



УДК 550.347.64+550.344.56

## **Средние скоростные характеристики основных структур Азиатского континента по данным поверхностных волн**

А. И. Середкина ([ale@crust.irk.ru](mailto:ale@crust.irk.ru))  
В. М. Кожевников ([kozhen@crust.irk.ru](mailto:kozhen@crust.irk.ru))  
О. А. Соловей ([solovey@crust.irk.ru](mailto:solovey@crust.irk.ru))

**Аннотация.** На основании представительной выборки дисперсионных кривых групповых скоростей основной моды волн Рэлея для более чем 3 200 сейсмических трасс исследовано строение земной коры и верхней мантии Азиатского континента. Методом двумерной томографии для случая сферической поверхности построены карты распределений групповых скоростей в диапазоне периодов от 10 до 250 с. По вычисленным картам для восьми различных в тектоническом отношении регионов были рассчитаны средние дисперсионные кривые и проведено их дальнейшее обращение в скоростные разрезы поперечных волн до глубин ~700 км. Полученные результаты позволяют проследить основные особенности глубинного строения рассматриваемых структур, а также могут быть использованы в качестве исходных данных для дальнейших детальных исследований Азиатского континента.

**Ключевые слова:** волны Рэлея, групповые скорости, поверхностно-волновая томография, строение мантии.

### **Введение**

Метод поверхностных волн широко применяется для изучения глубинного строения Земли на различных масштабных уровнях. Особенности распределения сейсмичности и доступность баз данных создают благоприятные условия для исследований коры и верхней мантии Азии с помощью данного метода [2; 4; 10–12; 15; 16; 20–24]. При этом в части вышеперечисленных работ анализируются только карты распределений скоростей поверхностных волн [16; 21]. В некоторых из них вычислены средние вертикальные скоростные разрезы поперечных волн ( $S$ -волн) для отдельных регионов [3; 14; 17; 22]. Большинство исследований, основанных на использовании групповых скоростей поверхностных волн, ограничено глубинами 350–400 км [11; 20; 23; 24], а результаты, рассчитанные до глубин 600 км по фазовым скоростям, имеют невысокое разрешение из-за малого количества исходных сейсмических трасс [4; 8; 12].

В настоящее время авторами получена представительная выборка (3200 сейсмических трасс) дисперсионных кривых групповых скоростей основной моды волн Рэлея в пределах диапазона периодов колебаний

10–250 с, что соответствует глубинности исследований  $\sim 700$  км. Методом поверхностно-волновой томографии рассчитано распределение групповых скоростей на Азиатском континенте, проанализированы особенности дисперсии поверхностных волн и вычислены средние скоростные разрезы поперечных волн для отдельных областей. В работе рассмотрены различные в тектоническом отношении регионы: платформы (Сибирская и Китайско-Корейская платформы, Западно-Сибирская плита), структуры Монголо-Охотского складчатого пояса (Байкальская рифтовая зона, Хангайское сводовое поднятие, области умеренного горообразования Центральной Монголии), а также высокогорное плато Тибет. Результаты данной работы не только позволяют получить новые сведения о глубинном строении рассматриваемых регионов, но и представляют значительный интерес для дальнейших исследований, в первую очередь направленных на построение трехмерных моделей распределения скоростей  $S$ -волн в мантии Азиатского континента.

### Исходные данные и методы исследования

Изучение горизонтальных неоднородностей коры и верхней мантии Азии основывалось на данных о дисперсии групповых скоростей волн Рэлея. Вычисления значений групповых скоростей проводились по записям поверхностных волн от сильных ( $M \geq 5,5$ ) удаленных землетрясений на каналах LHZ цифровых широкополосных сейсмических станций сетей IRIS. Всего было использовано 145 землетрясений, зарегистрированных в период с 1991 по 2009 г. Диапазон расстояний от эпицентров выбранных для анализа землетрясений до регистрирующих станций составил 1 500–16 000 км, что в большинстве случаев позволило выделить основную моду волны Рэлея в пределах диапазона периодов колебаний от 10 до 250 с. В результате с помощью процедуры спектрально-временного анализа [6] были получены дисперсионные кривые групповых скоростей для более чем 3 200 сейсмических трасс, пересекающих область исследования в различных направлениях (рис. 1).

