относится скорее к границам, а не к объемам земных оболочек. В-третьих, интрига становится еще интереснее, когда мы обратимся к splitting-функции внешнего ядра, у которого "земной географии" не наблюдается, зато четко видна структура, которую можно интерпретировать как конвективные ячейки (рис. 8в). В-четвертых, не такой сенсационный, но тем не менее интересный результат состоит в том, что во внутреннем ядре теоретическая splitting-функция наилучшим образом соответствует наблюдаемой в том случае, когда плотность его вещества принимается в 1,5 раза выше, чем общепринятое значение. И наконец, в-пятых, совпадение теории с экспериментом для расщепления мод "ядерных" колебаний (во внутреннем ядре) имеет место в том случае, когда в модели учитываются S-волны (т.е. РКІКР-волны, поиск которых выше сравнивался с поиском святого Грааля). Вполне возможно, что эти волны действительно распространяются во внутреннем ядре, однако обнаружить их пока не удастся.

Обратимся к попыткам найти объяснение отмеченному феномену — анизотропии свойств внутреннего ядра. Преобладающее большинство авторов [3, 10, 11 и др.] считают, что это явление обусловлено особенностями строения внутреннего ядра, в котором железо представляет собой монокристалл, ориентированный по оси вращения Земли. Эта идея несмотря на то, что механизм возникновения такой анизотропии неясен,

авторам [14] "не кажется физически невозможной". Другие пытаются объяснить физику возникновения такого монокристалла (как считается, состоящего из железа, находящегося в гексагональной плотно упакованной фазе), привлекая для этого конвекцию во внутреннем ядре (конвекцию в монокристалле?) [21] или влияние магнитного поля на рост такого кристалла железа [18]. Совсем не к месту для объяснения привлекается так называемое истинное блуждание полюса (True polar wander) [21], которое якобы может влиять на течение железа вдоль оси, и т.п. (?). Эти попытки представляются настолько неубедительными, что нет смысла останавливаться на них более подробно, тем более, что ни один из пяти отмеченных нами результатов нигде в других работах (возможно, за исключением [19, 25]) специально не обсуждался. Отметим, что в поле нашего внимания находятся более 25 работ по анизотропии внутреннего ядра (по-видимому, большинство из опубликованных), выполненных в последние 15 лет [2, 3, 10, 11, 13–35], и некоторые другие. Все они, без исключения, указывают на то, что акустические свойства пограничного слоя внутреннего ядра отличаются от аналогичных свойств более глубоких слоев внутреннего ядра и свойств внешнего ядра. Такая же особенность наблюдается и на границе ядро–мантия. Несмотря на обилие работ и однозначность полученных результатов, авторы практически всех статей не обсуждают проявление латеральной анизотропии, ограничиваясь рассмотрением только цилиндрической. Однако можно показать, что есть способ, с помощью которого можно попытаться связать анизотропию цилиндрическую с латеральной.

Как известно, на Земле материка занимают примерно 30 % ее общей поверхности, а 70 % приходится на океаны. Если из земного шара "вырезать" цилиндр, параллельный оси вращения Земли, с основаниями, ограниченными примерно 75° широты, то площадь его торцов (учитывая Антарктиду и Арктику) будет занята материками примерно на 50 %. Если "вырезать" диск в области экватора таким образом, чтобы площадь его боковой поверхности была равна суммарной площади оснований нашего цилиндра, то здесь материка будут занимать не более 20 % площади (а 80 % — океаны). Таким образом, соотношение площадей (материки — океаны) оказывается в первом случае (в цилиндре вдоль оси вращения) примерно в 2,5 раза выше, чем во втором (в области экватора). Еще более убедительная картина получается, если построить долготную зависимость площади материков (рис. 9в). Здесь отложено отношение площади поверхности материков к общей поверхности Земли на каждые 15° по долготу. Легко видеть, что в районе Тихого океана это отношение минимально, а в районе Африки максимально. Заметная схожесть рисунков 9а и 9в (так же, как рисунков 8б и 8г) еще раз подчеркивает наш вывод о том, что "земная география" (не совсем пока ясным образом) проявляется и в мантии, и во внутреннем ядре.

Как мы отмечали и как это следует из рис. 8, максимальная разность splitting-функций по латерали составляет 0,4 %. С учетом сделанной оценки можно сказать, что анизотропия внутреннего ядра по оси вращения и поперек нее действительно должна составлять примерно 1 % ( $0,4\% \times 2,5$ ). Естественно, это не объясняет обсуждаемый в обзоре эффект, а является, скорее, переформулировкой проблемы. Однако задачу в такой новой постановке, казалось бы, можно попытаться решить... По крайней мере, качественно.

