

УДК 550.311

## СКОРОСТЬ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ЗЕМНОМ ЯДРЕ. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2003 г. В. Ю. Бурмин

Представлено академиком В.Н. Страховым 19.08.2002 г.

Поступило 21.08.2002 г.

На основе монтажа записей сейсмических колебаний от глубокофокусных землетрясений, зарегистрированных мировой сетью, построены годографы рефрагированных и отраженных короткопериодных продольных сейсмических волн, распространяющихся в ядре Земли. По этим годографам получен скоростной разрез земного ядра, хорошо согласующийся с наблюдаемыми данными и объясняющий природу “предвестников” – колебаний, выходящих в первые вступления на поверхности Земли на эпицентральных расстояниях  $134^\circ$ – $142^\circ$ . Особенностью скоростного разреза во внешнем ядре является наличие в его низах слоя мощностью около 500 км с высоким градиентом скорости и сразу под ним слоя с пониженной скоростью мощностью около 200 км (зона *F*). Во внутреннем ядре скорость сначала увеличивается довольно сильно до глубин примерно 5500 км, а затем к центру Земли меняется практически линейно, с чуть большим градиентом, чем это принято в стандартных моделях.

### ВВЕДЕНИЕ

Первое указание на существование земного ядра получил Р. Олдгем в 1906 г. при исследовании записей землетрясений вблизи антицентра. Он установил существование скачка скорости приблизительно на середине радиуса Земли.

К 1914 г., когда был построен общий скоростной разрез Земли для продольных волн *P*, Б. Гутенберг показал, что на глубине около 2900 км скорость  $v_p$  продольных волн уменьшается от 13.5 до 8.5 км/с. Область ниже этой глубины получила название земного ядра.

В 1936 г. И. Леманн предположила, что ядро состоит из двух частей – внешнего и внутреннего ядра и что скорость во внутреннем ядре больше. Чуть позже это подтвердил Г. Джеффрис [1]. Он дал ставший классическим разрез ядра, осно-

ванный на ветвях годографа рефрагированных волн *PKP1* и *PKP2*, имеющих разные наклоны. Распределение скорости, полученное Г. Джеффрисом, включает переходный слой между внешним и внутренним ядром, занимающий область  $0.36R < r < 0.40R$ , т.е. между глубинами 4980 и 5120 км. Позднее этот слой был назван зоной *F*. Г. Джеффрис ввел в этой части ядра отрицательный градиент скорости волн *P*, равный  $\frac{dv_p}{dz} = -0.0075 \text{ с}^{-1}$ . На нижней границе зоны *F* Г. Джеффрис ввел скачок  $v_p$  от 9.40 до 11.16 км/с.

Б. Гутенберг и Ч. Рихтер [2, 3] получили распределение  $v_p$  непрерывное для всего ядра, но с большими положительными градиентами в некотором интервале глубин, приблизительно приходящемся на зону *F*.

В 50–60-е годы было показано, что годограф *PKP* имеет еще дополнительные ветви, соответствующие волнам с промежуточными кажущимися скоростями, распространяющимися в области между внутренним и внешним ядром. Начиная с 50-х годов появляются данные о том, что на эпицентральных расстояниях от  $125^\circ$  до  $140^\circ$  перед волнами *PKP* наблюдаются волны–“предвестники” с периодами 0.5–1 с, которые вступают примерно на 10–20 с раньше, чем *PKP1*, имеющие период около 2 с и больше [4, 5].

Б. Болт [6, 7] показал, что значительное количество наблюдений волн *PKP* и их “предвестников” можно объяснить в рамках лучевой теории, если ввести дополнительную ветвь годографа на расстояниях от  $124.0^\circ$  до  $160.0^\circ$  и соответствующий ей переходный слой с двумя скачками скорости (на глубинах около 5000 км), а в остальном оставить модель Г. Джеффриса. В период 1964–1970 гг. модель Б. Болта, благодаря своей параметрической простоте, часто использовалась для оценки плотности во внутреннем ядре.

При создании модели PREM А. Дзивонский и Д. Андерсон [8] придерживались гипотезы о том, что ядро состоит из двух гомогенных частей.

