

В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко

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

СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИМИ ХРЕБТАМИ

По данным о времени прихода P -волн от землетрясений под срединно-океаническими хребтами Арктического, Атлантического, Тихого и Индийского океанов построены годографы на расстояния до 25 градусов. Это позволило установить распределение скорости до глубины около 450–500 км. Установлена зона пониженной скорости в верхней мантии от 90 до 240 км, в пределах которой вероятно частичное плавление пород.

Ключевые слова: срединно-океанические хребты, скорость сейсмических волн.

Введение

В статье приведены результаты исследования, продолжающие начатые работой [3], где рассмотрены исходные данные, их обработка, интерпретация и геологическое приложение результатов построения скоростной (по P -волнам) модели верхней мантии океанических регионов северо-запада Тихого океана. После рассмотрения островных дуг авторы перешли к анализу данных по срединно-океаническим хребтам (СОХ), изученных в гораздо меньшей степени. Использованы сведения о времени прихода сейсмических волн от землетрясений с эпицентрами в пределах СОХ на островные и прибрежные сейсмостанции [14]. Применялась опробованная в [3 и др.] методика обработки данных, ее описание здесь не повторяется. Расчетный годограф получен по программе *SEIS-83* И. Пшенчика и В. Червени. Максимальная необходимая глубина проникновения лучей (до 500 км) достигается на удалении примерно 23° и времени пробега около 300 с. Глубина гипоцентров, привлеченных к анализу землетрясений, достигала 20 км, все они были пересчитаны на 10 км, что несколько превышает глубину нахождения раздела Мохо под СОХ. Скоростные разрезы под сейсмостанциями незначительно отличались от использованных для островных дуг [3]. Поправки к времени прихода волн пересматривали по мере подбора скоростного разреза в диапазоне между действительной глубиной очага (гипоцентра) и 10 км.

© В.В. ГОРДИЕНКО, Л.Я. ГОРДИЕНКО, 2016

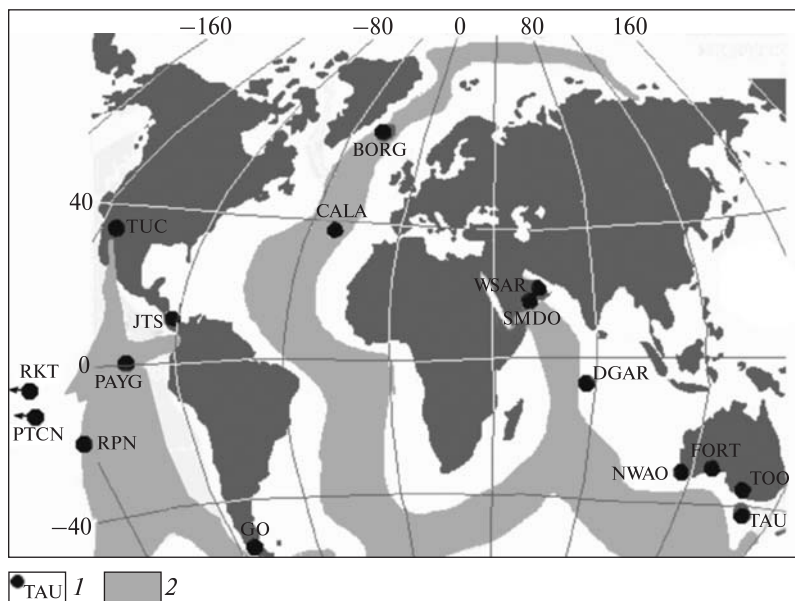


Рис. 1. Расположение источников информации и срединно-океанических хребтов: 1 — сейсмостанции; 2 — СОХ