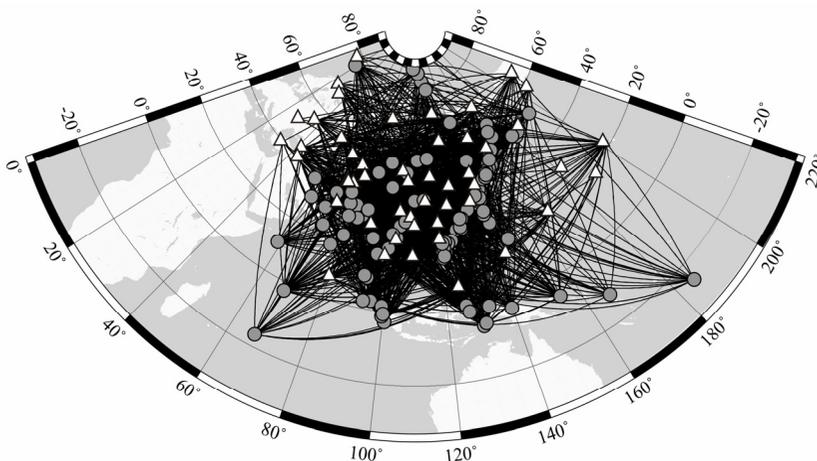


Рис. 1. Используемые сейсмические трассы. Эпицентры землетрясений обозначены кружками, сейсмические станции – треугольниками

Картирование групповых скоростей осуществлялось методом двумерной томографии по программе, разработанной профессором СПбГУ Т. Б. Яновской для случая сферической поверхности [9; 23]. Согласно используемой методике, карты вычислялись отдельно для каждого из заданных периодов колебаний. Всего, таким образом, было построено 18 карт с переменным по периоду шагом. Для интервала периодов колебаний от 10 до 30 с этот шаг составлял 5 с, от 30 до 100 с – 10 с и от 100 до 250 с – 25 с. Разрешение результатов картирования оценивалось путем вычисления эффективного радиуса осреднения  $R$  [9]. Пример карты распределения групповых скоростей с разрешением для периода 100 с показан на рис. 2.

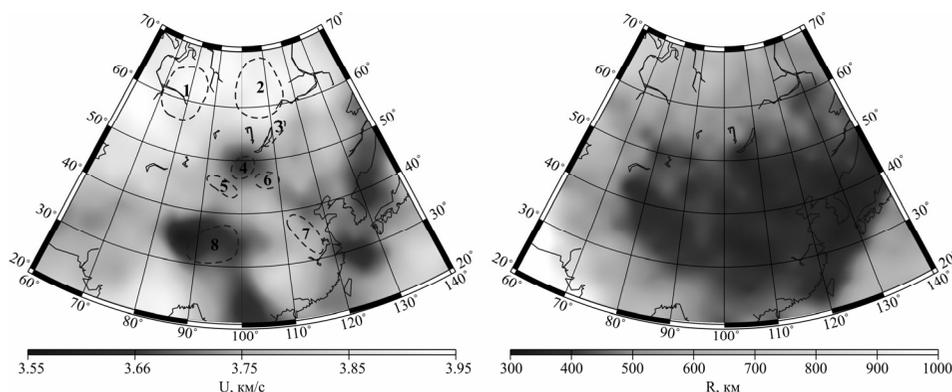


Рис. 2. Распределение групповых скоростей волн Рэлея ( $U$ , км/с) с разрешением ( $R$ , км) для периода колебаний 100 с. Пунктиром обозначены области, для которых были вычислены средние дисперсионные кривые: 1 – Западно-Сибирская плита; 2 – Сибирская платформа; 3 – Байкальская рифтовая зона; 4 – Хангайское сводовое поднятие; 5 – Гобийский Алтай; 6 – область умеренного горообразования Центральной Монголии; 7 – Китайско-Корейская платформа; 8 – Тибет

Из рисунка 2 видно, что наилучшее разрешение результатов картирования получено для центральной части области исследования, включающей в себя структуры Монголо-Охотского складчатого пояса, платформы Восточного и Юго-Восточного Китая, бассейны окраинных морей, высокогорные сооружения Тянь-Шаня, Памира и Гиндукуша, а также плато Тибет с его горным обрамлением. На периферии исследуемой области значения эффективного радиуса осреднения несколько выше.

