

В. В. Гордиенко, Л. Я. Гордиенко

Сейсмологические данные о глобальной астеносфере*(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)*

Проведен расчет годографа для скоростной модели нижней мантии, включающей астеносферу с $\approx 1\%$ -й частичного плавления пород в интервале глубин от 700 до 1000 км. Показана практическая невозможность выделения этого объекта сравнением расчетного и экспериментального годографов. Более заметно реагирует на астеносферу вертикальный градиент скорости и отношение скоростей продольных и поперечных волн. Для определения аномалии скорости, отвечающей астеносфере, необходим переход к использованию региональных вместо глобальной моделей, построенных для районов с разными эндогенными режимами на континентах и океанах.

В геофизической литературе встречаются различные толкования термина “астеносфера”. Нами определяется она как слой частичного плавления пород коры или/и верхней мантии. Именно превышение солидуса и появление жидкости служит причиной значимой неустойчивости (пониженной вязкости) вещества. Сейчас уже не вызывает сомнений отсутствие такой непрерывной геосферы внутри верхней мантии, где спорадически возникают (при прогреве поднявшимися астенолитами) и исчезают (при их остывании после прекращения подпитки перегретым веществом снизу) линзы частично расплавленных пород. Однако для описания указанных объектов термин по-прежнему применяется. Поэтому мы считаем необходимым использовать формально избыточный термин “глобальная астеносфера”, имея в виду выделение объекта, охватывающего всю планету и занимающего часть нижней мантии (в интервале глубин от около 700 до 1000 км).

Степень частичного плавления в рассматриваемом объекте невелика — $\approx 1\%$ (т. е. температура находится на уровне солидуса пород или незначительно превышает его). Объем данной астеносферы ($\approx 1,14 \cdot 10^{11}$ км³) сопоставим с объемом внешнего ядра ($1,66 \cdot 10^{11}$ км³) и превосходит объем внутреннего ($0,08 \cdot 10^{11}$ км³). Ее образование и сохранение от глубокого докембрия (астеносфера на указанных глубинах возникает как изолированный объект около 4 млрд лет назад) до настоящего времени следует из анализа тепловой истории Земли [1, 2], отвечающий ей слой аномально высокой электропроводности обнаружен магнитовариационными зондированиями [3 и др.] в различных регионах континентов и океанов. Использование сейсмологической информации для диагностики этого объекта пока не привело к определенному результату. В данном сообщении авторами поставлена цель выявить причину такого положения и привлечь внимание сейсмологов к проблеме.

Прогнозные оценки эффекта астеносферы. Изменения скорости продольных сейсмических волн (V_p) на глубинах 700–1000 км по сравнению с фоновым плавным ростом параметра с глубиной могут быть связаны именно с появлением жидкости, так как для образования слоя частичного плавления в данном случае не нужны заметные температурные аномалии. По имеющимся сведениям, о влиянии расплава на скорость (относящимся к породам верхней мантии, т. е. необязательно подходящим для рассматриваемого случая) в центре интервала можно ожидать понижения V_p до 0,1 км/с, на периферии — заметно

меньше. Это незначительные величины. Выявление подобной аномалии может быть осложнено кроме ее малой интенсивности еще и вариациями скорости сейсмических волн иной природы.

Так, по данным публикации [2], при рассмотрении скоростных разрезов подкорковой мантии в зонах современной активизации Северной Евразии с использованием сейсмологической информации в основном из работы [4] скоростная аномалия в линзах частично-го плавления имеет интенсивность, незначительно превосходящую в максимуме 0,1 км/с. Аномалия обнаружена на фоне вариаций скорости сопоставимой величины. Не исключено, что в верхах нижней мантии изменчивость минералогии пород (с которой предположительно связываются вариации скорости нетепловой природы [2 и др.]) менее значительна, чем в верхней мантии. Отметим, что и возможности выделения частей скоростного разреза с индивидуальными характеристиками с глубиной сокращаются. Выявленная аномалия определена на фоне скоростного разреза платформенных регионов, где в рассматриваемом интервале глубин температура далека от солидуса. Т.е. влияние только появления жидкости на скорость будет заметно меньшим. Близкая по величине аномалия V_p (на фоне соседних объемов верхней мантии с субсолидусными температурами) обнаруживается и под вулканическим регионом Восточной Камчатки [5].

