

УДК 550.311

## СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В МАНТИИ ЗЕМЛИ

© 2004 г. В. Ю. Бурмин

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева РАН, г. Москва

E-mail: burmin@ifz.ru

Поступила в редакцию 02.04.2003 г.

На основе монтажей записей сейсмических колебаний коровых (с глубинами не более 33 км) землетрясений, зарегистрированных мировой сетью, построены годографы рефрагированных и отраженных короткопериодных продольных сейсмических волн, распространяющихся в мантии Земли. По этим годографам получен скоростной разрез мантии, хорошо согласующийся с наблюдаемыми данными. Особенностью скоростного разреза мантии является наличие в верхней ее части двух слоев с пониженной скоростью. Первый слой мощностью около 162 км начинается на глубине 132 км и соответствует разрыву годографа в диапазоне 10–12 градусов. Второй слой мощностью 180 км начинается на глубине около 1300 км и соответствует разрыву годографа на 50 градусах.

### ВВЕДЕНИЕ

В 1939 г. Джеффрисом [Jeffreys, 1939] было проведено определение скоростного разреза для всей Земли по временам пробега сейсмических волн от землетрясений. Времена пробега сейсмических волн были взяты из таблиц построенных ранее Г. Джеффрисом и К.Е. Булленым [Jeffreys, Bullen, 1935]. Позднее эти таблицы уточнялись, и последний их вариант был опубликован, по-видимому, в 1967 году. По сути, им была предложена первая стандартная скоростная модель Земли.

Аналогичные таблицы времен пробега сейсмических волн и соответствующие им скоростные модели Земли строились и другими исследователями. Наиболее полные из них были построены Б. Гуттенбергом и Ч. Рихтером [Gutenberg, Richter, 1936]. Б. Гуттенбергом так же была предложена скоростная модель Земли [Гуттенберг, 1963], которая несколько отличалась от модели Г. Джеффриса, особенно в верхней мантии Земли и в зоне  $F$  земного ядра.

Дж. Таггарт и Э. Энгдал [Taggart, Engdahl, 1968], основываясь на новых таблицах времен пробега  $P$ -волн от землетрясений и ядерных взрывов [Nerpin, Tucker, Taggart et al., 1968], дали скоростной разрез мантии и соответствующее значение радиуса ядра Земли, равное  $3477 \pm 2$  км.

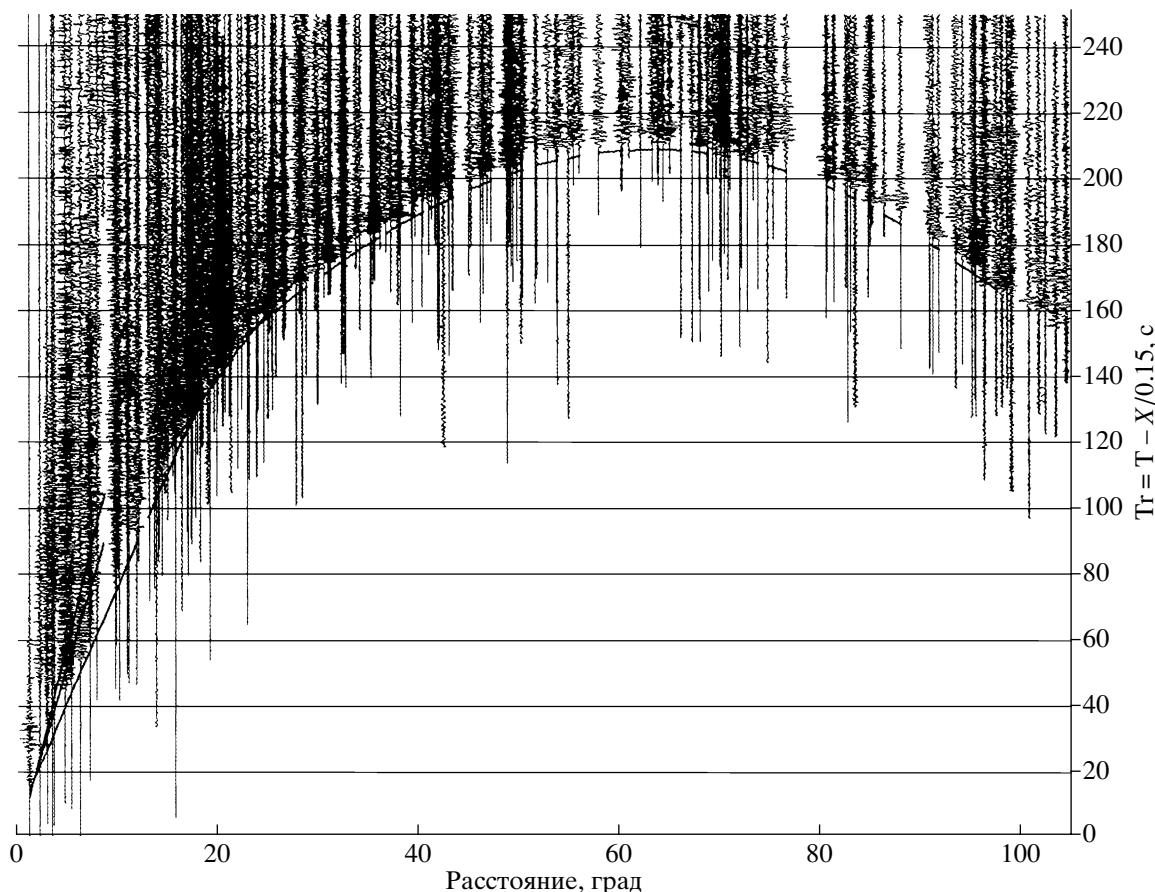
Э. Энгдал и Л. Джонсон [Engdahl, Johnson, 1974], обращая внимание на времена пробега короткопериодных  $PcP$ - и  $P$ -волн методом Бейкуса–Гильберта, получили скоростной разрез мантии и значение радиуса земного ядра, равное  $3484.2 \pm 2.9$  км.