Анализ карт распределений групповых скоростей для отдельных периодов позволяет получить общие представления о крупномасштабных горизонтальных неоднородностях глубинного строения. Так, на рис. 2 хорошо выражены низкоскоростные аномалии под Тибетом, а также в районах высокогорных сооружений Южной Сибири и Западной Монголии, в то время как платформенные регионы характеризуются высокими значениями групповых скоростей.

### Региональные дисперсионные кривые групповых скоростей

Для дальнейшего исследования особенностей строения коры и мантии по полученным картам распределений групповых скоростей для восьми различных в тектоническом отношении регионов в пределах областей, обозначенных пунктиром на рис. 2, были отобраны дисперсионные кривые и для каждого периода колебаний вычислены средние значения групповых скоростей (рис. 3).

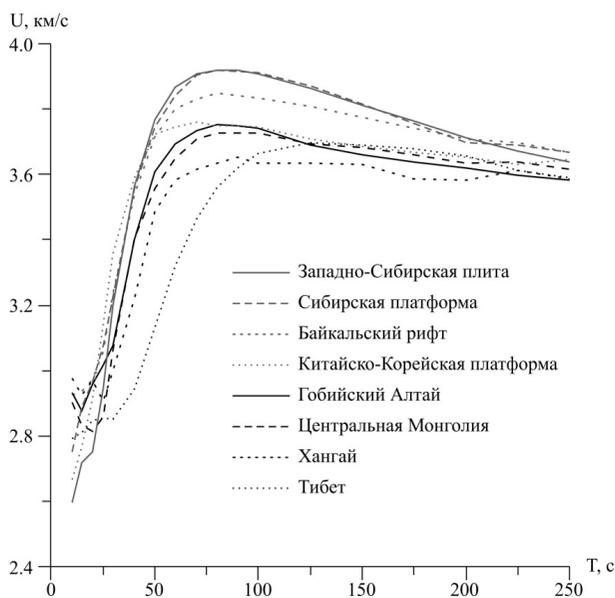


Рис. 3. Средние дисперсионные кривые групповых скоростей волн Рэлея

Результаты сопоставления региональных дисперсионных кривых (см. рис. 3) показывают, что они отражают особенности строения исследуемых структур. Как и на картах распределений групповых скоростей, наиболее высокие скорости поверхностных волн получены для Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Низкие значения скоростей (меньше 2,8 км/с,  $T = 10-25$  с), приуроченные к платформенным регионам, обусловлены наличием мощного чехла осадочных отложений [1; 7]. В интервале периодов 25–50 с средняя дисперсионная кривая для Байкальского рифта практически не отличается от дисперсионных кривых платформенных областей, что свидетельствует о сходстве в строении нижней коры и верхней мантии (до глубин ~80 км) данных структур, основные различия между которыми проявлены в более глубоких этажах мантии. Также следует отметить, что с учетом ошибок осреднения (рис. 4) дисперсионные кривые для Гобийского Алтая и областей умеренного горообразования Центральной Монголии совпадают практически на всем интервале исследуемых периодов и характеризуются промежуточными по отношению к остальным рассматриваемым регионам значениями групповых скоростей. Низкие групповые скорости наблюдаются под высокогорным плато Тибет и Хангайским сводовым поднятием.

