



УДК 550.34

© 2012

В. В. Гордиенко, Л. Я. Гордиенко

## О скорости распространения продольных сейсмических волн в подкоревой мантии Карпатского региона

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

*Рассмотрено распространение продольных сейсмических волн Береговского землетрясения 1965 г. Показано, что для объяснения времен прихода волн на удаленные сейсмостанции, когда значительная часть их пути проходит по верхней мантии, необходимо принять скоростную модель с зоной пониженной скорости под корой Карпатского региона. Аномалия скорости отвечает прогнозированной в соответствии с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы и вызвана повышением температуры пород верхней мантии примерно на 400–500 °С по сравнению с температурами под докембрийской платформой в том же интервале глубин. Возможна небольшая степень плавления мантийных пород.*

Активные альпийские и постальпийские (современные) геологические процессы в Карпатском регионе не вызывают сомнений. Многие геолого-геофизические данные свидетельствуют о существовании их мантийного этажа [1], в котором практически непосредственно под корой располагается зона частичного плавления ультраосновных пород. На это указывают состав молодых магматических образований Закарпатского прогиба, тепловая модель тектоносферы региона (согласованная с данными о распределении глубинного теплового потока), изотопия водорастворенного гелия, мантийная гравитационная аномалия [1–3]. Указанием на существование подкоревой зоны частичного плавления именно в настоящее время могли бы служить сведения о значительном снижении скорости продольных сейсмических волн ( $V_p$ ). В публикациях [4, 5] приводятся данные о снижении  $V_p$  под Паннонской впадиной по сравнению с Восточной Европой, но величина аномалии неясна (предполагается, что она составляет первые десятые доли километра в секунду), ее границы устанавливаются со значительными допусками. На скоростных разрезах вдоль профилей ГСЗ в Карпатах значения  $V_p$  в верхах мантии, как правило, не отличаются от встречающихся в платформенных регионах (исключение — понижение скорости продольных волн на сравнительно небольшой глубине под Восточно-Словацкой впадиной в Закарпатье [6] примерно до  $(7,9 \pm 0,1)$  км/с). Поэтому представляет интерес изучение скорости продольных сейсмических волн в верхних горизонтах мантии Карпат и сравнение результатов такого исследования с независимо по-

строенной скоростной моделью, опирающейся на определенные представления о глубинном процессе и сведения о связи скорости с температурой и степенью частичного плавления.

**Прогнозная скоростная модель.** С точки зрения определения достоверности тектонической гипотезы имеет значение не только факт выявления скоростной аномалии, но и величина возмущения. Сравнение прогнозируемой гипотезы и экспериментально установленной величины  $V_p$  — одна из возможностей количественного контроля схемы глубинного процесса. В случае использования адвекционно-полиморфной гипотезы [7], как показывают данные по другим регионам, возможно достижение согласования этих величин в степени, отвечающей погрешностям обоих методов расчета  $V_p$ , без подбора параметров процесса.

По данным [8], при нормальных (платформенных) температурах и обычном минеральном составе мантийных пород на глубине первых десятков километров под поверхностью раздела Мохоровичича (М) расчетные  $V_p$  составляют около 8,2 км/с. Эта величина согласуется с экспериментальными данными для регионов, где отсутствуют современные или молодые активные процессы. Под влиянием повышенной температуры и небольшой (порядка 2%) степени частичного плавления скорость должна понижаться примерно на 0,4–0,5 км/с.

Анализ тепломассопереноса в регионах, охваченных современной активизацией [7], показывает, что в верхних горизонтах мантии должны находиться высокоскоростные объекты, представленные опустившимися из коры эклогитами. Наиболее значительный из них, вероятно, фиксируется скоростной аномалией (обнаруженной К. Пожгаем), в пределах которой  $V_p$  достигает 8,6 км/с, вблизи границы Паннонской впадины и Апусени [9]. По мнению В. Б. Соллогуба [9], способ построения скоростного разреза в районе аномалии способствует некоторому завышению ее интенсивности, более реальной представляется величина около 8,3–8,4 км/с [8]. Количество высокоскоростного материала, распределенного в настоящее время в астеносфере под корой, можно оценить как эквивалентное слою мощностью 7–8 км [7]. Молодость процесса погружения эклогитизированных блоков (первые миллионы лет) делает вполне вероятным сохранение минералогии пород (и, следовательно, их физических свойств) к настоящему времени. Изменения могут быть связаны только с новыми  $PT$ -условиями, что радикально не скажется на относительной величине скоростной аномалии [8]. Следовательно, в подкоровом пространстве альпийской геосинклинали Карпат можно ожидать величины  $V_p$  примерно 7,8–7,9 км/с, что заметно отличает скоростной разрез региона от платформенного. Аномалия в 0,3–0,4 км/с должна надежно диагностироваться сейсмологическими методами.