В.Ю. Бурмин, с целью определения скорости продольных волн в мантии и уточнения величины

радиуса земного ядра провел анализ наиболее полных данных о временах пробега объемных сейсмических волн и получил скоростной разрез мантии [Бурмин, 1994] по методике изложенной в работе [Бурмин, 1993]. Им были рассмотрены сглаженные годографы  $P$ - и  $PcP$ -волн, построен-

Распределение скорости продольных сейсмических волн в мантии Земли

$H$ , км	$v_p$ , км/с	$H$ , км	$v_p$ , км/с	$H$ , км	$v_p$ , км/с
0.00	6.01	640.00	10.07	1500.00	12.20
5.22	6.01	663.17	10.34	1600.00	12.30
5.22	6.03	717.65	10.70	1700.00	12.45
41.13	6.10	742.41	10.82	1800.00	12.65
41.13	7.96	765.61	10.92	2000.00	12.80
116.82	7.93	794.12	11.01	2100.00	12.95
116.82	8.45	797.48	11.01	2200.00	13.05
132.42	8.46	805.03	11.02	2300.00	13.15
132.45	8.20	810.37	11.03	2400.00	13.25
294.54	8.50	877.64	11.18	2500.00	13.35
294.60	8.87	954.83	11.40	2600.00	13.50
301.77	8.89	970.03	11.43	2700.00	13.60
344.90	9.03	973.81	11.43	2750.00	13.62
412.59	9.10	983.91	11.42	2780.00	13.65
412.59	9.30	1035.36	11.45	2800.00	13.64
476.11	9.64	1148.94	11.64	2830.00	13.60
508.01	9.79	1287.92	11.86	2860.00	13.56
519.66	9.83	1288.00	11.50	2893.000	13.50
555.04	9.95	1397.00	11.95	2893.000	8.1
640.00	9.95	1400.00	12.05		



**Рис. 1.** Монтаж сейсмограмм и теоретический годограф рефрагированных волн для скоростной модели мантии IASPEI91.

ные С.Д. Коган [Коган, 1980 а; б], и наблюдаемые годографы мантийных *P*-волн, полученные в [Herrin, Tucker, Taggart et al., 1968], и *PcP*-волн, полученные в [Taggart, Engdahl, 1968].

При создании модели PREM А. Дзивонский и Д. Андерсон [Dziewonsky, Anderson, 1981] помимо времен пробега объемных волн использовали данные о собственных колебаниях Земли.

Одной из современных сейсмологических моделей, получивших широкое признание, является модель IASPEI91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [Kennett, 1992].

