

УДК 550.347

## СКОРОСТНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА ОТ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ К ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

© 2012 г. Т. Б. Яновская, Т. Ю. Королева

Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: yanovs@geo.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 21.12.2011 г.

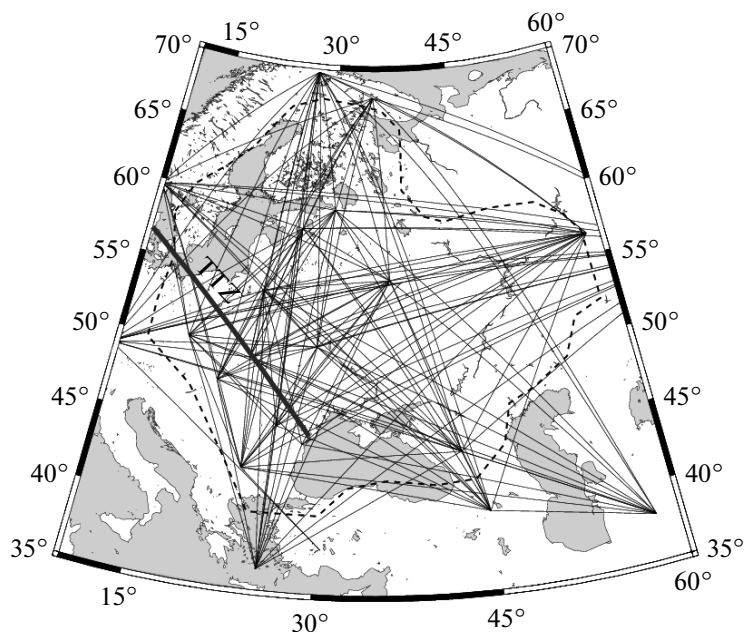
Использование записей сейсмического шума на станциях Западной Европы (ЗЕ) в совокупности с данными станций на Восточно-Европейской Платформе (ВЕП) позволило оценить структуру коры и верхней мантии в области перехода от докембрийской платформы к более молодой структуре Западной Европы методом шумовой поверхностно-волновой томографии. Линия Тессейра–Торнквиста, разделяющая эти структуры, четко выделилась как переходная зона от высоких скоростей (под ВЕП) к низким (под ЗЕ) в коре и верхней мантии до 150–170 км. На глубинах более 200 км соотношение между значениями скоростей под ВЕП и ЗЕ становится противоположным. Подобное соотношение между скоростями в верхней мантии до глубин 300 км отмечается и на южной границе, где ВЕП граничит с северным сегментом Альпийско-Гималайского сейсмического пояса.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что строение литосферы асейсмичной докембрийской Восточно-Европейской Платформы (ВЕП) и тектонически активной Западной Европы (ЗЕ) существенно различается. Эти два тектонических образования граничат вдоль так называемой линии Тессейра–Торнквиста, с направлением простирания с северо-запада на юго-восток от Дании до Румынии. Различие между структурами по разные стороны зоны ТТ было обнаружено, в частности, в работе [Zielhuis, Nolet, 1994], однако большие расстояния между станциями не позволили добиться хорошего разрешения. Эта зона активно исследовалась в рамках программы EUROPROBE – на ее изучение были направлены такие проекты, как POLONAISE'97, CELEBRATION'2000, TOR. По результатам первых двух проектов [Guterch et al., 1986; 1999; Šroda et al., 2006] методами ГСЗ было получено строение коры по профилям, пересекающим зону ТТ на территории Польши. В частности, было показано, что при переходе через эту границу от ВЕП к ЗЕ кора утоньшается (от 40–45 до 30–35 км), и скорость в ней резко понижается. В 1996–1997 гг. были организованы работы по проекту TOR, в котором по данным 150 временных сейсмостанций было проведено исследование глубинной структуры (200–300 км) территории от Северной Германии через Данию до Южной части Швеции вкрест простирания зоны ТТ при использовании нелинейного телесеismicкого томографического алгоритма [Shomali et al., 2002]. Исследование показало, что в рассматриваемой части зоны ТТ толщина литосферы состав-

