

СКОРОСТНОЙ РАЗРЕЗ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД АЛЕУТСКОЙ, КУРИЛЬСКОЙ И ЯПОНСКОЙ ОСТРОВНЫМИ ДУГАМИ

Построена скоростная модель верхней мантии Алеутской, Курильской и Японской островных дуг в северной части Тихого океана по временам прихода продольных сейсмических волн на сейсмостанции Аляски, Алеут, Камчатки, Сахалина, Японии и Тайваня. Установлены аномалии, которые могут указывать на очень молодой геосинклинальный процесс.

Введение. Обобщение геолого-геофизической информации, касающейся океанов и переходных зон между ними и континентами, проведенное, в частности, в работе [4], обнаруживает ее недостаточность для обоснованного контроля гипотетических схем глубинных процессов в тектоносфере этих регионов. В значительной мере исправить положение можно построением скоростных моделей верхней мантии под ними, так как упомянутые регионы отличаются повышенной сейсмичностью и довольно развитой системой наблюдения за землетрясениями.

Наиболее перспективной представляется такая операция для островных дуг, в пределах которых сеть сейсмостанций особенно плотная. Под территориями и акваториями этих регионов гипоцентры многих землетрясений располагаются на сравнительно небольших глубинах, в верхних горизонтах мантии. Они могут поставить подходящий материал для планируемых построений. Можно предвидеть и источник возможных осложнений, заключающийся в крайней неравномерности распределения скоростей распространения сейсмических волн в подкоровой части тектоносферы [7 и др.]. Однако, достижение поставленной цели все же кажется реальным.

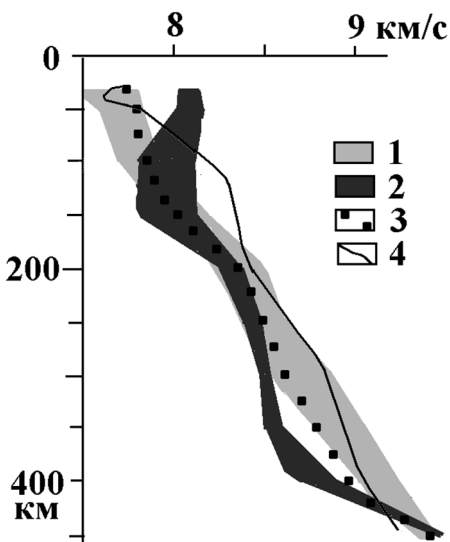
После решения этой задачи можно перейти к изучению мантии других, прежде всего – океанических – регионов. В литературе есть информация об их скоростных разрезах, но она часто противоречива (см. ниже) или ограничена априорными представлениями, например, об отсутствии вариаций скорости на глубинах нижней половины верхней мантии [17 и др.] и т.п.

В этой статье приведены результаты построения скоростных (для продольных сейсмических волн – V_p) разрезов верхней мантии под тремя островными дугами (Алеутской – АОД, Курильской – КОД и Японской – ЮОД) на северной и северо-западной окраинах Тихого океана; использованы также данные, позволяющие оценить распределение V_p под частью Восточной Камчатки (ВК). Предполагается своеобразие моделей (высокие значения V_p в нижней тектоносфере), обусловленное молодостью последней стадии глубинного процесса в альпийских геосинклиналях дуг [11 и др.]. Сбор дополнительных данных о геологической истории островных дуг запада Пацифики привел к выводу, что такое развитие событий может быть свой-

ственно и другим дугам: Идзу-Бонинской, Марианской, Соломоновой, Новогебридской, Тонга, Кермадек, Новой Зеландии. В их пределах последняя складчатость мощных толщ возрастом от олигоцена до плиоцена (они сосредоточены, как правило, в прогибах на внешней – океанической – стороне островов) произошла на границе плиоцена и плейстоцена или даже позже, в рамках Родопской (5 млн. лет назад) или Валахской (0-2 млн. лет назад) фаз [12]. Не исключено, что складчатость в расположенных западнее дугах старше.