Особенностью всех существующих скоростных моделей мантии является то, что, начиная с расстояний 20 градусов времена пробега сейсмических волн, рассчитанные по ним, плохо ложатся на первые вступления высокочастотных записей продольных сейсмических волн (см. рис. 1). Причины этого будут указаны ниже. Кроме этого, все перечисленные выше авторы для построения скоростных разрезов используют таблицы времен пробега сейсмических волн (как правило, сглаженные не корректным способом, например,

[Arnold, 1968]), что не позволяет проконтролировать правильность интерпретации волнового поля, то есть построения годографов сейсмических волн. Все это дало повод к тому, чтобы, используя современную методику обращения сейсмических годографов [Бурмин, 1994], заново определить скоростной разрез мантии и сопоставить теоретические годографы с монтажом записей высокочастотных (0.5–5.0 Гц) сейсмических волн.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе используются экспериментальные данные, содержащие записи сейсмических волн, прошедших через мантию Земли и позволяющие построить соответствующие им годографы для интерпретации. Были использованы цифровые сейсмические данные Национального информационного центра (NEIC) мировых сейсмологических данных департамента геологической службы США, полученные мировой сетью за период с 1980 по 1987 гг. Эти данные содержат записи длиннопериодных, промежуточных и короткопе-

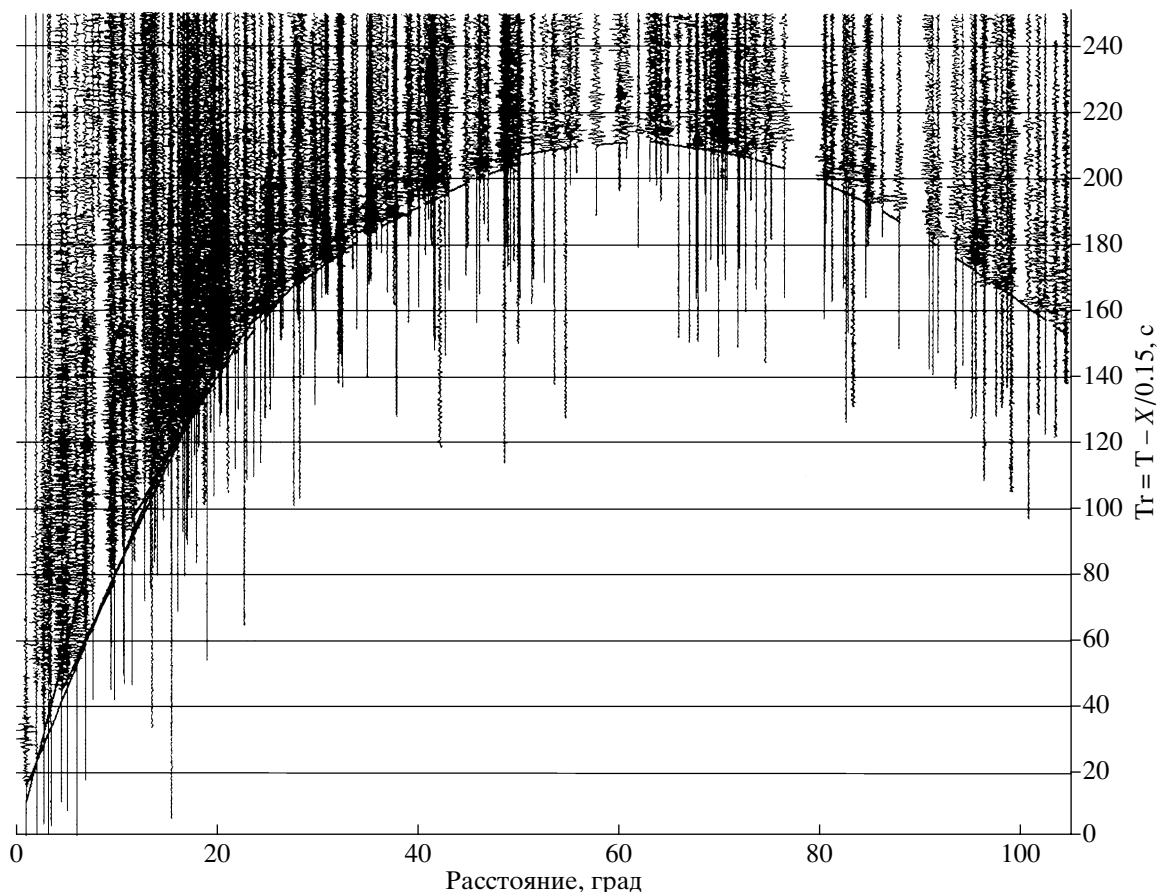


Рис. 2. Монтаж сейсмограмм и теоретический годограф рефрагированных волн для новой скоростной модели мантии.