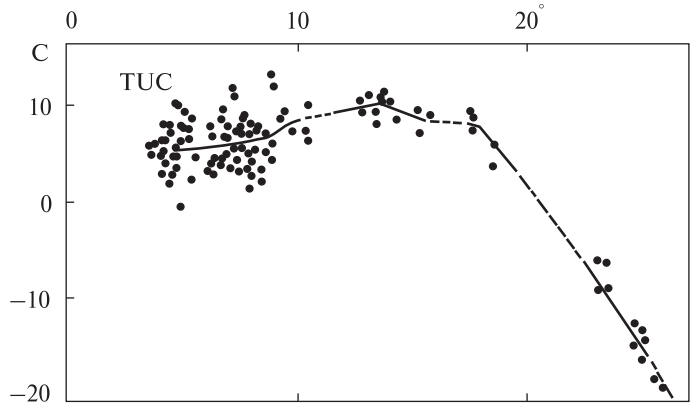
С точки зрения используемой авторами адвекционно-полиморфной гипотезы глубинных процессов в тектоносфере (АПГ) [2], срединно-океанические хребты представляют собой регионы максимальной современной активности (наиболее объемного тепломассопереноса в мантии), соответственно в их пределах следует ожидать максимальной аномальности в распределении скоростей продольных сейсмических волн (V_p), однако достоверность такого заключения ограничена, т. к. информация о геологической истории рассматриваемых регионов незначительна. Это не позволяет строить геологически значимые модели глубинного процесса. Но именно это и заставляет обратиться к изучению СОХ: скоростные разрезы могут послужить одним из источников данных для воссоздания истории тепломассопереноса в тектоносфере.

Ниже приведены результаты построения скоростных разрезов верхней мантии под северной частью Восточнотихоокеанского поднятия (включая Калифорнийский залив), частью поднятия южнее о. Пасхи, Галапагосским и Чилийским хребтами, северной частью Срединно-Атлантического хребта, хребта Мона в Арктическом океане, северной частью Восточноиндийского хребта, центральной частью Южноиндийского хребта южнее Австралии (рис. 1).

Используемый материал

Угловое расстояние между источниками колебаний и сейсмостанциями определялось по [7, 14]. Были привлечены данные по сейсмостанциям: Наррогин (NWAO), Форрест (FORT), Туленги (TOO) в Австралии, Тасманский Университет (TAU) на о. Тасмания, Австралия, Эйбат (ABTO), Бисья (BSY), Джабал Мадар (JMDO), Рабкут (RBK), Самад (SMDO), Вадии Бани Халид (WBK), Вадии Сарин (WSAR) в Омане, Диего Гарсиа (DGAR) на архипелаге Чагос, Боргар-

Рис. 2. Редуцированный наблюдаемый годограф для одной из станций (TUC→PAYG) на Восточнотихоокеанском поднятии. Точки — наблюдаемые значения времени прихода продольных сейсмических волн, линия — осредненный годограф



нес (BORG) в Исландии, Калдейра и др. (CALA) на Азорских о-вах, Португалия, Джунтас Абангарес (JTS) в Коста-Рике, Пуэрто Аврора (PAYG) на о. Галапагос, Эквадор, Тусон (TUC) в США, Вилла О'Хиггинс (GO08), Сьерро Кастило (GO09) в Чили, Рапа Нуи (RPN) на о. Пасхи, Чили, Рикитеа (RKT) на о. Камбье, Франция, Остров Питкерн (PTCN) на о. Питкерн, Великобритания (рис. 1).

Для построения наблюдаемых годографов в разных частях изучаемых регионов использовалось заметно различающееся количество данных (таблица).

Информации на каждой из станций, как правило, немного, поэтому часто для построения наблюдаемых годографов использовались сведения по нескольким станциям, что дало возможность построить годографы (редуцированные к скорости 8,2 км/с) на значительные угловые расстояния и с относительно небольшими пробелами (рис. 2).

Результаты расчетов

Осреднение наблюдаемых времен прихода волн проводилось в скользящем окне в 3° , результирующая точка на годографе размещалась внутри окна с учетом изменяющейся «концентрации» наблюдаемых, единичное смещение окна составляло $0,4^\circ$. Отклонения точек на отдельных построенных годографах от осредняющей кривой могут быть использованы в качестве характеристики погрешности его построения. Гистограмма распределения этих величин приведена на рис. 3. Типичное значение отклонений ($1,5$ с) меньше полученных в других подобных работах — [12] и др.