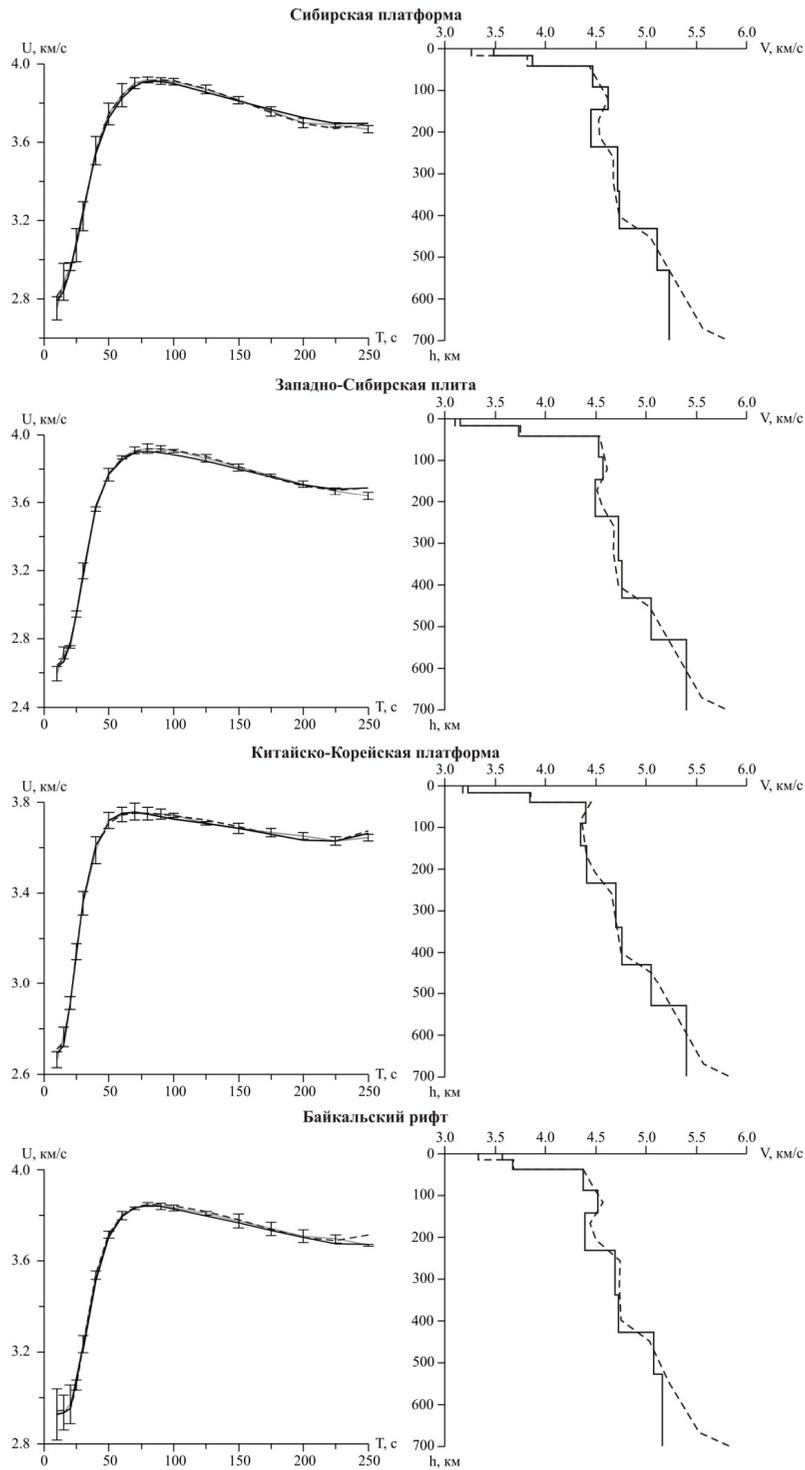
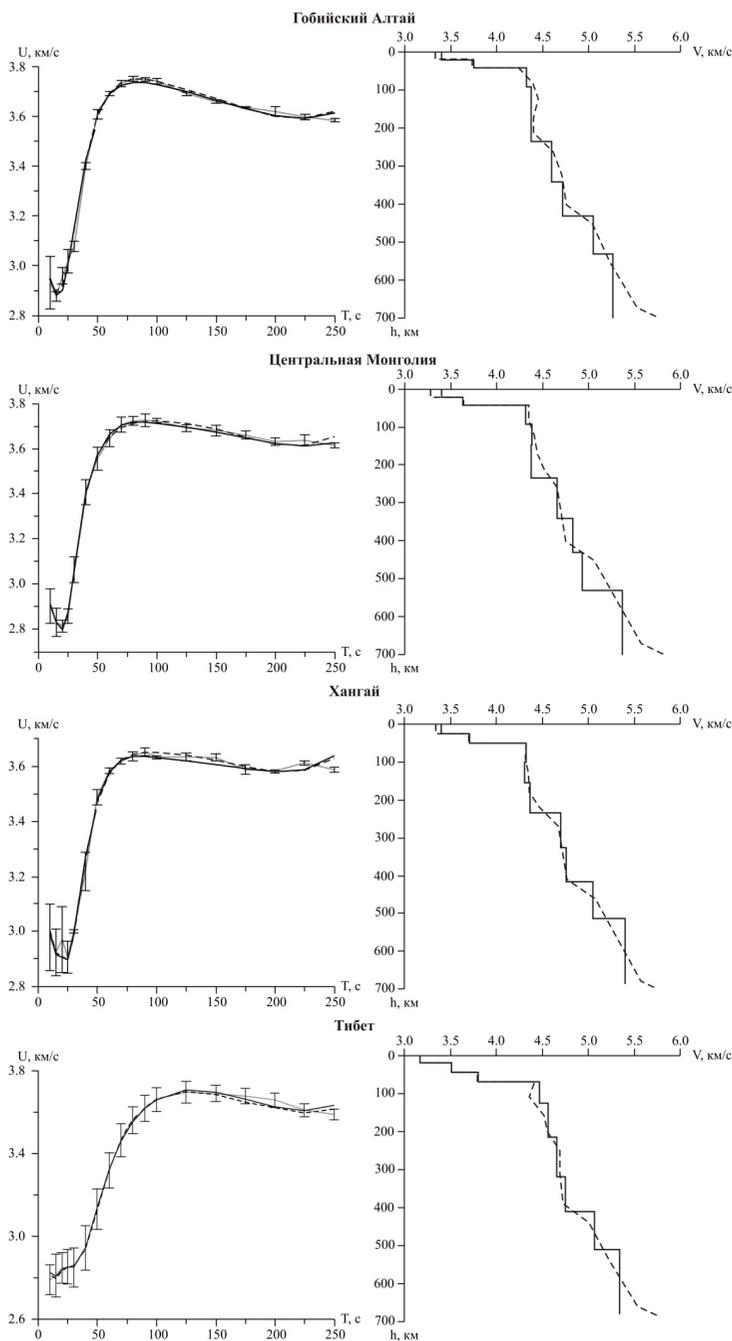