**Экспериментальные данные.** В качестве фактического материала логично использовать сведения о временах пробега продольных сейсмических волн землетрясений Закарпатья, интенсивность которых достаточно велика для фиксации проявлений этих событий на значительных расстояниях. Удаления пунктов приема от источников колебаний должно быть значительным, чтобы в первых вступлениях проявлялись волны, большую часть пути прошедшие по мантии. В таком качестве удобно использовать Береговское землетрясение 24 октября 1965 г. (глубина очага около 5 км,  $M$  3,7) [10] (табл. 1). Отвечающие ему волны фиксируются на расстояниях до 1000 км (максимально далекая использованная сейсмостанция — Алушта). Вместе с тем к рассмотрению можно привлечь данные по многим другим сейсмостанциям, расположение которых показано на рис. 1.

На ближайшие к эпицентру сейсмостанции в первых вступлениях приходят волны, распространяющиеся только по коре, они могут быть использованы для контроля коровых скоростных моделей, которые необходимо привлекать для достоверной диагностики мантийных.



Рис. 1. Расположение сейсмостанций (1) и эпицентра Береговского землетрясения (2).

Условные обозначения: ПВ — Паннонская впадина; Ап — Апусени; ТВ — Трансильванская впадина; ЗП — Закарпатские прогибы; Т — Татры; ЗпК — Западные Карпаты; ВК — Восточные Карпаты; ПП — Предкарпатский прогиб.

Сейсмостанции (здесь и на рис. 2): 1 — Кашперские горы; 1а — Плугонице; 2 — Краков; 3 — Львов; 4 — Моршин; 5 — Ужгород; 6 — Межгорье; 7 — Рахов; 8 — Косов; 9 — Черновцы

Коровые модели построены по данным о скоростных разрезах, содержащихся в работах [6, 9, 11–13 и др.]. Здесь представлены скоростные разрезы вдоль профилей ГСЗ и КМ-ПВ (на которых  $V_p$  приведены в виде пластовых и средних величин), построенные под сейсмостанциями по сейсмологическим данным. Их точность явно не лучше 0,1–0,2 км/с, поэтому в нескольких случаях разрезы между источником и разными сейсмостанциями считались одинаковыми. Конкретные варианты приведены на рис. 2.

В зависимости от расположения сейсмостанций и источника между ними строилась модель среды, включающая два (или более) элемента.

Времена начала землетрясения определены разными методами, результаты различаются на  $\pm 0,3$  с [10]. Поэтому нельзя рассчитывать на более точное совпадение экспериментальных времен пробега волн с расчетными. Учитывая вероятность и других источников ошибок, следует ожидать больших расхождений даже при использовании адекватных реальности моделей.

**Результаты расчета.** Вычисления, позволяющие контролировать ход лучей и определять времена появления волн в первых вступлениях, проведены по программе SEIS-83 Пшенчика и Червени. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение расчетных и наблюдаемых времен прихода на сейсмостанции продольных волн от Береговского землетрясения

Номер сейсмостанции	Сейсмостанция	$\Delta X$ , км	$t_{\text{набл}}$ , с	$t_{\text{расч}}$ , с	$\Delta t$ , с
1	Кашперские горы	675	90,8	91,2	0,4
1а	Плугонице	625	85,3	84,8	–0,5
2	Краков	288	43,8	44,3	0,5
3	Львов	210	34,8	34,4	–0,4
4	Моршин	145	26,0	25,5	–0,5
5	Ужгород	58	11,0	11,2	0,2
6	Межгорье	77	14,3	14,6	0,3
7	Рахов	118	21,4	21,1	–0,3
8	Косов	180	31,0	29,1	–1,9
9	Черновцы	245	38,3	38,3	0
А	Алушта	982	128,3	128,8	0,5