Согласно имеющимся оценкам [8 и др.], отклонение около 2 с может быть обусловлено только ошибкой в определении планового положения эпицентра землетрясения при реальной погрешности информации об одномерной скоростной модели региона, используемой для расчета параметров очага. Таким образом, установленная величина вполне соответствует качеству используемого материала.

Наблюдаемые годографы представлены на рис. 4. Их строили начиная с углового расстояния около 3° , так как на меньших резко увеличивался разброс экспериментальных данных. Возможно, сказывалась неоднородность земной коры или самых верхних горизонтов мантии. В соответствии с установленной

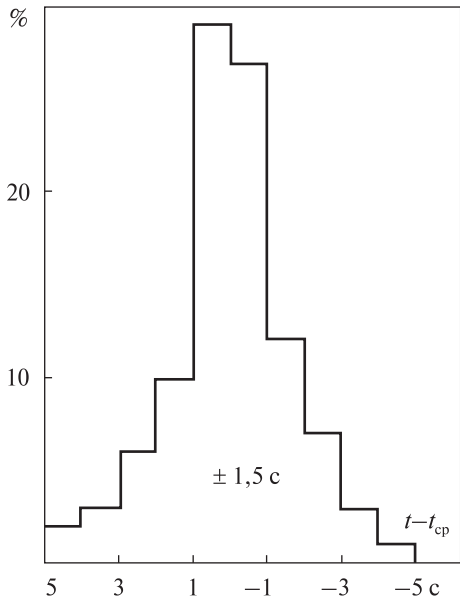


Рис. 3. Гистограмма распределения отклонений времени прихода волн на сейсмостанции от осредненных годовых графиков

величиной погрешности можно оценивать результаты сравнения наблюдаемых и расчетных годовых графиков. Вариации результатов расчета, выраженные в разнице времени при разных скоростных разрезах, существенно меняются с глубиной вносимых изменений. Чтобы не пропустить скоростных аномалий, будем считать заметными различиями расчетных и наблюдаемых годовых графиков все, превосходящие 1,5 с. Хотя не все фиксируемые при этом скоростные аномалии (отвечающие отличиям от подобранного расчетного годового графика) могут быть признаны достоверными. Годовые графики, полученные в разных океанах, мало различаются (рис. 4). Основная часть близка к осредненному, отличаясь от него на величину около 1 с. Только годовые графики, построенные по данным станций Омана в центральной и правой частях и DGAR в центральной части, отличаются от осредненного больше (до 2–3 с). Это может свидетельствовать о наличии в скоростных разрезах соответствующих участков хребтов аномалий интенсивностью до 0,1–0,2 км/с на глубине порядка 300 км (Оман) и 100 км (DGAR). В первом случае аномалия скорости отрицательная, во втором — положительная.

На рис. 5 показан редуцированный расчетный годовое график, подобранный под наблюдаемые, отвечающий ему скоростной разрез верхней мантии и некоторые лучи распространения сейсмических волн. Подбор годового графика начат с варианта первого приближения, в качестве которого использованы априорные данные. Такой информации немного, но имеющиеся сведения согласуются между собой [10, 13, 15], поэтому можно надеяться на близость модели первого приближения и конечного результата подбора.

Большинство наблюдаемых годовых графиков удовлетворительно согласуются с расчетным, т. е. можно утверждать, что типичный скоростной разрез верхней

Количество землетрясений (N), сведения о которых были использованы при построении годовых графиков на сейсмостанциях

Станция и направление	N	Станция и направление	N	Станция и направление	N
NWAO→юг	225	RBK→юг	60	CALA→BORG	60
FORT→юг	111	SMDO→юг	75	JTS→PAYG	562
TOO→запад	40	WBK→юг	33	PAYG→JTS	91
TAU→запад	80	WSAR→юг	54	TUC→PAYG	329
ABTO→юг	66	DGAR→север	98	GO→PTCN→GO	137
BSY→юг	42	BORG→север	183		
JMDO→юг	40	BORG→GALA	320		