ляет порядка 120 км и подстилается низкоскоростной астеносферой, существенно отличающейся как от тонкой литосферы Северной Германии, так и от толстой (более 200 км) литосферы Балтийского щита без явных признаков астеносферного слоя [Санина, Ризниченко, 2006; Bruneton et al., 2004]. Однако проект TOR покрыл лишь небольшую (северную) часть зоны ТТ, где была развернута сеть временных станций. Результаты же исследования строения верхней мантии на протяжении всей зоны ТТ чрезвычайно скудные, так как они сталкиваются с невозможностью получить достаточно большое число данных из-за недостаточного числа землетрясений – они происходят в ограниченной зоне ЗЕ, отсутствуют на ВЕП, и подобрать данные от землетрясений по трассам, пересекающим данный регион по всем направлениям, практически невозможно.

Но в последние годы появилась методика извлечения функции Грина и, соответственно, получения дисперсионных кривых поверхностных волн на трассах между станциями из кросс-корреляционной функции (ККФ) сейсмического шума [Lobkis, Weaver, 2001; Shapiro et al., 2004; 2005; Stehly et al., 2006; Королева и др., 2009]. С помощью этой методики авторами было оценено строение верхней мантии под ВЕП [Королева и др., 2010] по данным станций, расположенных на ВЕП и на ее обрамлении. Однако, при работе с этой методикой выяснился неприятный факт, состоящий в том, что на периодах более 20–40 с, несущих информацию о подкоровой зоне верхней мантии, основной вклад в шум вносят землетрясения, несмотря на то, что в рамках метода сигналы от землетрясений подавляются и сводятся к



**Рис. 1.** Схема трасс между станциями, вдоль которых были определены дисперсионные кривые волн Релея. Пунктиром околнурена область достаточного разрешения. Зона Торнквиста–Тессейра (ТТЗ) обозначена жирной линией.

уровню шума. Исследования кросс-корреляционных функций на отдельных межстанционных трассах, а также результаты математического моделирования [Яновская, Королева, 2011] показали, что существенные искажения ККФ возникают, если в период времени, используемый для построения ККФ, происходит скопление землетрясений в весьма ограниченной области (кластеризация). В этой же работе намечены пути избавления от этого искажающего эффекта.

Несмотря на указанные ограничения, данная методика была применена к более широкому региону, включающему в себя и зону ТТ за счет использования данных станций, расположенных в Западной Европе. Но при этом учитывался факт возможных искажений дисперсионных кривых, поэтому при их построении производился более тщательный анализ ККФ, позволивший получать дисперсионные кривые адекватными тем, какие были бы при равномерном распределении источников шума. В результате были получены результаты о различии структур к востоку и западу от зоны ТТ во всем рассматриваемом регионе и уточнено строение верхней мантии под ВЕП.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В предыдущей работе [Королева и др., 2010] использовались данные по 120 межстанционным трассам. К этим данным были добавлены данные еще по 66 трассам между станциями DPC, STU, VTS, KONO и станциями на ВЕП. Кроме того, были исключены данные по протяженным трас-

сам между станцией ААК, расположенной далеко на востоке, и другими станциями, всего 13 трасс. Это было обусловлено тем, что, во-первых, вклад в дисперсионные кривые между ААК и другими станциями сильно зависит от значительного участка вблизи ААК, и во-вторых, на ККФ между станцией ААК, расположенной к сейсмическому поясу Дальнего Востока и Китая значительно ближе других станций, оказывают влияние землетрясения. Это было продемонстрировано в [Яновская, Королева, 2011] на примере трассы ААК–DPC за 2000 год, когда имело место сосредоточение землетрясений в Японии. Тем более, в данной работе нас в большей степени интересовала западная часть региона. Для ослабления влияния кластера землетрясений в 2000 году ККФ строились путем усреднения за несколько лет. Возможность этого показана в [Яновская, Королева, 2011] путем математического моделирования. Всего таким образом были использованы данные по 173 трассам.