Одна из современных сейсмологических моделей, получивших широкое признание, – модель

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева,  
Российской Академии наук, Москва

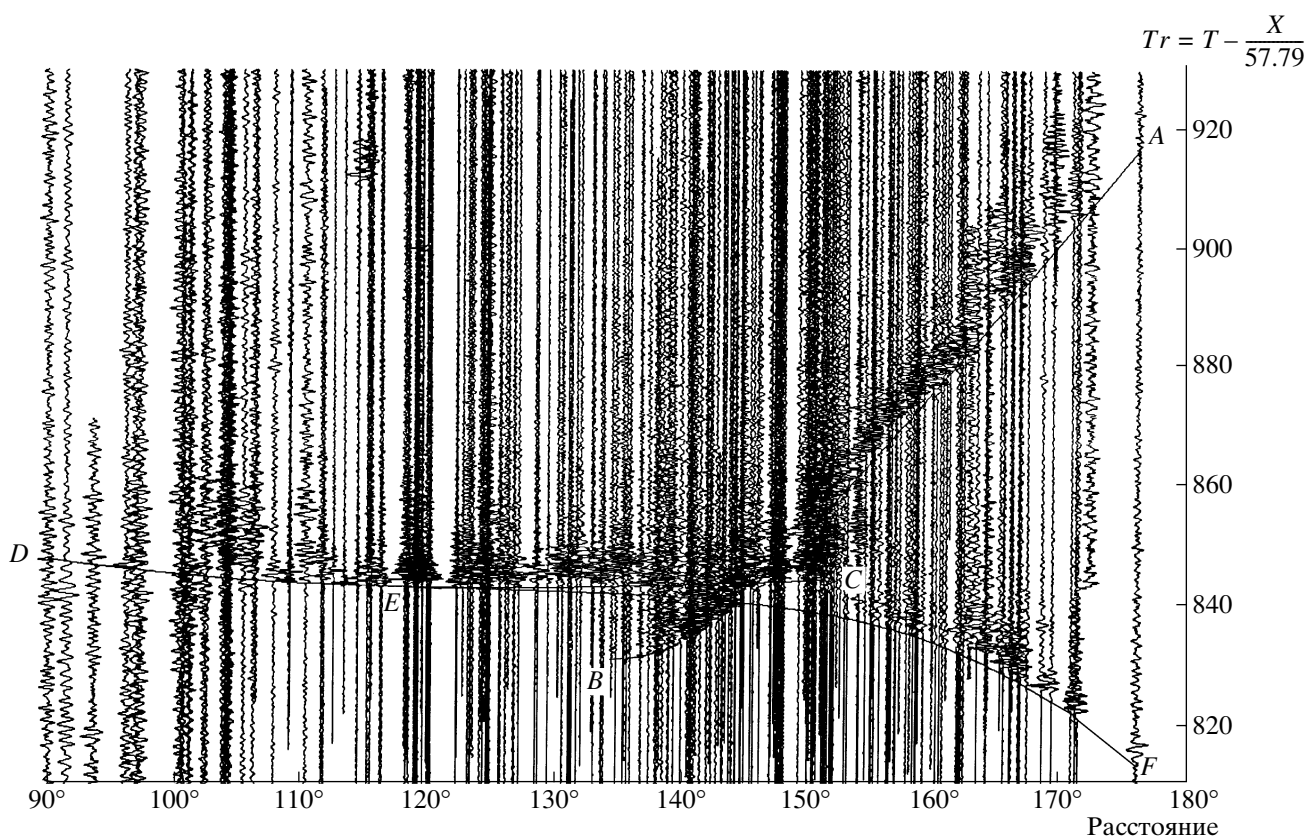


Рис. 1. Монтаж сейсмограмм и теоретические годографы для скоростной модели, полученной автором.

IASPEI 91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [9] – также построена на основе предположения о том, что ядро состоит из двух однородных частей, на границе которых на глубине  $z = 5153.9$  км существует скачок скорости  $\Delta v = 0.84$  км/с.