Предметом наших исследований являются именно дуги на окраине океана: имеется в виду последующее использование их скоростных разрезов для моделирования верхней мантии собственно океанских структур; можно предположить, что и южнее скоростные разрезы будут близки к установленным под рассматриваемыми дугами. В широкой Японской дуге очевидна территориальная близость разновозрастных образований. Однако, расположение эпицентров (см. ниже) на восточной окраине дуги, часто между берегом и глубоководным желобом, позволяет характеризовать именно самую молодую часть структуры. Исключением может оказаться юго-западная часть ЯОД, не сопровождаемая желобом (более того, расположенная западнее современного рифтогена Фосса-Магна, предположительно продолжающегося на север дугу Идзу-Бонин). Но времена пробега волн от здешних землетрясений не отличаются от остальных на тех же угловых расстояниях (см. ниже).

Априорные данные о скоростном разрезе. Сейсмологическая изученность рассматриваемых дуг довольно значительна [1, 3, 10, 11, 16, 18, 23 и др.], но предпринимаемое исследование не кажется излишним. Дело в том, что различия между приводимыми в перечисленных публикациях моделями очень велики. Можно выделить две группы разрезов: в первой предполагается обязательное наличие резкого скачка скорости на глубине около 400 км (от этих моделей существенно не отличается и скоростной разрез для соседней с Японской дуги Рюкю-Тайвань [19]); во второй этот элемент отсутствует (рис. 1).



Обоснованием для границы на глубине 410 км, часто вводимой в скоростные модели мантии априорно, являются, кроме сейсмических, петрологические данные, в частности результаты А. Рингвуда [9]. Они свидетельствуют о начале примерно на этой глубине (при температуре

Рис. 1. Скоростные модели КОД, ЯОД и южной части ВК. 5 моделей в интервале глубин 200–400 км и 7 моделей в интервале глубин 30–200 км без резкого скачка V_p на глубине около 410 км (1); то же со скачком V_p (2); среднее распределение скоростей (3); распределение скорости в мантии КОД и ЯОД, установленное в этой работе (4)

около 1600⁰С) полиморфного преобразования мантийных пород. Процесс должен охватывать вполне заметный интервал глубин. Согласно расчетам [13], основанным на экспериментальных данных, мощность слоя, в котором происходит преобразование оливина- α в модифицированную шпинель (оливин- β) и завершение перехода пироксенов мантийного пиролита в гранаты, составляет около 60 км.

Использованное при оценке глубины полиморфного перехода значение вертикального градиента температуры (Т) представляется близким к реальному, но приведенные абсолютные величины Т и метод их получения [13] не согласуются с принятыми авторами моделями верхней мантии [4], как и оценка мантийных температур А. Рингвудом [9].

Само по себе получение в одном регионе указанных вариантов скоростных разрезов говорит о неоднозначности решения обратной задачи при различном подходе авторов (прежде всего использовании разных моделей первого приближения). На возможность согласования сейсмической информации с разными распределениями V_p в рассматриваемом интервале глубин указывают авторы, специально изучавшие вопрос, например [24].

Глубина скоростного скачка в рассматриваемых моделях принята равной примерно 400 км. В то же время исследования, проведенные именно с целью ее определения (т.е. в предположении, что граница существует), указывают на глубину около 430 км или несколько больше [15] (на результирующей схеме – рис. 2 – по какой-то причине приведены глубины на 10 км меньше). Достоверность такой информации увеличивается с ростом детальности и точности учета вышележащего разреза [15], но все же установленные вариации глубины (порядка 10 км) оказываются меньше погрешности их определения (около 15 км). С этой точки зрения полезно сравнить полученные результаты с данными ГСЗ на базе ядерных взрывов, полученными на Сибирской платформе [21]. Использованный метод построения границы в этом случае позволяет максимально использовать сведения о скоростях в