В случаях, когда не удавалось набрать достаточное количество данных, чтобы в результате осреднения нивелировать влияние кластеров землетрясений (что оценивалось по “расплыванию” максимумов ККФ и/или по значительному несовпадению положений максимумов справа и слева), дисперсионные кривые строились либо по сосредоточенным максимумам одной части ККФ, либо, если их не удавалось выделить, не строились для таких периодов вообще.

На рис. 1 изображены трассы между станциями, на которых были определены ККФ верти-

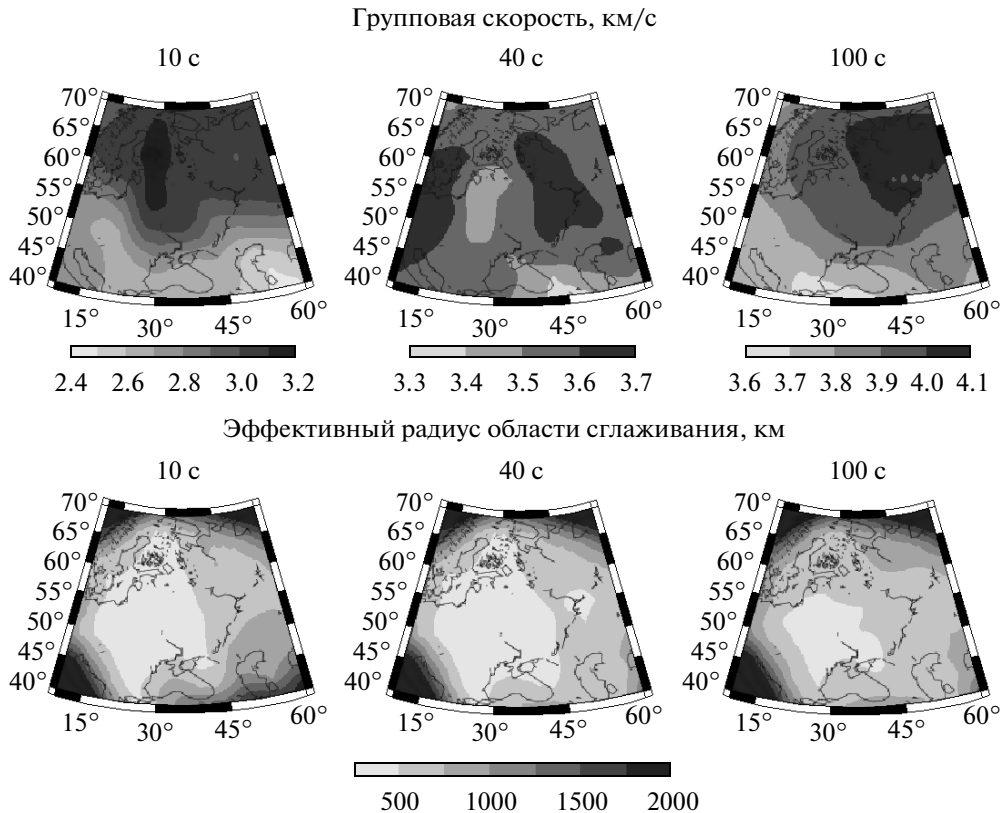


Рис. 2. Карты латерального распределения групповых скоростей для периодов 10, 40 и 100 с, полученные 2D томографией (вверху) и эффективного радиуса области сглаживания (внизу).

кальных компонент шума и, соответственно, построены дисперсионные кривые волн Релея. На этом же рисунке обозначено положение линии Тессейра–Торнквиста (ТТЗ). Пунктиром околнурена область приемлемого разрешения, внутри которой по методу поверхностно-волновой томографии оценивались локально-сглаженные групповые скорости для периодов 10–100 с.

