



УДК 550.36

<http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2016.04.062>

**В. В. Гордиенко, Л. Я. Гордиенко**

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

E-mail: [tectonos@igph.kiev.ua](mailto:tectonos@igph.kiev.ua)

## Скоростные разрезы верхней мантии океанических желобов

*(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)*

*По данным о времени пробега продольных волн от землетрясений в верхней мантии под океаническими желобами построена скоростная модель волн под этими структурами до глубины 360 км. Установлено резкое отличие распределения  $V_p$  под желобами от океанических регионов, изученных ранее. Собранный авторами по Камчатскому и Курильскому желобам экспериментальный материал не допускает построения годографов, которые характеризовали бы столь различные скоростные разрезы. Полученный в процессе подбора годограф должен отвечать скоростному разрезу, отличающемуся от сформировавшегося экспериментальный годограф не более чем на несколько сотых долей км/с. В интервале глубин 120–360 км скоростная модель практически совпадает с моделью для мантии континентальной платформы. На меньших глубинах скорости ниже, но не указывают на частичное плавление.*

**Ключевые слова:** сейсмические волны, океанические желоба, скоростная модель, землетрясение.

В статье рассматриваются результаты части исследования скоростей продольных сейсмических волн ( $V_p$ ) в верхней мантии океанов, проводимого авторами в последние годы. Ими были к настоящему времени охвачены островные дуги и береговые хребты Тихого океана и срединно-океанические хребты Арктического, Атлантического, Тихого и Индийского океанов [3, 4 и др.]. В этих регионах удалось собрать большой фактический материал, использованный для построения скоростных разрезов, достаточно полно освещавших мантию до глубин около 450–500 км. Достигнуто удовлетворительное совпадение полученных результатов с представлениями используемой авторами адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ).

© В. В. Гордиенко, Л. Я. Гордиенко, 2016

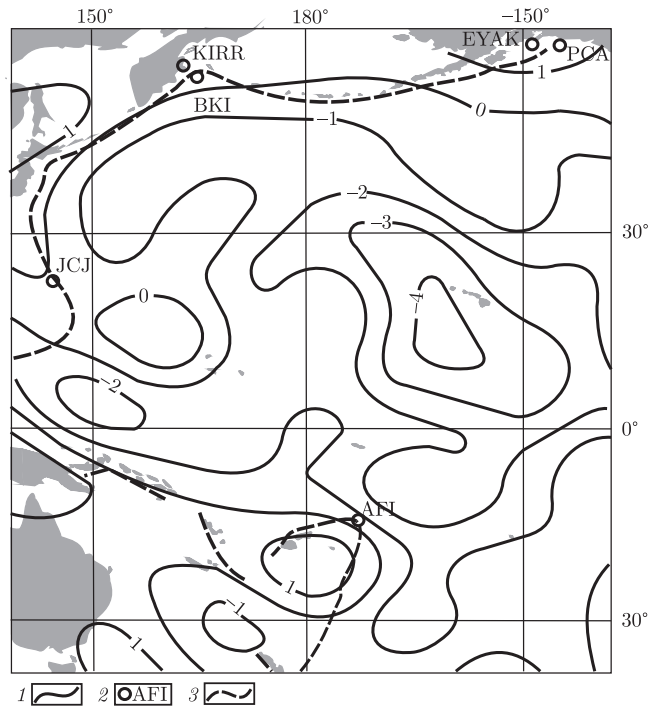


Рис. 1. Размещение использованных сейсмостанций: 1 — изолинии поляризованной анизотропии ( $V_{sh} - V_{sv} / V_{sh}$  в %) на глубине около 150 км; 2 — сейсмостанции; 3 — оси желобов

При изучении океанических желобов ситуация менее благоприятна: небольшая ширина этих изогнутых в плане структур затрудняет подбор сейсмостанций и малоглубинных землетрясений, расположение которых обеспечивает построение скоростной модели именно желоба без влияния соседних океанических котловин или островных дуг. Поэтому обоснованность средней скоростной модели желоба оказалась значительно меньше, чем упомянутых выше образований. Тем не менее, удалось установить резкое отличие распределения  $V_p$  под желобами от океанических регионов, изученных ранее.