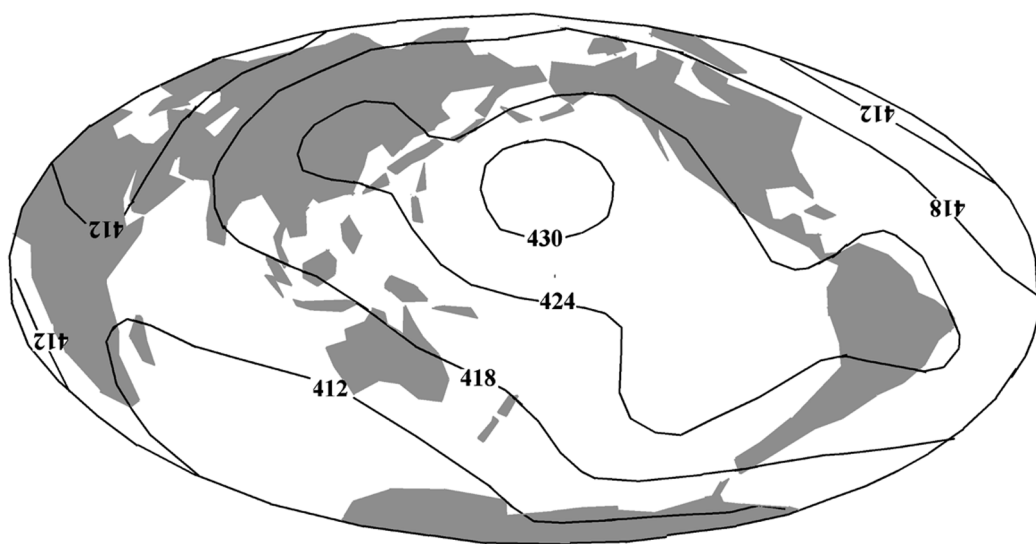


Рис. 2. Схема глубин раздела «410 км» [15]

коре и верхней мантии региона. Установленные двумя методами глубины совпадают с точностью до нескольких километров. Таким образом, наиболее вероятной представляется глубина начала полиморфного перехода около 430-435 км. Этот результат примерно согласуется и с установленным по тепловой модели верхней мантии (см. ниже). На несколько больших глубинах скорость должна расти с большим градиентом, но не скачкообразно.

Среди опубликованных вариантов скоростного разреза региона присутствует и полученный сотрудниками Института Океанологии РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, довольно близкий к осредненному при условии сглаживания приведенной в [8] ступенчатой модели. Поскольку он применяется для определения параметров очагов, можно говорить об их соответствии искомому разрезу.

Методика расчетов. В качестве стартовой модели для подбора скоростного разреза использовалось среднее распределение V_p на рис. 1 (дополненное данными по АОД под о. Кюдяк [18]) до глубины 450 км. Скачок скорости на подошве верхней мантии в ней был представлен зоной сравнительно высокого градиента. В коре (0-30 км) в соответствии с имеющимися данными было принято упрощенное распределение скорости в виде трех слоев со значениями на границах 0 км – 5.0, 10 км – 6.6, 20 км – 7.4, 30 км – 7.7 км/с и линейным изменением между ними.

Расчетный годограф получен по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени. Построенная картина проникновения лучей рефрагированных волн на разные глубины обнаруживает причины пробелов (не идентичные причинам возникновения «тени» в зоне пониженных скоростей) и «петель». Последние отмечены и при предшествующих исследованиях мантии региона [10 и др.]. Максимальные необходимые глубины проникновения лучей достигаются на удалениях примерно 23^0 и временах пробега около 300 сек.

Угловое расстояние между источниками колебаний и сейсмостанциями определялось по дистанции на поверхности, устанавливаемой из разницы координат [5]. Полученный результат переводился в угловые расстояния. Для сравнения с расчетным годографом использованы сведения о временах пробега волн за 1997-2004 гг. из [22], имеющиеся в свободном доступе и характеризующиеся как отобранные по качеству. Глубины гипоцентров привлеченных к анализу землетрясений (Н) достигали 50-55 км, все они были пересчитаны на одну величину Н, равную 30 км, примерно соответствующую глубине раздела Мохо под дугами. Поправки к временам прихода волн пересматривались по мере подбора скоростного разреза в диапазоне глубин между действительной глубиной очага (гипоцентра) и 30 км. Были привлечены данные по шести сейсмостанциям: Колледж Аутпост (COLA), о. Адак (ADK) в США, Петропавловск-Камчатский (PET) и Южно-Сахалинск (YSS) в России, Мацуширо в Японии (MAJO) и Тайбей на Тайване (ТАТО).

На пути к станции ТАТО сейсмические волны часть пути проходят по верхней мантии дуги Рюкю-Тайвань, скоростной разрез которой может отличаться от разреза изучаемых регионов. Однако полученные данные очень близки к остальным, поэтому информация по сейсмостанции ТАТО использовалась.