В настоящей работе ставится задача построения модели скоростного строения ядра, наилучшим образом удовлетворяющая экспериментальным сейсмическим данным.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для решения поставленной задачи в работе используются экспериментальные данные, содержащие записи сейсмических волн, прошедших через земное ядро, и позволяющие построить соответствующие им годографы для интерпретации. В настоящее время станции мировой сейсмической сети регистрируют практически все крупные события, волновая картина которых позволяет изучать скоростную структуру ядра. Нами были использованы цифровые сейсмические данные Национального информационного центра (NEIC) мировых сейсмологических данных департамента геологической службы США, полученные мировой сетью за период с 1980 по 1988 г. Данные содержат записи длиннопериодных, промежуточ-

ных и короткопериодных сейсмографов. С точки зрения разрешающей способности сейсмических волн предпочтительнее всего работать с записями короткопериодных приборов (с полосой пропускания от 0.1 до 6 Гц).

Для интерпретации были привлечены записи сейсмических волн от землетрясений глубже 100 км и магнитудой больше 5.5. Все записи отфильтрованы в полосе частот 0.5–5.0 Гц и приведены к одному источнику с глубиной 500 км с учетом разности времен пробега волн и сейсмического сноса. Данные представлены в виде монтажа сейсмограмм в диапазоне эпицентральных расстояний  $90^\circ$ – $180^\circ$  и времен 810–930 с, в редукции 57.79 км/с (рис. 1) и каждая запись нормирована на максимальную амплитуду колебаний в трассе. Всего в монтаже, представленном на рис. 1, содержится 263 записи вертикальной компоненты сейсмографов. На рис. 1 на монтаж сейсмограмм нанесены также и теоретические годографы рефрагированной и отраженной волн, рассчитанные по новой модели.

### КОРРЕЛЯЦИЯ ВОЛН

Как видно из монтажа, колебания, прошедшие через внутреннее ядро и соответствующие ветви годографа *AB*, четко, хотя и с небольшой относи-

тельной амплитудой, просматриваются на эпицентральных расстояниях  $176^\circ$  и непрерывно переходят в “предвестники” и продолжают до эпицентральных расстояний вплоть до  $134^\circ$ . Точка *B* является предельной точкой этой ветви годографа. Таким образом, “предвестники” представляют собой не что иное, как продолжение той же волны, которая распространяется во внешнем ядре. Так как точка *B* является предельной точкой ветви, то, очевидно, годограф имеет разрыв, связанный с наличием волновода (зона *F*) непосредственно над внутренним ядром (зона *E*).

Колебания, соответствующие ветви годографа *CD*, связаны с распространением рефрагированной волны в низах зоны *F* или отраженной от внутреннего ядра волны, или то и другое одновременно (годограф отраженной волны непрерывно переходит в годограф рефрагированной волны). Ветвь *EF* огибает колебания, распространяющиеся во внутреннем ядре.

Хотя качество записей мировой сети оставляет желать лучшего, так как некоторые трассы несколько “выпадают” из общей картины (ошибка во времени для них достигает 1 с), тем не менее, если не вдаваться в тонкие детали, точности данных достаточно для интерпретации волнового поля на данных эпицентральных расстояниях.