Рис. 4



**Рис. 4.** Средние дисперсионные кривые групповых скоростей и скоростные разрезы  $S$ -волн. Серым цветом обозначены исходные данные с ошибками осреднения, черные сплошные и пунктирные линии – решения обратной задачи различными методами

В интервале периодов от 10 до 80 с наименьшие значения скоростей характерны для Тибета, имеющего более мощную кору, а с увеличением периода – для Хангая, что соответствует пониженным скоростям  $S$ -волн в мантии на больших глубинах. Общей закономерностью для всех полученных дисперсионных кривых является уменьшение разброса в значениях групповых скоростей для периодов более 175 с, показывающее, что на глубинах более 400 км мантия становится менее дифференцированной по скоростям.

### Скоростные разрезы $S$ -волн

Анализ средних дисперсионных кривых волн Рэлея позволяет получить общее представление о глубинном строении исследуемых регионов. Однако из-за невозможности на периодах более 10 с достаточно достоверно разделить влияние коры и верхней мантии на характер дисперсии рассматриваемых колебаний для более детального изучения глубинного строения были вычислены скоростные разрезы поперечных волн.

Расчет параметров моделей среды, удовлетворяющих региональным дисперсионным кривым, осуществлялся двумя методами. В первом случае минимизация невязок между теоретическими и экспериментальными значениями горизонтальной медленности (величина, обратная групповой скорости) проводилась методом сопряженных градиентов для плоскопараллельной модели среды, представляющей собой 2 слоя коры (3 для Тибета) и 6 слоев мантии на полупространстве. Для вычислений использовалась программа, разработанная в ИТПЗ РАН под руководством профессора А. Л. Левшина. Во втором случае инверсия осуществлялась для модели среды, представляющей собой 2 плоскопараллельных слоя коры (3 для Тибета) и 11 слоев мантии с линейным нарастанием скорости с глубиной на однородном полупространстве. Расчеты выполнялись по программе профессора СПбГУ Т. Б. Яновской. Исходя из рассматриваемого диапазона периодов колебаний, глубинность метода близка к 700 км [16]. Варьируемыми параметрами служили скорости поперечных волн в слоях коры и мантии и мощности слоев коры. Начальные значения искомым величин были взяты из сферически симметричной модели PREM [13].