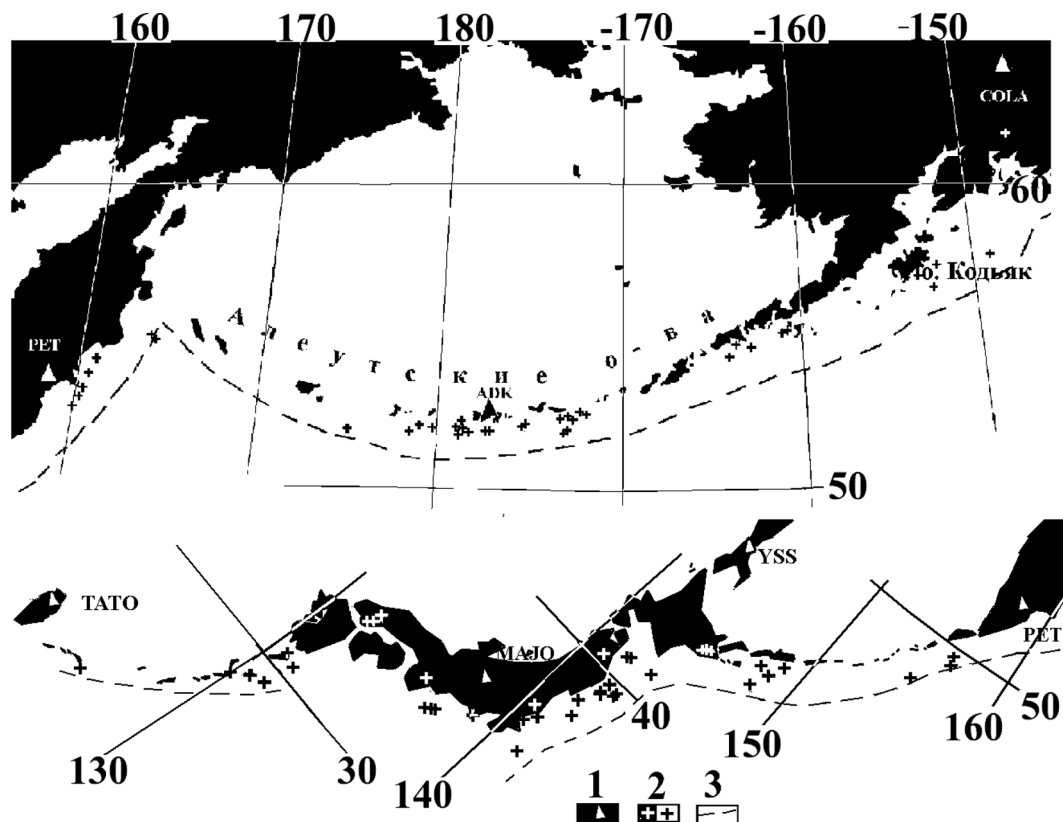


Рис. 3. Расположение сейсмостанций (1) и эпицентров землетрясений (2) в изучаемом регионе; 3 – ось глубоководного желоба

На рис. 3 показано размещение станций и эпицентров.

Результаты расчета. Для удобства сопоставления расчетных и наблюдаемых годографов построены их редуцированные варианты для скорости продольных сейсмических волн в породах верхней мантии, равной 8,2 км/с. После нескольких итераций подобраны варианты скоростных разрезов верхней мантии, редуцированные годографы для которых наиболее полно соответствуют экспериментальным данным (рис. 4).

Для АОД сравнение выполнено по 36 точкам. Типичное отклонение наблюдаемых значений от расчетных (Δt) составляет $\pm 2,6$ с. Это достаточно распространенная величина. Например, в работе [14] при проведении близкой по сути операции подбора скоростного разреза среднее отклонение от расчетного годографа составило 3,6 с. Согласно оценкам в работе [6] подобное 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. Погрешность определения глубины очага также вносит вклад в величину отклонения, заметно увеличивая его.

Информации немного и в случае КОД и ЯОД, сопоставление выполнено для 43 точек. Среднее отклонение составляет около 3,3 с. По данным работы [10] ошибка в определении момента события 1–1,2 с. Погрешность по-