риодных сейсмографов. Для интерпретации были использованы записи короткопериодных приборов (с полосой пропускания от 0.1 до 6 Гц) поскольку они имеют более высокую разрешающую способность.

Были просмотрены записи сейсмических волн от всех землетрясений за указанный период с магнитудой больше 5.5, расположенных на глубинах, не превышающих 33 км. Для интерпретации были отобраны те сейсмограммы, которые имели наиболее четкие записи сигнала.

Все записи были отфильтрованы в полосе частот 0.5–5.0 Гц и приведены к дневной поверхности, с учетом разности времен пробега волн и сейсмического сноса. Данные представлены в виде монтажа сейсмограмм вертикальной компоненты сейсмографов в диапазоне эпицентральных расстояний от 0° до 105° и времен от 0 до 250 с, в редукции 0.15 град/с (рис. 1, рис. 2). Каждая запись нормирована на максимальную амплитуду колебаний в трассе. Всего в монтаже содержится 272 записи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

При рассмотрении теоретического годографа продольных рефрагированных волн, рассчитанного для модели IASPEI91, наложенного на монтаж сейсмограмм (рис. 1), хорошо видно, что после 20 градусов годограф проходит ниже первых вступлений. Чтобы согласовать теоретический годограф с наблюдаемыми данными, в интервале глубин 150–300 км необходимо ввести слой пониженной скорости. В этом случае совпадение теоретических и экспериментальных данных оказывается гораздо лучше (рис. 2), чем в модели IASPEI91.

На рис. 3 приведены монтаж сейсмограмм и теоретический годограф рефрагированных волн в диапазоне расстояний 0–30 градусов и времен 0–40 с в редукции 0.08 град/с. На представленном монтаже выделяются несколько ветвей годографа. Ветвь *a* соответствует волне с кажущейся скоростью от 6.0 до 6.1 км/с. Следует отметить, что начальная часть годографа представляет собой осреднение нескольких ветвей, отвечающих волнам, распространяющимся в земной коре. Мощность коры в данном случае соответствует 41.1 км (рис. 6). Ветвь *b* отвечает волнам, распространяющимся в