**Используемый материал.** Размещение сейсмостанций на периферии Тихого океана, данные по которым были привлечены для анализа, показано на рис. 1.

В двух пунктах наблюдения (JCJ и AFI), вынесенных на рис. 1, использовались в каждом случае данные по одной сейсмостанции. В остальных были привлечены сведения по 3–14 сейсмостанциям, расположенным на небольшом расстоянии одна от другой. Существенно различались количества землетрясений, использованных при построении годовых годовграфов на каждой из сейсмостанций (табл. 1).

Для построений применяли данные о временах прихода на станцию волн от землетрясений с глубинами гипоцентров 10 км [10]. При отличии реальных глубин от этой вели-

Таблица 1. Количество землетрясений, сведения о которых были использованы при построении годовграфов на сейсмостанциях

Станция и направление	N	Станция и направление	N
AFI → юг	557	EYAK → запад	38
JCJ → юг	616	PCA → запад	21
BKI → юг	70	KIRR → юг	39

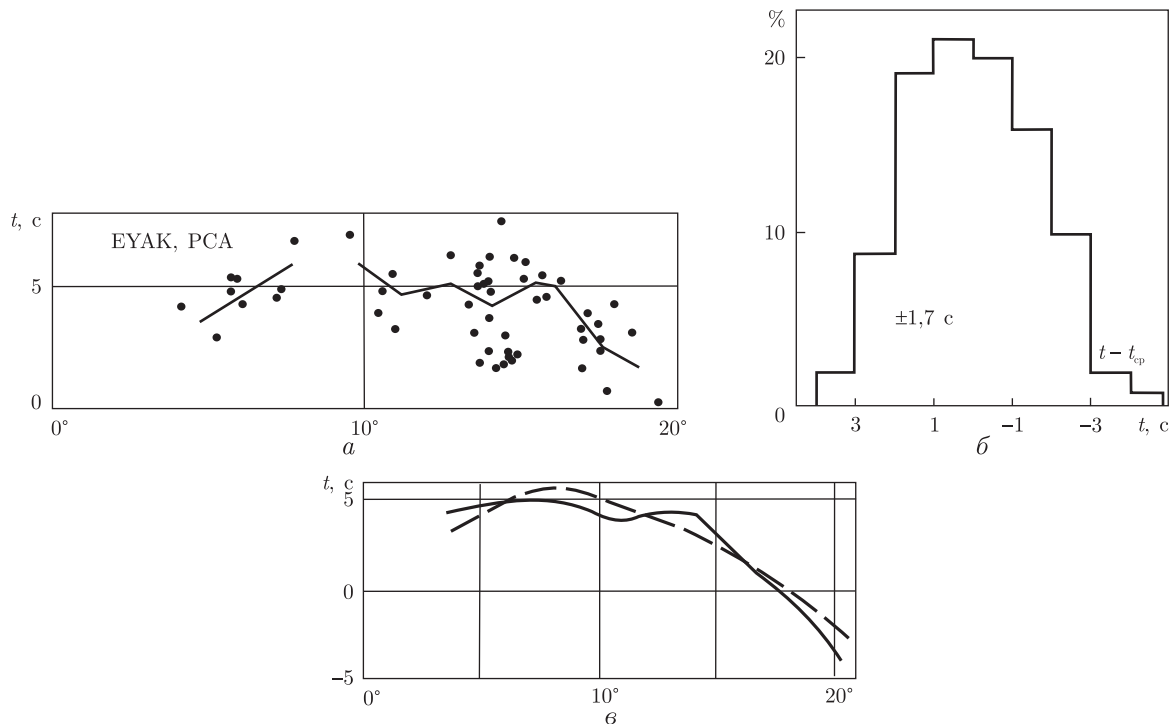


Рис. 2. Редуцированный к скорости 8,2 км/с наблюдаемый годограф для станций у восточного конца Алеутского жолоба (ЕУАК, РСА) (а): точки — наблюдаемые значения времен прихода продольных сейсмических волн, линия — осредненный годограф для станций ЕУАК, РСА. Гистограмма распределения отклонений индивидуальных точек от средней линии годографа (б). Сопоставление расчетного годографа, подобранного для скоростного разреза верхней мантии жолобов (штриховая линия) со средним наблюдаемым годографом (сплошная линия) (в)

чины вносили поправки, учитывающие реальный скоростной разрез [3, 4 и др.]. Только в двух случаях удалось построить наблюдаемые годографы в диапазоне угловых расстояний, обеспечивающем проникновение волн на глубины примерно до 360 км. Для остальных сейсмостанций построены только фрагменты годографов (рис. 2).