Во-первых, стоит отметить, что рассчитанные различными методами вертикальные скоростные разрезы  $S$ -волн (см. рис. 4) хорошо согласуются между собой, что свидетельствует об устойчивости и достоверности результатов. Во-вторых, полученные модели позволяют проследить основные закономерности в глубинном строении исследуемых регионов, а также сделать определенные выводы о мощностях литосферы и астеносферы. Так, для Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты получены близкие скоростные разрезы  $S$ -волн (что также проявлено и в дисперсии групповых скоростей), с мощной литосферой (~200 км) и утоненной астеносферой. Причем астеносферный слой утонен настолько, что с помощью используемого метода выделить его в явном виде невозможно, а о его наличии свидетельствует только общее понижение скоростей в интервале глубин 150–240 км. Верхняя мантия молодой Китайско-Корейской платформы также обладает,

хотя и пониженными по сравнению с древними платформами на севере области исследования, но достаточно высокими относительно тектонически активных регионов скоростями поперечных волн. Мощность литосферы здесь составляет около 80 км, а астеносферы – около 70 км. На территории Гобийского Алтая и Центральной Монголии кровля астеносферы расположена вблизи подошвы коры, а сам астеносферный слой хорошо развит и имеет толщину ~170 км. Аналогичная ситуация характерна и для Хангайского сводового поднятия, причем для данной структуры получены наиболее низкие скорости поперечных волн в верхней мантии до глубин порядка 250 км. Высокогорное плато Тибет обладает наиболее мощной корой (порядка 70 км) из всех рассматриваемых структур и достаточно высокими ( $> 4,40$  км/с) скоростями в верхней мантии, что согласуется как с результатами предшествующих исследований данного региона по поверхностным волнам [12; 17; 24], так и с данными ГСЗ [18; 19].

Отдельно остановимся на особенностях скоростного разреза, полученного для Байкальской рифтовой зоны. На нем непосредственно под корой обнаруживается достаточно мощный (~30 км) слой пониженных скоростей ( $< 4,40$  км/с), отделенный от астеносферы, залегающей на глубинах 150–230 км, слоем со скоростями, характерными для платформенных структур (~4,50 км/с). Похожие закономерности распределения скоростей в мантии Байкальского рифта ранее были выявлены по результатам глубинного сейсмического зондирования [5].

### Обсуждение результатов

Результаты данного исследования являются в значительной мере осредненными. Вычисление карт распределений групповых скоростей осуществлялось с параметром регуляризации 0,2 и основывалось на достаточно представительной выборке дисперсионных кривых, что обеспечило приемлемую сглаженность результатов картирования по горизонтали.

На следующем этапе осреднение проводилось при построении региональных дисперсионных кривых. В качестве погрешностей определения групповых скоростей на рис. 4 приведены удвоенные значения среднеквадратичных отклонений среднего на соответствующих периодах. Наибольшие ошибки осреднения (~2 %) характерны для Тибета в интервале периодов от 10 до 70 с и остальных тектонически активных регионов для  $T = 10–25$  с, что свидетельствует о значительной горизонтальной неоднородности коры и верхов мантии данных структур. Для платформенных областей на тех же периодах ошибки осреднения составляют порядка 1 %. С увеличением периода значения среднеквадратичных отклонений становятся меньше: около 0,5 для  $T = 30–175$  с и 0,2 для  $T \geq 200$  с.

Оценка качества результатов решения обратной задачи проводилась путем сравнения дисперсионных кривых, соответствующих вычисленным скоростным срезам, с региональными дисперсионными кривыми. Как видно из рис. 4, теоретические и экспериментальные значения групповых скоростей хорошо согласуются между собой во всем диапазоне рассматри-

ваемых периодов. Кроме того, достоверность полученных скоростных разрезов подтверждается непротиворечивостью результатов, полученных различными методами с разными начальными моделями. Что касается разрешения по глубине, то по имеющимся оценкам методом шахматной доски оно составляет порядка 30 км [15].