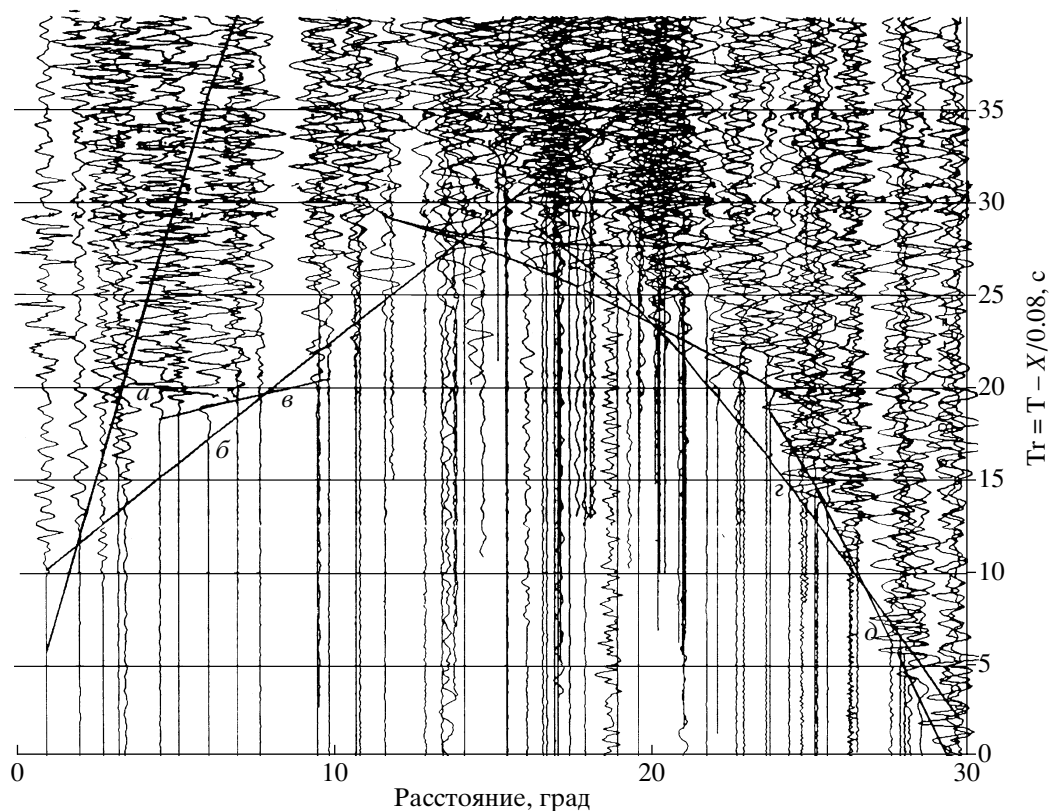


Рис. 3. Монтаж сейсмограмм и теоретические годографы для новой скоростной модели мантии в диапазоне эпицентральных расстояний 0–30 градусов времен 0–40 с в редукции 0.08 град/с.

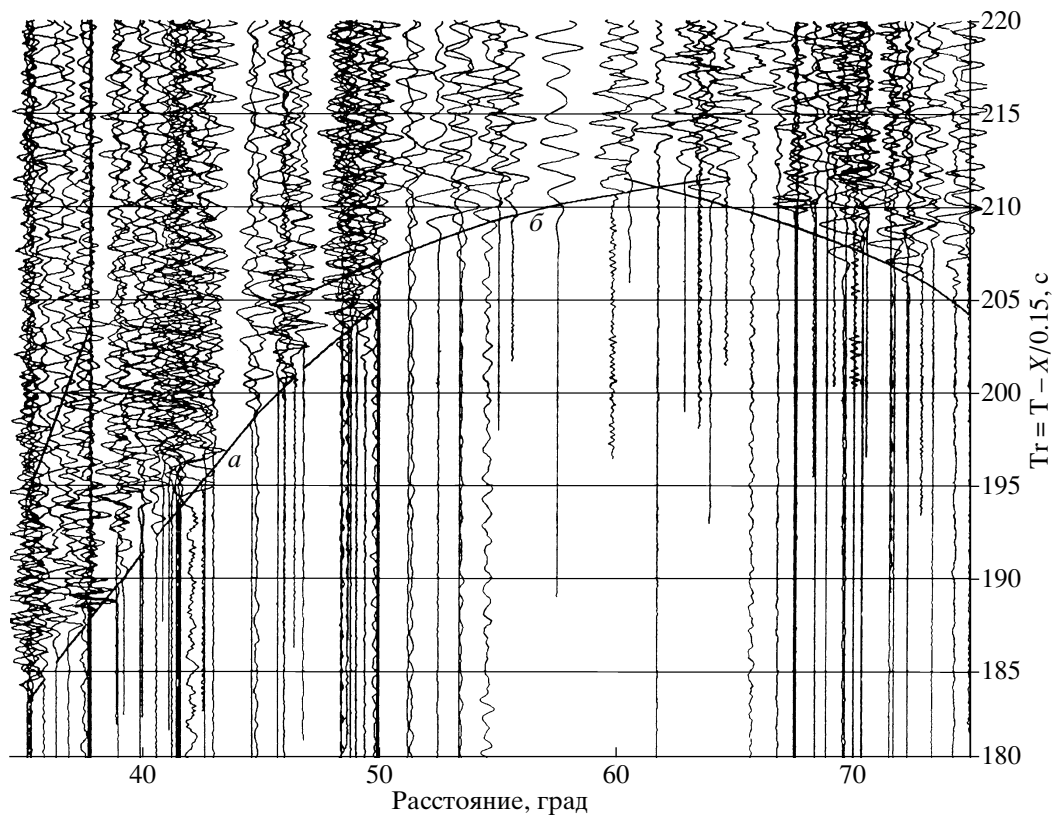
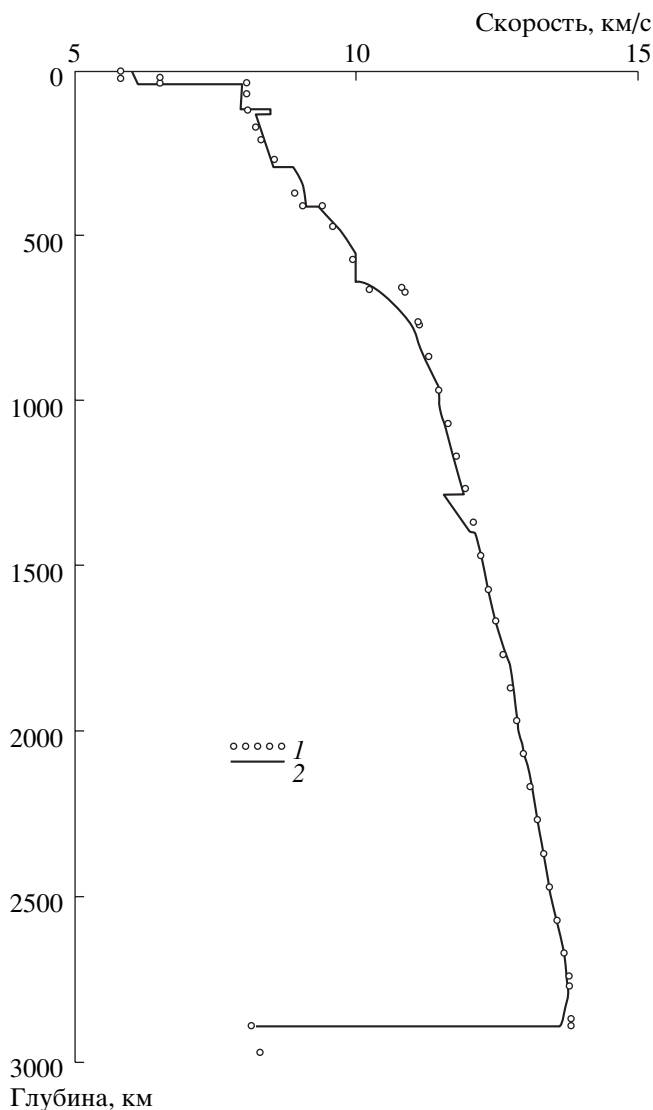