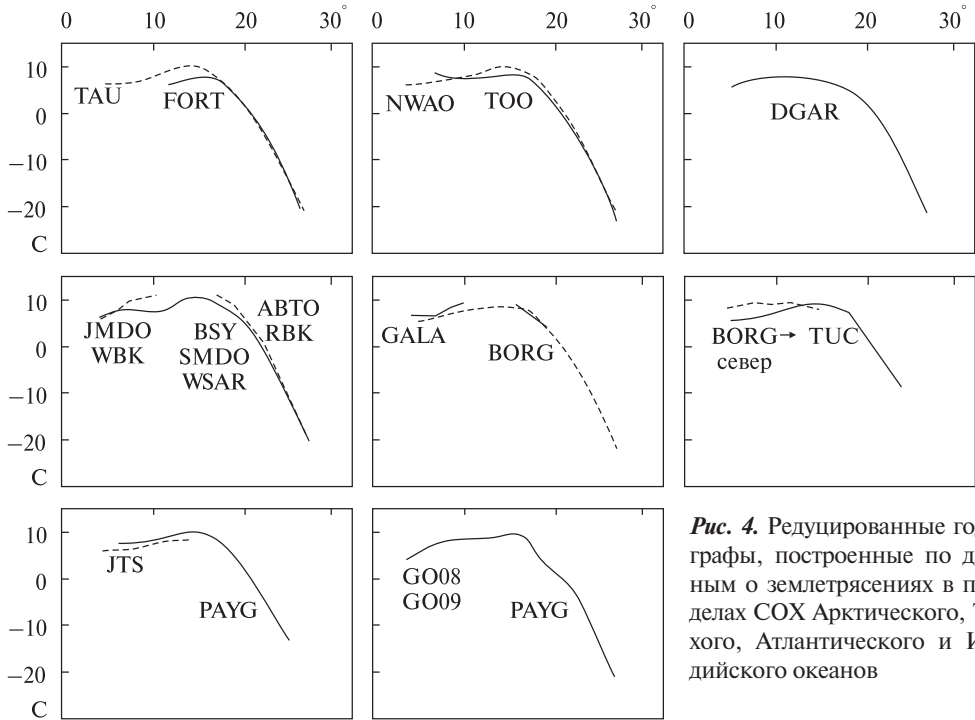


Рис. 4. Редуцированные годографы, построенные по данным о землетрясениях в пределах СОХ Арктического, Тихого, Атлантического и Индийского океанов

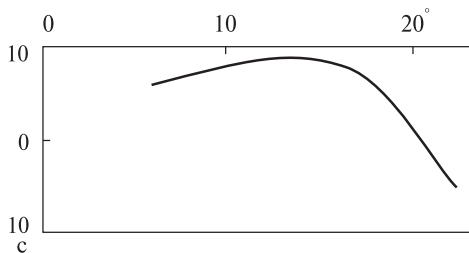
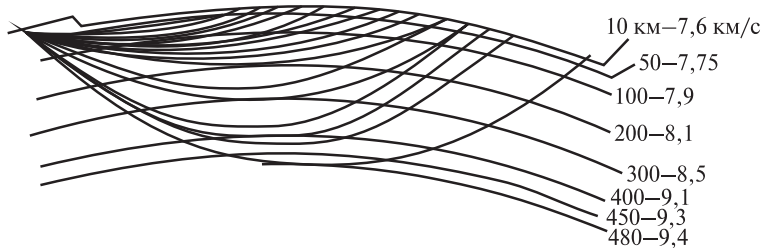


Рис. 5. Редуцированный расчетный годограф, отвечающий подобранному скоростному разрезу



мантии изучаемых СОХ установлен. Возможные уточнения скоростного разреза для конкретных участков СОХ практически исчерпываются указанными выше для северной части Восточноиндийского хребта.