Предположим, что в некоторой области мантии, на ее границе с внешним ядром, а также на границе внешнего ядра, происходят однотипные процессы, например фазовые переходы первого рода. Можно предположить, что в области фазовых переходов коэффициент асферических возмущений ( $\alpha_{sp}$ ) может оказаться больше (или меньше), чем в соседней области. В этом случае различия в величине  $\alpha_{sp}$  могут быть свойственны веществу мантии (на границе с ядром) и внутреннего ядра (на границе с внешним), и их не должно было бы быть в веществе конвективного внешнего ядра. По-видимому, наличие эндотермических фазовых переходов может приводить к появлению наблюдаемой как цилиндрической, так и латеральной анизотропии. Акустические свойства обоих фазовых переходов могут оказаться идентичными, что, в принципе, может быть причиной однообразия картин, изображенных на рис. 8б и 8г, и проявления их "географических" особенностей, нашедших отражение на рис. 9а и 9в.

Как известно в настоящее время принято считать единственно правильной так называемую модель "холодной" Земли, внутреннее ядро которой представляет собой шар, состоящий из кристаллического железа с небольшим количеством других элементов. Внешнее ядро — это то же железо, но в виде расплава. Находясь в таких жестких, ограничивающих фантазию рамках, действительно трудно найти правдоподобное объяснение фактам, изложенным в этой статье.

Попытаемся подойти к решению этой проблемы по-другому, представив себе, что Земля, как и другие планеты и спутники, образовалась в едином процессе вместе с Солнцем и по одному с ним "сценарию" — через самогравитацию и быстрое сжатие вещества. Этот, казалось бы, наиболее очевидный путь образования и эволюции солнечной системы был признан после ряда работ О.Ю. Шмидта неверным и в течение последних 50 лет о нем забыли, хотя в более ранние времена к развитию модели "горячей" Земли "приложили руки" такие великие классики, как Декарт, Кант, Лаплас и др. Естественно, не ставя себя в этот ряд, я последние полтора десятка лет пытаюсь развить модель "горячей" Земли [36].

Суть модели "горячей" Земли состоит в том, что если ее гравитационная энергия ( $E \sim GM/R$ ) в момент образования Земли будет "использована" для нагрева ее вещества, то его температура  $T \sim E/c_p$  оказывается порядка 3 эВ ( $G$  — гравитационная постоянная,  $M$  — масса, а  $R$  — радиус Земли,  $c_p$  — теплоемкость). Вещество Земли, обладающее такой температурой, должно находиться в состоянии газа (слабоионизированной плазмы). Плотность сжатой мегабарным давлением в центре Земли плазмы может достигать десятки грам на кубический сантиметр и более и вполне соответствовать плотности вещества внутреннего ядра. Вещество в состоянии "астрофизической плазмы" [37], когда длина волны де Бройля электронов становится сравнимой с расстояниями между атомами, может обладать квантовыми свойствами. Здесь при выполнении условия  $\Gamma = E_c/E_k > 178$  ( $E_c = Ze^2/r$  — энергия кулоновского взаимодействия,  $E_k = kT$ ) на границе сжатой плазмы (т.е. на границе внутреннего ядра Земли) может возникнуть двумерный электронный кристалл Вигнера [37, 38] в виде 2D-слоя с аномальными свойствами. Известно, что вигнеровский кристалл, несмотря на то, что это всего лишь плазма, обладает свойствами, присущими твердым кристаллическим веществам, и, в частности, через него

способны распространяться Р- и S-волны. Возможно, именно такой подход к состоянию вещества внутреннего ядра позволит объяснить его анизотропию<sup>2</sup>. Возможно, двумерная вигнеровская кристаллизация на границе внутреннего ядра откроет принципиально новую возможность решения "проблемы № 1" в физике Земли — проблемы генерации ее магнитного поля, например, используя квантовый эффект Холла, который, как известно [39], проявляется при наличии в структуре вигнеровского кристалла. Создание принципиально новой модели генерации магнитного поля Земли и других планет тем более актуально, что несмотря на 50 лет развития идеи магнитного динамо, она так до сих пор и не оказалась способной объяснить большое количество их особенностей.

В подтверждение тому, что с динамо "не все в порядке", обратим внимание на результат, приведенный на рис. 8в, касающийся структуры внешнего ядра. Если интерпретировать его как конвекцию типа тессеральной гармоник, то это совсем не та конвекция, которая постулирована в модели магнитного динамо.

Заключая обсуждение проблемы анизотропии внутреннего ядра, нельзя не отметить высокий вычислительный уровень серии реферируемых работ. Обратим внимание на то, что обнаружен эффект порядка 1 % и менее. Обсуждается различие свойств Земли во внутреннем ядре с точностью в доли процента (!). Выявлено, что различия, ответственные за анизотропию свойств внутреннего ядра, приурочены к его границе. Оценена толщина этого слоя. Аналогично этому показано, что анизотропия свойств мантии также проявляется на границе ядро — мантия. Выполнена объемная работа по синтезу сейсмограмм, их спектральному анализу, коррекции скоростных и плотностных моделей Земли, корреляции синтезированных сигналов с получаемыми в результате наблюдений, которые, в свою очередь, прошли непростой путь чистки, фильтрации и т.п. В целом можно считать, что в физике Земли выполнена серия хороших работ, направленных на то, чтобы вывести эту науку из созерцательно-описательного состояния, в котором она еще пребывает, и сделать ее точной.