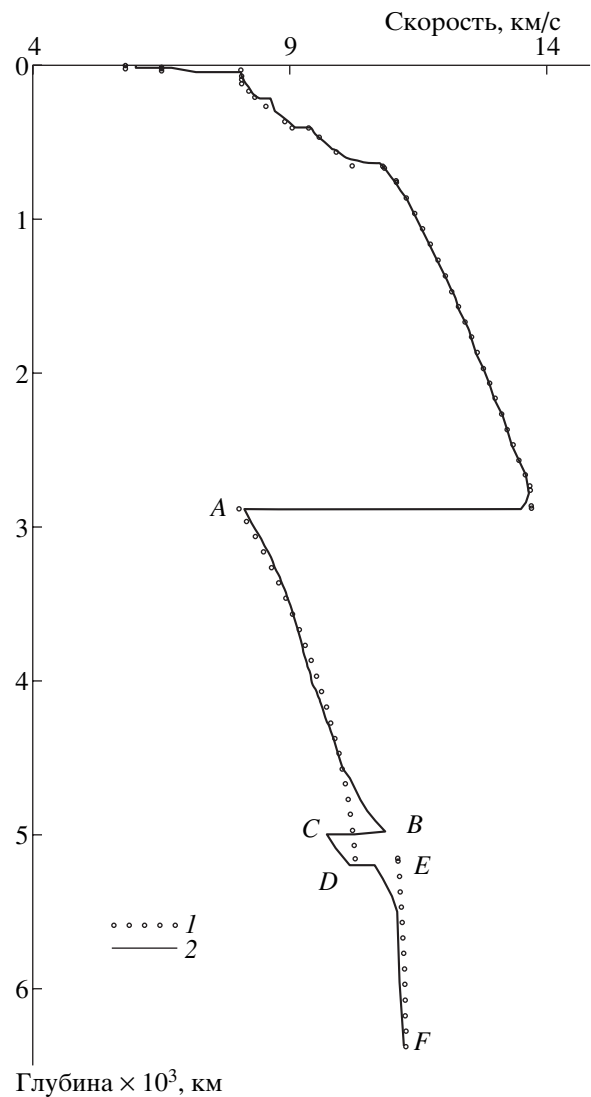
### СКОРОСТНОЙ РАЗРЕЗ ЗЕМНОГО ЯДРА

На основе проведенной корреляции сейсмических волн были построены экспериментальные годографы рефрагированных (*AB* и *EF*) и отраженной (*CD*) волн (рис. 1), которые практически полностью совпадают с теоретическими годографами, и по ним проведено решение обратной кинематической задачи. Для определения скоростного разреза в ядре распределение скорости в верхней части Земли, т.е. распределение скорости распространения объемных волн в коре и мантии, было взято из работ [11, 12].

В настоящей работе обратная задача решается с помощью формул обращения разрывных годографов рефрагированных и годографов отраженных волн, полученных ранее автором [10].

Для более точного определения скоростной кривой решалась прямая кинематическая задача для сферически-симметричной Земли, т.е. по заданному скоростному разрезу строился годограф, который должен был согласоваться с экспериментальными данными. Результаты решения прямой задачи показали, что полученный скоростной разрез может рассматриваться в качестве решения обратной задачи.

Остановимся подробнее на некоторых деталях полученной скоростной кривой (рис. 2). Прежде всего заметим, что значение скорости на кровле



**Рис. 2.** Распределение скорости продольных волн в Земле. 1 – модель IASPEI 91; 2 – модель с монотонно убывающей функцией  $v(r)/r$  на сегменте 2652–3478 км, что соответствует глубинам 3719–2893 км.

внешнего ядра равно 8.1 км/с. Это значение больше, чем соответствующее значение в модели IASPEI91 (8.0 км/с), и близко к значению в модели PREM (8.105 км/с).

Зона тени во внешнем ядре распространяется до глубин 3956 км. На этой глубине градиент скорости сейсмической волны начинает увеличиваться по отношению к вышележащему слою. При этом начальная точка соответствующей ветви *AB* (рис. 1) годографа расположена на эпицентральных расстояниях, чуть меньшем  $180^\circ$ .

Следует особо отметить, что глубина поворота первого луча, вышедшего на поверхность, как и положение начальной точки годографа, соответствующей этому лучу, существенно зависит от значений скорости непосредственно над волново-

дом. В стандартных моделях PREM и IASPEI 91 скорость в нижней части слоя  $D''$  равна  $\sim 13.7$  км/с. Такое значение скорости определяет и глубину (3971 км) проникновения первого луча и положение начальной точки ( $162.3^\circ$ ) соответствующей ветви годографа. В работе [12] положение границы мантия–ядро и значение скорости на нижней границе мантии получены путем обращения годографа отраженной волны  $PcP$ , которые соответственно равны  $\sim 2893.0$  км и  $\sim 13.54$  км/с. Уточнение скоростной кривой с помощью решения прямой кинематической задачи показало, что наиболее подходящим значением скорости на нижней границе мантии является значение 13.50 км/с.