На кровле и подошве астеносферы прогнозную скоростную аномалию логично считать сокращающейся практически до нуля. Рассматриваемое возмущение скоростного разреза мантии накладывается на фон, который должен представлять собой скоростную модель в нужном интервале глубин при отсутствии эффекта астеносферы. Нельзя исключать, что этот эффект присутствует в различных одномерных моделях распределения V_p Земли [6–10 и др.]. Поэтому для построения фонового распределения скорости были использованы фрагменты кривой $V_p = f(z)$ выше (но вне зоны скачка скорости, связанного с полиморфными преобразованиями вещества) и ниже предполагаемой аномалии, соединенные отрезком с плавно изменяющимся градиентом. Выбор одномерной модели среди имеющихся не принципиален. Сама по себе задача построения некоего среднеземного распределения V_p при условии явных крупных горизонтальных неоднородностей в коре и верхней мантии, скоростной анизотропии верхней мантии, четко выраженной неравномерности сетей источников и приемников волн представляется чисто технической. Результаты ее решения полезны как один из элементов сейсмологических расчетов.

В смысле изучения строения планеты трудно говорить о прогрессе при увеличении количества используемой информации даже по отношению к глубоким геосферам, в которых можно предположить реально одномерное распределение скорости сейсмических волн. Так, резкое изменение V_p в зоне полиморфных преобразований у границы верхней и нижней мантии в старых моделях Гутенберга (G) и Джеффриса–Буллена (JB) ($\approx 1,5$ км/с) можно согласовать с минералогическими преобразованиями вещества мантии в соответствующих PT -условиях. Изменение, принятое в современных моделях (≈ 2 км/с), по нашему мнению, с моделями G и JB не согласуется. Это различие влияет на рассчитываемую по годографу величину $\Delta V_p / \Delta z$ ниже зоны преобразований, существенно сокращая ее во втором случае.

Изложенные соображения привели нас к необходимости использовать модель JB как основу для построения фонового распределения. Модель G (автор допускал наличие зоны пониженных скоростей на глубине около 900–1000 км [6]) не использовалась, так как базируется на данных ограниченного числа североамериканских сейсмостанций, что по существу исключает ее из ряда глобальных построений.

В скоростной модели с отсутствующей зоной пониженных скоростей астеносфере может соответствовать интервал глубин с понижением $\Delta V_p/\Delta z$ от кровли слоя частичного плавления к его центру. Рост градиента к подошве не обязателен, так как этот параметр в основном сокращается с глубиной. Оценка с использованием приведенных выше данных возможной величины сокращения $\Delta V_p/\Delta z$ показывает, что она достигает $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ на фоне типичной величины для рассматриваемого интервала глубин $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [11].

Различия в сокращении скоростей продольных и поперечных (V_s) сейсмических волн при частичном плавлении изучены еще недостаточно полно. Имеющиеся сведения [12] позволяют предположить, что отношение значений скоростей при появлении 1% расплава сократится примерно на 0,01. По литературным данным [5, 13], для Восточной Камчатки на глубинах верхних горизонтов мантии величина V_p/V_s в средней части астеносферы оказывается на 0,02–0,03 меньше, чем над ее кровлей. Величину возмущения трудно признать достоверно установленной, но разница все же получена для довольно крупных объектов линейными размерами в первые сотни километров и мощностью в 50 км и более, поэтому качественный эффект аномалии можно принять до появления противоречащей информации. Этот эффект (проявляющийся и в других регионах с молодым мантийным магматизмом) также можно использовать для диагностики слоя частичного плавления на глубинах 700–1000 км. Скорее всего, в нижней мантии он окажется менее значительным, так как в глобальной астеносфере концентрация жидкости примерно вдвое меньше, чем под Восточной Камчаткой.

Сравнение годографов. Для моделей распределения V_p (на глубинах менее 700 км полностью совпадавшей с моделью JB) проведен расчет времен прихода продольных сейсмических волн в зависимости от глубин проникновения лучей. Вычисления, позволяющие контролировать ход лучей и определять времена появления волн в первых вступлениях, проведены по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени в сферическом варианте. Поскольку скоростной разрез на глубинах менее 700 км предполагался совпадающим, то расчетная модель начиналась с этой глубины, а не с поверхности. Различия времен прихода для моделей V_{pb} и V_{pc} составляют в области глубин проникновения 750–950 км 0,5–0,7 с. Соответственно отличия времен прихода при сравнении прогнозной модели и модели JB — 0,3–0,4 с. При среднеквадратической погрешности определения времен по годографу JB — 0,3 с учетом данных, опубликованных в монографии [7], уловить эту разницу практически не возможно.