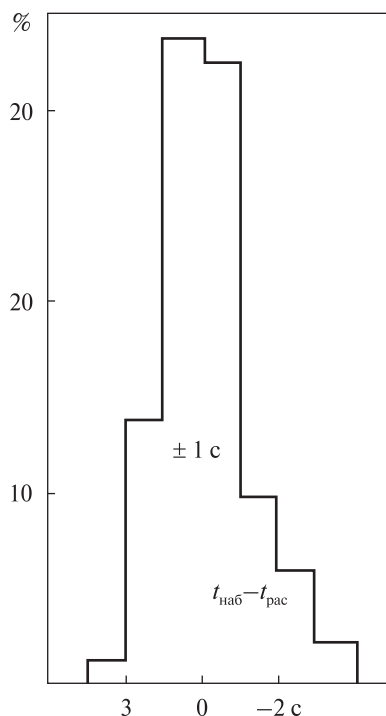
Распределение отличий наблюдаемых годографов от расчетного ($t_{\text{наб}} - t_{\text{рас}}$) для всех экспериментальных годографов отражает рис. 6. Очевидно, что типичное различие годографов полностью объясняется погрешностью исходного материала, небольшие аномалии размером в 0,10–0,15 км/с, которым отвечают различия времен пробега волн 2–3 с, мало распространены.

Обсуждение результатов

Подобранный скоростной разрез (рис. 7) отличается от модели первого приближения, но не принципиально. В пределах большей части верхней мантии различия составляют 0—0,1 км/с и только на глубине около 400 км достигают 0,2 км/с. Однако это связано с априорным введением в скоростные разрезы [13, 15] скачка скорости на предполагаемой подошве верхней мантии [3 и др.] и не может считаться элементом, полученным как результат интерпретации сейсмологических данных. Можно утверждать, что такое согласование увеличивает достоверность построенного скоростного разреза верхней мантии СОХ.

Очевидно, что установленное распределение скорости продольных сейсмических волн выявляет две очень интенсивные аномалии (отличия от распределения V_p в верхней мантии неактивизированной докембрийской континентальной платформы [1]) разного знака (рис. 8). Отрицательная аномалия расположена в основном в верхней половине верхней мантии, положительная — в нижней. Величина возмущений превышает установленные ранее в других активных регионах Земли. Впрочем, не исключено, что при анализе аномалий необходимым окажется пересмотр представления о фоновом скоростном разрезе.

Распределение скоростных аномалий в недрах СОХ явно указывает на адвективный характер перемещения вещества, который привел к резким изменениям температуры разного знака на разной глубине. Однако, в отличие от подобных возмущений, наблюдаемых под активными регионами континентов [4, 5 и др.], здесь отрицательная аномалия намного превосходит положительную. Не исключено, что интенсивность отрицательной скоростной аномалии столь значительна потому, что в ее образовании участвует не только высокая температура и незначительная (порядка 1 %, в интервале 130—180 км до 2 %) степень частичного плавления. По данным, приведенным одним из авторов в работе [1], различие химического состава пород верхней мантии под континентами и океанами не может быть причиной заметного скоростного возмущения. Сведения о составе, приведенные в работе Ф. Бойда [11], позволяют сделать несколько иной вывод. Если они справедливы (по приведенным в [11] данным это установить не удастся: для этого там недостаточно информации, она ограничена, в частности, одним районом докембрийской платформы — Южной Африкой), то несколько большее содержание железа в мантийных минералах под океанами может обусловить понижение скорости на 0,05—0,10 км/с. Причина роста железистости может быть связана с процессом океанизации базитовой коры кон-



тура и незначительная (порядка 1 %, в интервале 130—180 км до 2 %) степень частичного плавления. По данным, приведенным одним из авторов в работе [1], различие химического состава пород верхней мантии под континентами и океанами не может быть причиной заметного скоростного возмущения. Сведения о составе, приведенные в работе Ф. Бойда [11], позволяют сделать несколько иной вывод. Если они справедливы (по приведенным в [11] данным это установить не удастся: для этого там недостаточно информации, она ограничена, в частности, одним районом докембрийской платформы — Южной Африкой), то несколько большее содержание железа в мантийных минералах под океанами может обусловить понижение скорости на 0,05—0,10 км/с. Причина роста железистости может быть связана с процессом океанизации базитовой коры кон-