Осреднение наблюдаемых времен прихода волн проводили в скользящих окнах  $2\text{--}4^\circ$ , результирующую точку на годографе размещали внутри окна с учетом изменяющейся “концентрации” наблюдаемых, единичное смещение окна составляло  $0,4^\circ$  (рис. 2, а). Построена гистограмма распределения отклонений единичных точек от осредняющей линии годографа. Типичные значения отклонений (1,0–1,5 с) меньше полученных в других работах близкой направленности [7 и др.]. Исключением оказывается только годограф для сейсмостанции АFI (на северном окончании жолоба Тонга–Кермадек). Здесь среднее отклонение в 2 раза больше. При изучении скоростных разрезов верхней мантии островных дуг [4] на этой станции также был зафиксирован повышенный разброс наблюдаемых времен прихода. Осредняющий годограф значительно отличался от полученных для других дуг. По имеющимся данным эта особенность может быть связана с отличием поляризационной анизотропии района дуги и жолоба Тонга от существующей в других частях Тихого океана [9] (см. рис. 1). Двумерное моделирование для всей островной дуги включая северную часть Новой Зеландии [4] показало, что рассматриваемая особенность может быть ограничена северной частью системы дуга–жолоб. Соответственно, данные о временах прихода волн

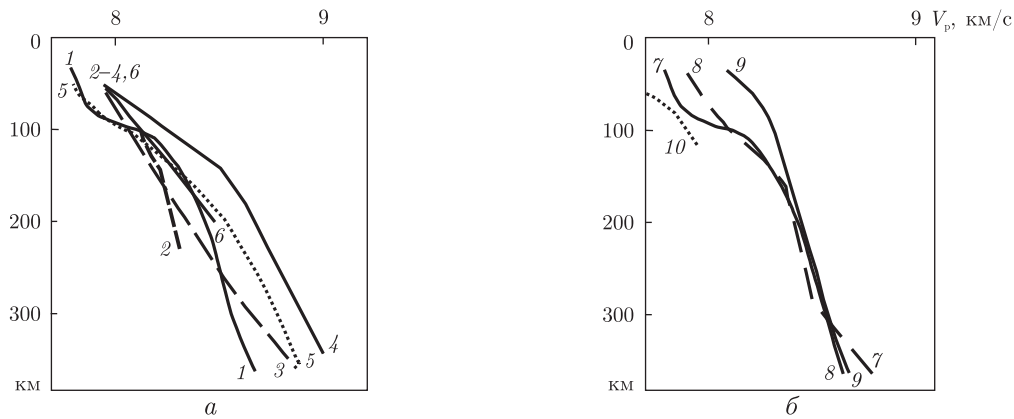


Рис. 3. Построенная скоростная модель верхней мантии желоба и данные предшествующих исследований (а), сравнение построенной скоростной модели (7) с моделями докембрийской платформы (8), расчетной моделью по АПГ (9), распределением  $V_p$  вдоль линии солидуса (10) (б). Модели верхней мантии: 1 и 7 — построенная в этой работе; 2 и 5 — Камчатского желоба по [2, 5]; 3 и 4 — Курильского желоба по [1, 5]; 6 — модель желоба по [8]