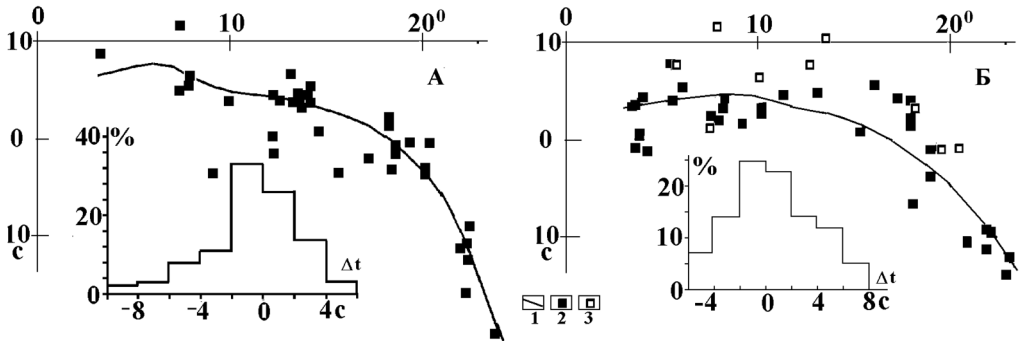


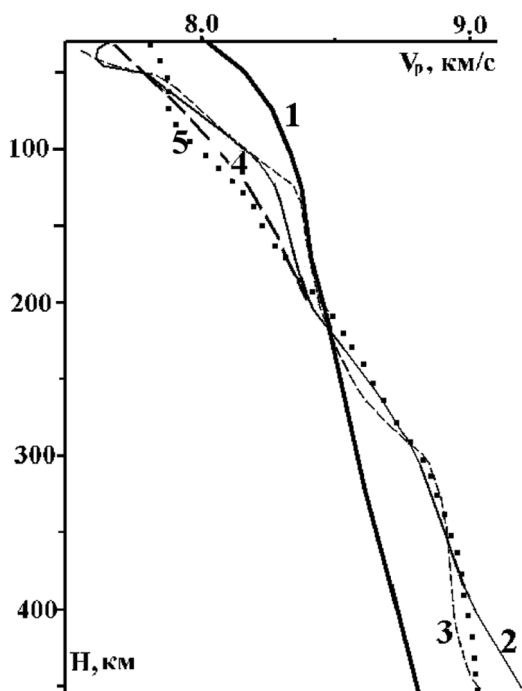
Рис. 4. Сопоставление расчетных годографов для АОД (А) и КОД, ЯОД (Б) с экспериментальными данными: 1 – расчетный годограф, 2, 3 – экспериментальные данные: 2 – по сейсмостанциям COLA, ADK, PET, MAJO, TATO, 3 – YSS

ложения гипоцентра $\pm 10\text{--}15$ км, глубины очага ± 10 км. По [8] погрешность определения координат эпицентра составляет около $0,1^{\circ}$ широты и долготы. Оценки погрешности расчета для большей части годографа дают величину не меньше $1\text{--}1,5$ с, скорее всего они значительней, но обоснованно их установить не удастся. Такие ошибки экспериментального и расчетного материала могут объяснить наблюдаемые расхождения. Обсуждая расхождения между расчетными и экспериментальными результатами, следует упомянуть, что данные по сейсмостанции YSS заметно отличаются от остальных. Почти все отвечающие ей точки на рис. 4 располагаются выше расчетного годографа. Видимых причин для их отбраковки нет, расположение гипоцентров по отношению к станции позволяет примерно в той же мере характеризовать распределение скоростей в верхней мантии изучаемой Японской островной дуги, что и по данным других станций. Скоростной разрез земной коры Сахалина заметно отличается от принятого нами для островной дуги, на которой располагается сейсмостанция. Но внесение соответствующей поправки во времена пробега волн изменит положение точек на рис. 4 не более, чем на $0,5$ с. Отметим все же, что при исключении материала по сейсмостанции YSS среднее отклонение экспериментальных точек от расчетной кривой заметно уменьшится, составив $\pm 2,4$ с.

Отметим, что различия во временах пробега волн на совпадающих угловых расстояниях в $2/3$ случаях составляют до $2,5$ с. Они не обязательно связаны с ошибками экспериментальных данных, их могут вызвать и реальные вариации скоростных моделей мантии дуг. Но этот фактор тоже сказывается на отклонениях экспериментальных точек от расчетного годографа.