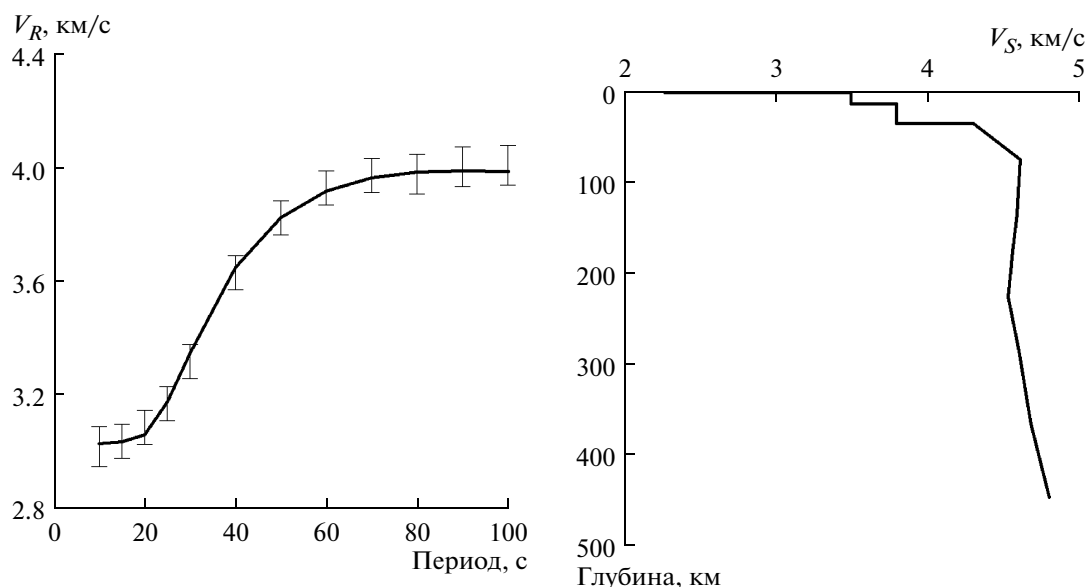
### 3. МЕТОДИКА ТОМОГРАФИИ

Для определения трехмерного распределения скорости поперечных волн в коре и верхней мантии по дисперсионным кривым групповых скоростей использовалась стандартная методика поверхностно-волновой томографии (ПВТ): вначале на основе двумерной томографии строились карты распределения групповых скоростей для отдельных периодов, затем по этим данным в отдельных точках территории определялись локальные (точнее, локально-сглаженные) дисперсионные кривые, которые далее обращались в вертикальные скоростные разрезы поперечных волн. Набор таких разрезов и определял трехмерное распределение скорости  $V_S$  в среде.

Не для всех трасс удалось получить дисперсионные кривые из ККФ в используемом интервале

периодов 10–100 с. В ряде случаев не удавалось определить скорости для малых (10–15 с) и больших (>70 с) периодов. Поэтому для таких периодов карты распределения групповых скоростей строились по меньшему числу трасс, что соответственно приводило к уменьшению разрешения в ряде точек по сравнению с периодами в интервале 30–70 с. В соответствии с [Дитмар, Яновская, 1987], разрешение оценивалось эффективным радиусом области сглаживания. В качестве примера на рис. 2 приведены карты распределения групповой скорости, полученной методом ПВТ, и размеров области сглаживания для трех периодов – 10, 40 и 100 с.

Локальные дисперсионные кривые строились в точках территории, околнуренной пунктиром на рис. 1, с шагом  $3^\circ$  по широте и  $3^\circ$  по долготе. Расчеты по более мелкой сетке не имели смысла, поскольку, как видно из рис. 2, размер (радиус) области сглаживания составлял 300–600 км. Для решения обратной одномерной задачи – восстановления скоростного разреза по дисперсионной кривой – необходимо было из результатов томографической реконструкции групповых скоростей извлечь не только сами значения скорости, но и погрешности их определения.