<sup>2</sup> Еще раз обратимся к И. Леман: возможно, именно квантовые свойства вещества внутреннего ядра она имела в виду, когда говорила об использовании новых свойств материи при описании самых глубинных частей нашей планеты.

Автор благодарит И.И. Нестерову и Г.В. Нестерова за помощь в подборе и подготовке статей для настоящего обзора.

## Список литературы

1. Lehman I, in *Bureau Centrale Seismologique Internationale* (Travaux Scientifiques 1936) **A14**
2. Julian B R, Davies D, Sheppard R M *Nature* (London) **235** 317 (1972)
3. Tromp J *GSA Today* **5** (1995)
4. Su W, Dziewonski A M *J. Geophys. Res.* **99** 6945 (1994)
5. *Собственные колебания Земли* (Под ред. В Н Жаркова) (М.: Мир, 1964)
6. Браун Д, Массет А *Недоступная Земля* (М.: Мир, 1984)
7. Буллен К Е *Плотность Земли* (М.: Мир, 1978)
8. Альтерман З, Ярош Х, Пекерис Х Л, в сб. *Собственные колебания Земли* (Под ред. В Н Жаркова) (М.: Мир, 1964)
9. Пекерис Х Л, Альтерман З, Ярош Х, в сб. *Собственные колебания Земли* (Под ред. В Н Жаркова) (М.: Мир, 1964)
10. Masters G, Gilbert F *Geophys. Res. Lett.* **8** 569 (1981)
11. Tromp J *Nature* (London) **366** 678 (1993)
12. Love A E H *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* (Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1927)
13. Woodhouse J H, Giardini D, Li X *Geophys. Res. Lett.* **13** 1549 (1986)
14. Morelli A, Dziewonski A M, Woodhouse J H *Geophys. Res. Lett.* **13** 1545 (1986)
15. Woodhouse J H, Giardini D *EOS* **66** 301 (1985)
16. Giardini D, Li X D, Woodhouse J H *J. Geophys. Res.* **93** 13716 (1988)
17. Phinney R A, Burridge R *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **34** 451 (1973)
18. Karato S *Science* **262** 1708 (1993)
19. Morelli A, Dziewonski A M *Nature* (London) **325** 678 (1987)
20. Poupinet G, Pillet R, Souiau A *Nature* (London) **305** 204 (1983)
21. Jeanloz R, Wenk H-R *Geophys. Res. Lett.* **15** 72 (1988)
22. Song X, Helmberger D V *Geophys. Res. Lett.* **20** 2591 (1993)
23. Shearer P M, Toy K M, Orcutt J A *Nature* (London) **333** 228 (1988)
24. Ritzwoller M, Masters G, Gilbert F *J. Geophys. Res.* **93** 6369 (1988)
25. Creager K C *Nature* (London) **356** 309 (1992)
26. Song X D, Helmberger D V *J. Geophys. Res.* **96** 6573 (1992)
27. McSweeney T J, Creager K C *EOS* **74** 407 (1993)
28. Vinnik L, Takeshita T, Dreger L *Geophys. Res. Lett.* **21** 1671 (1994)
29. Shearer P M *J. Geophys. Res.* **99** 19647 (1994)
30. Su W J, Dziewonski A M *J. Geophys. Res.* **100** 9831 (1995)
31. Widmer R, Masters G, Gilbert F *Geophys. J. Int.* **111** 559 (1992)
32. Gilbert F *Geophys. J. Int.* **116** 227 (1994)
33. Bhattacharyya J, Shearer P, Masters G *Geophys. J. Int.* **114** 1 (1993)
34. Widmer R, Masters G, Gilbert F *Geophys. J. Int.* **104** 541 (1991)
35. Kaneshima S et al. *Geophys. Res. Lett.* **21** 157 (1994)
36. Кузнецов В В *Физика Земли и солнечной системы* (Новосибирск: ИГиГ, 1990)
37. Van Horn H M *Science* **252** 384 (1991)
38. Аврорин Е Н и др. *УФН* **163** 1 (1993)
39. Пудалов В М *УФН* **164** (9) 997 (1994)

## Anisotropy of the Earth's inner core properties

V.V. Kuznetsov

*Institute of Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Universitetskii prosp. 3, 630090 Novosibirsk, Russia*

*Tel. (7-3832) 35-59 16*

*Fax (7-3832) 35-01 32*

*E-mail: kuz@geophysics.uiggm.nsc.ru, kuz@observ.nsk.su*

Anisotropy of the Earth's inner core properties can be seen from the fact that the time a seismic wave takes to cross the core along the Earth's rotation axis is 1 % less than the time a wave takes to cross the core in the equator plane. Another piece of evidence comes from data on the splitting of the Earth's eigen oscillation spectra. In addition to the velocity difference between crossing the core along versus normal to the rotation axis, a lateral core anisotropy has been discovered both from function splitting and travel time data. Attempts at explaining this phenomenon are discussed.

PACS numbers: **91.35.-x, 91.30.Dk**

Bibliography — 39 references

*Received 20 March 1997, revised 28 May 1997*