Рис. 4. Монтаж сейсмограмм и теоретические годографы для новой скоростной модели мантии в диапазоне эпицентральных расстояний 35–75 градусов времен 180–220 с в редукции 0.15 град/с.



**Рис. 5.** Распределение скорости продольных волн в мантии Земли: 1 – скоростная модель мантии IASPEI91; 2 – скоростная модель мантии, полученная в настоящей работе.

слое от 41.1 до 116.8 км со скоростью  $\approx 7.95$  км/с. Ветвь *в* соответствует волне с быстро затухающей амплитудой колебаний, распространяющейся в тонком слое (116.8–132.4 км) со скоростью 8.45 км/с (см. рис. 5). Далее хорошо виден разрыв годографа, который соответствует слою с пониженной скоростью мощностью 162.1 км со скоростью 8.25–8.3 км/с. Ветви *г* и *д* соответствуют волнам с кажущимися скоростями от 8.87 до 9.95 км/с, распространяющимся ниже слоя с пониженной скоростью ( $Z > 294.5$  км). Существенным в данном случае является то, что сейсмические записи, первые вступления которых огибает ветвь *в*, получены на различных станциях и от разных, достаточно удаленных друг от друга землетрясений. Последнее обстоятельство указывает на то, что

разрыв годографа на 10 градусах имеет глобальный характер. Следует отметить, что примерно на этих же глубинах расположен волновод и в модели Б. Гутенберга [Гутенберг, 1963]. Более того, волноводы в верхней части мантии присутствуют во многих моделях, полученных на длинных профилях от ядерных взрывов [Mechie et al., 1993; Ryberg et al., 1998], но на несколько других глубинах. Следует отметить, что и в этих работах нет непосредственного сравнения (наложения) теоретических годографов с монтажами сейсмических записей. И хотя по полученным моделям рассчитаны синтетические сейсмограммы, все же трудно судить о правильности определения в этих работах параметров волновода и глубине его расположения.