Полученный скоростной разрез КОД и ЯОД не отличается резко от установленных ранее для рассматриваемого региона (рис. 1) и рассчитанного авторами под Алеутской островной дугой. Существенным можно считать только разницу в интервале глубин примерно $100\text{--}150$ км, где полученные скорости заметно больше приведенных в публикациях. Принятая в работе [10] погрешность скоростной модели региона около $0,1$ км/с представляет собой среднюю величину, в отдельных интервалах глубин ошибка может быть и больше. Собственно, об этом свидетельствуют и расхождения между разрезами, полученными в регионе (рис. 1) разными авторами, использо-

Рис. 5. Скорости продольных сейсмических волн: 1 – под докембрийской платформой, 2 – под КОД и ЯОД, 3 – под АОД, 4 – при температуре солидуса, 5 – скоростной разрез, рассчитанный по тепловой модели тектоносферы, отвечающей молодой геосинклинали согласно адвекционно-полиморфной гипотезе (АПГ) глубинных процессов [4]



вавшими разные модели первого приближения. Среднее отклонение расчетной модели от осредненных данных прежних работ составляет 0,15 км/с, что вполне объяснимо погрешностями построения обоих распределений. Но знак различия сохраняется практически на всех глубинах. Это не позволяет считать модели согласующимися.

Рассчитанный скоростной разрез приведен на рис. 5, где сопоставлен с распределением V_p в верхней мантии докембрийской платформы и распределением скорости при температуре солидуса мантийных пород.

Обсуждение результатов. Очевидно, что полученное распределение скорости отвечает адвекционному перемещению мантийного вещества, охватившему также и кору. Сопоставимая аномальность (отличие от скоростного разреза под докембрийской платформой) в верхней половине верхней мантии (и, предположительно, в коре) и нижней половине (примерно той же мощности) указывает на очень молодой возраст теплопереноса: энергия, доставленная адвективным перемещением в верхнюю часть разреза, еще не вынесена в значительной мере через поверхность. В настоящее время нагрев и охлаждение единицы объема верхнего и нижнего этажа теплопереноса (проявляющиеся в скоростных аномалиях разного знака) различаются всего примерно на 10–15%. Непосредственно под корой располагается слой частичного плавления (значения скорости меньше, чем отвечающие температуре солидуса).

Адвекционный характер теплопереноса при формировании слоя частичного плавления в самих верхних горизонтах мантии дуги в принципе подтверждается петрологическими данными: «породы... позднекайнозойского... возраста, распространенные в ... зрелых островных дугах ... такой фации глубинности не могли содержать таких количеств некогерентных элементов ... даже при развитии процессов зонного плавления или избирательного флюидного выщелачивания. Поэтому представляется более обоснованным предположить привнос в зоны селективного плавления верхней мантии... пластического вещества с гораздо более значительных глубин» [2, с. 300–301]. Установленный по скоростному разрезу интервал

частичного плавления в верхах мантии (30–50 км) только частично согласуется с петрологическими данными. Под Камчаткой молодые магматические очаги распространены на глубинах 30–40 км, но кроме того – на 60–80 км и глубже (до 120–160 км). Магмы Курильских островов формируются в очагах глубиной от 25 до 40–60 км [11]. Глубина кровли слоя частичного плавления по тепловой, скоростной модели и петрологическим данным для Восточной Камчатки составляет около 70 км [3]. Впрочем, скорость продольных сейсмических волн в расчетной модели в интервале глубин 50–200 км превышает характерную для солидуса всего на 0–0,1 км/с (рис. 5), т.е. при достигнутой точности определения V_p астеносфера может быть распространена и значительно глубже 50 км. Оценивая соответствие построенных скоростных моделей очагам частичного плавления, следует учитывать и фактор, не отраженный в скоростном разрезе по АПГ. На глубинах астеносферы и под ней (примерно до 200 км) распространены высокоскоростные блоки эклогитизированных коровых пород, погружившихся в мантию [3, 4 и др.].

В целом скоростной разрез верхней мантии под изученными островными дугами неплохо согласуется с прогнозным, отражающим тепловые результаты недавнего тепломассопереноса согласно АПГ. В самой нижней части разреза превышение V_p модели над значениями, рассчитанными в КОД и ЯОД (под АОД оно отсутствует) по тепловой модели молодой геосинклинали, возможно, отражает начало полиморфного преобразования мантийного оливина. Если интерпретировать эту аномалию как следствие резкого понижения температуры после последнего акта адвекционного тепломассопереноса, соответствующее возмущение T окажется на уровне 800°C. Такая аномалия нереальна, так как намного превышает отличие нормальной платформенной температуры от РТ-условий начала трансформации α -оливина в β -оливин.