**Рис. 3.** Локально-сглаженная дисперсионная кривая в точке  $\varphi = 55^\circ$ ,  $\lambda = 45^\circ$ , полученная 2D томографией, изображена вертикальными черточками, определяющими пределы ошибок (слева). Там же линией изображена кривая, соответствующая решению – скоростному разрезу поперечных волн, который приведен на этом же рисунке справа.

Среднеквадратичная ошибка оценки скорости (сглаженной по достаточно широкой области) определялась в процессе томографического восстановления в каждой точке. Но использовать эту погрешность в процедуре обращения локальной дисперсионной кривой было бы неверно – известно, что чем хуже разрешение, тем меньше среднеквадратичная ошибка. Иначе говоря, малой стандартной ошибке соответствовало худшее качество оценки скорости за счет худшего разрешения. Поэтому при восстановлении локальных скоростных разрезов “ошибки” значений скорости принимались пропорциональными эффективному радиусу области сглаживания. Ошибка каждого индивидуального значения групповой скорости принималась равной средней величине стандартной ошибки для всех точек, которая составляла 0.04 км/с, умноженной на отношение соответствующего радиуса эффективной области сглаживания к наименьшему (300 км). В результате ошибки входных данных, использованные в процедуре обращения дисперсионной кривой, варьировали от 0.04 до 0.08 км/с в пределах области исследования, оконтуренной пунктирной линией на рис. 1. В качестве примера обращения локально-сглаженной дисперсионной кривой на рис. 3 приведены полученная по ПВТ дисперсионная кривая в точке  $\varphi = 55^\circ$ ,  $\lambda = 45^\circ$ , заданная пределами ошибок, и кривая, соответствующая решению обратной одномерной задачи – скоростному разрезу поперечных волн, который приведен на этом же рисунке. Разрез параметризовался значениями скоростей и мощностей слоев в коре (число слоев было принято равным 3) и

значениями скоростей на фиксированных глубинах, между которыми разрез аппроксимировался линейно [Яновская и др., 2008].

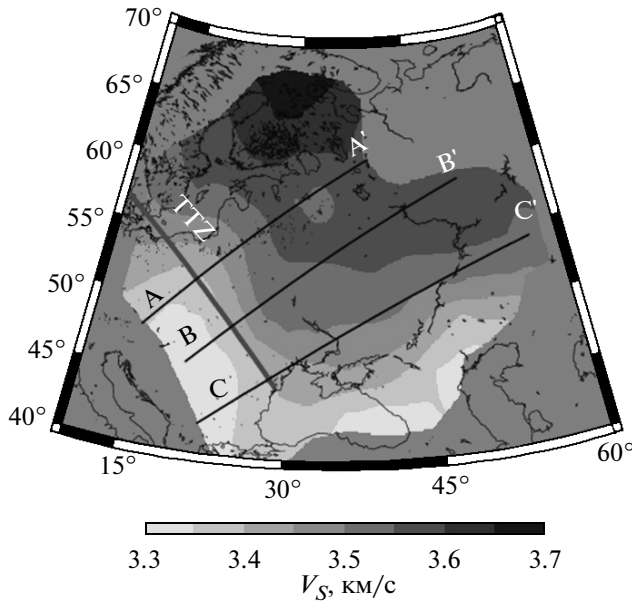
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

На основе полученных вертикальных скоростных разрезов были рассчитаны средняя скорость в коре и значения скоростей на глубинах от 50 до 300 км с шагом 25 км.

На рис. 4 изображено распределение средней скорости в коре внутри области, оконтуренной пунктиром на рис. 1. На нем же показано положение линии Торнквиста–Тессейра (ТТЗ). Распределение скорости в верхней мантии изображено в виде горизонтальных срезов вариации скорости по отношению к средней на глубинах 75, 100, 125, 175, 225 и 275 км (рис. 5) и вертикальных скоростных разрезов (рис. 6), вдоль профилей AA', BB' и CC', показанных на рис. 4.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рассмотрения рис. 4 ясно видно, что четко разделяются структуры коры с востока и запада от линии Торнквиста–Тессейра (ТТ). Средняя скорость в коре уменьшается с востока на запад в направлении, перпендикулярном линии ТТ, от 3.6 до 3.3 км/с. Плавность этого изменения является кажущейся – она обусловлена сглаживанием в процедуре поверхностно-волновой томографии [Дитмар, Яновская, 1987]. В действительности, по-видимому, имеет место резкий переход от вы-