с юга к сейсмостанции АГІ на угловых расстояниях больше примерно  $15^\circ$  не искажены ее влиянием. Учитывая небольшое общее количество данных и ограниченность длин годографов, построен один годограф по всем имеющимся данным (см. рис. 2). Отклонения от него фрагментов индивидуальных годографов для различных желобов не превышают 1–1,5 с.

Отклонения точек от осредняющей кривой могут быть использованы в качестве характеристики погрешности построения годографа. Типичная величина не превышает 1,7 с (см. рис. 2), т. е. вполне объясняется вариациями времен прихода волн на сейсмостанции.

**Результаты расчетов.** Расчетный годограф получен по программе SEIS-83 И. Пшеничка и В. Червени. Максимальные необходимые глубины проникновения лучей (до подошвы верхней мантии — 450–500 км) достигаются при реальном скоростном разрезе на удалениях примерно  $23^\circ$  и временах пробега около 300 с. Практически расчет был ограничен угловым расстоянием  $20\text{--}21^\circ$  из-за ограниченной длины экспериментального годографа.

Подбор расчетного годографа, согласующегося с экспериментальным, был начат с модели первого приближения, отвечающей верхней мантии неактивизированной докембрийской платформы [2, 6 и др.]

Полученный в процессе подбора годограф (рис. 2, в) ни в одной из точек не отличается от экспериментального более чем на 1,2 с. Среднее различие между ними составляет около 0,6 с. Проведенные ранее и в данной работе тестовые расчеты показали, что различия между годографами около 2 с могут быть компенсированы изменением скоростного разреза в пределах слоя мощностью не менее 100 км на 0,1 км/с. Таким образом, расчетный годограф должен отвечать скоростному разрезу, отличающемуся от сформировавшегося экспериментальный годограф не более, чем на несколько сотых долей км/с.

Сравнивая полученный нами скоростной разрез верхней мантии желобов (рис. 3) с установленными под этими структурами ранее [1, 2, 5, 6, 8], убеждаемся, что некоторые разрезы в значительных интервалах глубин практически совпадают с ним. Но часто отличия значительны. В верхней части разреза они составляют 0–0,1 км/с, в нижней — 0,1–0,3 км/с. Отличия полученных ранее скоростных разрезов друг от друга не меньше, их нельзя объяснить погрешностью используемых данных. И самое существенное — собранный авторами

по Камчатскому и Курильскому желобам экспериментальный материал не допускает построения годографов, которые характеризовали бы столь различные скоростные разрезы.

**Обсуждение результатов.** Ранее одним из авторов были построены скоростные разрезы для Камчатского и Курильского желобов в соответствии с представлениями АПГ. Следует отметить, что адвекционно-полиморфная гипотеза для глубинных процессов в океанах разработана еще недостаточно, так как в этих регионах слишком мало данных об их геологической истории, которыми можно проконтролировать гипотетические схемы тепломассопереноса в верхней мантии [6 и др.]. Тем не менее, этот прогнозный скоростной разрез отличается от установленного в данной работе лишь на несколько сотых долей км/с за исключением интервала глубин мощностью около 40 км в верхнем горизонте мантии (см. рис. 3). И здесь отличие не превышает 0,1 км/с, т. е. может быть обусловлено погрешностью наблюдений и расчетов.

Сравнение полученного скоростного разреза с отвечающим линии солидуса (см. рис. 3) показывает, что в верхней мантии под желобом отсутствует интервал глубин с частичным плавлением, характерный для изученных авторами ранее островных дуг и срединно-океанических хребтов [3, 4 и др.]. Это согласуется с геологическими данными: в желобах в отличие от островных дуг и прилегающих к ним частях океанических котловин отсутствует современный и молодой магматизм.