Рис. 6. Гистограмма распределения отличий наблюдаемых годовых графиков от расчетного

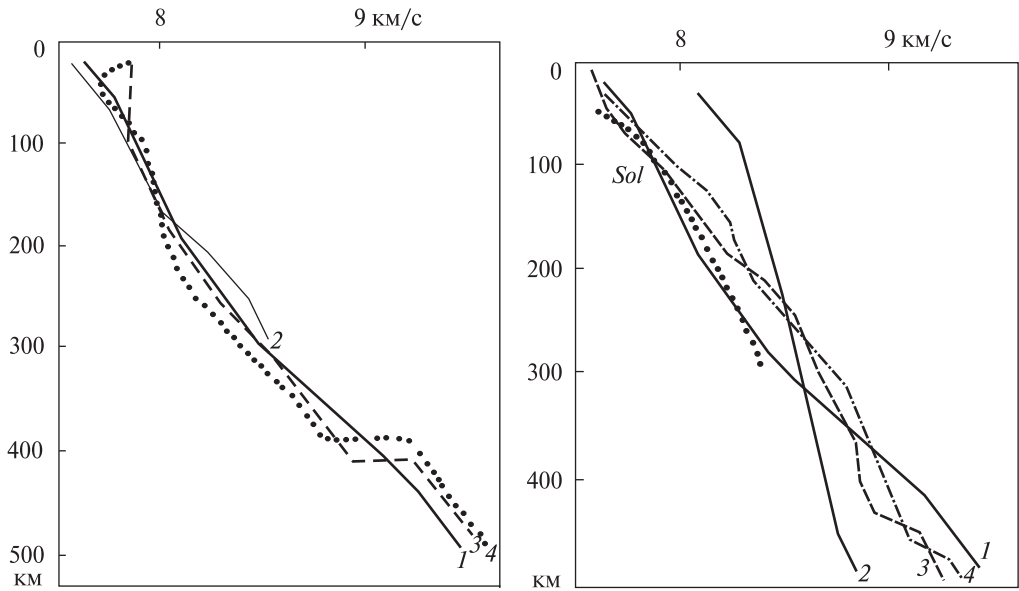


Рис. 7. Полученная скоростная модель СОХ в сравнении с данными других авторов: 1 — модель, полученная в данной работе, 2 — одна из моделей по [10], 3 — по [13], 4 — по [15]

Рис. 8. Сравнение полученной скоростной модели верхней мантии СОХ (1) с моделями докембрийской платформы (2), распределением скорости в мантии по представлениям о глубинном процессе под СОХ согласно АПГ (3) и скоростным разрезом верхней мантии под островной дугой (4). Sol — распределение V_p , отвечающее началу частичного плавления

тинентальной мощности [2 и др.]. При этом процессе в мантию погружается количество основных пород, эквивалентное слою мощностью порядка 30 км. В них железистость составляет в среднем 13 %, в континентальной мантии — 7 %. Возможен рост содержания железа на 1—2 % в верхней половине верхней мантии, что примерно отвечает оценке Ф. Бойда. Нижняя часть верхней мантии, скорее всего, этим процессом не затронута: на такой глубине в нормальных мантийных породах уже произошла замена значительной части пироксенов гранатами, их плотность не меньше плотности эклогитов.

Из приведенных данных следует необходимость введения небольших (на уровне погрешности расчета) поправок в значения V_p под СОХ и в скоростной разрез, отвечающий начальной степени частичного плавления под океанами. Необходим также и специальный расчет фона (скоростной модели мантии под неактивизированными регионами океана) для более адекватного отражения степени аномальности верхней и нижней частей модели. Первые два требования выполнены (рис. 8), третье — дело будущего, так как для необходимых расчетов нужно знать геологическую историю (включая докембрийскую) океанов.