Отклонения единичных точек, по которым проводится плавная кривая, представляющая собой годограф в интересующем нас диапазоне глубин проникновения сейсмических лучей (отвечающем угловым расстояниям примерно 30° – 55°), для более современных вариантов годографов существенно сократились. Они не превышают 0,1 с. На рис. 1, а показаны отклонения для модели Дзевонского (1984), примерно такие же величины вариаций харак-

Таблица 1. Распределения скоростей в моделях Джеффриса–Буллена (V_{pa}); фоновой — без астеносферы (V_{pb}); прогнозной — с астеносферой (V_{pc})

Z , км	V_{pa} , км/с	V_{pb} , км/с	V_{pc} , км/с	Z , км	V_{pa} , км/с	V_{pb} , км/с	V_{pc} , км/с
700	10,69	10,69	10,69	900	11,23	11,24	11,19
750	10,84	10,86	10,83	950	11,32	11,33	11,30
800	10,99	11,02	10,96	1000	11,41	11,42	11,41
850	11,11	11,14	11,09	1050	11,50	11,50	11,50

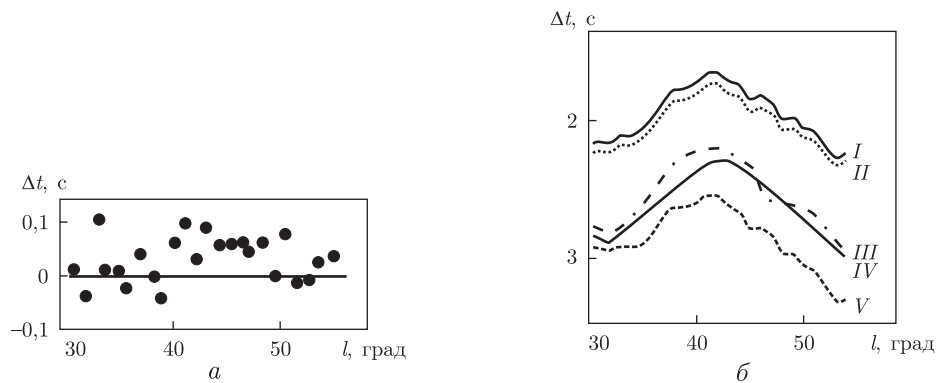


Рис. 1. Отклонения точек от годографа Дзевонского [Dz 84] (а) и отличия годографов различных авторов [I — SP 6, ak 135; II — IASP 91; III — Dz и An 83; IV — Dz 84; V — PREM] от годографа JB (б)

терны для моделей Дзевонского, Андерсона (1984) и SP 6. Однако разница времен прихода P -волн на совпадающих угловых расстояниях между годографами разных авторов значительна (см. б на рис. 1) [10].

Годограф JB до сих пор используется в сейсмологии, построенные позже годографы отличаются от него, но после “среднего по отличию” (на 0,7 с больше, чем отличие SP 6 от JB) построения Херрина [8] появляется максимально отличный от JB годограф PREM, а последующие варианты демонстрируют приближение к годографу JB (см. б на рис. 1) [9, 10].

Следовательно, сравнение расчетного и экспериментального годографов не позволяет выделить искомый объект, а также доказать его отсутствие. Есть смысл обратиться к отмеченным выше параметрам, производным от распределения скоростей сейсмических волн. Они могут оказаться более чувствительными к небольшим изменениям структуры, представленной плавным увеличением V_p и V_s с глубиной.

Вариации вертикального градиента V_p и V_p/V_s . Понижение вертикального градиента скорости V_p в части рассматриваемого интервала глубин очевидно в модели Гутенберга [6]. В публикации Л. П. Винника и А. В. Николаева [11] в близком интервале глубин выделяется одна из особенностей скоростного разреза нижней мантии — сокращение градиента по сравнению с нормальной величиной (в центре интервала отмечается его незначительно повышение). Столь незначительные вариации градиента трудноуловимы и не всегда достоверны. В других моделях изменения $\Delta V_p/\Delta z$ еще менее наглядны. Поэтому для обнаружения искомого эффекта кажется необходимым объединить информацию, которая имеющуюся в скоростных моделях PREM, IASP 91, SP 6, JB, G, а также данных [11], представленную на рис. 2. Достаточно отчетливо на рисунке просматривается понижение вертикального градиента скорости продольных волн в интервале глубин от 700 до 1000 км. Причем интенсивность минимума вполне сопоставима с прогнозированной (см. выше).

Примерно такая же картина наблюдается и для изменений с V_p/V_s (см. рис. 2). Используются данные моделей PREM, IASP 91, SP 6, JB, G. Сокращение величины отношения к центральной части рассматриваемого интервала глубин весьма отчетливое, его максимальная интенсивность согласуется с прогнозой.