В результате проведенных исследований были получены новые сведения о средних скоростных характеристиках основных тектонических структур Азии до глубин порядка 700 км. Наиболее мощная литосфера (~200 км) наблюдается под стабильными платформами на севере континента, тогда как под рассматриваемыми тектонически активными регионами толщина литосферы варьирует в пределах 50–150 км. Причем под Гобийским Алтаем, Хангайским сводовым поднятием и в областях умеренного горообразования Центральной Монголии кровля астеносферы находится в непосредственной близости от подошвы коры.

Астеносферный слой со скоростями от 4,30 до 4,40 км/с под рассматриваемыми геологическими провинциями также существенно различается по толщине. Так, для структур Монголо-Охотского складчатого пояса его мощность составляет 80–170 км, а для молодой Китайско-Корейской платформы – около 70 км. При этом нижняя граница астеносферы под всеми исследуемыми регионами мало изменяется по глубине, варьируя в пределах 200–250 км. Исключение составляет высокогорное плато Тибет, для которого слой пониженных скоростей в мантии не выделен, что согласуется с данными предыдущих исследований как по групповым, так и по фазовым скоростям поверхностных волн [12; 17; 24].

### **Заключение**

Результаты проведенного исследования показывают, что вычисленные на основании картирования групповых скоростей волн Рэлея средние региональные дисперсионные кривые и разрезы поперечных волн отражают особенности строения рассматриваемых структур. Обращение дисперсионных кривых в вертикальные скоростные разрезы *S*-волн с помощью различных методов дает непротиворечивые результаты, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве начальных приближений для детальных исследований глубинного строения Азиатского континента. Кроме того, полученные данные представляют значительный интерес для построения геодинамических моделей рассматриваемых регионов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-05-31173 и гранта интеграционного проекта ОНЗ № 7.7.*

### **Список литературы**

1. Земная кора восточной части Сибирской платформы / Г. Д. Бабаян [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1978. – 56 с.
2. Кожевников В. М. Горизонтальные неоднородности коры и верхней мантии Азиатского континента по данным поверхностных волн Рэлея / В. М. Кожевников, Л. М. Антонова, Т. Б. Яновская // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990. – № 3. – С. 3–11.

3. Кожевников В. М. Дисперсионные кривые групповых скоростей волн Рэлея для ряда регионов Азиатского континента / В. М. Кожевников, М. П. Бармин // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 9. – С. 16–25.
4. Кожевников В. М. Трехмерная модель мантии Центральной Азии по данным дисперсии фазовых скоростей волн Рэлея / В. М. Кожевников, О. А. Соловей // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 4. – С. 30–39.
5. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / С. В. Крылов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1981. – 105 с.
6. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле / А. Л. Левшин [и др.]. – М. : Наука, 1986. – 278 с.
7. Региональная тектоника материков / М. В. Муратов // Тектоносфера Земли. – М. : Наука, 1978. – С. 11–32.
8. Соловей О. А. Трехмерная скоростная модель верхней мантии / О. А. Соловей, В. М. Кожевников // Докл. РАН. – 2008. – Т. 421А, № 6. – С. 934–936.
9. Яновская Т. Б. Развитие способов решения задач поверхностно-волновой томографии на основе метода Бэйкуса-Гильберта // Вычисл. сейсмология. – М., 2001. – Вып. 32. – С. 11–26.
10. Яновская Т. Б. Латеральные вариации строения коры и верхней мантии в Азиатском регионе по данным групповых скоростей релеевских волн / Т. Б. Яновская, Л. М. Антонова // Физика Земли. – 2000. – № 2. – С. 25–33.
11. Яновская Т. Б. Анизотропия верхней мантии Азиатского континента по групповым скоростям волн Рэлея и Лява / Т. Б. Яновская, В. М. Кожевников // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 622–629.
12. Яновская Т. Б. Структура верхней мантии в Азии по фазовым и групповым скоростям релеевских волн / Т. Б. Яновская, В. М. Кожевников В. М., О. А. Соловей, К. Р. Акчурин // Физика Земли. – 2008. – № 8. – С. 22–31.
13. Dziewonski A. M. Preliminary Reference Earth Model / A. M. Dziewonski, D. L. Anderson // Phys. Earth Planet. Inter. – 1981. – Vol. 25. – P. 297–356.
14. Levshin A. L. The use of crustal higher modes to constrain crustal structure across Central Asia / A. L. Levshin, M. H. Ritzwoller, N. M. Shapiro // Geophys. J. Int. – 2005. – Vol. 160. – P. 961–972.
15. Priestley K. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography / K. Priestley, E. Debayle, D. McKenzie, S. Pilidou // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – B10304. doi:10.1029/2005JB004082.
16. Ritzwoller M. H. Eurasian surface wave tomography: Group velocities / M. H. Ritzwoller, A. L. Levshin // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103, N B3. – P. 4839–2878.
17. Romanowicz B. A. Constraints on the structure of the Tibet Plateau from pure path phase velocities of Love and Rayleigh waves // J. Geophys. Res. – 1982. – Vol. 87, N B8. – P. 6865–6883.
18. Teng J.-W. Explosion study of the structure and seismic velocity distribution of the crust and upper mantle under Xizang (Tibet) Plateau // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. – 1987. – Vol. 89. – P. 405–414.
19. Teng J.-W. Structure of the crust and the upper mantle pattern and velocity distributional characteristics in the northern Himalayan mountain region / J.-W. Teng, S.-B. Xiong, Z.-W. Yin, Z. Xu, X. Wang, D.-Y. Lu // J. Phys. Earth. – 1985. – Vol. 33. – P. 157–171.
20. Villasenor A. Shear velocity structure of Central Eurasia from inversion of surface wave velocities / A. Villasenor, M. H. Ritzwoller, A. L. Levshin, M. P. Barmin, E. R. Engdahl, W. Spakman, J. Trampet // Phys. Earth Planet. Int. – 2001. – Vol. 123, N 2–4. – P. 169–184.
21. Wu F. T. Surface-wave group velocity tomography of East Asia / F. T. Wu, A. L. Levshin // Phys. Earth Planet. Int. – 1994. – Vol. 84. – P. 59–77.