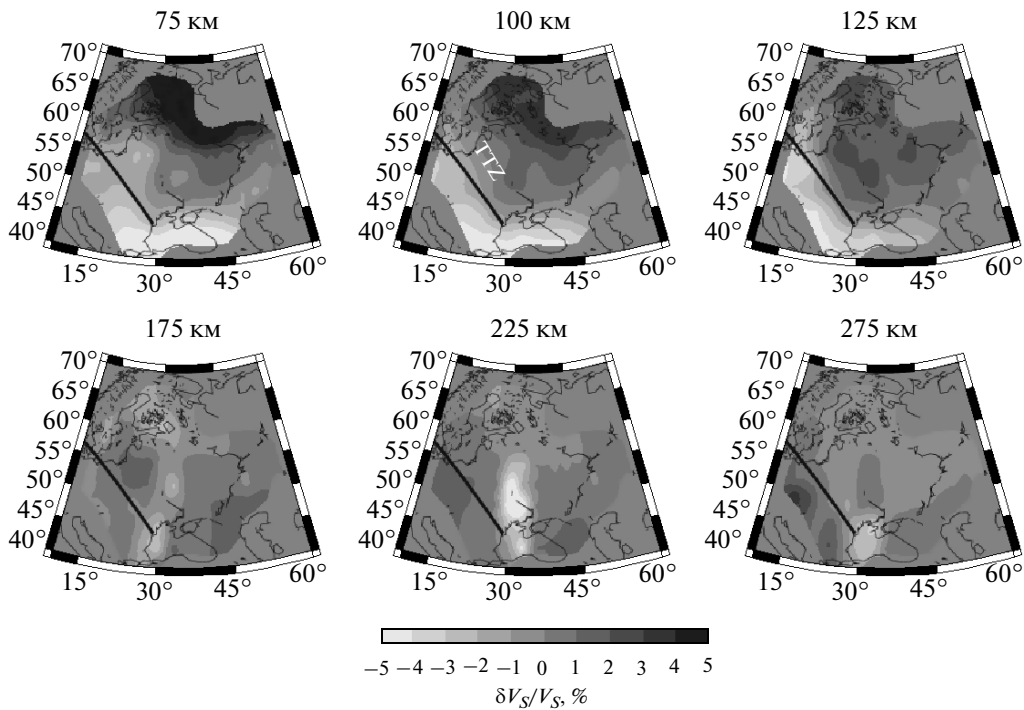


**Рис. 4.** Карта распределения средней скорости в коре. Показаны профили, вдоль которых определялись вертикальные скоростные разрезы, изображенные на рис. 6.