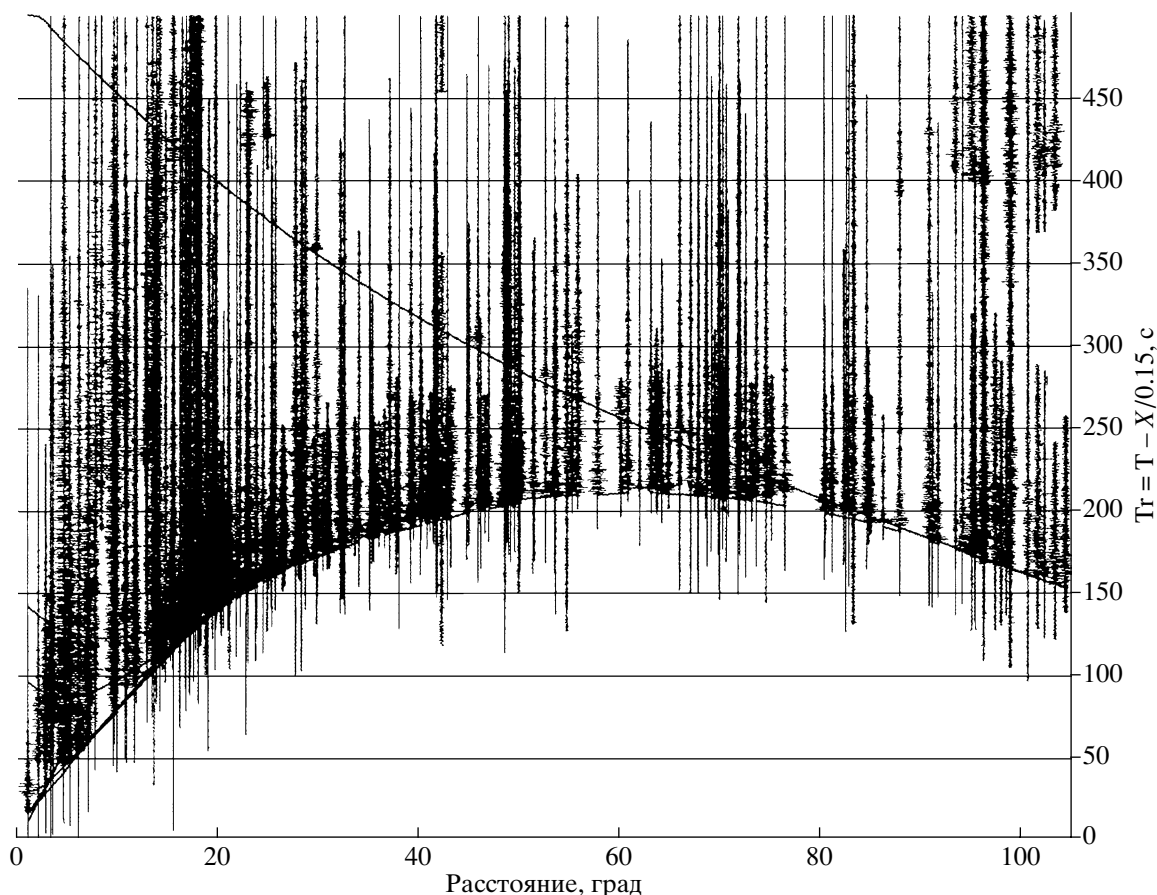
Так же, как и в модели IASPEI91 на глубине 640 км в нашей модели отмечается скачок скорости, правда, несколько меньший, чем в первой модели, но с большим градиентом скорости под границей, вплоть до глубин около 1000 км (рис. 5).

На рис. 4 представлен монтаж записей в диапазоне эпицентральных расстояний 35–75 градусов и времен пробега 180–220 с в редукции 0.15 град/с. На эпицентральной дистанции 50 градусов хорошо виден скачок годографа рефрагированной волны (ветви *а* и *б*), который связан с волноводом, верхняя граница которого расположена на глубине 1288 км (рис. 5). Ниже этого волновода скоростные кривые на рис. 5 вплоть до зоны *D''* практически сливаются. Распределение скорости в зоне *D''* определено ранее в работе [Бурмин, 1994] по годографу *PcP*-волн.

Сопоставление всего теоретического годографа, рассчитанного по новой скоростной модели мантии, с монтажом сейсмограмм в диапазоне эпицентральных расстояний 0–105 градусов представлено на рис. 2. Краткое, но достаточно подробное описание методики определения скоростной кривой дано в работе [Бурмин, 2003]<sup>1</sup>.

На рис. 6 показан годограф отраженной волны, который хорошо ложится на первые вступления *PcP*-волн. Следует отметить, что, несмотря на то, что перепады скоростей сейсмических волн, как продольных, так и поперечных, на границе мантия–ядро значительны, амплитуда отраженных волн невелика. На большинстве сейсмограмм, их вообще не видно (рис. 6). Это легко понять, если учесть, что коэффициент отражения прямо пропорционален разности  $v_1 \times \rho_1 - v_2 \times \rho_2$ , где  $v_1$  и  $\rho_1$  – скорость и плотность над границей, а  $v_2$  и  $\rho_2$  – скорость и плотность под границей отражения [Саваренский, 1972]. Для продольных волн

<sup>1</sup> Бурмин В.Ю. Скорость распространения сейсмических волн в земном ядре. Статья находится на рассмотрении в журнале “Физика Земли”.