Начиная с глубины 4600 км градиент скорости еще больше увеличивается, что обеспечивает значительную кривизну годографа в интервале эпицентральных расстояний  $145^\circ$ – $134^\circ$ . Годограф в этой части очень хорошо огибает первые вступления “предвестников”.

В интервале глубин 4983.64–5000.0 км ( $BC$ ) скорость продольной волны резко уменьшается от 10.86 до 9.7 км/с. Такое уменьшение скорости обеспечивает разрыв годографа в интервале эпицентральных расстояний  $134^\circ$ – $154^\circ$ .

На расстоянии  $154^\circ$  начинается ветвь годографа волны, распространяющейся в слое  $CD$ . Годограф рефрагированной волны на расстоянии  $152.2^\circ$  непрерывно переходит в годограф (участок  $CD$  на рис. 1) волны отраженной от подошвы слоя  $CD$  (рис. 2). Глубина границы  $DE$  равна 5197.3 км, а значение скорости на ней меняется от 10.15 до 10.64 км/с. Положение границы  $DE$  и скорость в слое  $CD$  определены путем обращения годографа отраженной волны по методике, описанной в [12]. Скорость в этом слое увеличивается с глубиной. Градиент скорости подобран таким, чтобы обеспечить наличие предельной точки годографа отраженной волны на эпицентральных расстояниях  $\sim 152^\circ$ . Формально скорость могла бы и уменьшаться, как это представлено в модели Г. Джеффриса, но в этом случае предельная точка отраженной волны уходила бы на эпицентральные расстояния вплоть до  $180^\circ$ , что противоречит данным наблюдения.

Глубже границы  $DE$  скорость сначала увеличивается довольно сильно до глубин примерно 5500 км, а затем, к центру Земли меняется практически линейно, с чуть большим градиентом, чем это принято в стандартной модели (рис. 2). В центре Земли скорость равна 11.2 км/с. В моделях PREM и IASPEI 91 она составляет 11.6 и 11.4 км/с соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как известно, в волноводе можно построить бесконечное множество скоростных кривых, которые будут удовлетворять полученным данным, но только одна из этого множества является монотонной возрастающей кривой. Приведенная на рис. 2 кривая на участке  $AB$  как раз и является таковой, но нельзя исключать и немонотонное поведение скоростной функции на отдельных ее участках.

Характерной особенностью скоростной кривой на участке  $AB$  является наличие большого градиента скорости на 500-километровом сегменте, примыкающего к точке  $B$  (рис. 2).

Наличие слоя  $CD$  с пониженной скоростью является совершенно необходимым для того, чтобы обеспечить согласование теоретических годографов с экспериментальными данными.

Распределение скорости во внутреннем ядре характеризуется наличием градиентного слоя сразу под слоем с пониженной скорости  $CD$  и имеет схематический характер ввиду скудности данных на эпицентральных расстояниях больше  $172^\circ$ . Привлечение более полных данных позволит дать детальную картину распределения скорости сейсмических волн во внутреннем ядре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jeffreys H.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl. 1939. V. 4. № 7. P. 548–561.
2. *Gutenberg B., Richter C.F.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl. 1938. V. 4. № 5. P. 363–372.
3. *Gutenberg B., Richter C.F.* // Gerl. Beit. Geophys. 1939. V. 54. P. 94–136.
4. *Gutenberg B.* // Trans. Amer. Geophys. Union. 1953. V. 38. P. 750–753.
5. *Gutenberg B.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1958. V. 48. P. 301–314.
6. *Bolt B.A.* // Nature. 1962. V. 196. P. 121–124.
7. *Bolt B.A.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1964. V. 54. № 1. P. 191–208.
8. *Dziewonsky A.M., Anderson D.* // Phys. Earth and Planet. Inter. 1981. V. 25. P. 297–356.
9. *Kennett B.L.N.* IASPEI 1991. Seismological Tables. Canberra: Research School of Earth Sciences; Austr. Nat. Univ. 1992.
10. *Бурмин В. Ю.* Методы численного обращения годографов сейсмических волн. М.: Наука, 1993. 100 с.
11. *Бурмин В. Ю., Саврина Л. А., Кугаенко Ю. В.* // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 64–75.
12. *Бурмин В. Ю.* // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4. С. 84–97.