По данным рис. 8 можно констатировать существование в настоящее время под СОХ довольно мощной астеносферы (зоны частичного плавления) в интервале глубины примерно 90—240 км. Впрочем, размеры этого объекта могут оказаться и существенно иными: распределение значений скорости с глубиной в модели СОХ и слоя частичного плавления различаются мало.

Проконтролировать правильность определения кровли астеносферы можно по данным о глубине очагов плавления в мантии, установленным по составу молодых изверженных пород [4—6]. В результате этих исследований выявлен источник магм на глубине около 90 км, имеются сведения о его формировании за счет материала, поднявшегося с больших глубин, вплоть до 230 км. Присутствует и информация о локальных очагах, образовавшихся при вторжении частично расплавленных пород на меньшую глубину, вплоть до подкоровой.

По принципиально иной методике в работе [9] глубина кровли очага магматизма под СОХ (или объектами, предположительно развивающимися по той же схеме) определена в 70—80 км. Геологическая информация, используемая для построения модели глубинного процесса под СОХ, гораздо менее детальна и достоверна, чем имеющаяся о континентах. Поэтому описываемая ниже оценка возможного вида теплопереноса и его последствий должна быть признана предварительной. Собственно, одна из целей данной работы — получение дополнительного критерия (скоростного разреза верхней мантии) для выбора типа адвекции.

Один из вариантов процесса недавней океанизации рассмотрен, например [2], в соответствии с ним построена современная тепловая модель тектоносферы, преобразованная в скоростную (с учетом сделанных выше замечаний). Результат показан на рис. 8. Согласование далеко не полное, типичная разница между экспериментальными и расчетными величинами V_p составляет 0,2 км/с. Но более существенен характер выявленных различий. В верхней и нижней половинах тектоносферы они имеют разные знаки, что может указывать на схему теплопереноса, отличную от принятой при расчете. Очевидна необходимость адвекционного переноса большего количества вещества аномальной температуры. Для сближения кривых распределения скорости в верхней мантии необходимо в использованной тепловой модели увеличить значения T в интервале глубины 150—300 км примерно на 400 °С. В интервале 500—400 км необходимо аналогичное по величине увеличение скорости, но нельзя утверждать, что речь идет о таком же изменении температуры. Здесь значительное влияние может оказать полиморфное преобразование пород (подъем подошвы верхней мантии). Скорее всего, преобразованными должны быть все породы глубже 380 км. Соответствующее изменение скорости продольных сейсмических волн составляет около 0,6 км/с в интервале примерно 60 км [3] (без учета продолжающегося роста V_p под влиянием роста давления и температуры с глубиной). Представляется вполне вероятным, что скоростная аномалия в переходной зоне между верхней и нижней мантией найдет объяснение. Но для обоснованного вывода необходимы специальные исследования.

Отметим, что расчетный скоростной разрез верхней мантии под СОХ оказывается довольно близким к наблюдаемому под островными дугами (рис. 8), т. е. молодыми (альпийскими) геосинклиналями, находящимися в процессе современной активизации. Разрез под СОХ существенно отличается от имеющегося под альпийской геосинклиналию: скоростные аномалии здесь интенсивнее, чем под регионом с наиболее активным из изученных типов эндогенного режима.