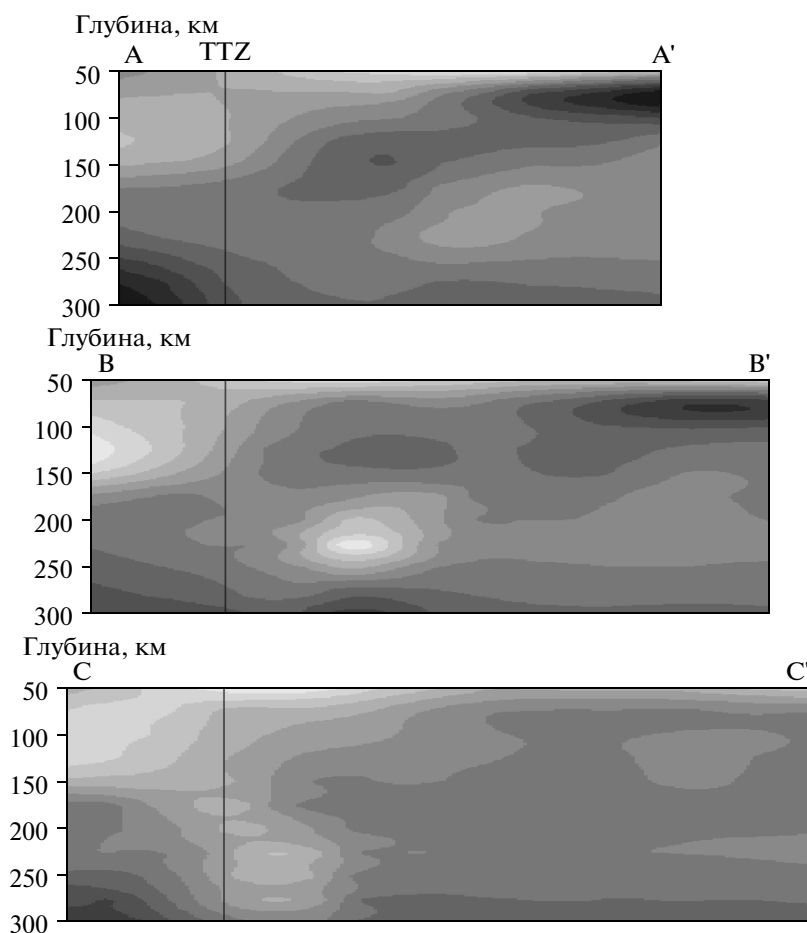
со скоростью к низкоскоростной коре именно вдоль линии ТТ. Это согласуется с полученными ранее результатами распределения скоростей продольных волн, полученными методами ГСЗ в рамках проектов POLONAISE и CELEBRATION.

Похожее по характеру уменьшение скорости наблюдается и на южной границе Восточно-Европейской платформы (ВЕП) – Альпийско-Гималайском сейсмическом поясе, перекрывающем часть зоны ТТ на территории Румынии (Карпатский складчатый пояс). Это и неудивительно, поскольку в обоих случаях древняя докембрийская платформа граничит с более молодыми образованиями – палеозойской корой Западной Европы и преимущественно кайнозойской корой Крыма–Турции–Кавказа.

Определенное сходство этих двух переходных зон отмечается и в строении подкорковой мантии (рис. 5). Глубины 75–125 км как к западу от ТТ, так и к югу от южной границы характеризуются наличием низкоскоростной астеносферы, тогда как под ВЕП скорости на этих глубинах достаточно высокие. Подобное понижение скорости  $S$ -волн было отмечено в работе [Marquering, Snider, 1996] на глубинах 80 и 140 км, где распределение скорости определялось инверсией волновых форм на записях землетрясений. Однако, на глубинах более 200 км соотношение между скоростями под ВЕП и примыкающими к ней структурами на западе и на юге меняется на обратное: как под палеозойской платформой ЗЕ, так и под Альпийско-Гималайской тектонической зоной скорости оказываются выше, чем под ВЕП. В упомянутой работе [Marquering, Snider, 1996] повышение скорости  $S$ -волн отмечается на глубинах более 300 км, хотя разрешающая способность данных на этих



**Рис. 5.** Карты вариаций скорости поперечных волн на разных глубинах в верхней мантии.



**Рис. 6.** Вертикальные скоростные разрезы поперечных волн вдоль профилей, показанных на рис. 4. Вертикальными линиями показано положение линии Торнквиста—Тессейра.

глубинах становится довольно низкой. В работе [Павленкова, 2006а] приводится сводный скоростной разрез продольных волн, построенный по сейсмологическим данным для Западной Европы [England et al., 1978] и по данным сверхдлинных сейсмических профилей на территории России [Павленкова, 2006б] вдоль профиля от Атлантики до Сибирской Платформы. На этом разрезе также видно повышение скорости ниже 300 км при переходе через линию ТТ. Но разрешение данных на глубинах уже более 100 км крайне низкое. Полученное в настоящей работе повышение скорости на глубинах более 200 км можно отчасти объяснить слабым понижением скоростей под ВЕП на глубинах 200–300 км. Этот факт был отмечен еще и в предыдущем исследовании [Королева и др., 2010]. Особенно ясно видно такое четкое разделение структур под структурами ВЕП и ЗЕ на рис. 6, где вертикальными линиями отмечено положение линии ТТ.