Таким образом, очевидный подход к диагностике глобальной астеносферы — построение прогнозной скоростной модели и ее тестирование путем решения прямой задачи и сравнения результатов с экспериментальным годографом — оказался непригодным для получе-

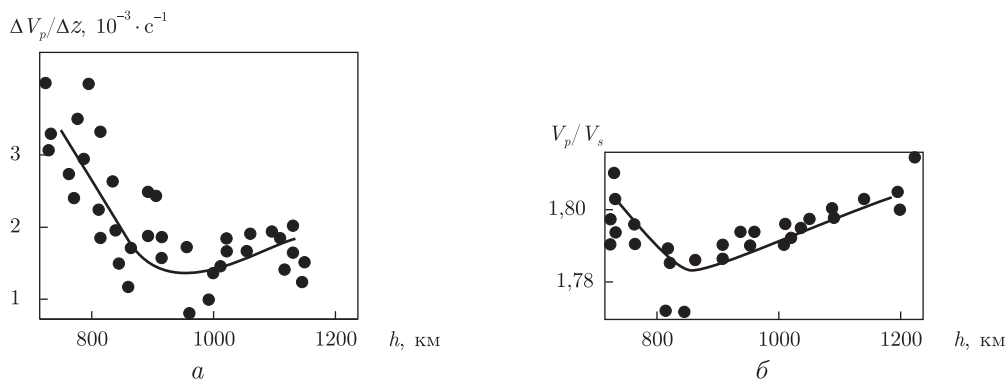


Рис. 2. Изменения $\Delta V_p/\Delta z$ (а) и V_p/V_s (б) в интервале глубин 670–1200 км, согласно данным различных скоростных моделей

ния определенного результата. Вероятный эффект слишком мал для выявления искомого объекта на столь значительной глубине, под множеством неоднородностей в верхней мантии.

Косвенные признаки существования астеносферы представляются более информативными, но их соответствия прогнозу едва ли достаточно для уверенного вывода. Вместе с данными геотермии и геоэлектрики они могут рассматриваться как некоторый вклад (до появления новых сейсмологических моделей, скорее всего, уже не одномерных) в решение задачи.

1. Гордиенко В. В. Глубинные процессы в тектоносфере Земли. – Киев: Ин-т геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины. – 1998. – 85 с.
2. Гордиенко В. В. Адвекционно-полиморфная гипотеза процессов в тектоносфере. – Київ: Корвін пресс, 2007. – 172 с.
3. Semenov V. Yu. Regional conductivity structures of the Earth's mantle // Warszawa: Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci, 1998. – Vol. C. – 65(302). – 122 p.
4. Pavlenkova G. A., Pavlenkova N. I. Upper mantle structure of Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. – 2006. – **416**. – P. 33–52.
5. Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. – 2006. – **2**. – С. 107–121.
6. Гутенберг Б. Физика земных недр. – Москва: Изд-во иностр. лит, 1963. – 263 с.
7. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. – Москва: Изд-во иностр. лит, 1960. – 486 с.
8. Herrin E. Seismological tables for P-phases // Bull. seism. soc. am. – 1968. – **60**. – P. 461–489.
9. Kennett B., Engdahl E., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophys. J. Inter. – 1995. – **122**, No 2. – P. 108–124.
10. Morelli A., Dziewonski A. Body Wave Traveltimes and A Spherically Symmetric P- and S-Wave Velocity Model // Ibid. – 1993. – **112**, No 2. – P. 178–194.
11. Винник Л. П., Николаев А. В. Скоростной разрез нижней мантии по прямым измерениям $dt/d\Delta$ // Физика Земли. – 1970. – **11**. – С. 24–40.
12. Бугаевский А. Г., Мельников Ю. Ю., Чесноков Е. М. Об эффективных модулях и анизотропии среды с включениями // Геодинамические исследования. – Москва: Радио и связь, 1984. – С. 76–86.
13. Низкоус И. В., Кислинг Э., Санина И. А., Гонтовая Л. И. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. – 2006. – **4**. – С. 18–29.

Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 16.03.2011

В. В. Гордієнко, Л. Я. Гордієнко

Сейсмологічні дані про глобальну астеносферу

Проведено розрахунок годографа для швидкісної моделі нижньої мантії, що містить астеносферу з $\approx 1\%$ -м ступенем часткового плавлення порід в інтервалі глибин від 700 до 1000 км. Продемонстровано практичну неможливість виділення цього об'єкта шляхом порівняння розрахункового та експериментального годографів. Більш помітно реагує на астеносферу вертикальний градієнт швидкості та співвідношення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль. Для визначення аномалії швидкості, що відповідає астеносфері, необхідний перехід до використання регіональних моделей замість глобальної, побудованих для районів з різними ендогенними режимами на континентах та океанах.

V. V. Gordienko, L. Ja. Gordienko

Seismological data on the global asthenosphere

The hodograph by the velocity model for the lower mantle with the asthenosphere consisting of 1% partial melting of rocks at depths of 700–1000 km is calculated. The practical impossibility of a separation of the object by comparing the calculated and experimental hodographs is shown. A more pronounced response to the asthenosphere is revealed by the vertical gradient of the velocity and the ratio of the velocities of compression and shear waves. For the selection of the velocity anomaly corresponding to the asthenosphere, it is necessary to use regional models instead of global ones. They must be built for the areas with different endogenous regimes on continents and oceans.