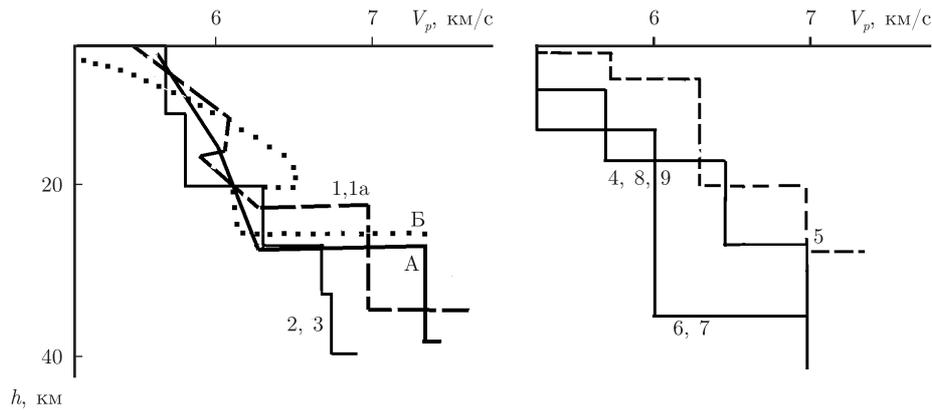


Рис. 2. Скоростные разрезы коры под сейсмостанциями и эпицентром Береговского землетрясения. Условные обозначения: А — Алушта; Б — Берегово

Очевидно, что для большинства близких к эпицентру сейсмостанций (№ 2–7, 9) получены расчетные времена прихода волн в первых вступлениях, отвечающие наблюдаемым. Среднее расхождение составляет  $\pm 0,3$ , оно вполне объясняется погрешностью экспериментальных данных, положительные и отрицательные отклонения сопоставимы. Исключение получено для станции Косов. Принятая при расчете скоростная модель изменена (скорости в слоях коры понижены на величину возможной погрешности) по сравнению с приведенными в [12], тем не менее расчетное время заметно меньше наблюдаемого. Причина выявленного аномального отклонения неясна, но поскольку оно единично, можно считать расчетные результаты в целом верно отражающими известные данные о скоростных разрезах коры Карпатского региона.

При построении мантийных моделей для далеких от эпицентра землетрясения сейсмостанций 1, 1a и А учитывалось размещение зон современной активизации (под которыми предполагалась астеносфера и, соответственно, зона пониженной скорости) не только в Карпатском регионе, но и за его пределами. Это — зоны молодого магматизма и повышенного теплового потока Чешского массива; установлены по комплексу геолого-геофизических данных Бельцкая зона, а также зоны Одесского залива Черного моря и Крыма. В обоих случаях между активизированными коро-мантийными блоками располагаются и блоки, вероятно, сохранившие к настоящему времени “тектонический покой”. Они диагностируются, в частности, по отсутствию аномально высокого теплового потока [14]. Размер каждого из платформенных блоков (принято, что любая трасса пересекает только один платформенный блок) был оценен примерно в 200 км. В модели включены соответствующие вставки (рис. 3).

Совпадение расчетных и экспериментальных времен пробега волн для случаев их погружения в мантию можно признать удовлетворительным (см. табл. 1). Таким образом, можно утверждать, что сейсмологические данные по Береговскому землетрясению 1965 г. подтверждают существование зоны пониженных скоростей прогнозной интенсивности на подкоровых глубинах под Карпатским регионом.

Проведенное моделирование, используя довольно ограниченный объем информации об одном землетрясении и основываясь на простых (скорее — упрощенных из-за отсутствия более детальных данных) конструкциях для коры и верхних горизонтов мантии, тем не менее позволило с полной определенностью ответить на важный для тектогенетических построе-

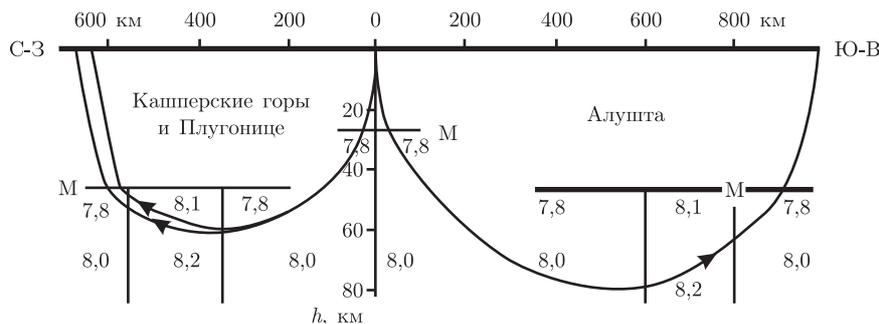


Рис. 3. Скоростные модели мантии и расчетные траектории лучей от Береговского землетрясения до Алушты, Кашперских гор и Плугонице

ний вопрос о наличии астеносферы в обширной области, охваченной альпийской геосинклиналью и постальпийской активизацией. Расчеты основаны на предположении о прямолинейном распространении волн от источника к приемникам. В рассматриваемом регионе установлено явление азимутальной анизотропии, наличие которого может существенно усложнить решение задачи [15]. Показано, что в первых вступлениях оказываются волны, огибающие значительную часть Карпатского региона, а не проходящие прямо через него. Однако построенная модель (с учетом указанных обстоятельств) должна использоваться для волн, образованных вне области распространения астеносферы с повышенным поглощением сейсмической энергии, огибающих эту область. Выбор источника внутри активного региона позволяет избежать усложнения модели.