22. Wu F. T. Rayleigh wave group velocity tomography of Siberia, China and vicinity / F. T. Wu, A. L. Levshin, V. M. Kozhevnikov // Pure and Appl. Geophys. – 1997. – Vol. 149. – P. 447–473.

23. Yanovskaya T. B. Lateral variations of the upper mantle structure in Eurasia from group velocities of surface waves / T. B. Yanovskaya, L. M. Antonova, V. M. Kozhevnikov // Phys. Earth Planet. Int. – 2000. – Vol. 122. – P. 19–32.

24. Yanovskaya T. B. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data / T. B. Yanovskaya, V. M. Kozhevnikov // Phys. Earth Planet. Int. – 2003. – Vol. 138. – P. 263–278.

## Average Velocity Characteristics of the Main Tectonic Structures of the Continent of Asia From Surface-Wave Data

A. I. Serechkina, V. M. Kozhevnikov, O. A. Solovei

**Abstract.** Deep velocity structure of the crust and the upper mantle of the continent of Asia has been investigated on the basis of the representative set of group velocity dispersion curves of Rayleigh waves (more than 3 200 paths). We applied a tomography method for spherical surface to image group velocity distributions in the period range 10–250 s. Average dispersion curves have been calculated for eight tectonic regions and then have been inverted to vertical shear wave velocity sections up to the depths of about 700 km. The results obtained allow us to explore main features of the deep velocity structure. Also they may be used as initial data in further detailed investigations of the continent of Asia.

**Keywords:** Rayleigh waves, group velocities, surface-wave tomography, mantle structure.

*Середкина Алена Игоревна*  
кандидат физико-математических  
наук, младший научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42-46-80

*Serechkina Alena Igorevna*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Junior Research Scientist  
Institute of the Earth's crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42-46-80

*Кожневников Владимир Михайлович*  
кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42-46-80

*Kozhevnikov Vladimir Mihaylovich*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Senior Research Scientist  
Institute of the Earth's crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42-46-80

*Соловей Оксана Анатольевна*  
кандидат геолого-минералогических  
научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42-46-80

*Solovei Oksana Anatolyevna*  
Candidate of Sciences (Geology and  
Mineralogy), Research Scientist  
Institute of the Earth's crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42-46-80