**Рис. 6.** Монтаж сейсмограмм и теоретические годографы рефрагированных и отраженных сейсмических волн для новой скоростной модели мантии.

эта разность во много раз меньше, чем для поперечных волн.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование только таблиц времени пробега сейсмических волн без одновременной визуализации всего волнового поля, на наш взгляд, не позволяет контролировать правильность интерпретации волнового поля и, следовательно, правильность построения сейсмического годографа с учетом особенностей строения реальной упругой среды. Дело в том, что в процессе интерпретации наблюдаемых данных, т.е. построения скоростной модели, неучет отдельных деталей волнового поля, как правило, проявляется в несогласованности теоретического годографа с волновым полем, которая не проявляется при сопоставлении теоретических годографов с точками экспериментального годографа. Совместное рассмотрение монтажей высокочастотных (0.5–5.0 Гц) сейсмических записей от сильных землетрясений и теоретических годографов позволяет более деталь-

но и обосновано построить скоростной разрез мантии Земли (см. рис. 5 и таблицу).

Особенностью полученного скоростного разреза мантии является наличие в верхней ее части двух слоев с пониженной скоростью. Первый слой мощностью около 162 км начинается на глубине 132 км и соответствует разрыву годографа на 10 градусах. Поскольку монтажи строились по записям различных землетрясений, полученных разными станциями, следует сделать вывод о том, что этот волновод имеет глобальный характер.

Второй слой мощностью 180 км начинается на глубине 1288 км и соответствует разрыву годографа на 50 градусах. Этот разрыв годографа не столь ярко выражен на монтаже сейсмических записей, но, тем не менее, хорошо просматривается в увеличенном масштабе в редукции 0.15 град/с (рис. 4).

К сожалению, на монтажах высокочастотных записей не удастся проследить поперечные волны в силу их значительного затухания. По-видимому, для регистрации высокочастотных поперечных волн необходимо проводить специальные

наблюдения сейсмическими станциями с большим увеличением. Как известно, увеличение приборов определяется в основном уровнем сейсмического шума (микросейсм) в месте регистрации.

Данные мировой сейсмологической сети были предоставлены автору Н.А. Сергеевой, которой автор выражает свою искреннюю признательность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмин В.Ю.* Методы численного обращения годографов сейсмических волн. М.: Наука. 1993. 100 с.
- Бурмин В.Ю.* Определение скорости распространения сейсмических волн в мантии и радиуса ядра Земли по временам пробега *P*- и *PcP*-волн // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4. С. 84–97.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.
- Коган С.Д.* Времена пробега продольной волны, отраженной от ядра; радиус ядра и особенности переходной зоны от мантии к ядру // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 12. С. 3–14.
- Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны. М.: Недра. 1972. 296 с.
- Arnold E.P.* Smoothing travel-time table // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1968. V. 58. № 4. P. 1345–1351.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary reference Earth model // Phys. Earth and Planet. Inter. 1981. V. 25. № 4. P. 297–356.
- Engdahl E.R., Johnson L.E.* Differential *PcP* travel-time and the radius of the core // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1974. V. 39. № 33. P. 201–209.
- Gutenberg B., Richter C.* On seismic waves // Beitr. Geophys. 1939. V. 54. P. 94–136.
- Herrin E., Tucker W., Taggart J. et al.* Estimation of surface focus *P* travel-time // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1968. V. 58. № 4. P. 1273–1291.
- Jeffreys H.* The times of *P*, *S* and *SKS* and the velocities of *P* and *S* // Month. Notic. Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl. 1939. V. 4. P. 498–536.
- Jeffreys H., Bullen K.E.* Seismological tables. L. 1967. 50 p.
- Kennett B.L.N.* IASPEI 1991. Seismological Tables. Research School of Earth Sciences. Australian National University. 1992.
- Mechie J., Egorkin A.V., Fuchs K., Ryberg T., Solodilov L.N., Wenzel F.* *P*-wave mantle velocity structure beneath northern Eurasia from long-range recordings along the profile Quartz // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1993. V. 93. P. 269–286.
- Ryberg T., Wenzel F., Egorkin A.V., Solodilov L.N.* Properties of the mantle transition zone in northern Eurasia // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. NO. B1. P. 811–822.
- Taggart J., Engdahl E.R.* Estimation of *PcP* travel-time and depth to the core // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1968. V. 58. № 4. P. 1293–1303.