Сопоставляя скоростной разрез верхней мантии желоба с платформенным, обнаруживаем их согласование в интервале глубин 120–360 км. Ближе к поверхности значения  $V_p$  под желобом значительно ниже имеющихся под платформой (см. рис. 3). Отличия достигают 0,3–0,4 км/с. Для количественного объяснения этих особенностей скоростного разреза необходимо провести довольно сложные исследования тепловой истории мантии региона, которые должны включать:

- 1) определение фоновых распределений температуры в мантии геосинклинальных поясов и океанов;
- 2) схему тепломассопереноса в прилегающих к желобу частях этих регионов;
- 3) расчет влияния таких процессов на тепловое поле, изменяющее значения температуры в недрах желоба по сравнению с фоном, предположительно средним между геосинклинальным и океаническим.

Ранее такая операция была проведена [2, 6], результат сравнения расчетной скоростной модели с полученной в данной работе в целом удовлетворительный (см. рис. 3), но за прошедшее время произошли изменения в содержании гипотезы, влияние которых на расчетную модель еще необходимо определить.

Такая масштабная задача не может быть решена в данной работе. На качественном уровне можно утверждать, что распределение  $V_p$  не противоречит АПГ. Согласно гипотезе, фоновый скоростной разрез желоба должен обладать несколько пониженными  $V_p$  по сравнению с платформенным. Во время активных (в том числе молодых и современных) процессов в недрах островной дуги и океанической котловины, происходящих у краев желоба, возникают интенсивные аномалии температуры разного знака. В нижней части верхней мантии они повышают  $V_p$  примерно до платформенного уровня, в верхней — значительно понижают по сравнению с ним.

Таким образом, при проведении работы по построению скоростного разреза верхней мантии под океаническими желобами авторам пришлось столкнуться с рядом специфических трудностей, обусловленных применяемой методикой отбора используемого фактического материала и анализа данных. В результате пришлось исследовать один сводный годограф

для всех желобов, но и в этом случае его протяженность не позволила изучить нижнюю часть верхней мантии. Т.е. из рассмотрения был исключен интервал глубин, имеющий большое значение для истолкования скоростной модели в геодинамическом смысле. При объяснении полученного скоростного разреза пришлось пока ограничиться качественным вариантом. Тем не менее очевидно, что полученный результат — еще один шаг в построении скоростной модели мантии океанического сектора Земли.

## Цитированная литература

1. *Болдырев С. А.* Мантийные неоднородности активных окраин Мирового океана // Структура и динамика зон перехода от континента к океану. – Москва: Наука, 1986. – С. 43–50.
2. *Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В.* Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. – № 2. – С. 107–121.
3. *Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я.* Скоростной разрез верхней мантии под Алеутской, Курильской и Японской островными дугами // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2012. – № 3. – С. 37–46.
4. *Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я.* Аномалии скорости Р-волн в верхней мантии нефтегазоносных регионов окраин Тихого океана. Материалы 3-х Кудрявцевских чтений, Москва, ЦГЭ, 2014. – С. 1–4.
5. *Тараканов Р. З.* Скоростные модели и годографы Р-волн для Дальневосточного региона // Вестн. ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 81195.
6. *Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии.* Под ред. К. Ф. Сергеева, В. В. Гордиенко, М. Л. Красного. – Владивосток: Дальневосточное отделение Ин-та морской геологии и геофизики РАН, 1992. – 238 с.
7. *Feng M., Lee S., Assumpcao M.* Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves // *J. G. R.*, 2007. – **112**. B04312. doi: 10.1029/2006JB004449.
8. *Gudmundsson O., Sambridge M.* A regionalized upper mantle (RUM) seismic model // *J. G. R.*, 1998. – **102**, No B4. – P. 7121–7126.
9. *Romanowicz B.* Global mantle tomography: progress status in the past 10 years // *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* – 2003. – **31**. – P. 303–328.
10. *U. S. Geological Survey Albuquerque Seismological Laboratory.* [http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic\\_Data/](http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic_Data/).