1. Гордиенко В. В., Тарасов В. Н. Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. – Киев: Знання, 2001. – 102 с.
2. Гордиенко В. В. Плотностные модели тектоносферы территории Украины. – Киев: Интелект, 1999. – 101 с.
3. Гордиенко В. В., Усенко О. В. Глубинные процессы в тектоносфере Украины. – Киев: Ин-т геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 2003. – 147 с.
4. Рябой В. З. Структура верхней мантии территории СССР по сейсмическим данным. – Москва: Недра, 1979. – 242 с.
5. Сагалова Е. А. Строение верхней мантии в Европе по годографам сейсмических волн землетрясений Вранча // Геофиз. журн. – 1980. – № 3. – С. 62–66.
6. Grad M., Guterch A., Keller G. et al. Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin: CELEBRATIONo 2000. – seismic profile CEL05 // J. Geophys. Res. – 2006. – 111, No 3. – P. 3647–3670.
7. Гордиенко В. В. Адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере. – Киев: Корвин пресс, 2007. – 172 с.
8. Гордиенко В. В. О природе аномалий скорости распространения продольных сейсмических волн в верхней мантии // Геофиз. журн. – 2010. – № 3. – С. 43–63.
9. Соллогуб В. Б. Литосфера Украины. – Киев: Наук. думка, 1986. – 184 с.
10. Костюк О. П., Руденская И. М. Сейсмичность Карпат в 1965 году // Сейсмичность Украины. – Киев: Наук. думка, 1969. – С. 23–31.
11. Гейко В. С., Ливанова Л. П., Чекунов А. В. Совместное использование рефрагированных и отраженных волн для определения скоростного разреза земной коры Закарпатья // Геофизические исследования на Украине. – Киев: Техніка, 1970. – С. 12–24.
12. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / За ред. В. І. Старостенко. – Киев: Наук. думка, 2005. – 256 с.
13. Соллогуб В. Б., Чекунов А. В., Соллогуб Н. В. и др. Структура литосферы Карпатско-Крымского сегмента Средиземноморского складчатого пояса // Геофиз. журн. – 1987. – № 1. – С. 3–13.

14. Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Усенко О. В. Тепловое поле Центральной и Восточной Европы // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Вып. 2. – Москва: ГЕОС, 2006. – С. 624–658.
15. Нестеров А. Н., Григорьева О. А. Эффекты азимутальных аномалий поверхностных волн Лява в Карпато-Балканском регионе // Физика Земли. – 1987. – № 6. – С. 57–65.

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

Поступило в редакцию 23.11.2010

**В. В. Гордієнко, Л. Я. Гордієнко**

### **Про швидкість поширення поздовжніх сейсмічних хвиль у підкоровій мантії Карпатського регіону**

*Розглянуто поширення поздовжніх сейсмічних хвиль Берегівського землетрусу 1965 р. Показано, що для пояснення часу надходження хвиль на віддалені сейсмостанції, коли значна частина їх шляху проходить по верхній мантії, необхідно прийняти швидкісну модель з зоною зниженої швидкості під корою Карпатського регіону. Аномалія швидкості відповідає прогнозованій у відповідності до уявлень адвекційно-поліморфної гіпотези та викликана підвищенням температури порід верхньої мантії приблизно на 400–500 °С у порівнянні з температурами під докембрійською платформою в тому самому інтервалі глибин. Можливий невеликий ступінь часткового плавлення порід мантії.*

**V. V. Gordienko, L. Ja. Gordienko**

### **On the propagation velocity of longitudinal seismic waves in the subcrustal mantle of the Carpathian region**

*The propagation of longitudinal seismic waves from the earthquake at Beregovo in 1965 is analyzed. It is shown that, to explain the arrival times of seismic waves on the remote seismostations, when a significant portion of their path passes through the upper mantle, it is necessary to take the velocity model with a low velocity zone under the crust of the Carpathian region. The velocity anomaly corresponds to the rate predicted in accordance with the advective-polymorphic hypothesis and the temperature rising in rocks of the upper mantle approximately by 400–500 °C, as compared with the temperatures under the Precambrian platform in the same depth interval. A small degree of mantle rocks melting is possible.*