Таким образом, результаты работы не противоречат полученным ранее по другим данным, и, в отличие от них, дают полную, хотя и сглажен-

ную, картину распределения скоростей в верхней мантии.

Работа поддержана грантом РФФИ 08-05-00355а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дитмар П.Г., Яновская Т.Б. Обобщение метода Бэйкуса—Гильберта для оценки горизонтальных вариаций скорости поверхностных волн // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 6. С. 30–40.
- Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // Физика Земли. 2009. № 5. С. 3–14.
- Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Скоростное строение верхней мантии Восточно-Европейской Платформы по данным сейсмического шума // Физика Земли. 2010. № 10. С. 38–47.
- Павленкова Н.И. Основные результаты изучения тектоносферы Восточной Европы и нерешенные проблемы. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Вып. 2. М.: Геокарт. 2006а. С. 659–672.

- Павленкова Н.И. Изучение верхней мантии Сибирского кратона по данным сверхдлинных сейсмических профилей // Геология и геофизика. 2006б. № 5. С. 36–47.
- Санина И.А., Ризниченко О.Ю. Томографический эксперимент SVEKALAPKO. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Вып. 2. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС. 2006. С. 70–78.
- Яновская Т.Б., Кожевников В.М., Соловей О.А., Акчурин К.Р. Строение верхней мантии в Азии по фазовым и групповым скоростям релеевских волн // Физика Земли. 2008. № 8. С. 22–31.
- Яновская Т.Б., Королева Т.Ю. О влиянии землетрясений на кросс-корреляционную функцию сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 9. С. 3–12.
- Bruneton M., Pedersen H.A., Farra V. and the SSTW Group. Complex lithospheric structure under the central Baltic Shield from surface wave tomography // J. Geophys. Res. V. 109. B10303. doi:10.1029/2003JB00294, P. 1–15.
- England P., Kennet B., Wortington M. A comparison of the upper mantle structure beneath Eurasia and North Atlantic and Arctic oceans // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1978. V. 54. P. 575–585.
- Guterch A., Grad M., Materzok R., Perchuc E. Deep structure of the Earth's crust in the contact zone of the Palaeozoic and Precambrian Platforms in Poland (Tornquist-Teisseyre zone) // Tectonophysics. 1986. V. 128. Issues 3–4. P. 251–279.
- Guterch A., Grad M., Thybo H., Keller G.R. The POLONAISE Working Group. POLONAISE '97 – an international seismic experiment between Precambrian and Variscan Europe in Poland // Tectonophysics. 1999. V. 314. P. 101–121.
- Lobkis O.I., Weaver R.L., On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. P. 3011–3017.
- Marquering H., Snieder R. Shear-wave velocity structure beneath Europe, the northeastern Atlantic and western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling // Geophys. J. Int. 1996. V. 127. P. 283–304.
- Shapiro N.M., Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlation of the ambient seismic noise // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L07614.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // Science. 2005. V. 307. P. 1615–1618.
- Shomali Z.H., Roberts R.G. and TWG. Non-linear body wave teleseismic tomography along TOR array // Geophys. J. Int. 2002. V. 148. P. 562–574.
- Šroda P., Czuba W., Grad M., et al. Crusral and upper mantle structure of the Western Carpathians from CELEBRATION 2000 profiles CEL01 and CEL04: seismic models and geological implications // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 37–760.
- Stehly L., Campillo M., Shapiro N.M. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. B10306(1)–B10306(12)
- Zielhuis, Nolet. Deep seismic expression of an ancient plate boundary in Europe Science. 1994. V. 265. P. 79–81.