## References

1. *Boldyrev S. A.* Structure and dynamics of the transition zone from continent to ocean, Moscow: Nauka, 1986: 43–50 (in Russian).
2. *Gontovaya L. I., Gordienko V. V.* Geology and Mineral Resources of the World Ocean, 2006, No 2: 107–121 (in Russian).
3. *Gordienko V. V., Gordienko L. Ja.* Geology and Mineral Resources of the World Ocean, 2012, No 3: 37–46 (in Russian).
4. *Gordienko V. V., Gordienko L. Ja.* Anomalies of P-wave velocity in the upper mantle of oil and gas regions on the margins of the Pacific Ocean. Articles 3 Kudryavtsevskoye readings, Moscow: CGE, 2014: 1–4 (in Russian).
5. *Tarakanov R. Z.* Vestnik DVO RAN, 2006, No 1: 81 195 (in Russian).
6. *The tectonosphere of the Asia-Pacific margin.* Ed. K. F. Sergeev, V. V. Gordienko, M. L. Krasny, Vladivostok, 1992 (in Russian).
7. *Feng M., Lee S., Assumpcao M.* *J. G. R.* 2007, **112**: B04312. doi: 10.1029/2006JB004449.
8. *Gudmundsson O., Sambridge M.* *J. G. R.* 1998, **102**, No B4: 7121–7126.
9. *Romanowicz B.* *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 2003, **31**: 303–328.
10. *U. S. Geological Survey Albuquerque Seismological Laboratory* [http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic\\_Data/](http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic_Data/).

Поступило в редакцию 30.09.2015

**В. В. Гордієнко, Л. Я. Гордієнко**

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

*E-mail:* tectonos@igph.kiev.ua

## **Швидкісні розрізи верхньої мантії океанічних жолобів**

*За даними про час пробігу подовжніх хвиль від землетрусів у верхній мантії під океанічними жолобами побудовано швидкісну модель хвиль під цими структурами до глибини 360 км. Встановлено різку відмінність розподілу  $V_p$  під жолобами від океанічних регіонів, вивчених раніше. Зібраний авторами по Камчатському і Курильським жолобах експериментальний матеріал не допускає побудови годографів, які характеризували б настільки різні швидкісні розрізи. Отриманий в процесі підбору годограф повинен відповідати швидкісному розрізу, що відрізняється від того, що сформував експериментальний годограф не більше ніж на кілька сотих часток км/с. У інтервалі глибин 120–360 км швидкісна модель практично збігається з моделлю для мантії континентальної платформи. На менших глибинах швидкості значно нижчі, але не вказують на часткове плавлення порід.*

**Ключові слова:** сейсмічні хвилі, океанічні жолоби, швидкісна модель, землетрус.

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

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

*E-mail:* tectonos@igph.kiev.ua

## **Velocity sections of the upper mantle under oceanic trenches**

*According to the travel time of longitudinal waves from earthquakes in the upper mantle under oceanic trenches, a velocity model of waves beneath these structures to a depth of 360 km is developed. A sharp contrast to the distribution of  $V_p$  under the trenches of ocean regions studied earlier is found. Experimental data on the Kamchatka and Kuril trenches compiled by the authors do not allow the construction of a hodograph that would characterize such different speed sections. As a result of the selection process, the hodograph must correspond to the velocity profile different from that forming the pilot hodograph by no more than a few hundredths of km/s. In the depth interval 120–360 km, the velocity model is almost the same as the model for the mantle of a continental platform. At shallower depths, the velocity is lower, but it does not indicate the partial melting.*

**Keywords:** seismic waves, ocean trench, velocity model, earthquake.