Выводы

Подобранный по наблюдаемым годографам P -волн скоростной разрез верхней мантии под СОХ мало изменяется от океана к океану. Заметно отличается только район Восточноиндийского хребта южнее Аравийского полуострова. Полученный в этой работе скоростной разрез выявил картину распределения параметра, резко отличающуюся от изученных авторами ранее. Можно предположить, что в данном случае мы имеем дело с максимальной аномальностью, отражающей максимальную современную активность теплопереноса в тектоносфере. Для построения адекватной расчетной модели необходимо построение схем теплопереноса в верхней мантии океанов, учитывающее высокую радиогенную теплогенерацию, возникшую, вероятно, при океанизации существовавшей прежде коры континентальной мощности. Наиболее важная и сложная проблема этого исследования — определение времени такого процесса и возможности его в прошлом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.В. О природе аномалий скорости распространения продольных сейсмических волн в верхней мантии // Геофиз. журн. — 2010. — № 3. — С. 43–63.
2. Гордиенко В.В. Процессы в тектоносфере Земли. (Адвекционно-полиморфная гипотеза). — Saarbrücken : LAP, 2012. — 256 с.
3. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростной разрез верхней мантии под Алеутской, Курильской и Японской островными дугами // Геол. и пол. ископ. Мирового океана. — 2012. — № 3. — С. 37–46.
4. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. О РТ-условиях в мантийных магматических очагах под Тихим океаном // Геол. и пол. ископ. Мирового океана. — 2013. — № 2. — С. 47–63.
5. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. О РТ-условиях в мантийных магматических очагах под Атлантическим океаном // Геол. и пол. ископ. Мирового океана. — 2013. — № 4. — С. 63–78.
6. Гордиенко В.В. О РТ-условиях в магматических очагах мантии Земли // Геофиз. журн. — 2014. — № 6.
7. Калькулятор расстояния и азимута по географическим координатам — <http://www.garmin.com.ua/tools/calc.php>.
8. Назарова З.А., Дрознина С.Я., Сеников С.Л., Дрознин Д.В. Определение положения очагов землетрясений Камчатского региона // Пробл. компл. геофиз. мониторинга Дальнего Востока России. — Петр.-Камч. : ДВО РАН, 2010. — С. 363–366.
9. Фролова Т.И., Бурикова И.А. Платобазальтовый магматизм и океанообразование // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. — М. : ИФЗ РАН, 2002. — С. 30–48.
10. Afonso J., Fernández M., Ranalli G., Griffin W., Connolly J. Integrated geophysical-petrological modeling of the lithosphere and sublithospheric upper mantle: Methodology and applications // *Geochem. Geophys. Geosyst.* — 2007. — 9, Q05008, doi:10.1029/2007GC001834
11. Boyd F. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere // *Earth and Plan. Sc. Lett.* 96 (1/2). — 1989. — P. 16–26.
12. 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.
13. Gudmundsson O., Sambridge M. A regionalized upper mantle (RUM) seismic model // *J. G. R.* — 1998. — 102, B4. — P. 7121–7126.
14. U.S. Geological Survey Albuquerque Seismological Laboratory [Электрон. ресурс]. — режим доступа: <http://aslwww.cr.usgs.gov/SeismicData>
15. Walck M. The upper mantle beneath the north-east Pacific rim: a comparison with the Gulf of California // *Geop. J. R. Astr.* — 1985. — Sos. 81. — P. 243–276.

Статья поступила 07.04.2015

В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко

ШВИДКІСНА МОДЕЛЬ ВЕРХНЬОЇ МАНТІЇ ПІД СЕРЕДИННО-ОКЕАНІЧНИМИ ХРЕБТАМИ

За даними про час приходу *P*-хвиль від землетрусів під серединно-океанічними хребтами Арктичного, Атлантичного, Тихого та Індійського океанів побудовано годографи на відстані до 25 градусів. Це дозволило встановити розподіл швидкості до глибини біля 450—500 км. Встановлено зону зниженої швидкості у верхній мантії від 90 до 240 км, у межах якої вірогідне часткове плавлення порід.

Ключові слова: *серединно-океанічні хребти, швидкість сейсмічних хвиль.*

V.V. Gordienko, L.Ya. Gordienko

A VELOCITY MODEL FOR THE UPPER MANTLE BENEATH MID-OCEAN RIDGES

According to the arrival time of the *P*-waves from earthquakes beneath mid-ocean ridges Arctic, Atlantic, Pacific and Indian Oceans Hodographs are built at distances up to 25 degrees. It is possible to establish the distribution of speeds up to depths of about 450—500 km. It is established the low velocity zone in the upper mantle from 90 to 240 km, where the partial melting of the rocks is probably.

Key words: *mid-ocean ridges, the velocity of seismic waves.*