Выводы. Построение скоростных моделей верхней мантии трех островных дуг (включая и часть Восточной Камчатки) проведено после целого ряда подобных исследований, выполнявшихся в этом (одном из самых изученных) районах Мирового океана в течение многих десятилетий. Полученные данные позволили предпочесть вариант скоростного разреза без резкого скачка скорости на глубине несколько больше 400 км, довольно распространенный и среди опубликованных моделей [8, 10, 11 и др.]. Отличие заключается в несколько более высоких значениях V_p в большом интервале глубин (рис. 1). Тем не менее, новая скоростная модель не позволяет исключать наличие в регионах довольно мощной астеносферы, располагающейся между разделом Мохо и глубиной 150–170 км. В нижней половине верхней мантии явно находится мощный интервал глубин с аномально холодными породами, степень их охлаждения на 400–450 км достаточна для начала полиморфного преобразования оливина.

Построенный скоростной разрез мало изменяется от дуги к дуге, что создает предпосылки обнаружения стандартного (типичного) распределения V_p в регионах с данным типом эндогенного режима. Естественно, такой вывод является предварительным до изучения верхней мантии других островных дуг западной окраины Тихого океана.

1. *Болдырев С.А.* Мантийные неоднородности активных окраин Мирового океана / / Структура и динамика зон перехода от континента к океану. – М.: Наука. – 1986. – С. 43-50
2. Геохимия глубинных вулканических пород и ксенолитов / Ред. Соболев В.С. – М.: Наука. – 1980. – 332с.
3. *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.
4. *Гордиенко В.В.* Процессы в тектоносфере Земли (Адвекционно-полиморфная гипотеза). – Saarbrücken: LAP. – 2012. – 256с.
5. Калькулятор расстояния и азимута по географическим координатам <http://www.garmin.com.ua/calc.php>
6. *Назарова З.А., Дроздина С.Я., Сенюков С.Л. и др.* Определение положения очагов землетрясений Камчатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. – Петр.-Камч.: ДВО РАН. – 2010. – С.363-366.
7. *Низкоус И.В., Кисслинг 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.
8. Отчет «Разработка научных основ комплексной системы мониторинга сейсмоактивности в Курило-Камчатском районе». Рук. Лобковский Л.И. - М.:ИО РАН. – 2008. –95с.
9. *Рингвуд А.* Состав и петрология мантии Земли. - М.: Недра. – 1981. – 583с.
10. *Тараканов Р.З.* Скоростные модели и годографы Р-волн для Дальневосточного региона // Вестник ДВО РАН. – 2006. – 1. – С.81-95.
11. *Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии* / В.В. Гордиенко, А.А. Андреев, С.К. Биккенина и др. Владивосток: ДВО РАН. – 1992. – 238 с.
12. *Эрлих Э.Н.* Очерки геологии островных дуг. – 2011 – google.com/site/geotermiakuril.
13. *Brown J., Shankland T.* Thermodynamic properties in the earth as determined from seismic profiles // Geop. J. R. Astron. Soc.. – 1981. – 66. – P. 579-596.
14. *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.
15. *Flanagan M., Sheater P.* A map of topography on the 410-km discontinuity from PP precursors // Geop. Res. Letters. – 1999. – 26, 5. – P. 549-552.
16. *Fukao Y.* Upper mantle P-structure on the ocean side of the Japan-Kurile arc // Geop. J. R. Astr. Soc. – 1977. – 50. - P.621-642.
17. *Gudmundsson O., Sambridge M.* A regionalized upper mantle (RUM) seismic model // J.G.R. – 1998. – 102, B4. – P. 7121-7126.
18. *Hansen R., Ratchkovski N.* The Kodiak Island, Alaska Mw7 Earthquake of 6 december 1999 // Sies. Research Letters. – 2001. – v.72, 1. – P.22-32.
19. *Inatani H., Kurita K.* Upper mantle velocity structure beneath the Ryukyu-Taiwan Arc // Zisin 2. – 1980. - 33. – P.37-49.
20. *Irifune T.* An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the construction of the mantle // Phys. Earth and Pl. Inter. – 1987. – 45. - P.324-336.
21. *Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I.* Upper mantle structure of Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. – 2006. – 416. – P.33-52.
22. U.S. Geological Survey Albuquerque Seismological Laboratory http://asllwww.cr.usgs.gov/Seismic_Data/

23. *Yamasaki A., Hirahara K.* The upper mantle P-wave velocity structure beneath the northern Japan Arc // *J. Phys. Earth.* - 1996. - 44, 6. - P.713-728.
24. *Zhao M., Langston C., Nyblade A., Owens T.* Upper mantle velocity structure beneath southern Africa from modeling regional seismic data // *J.G. R..* - 1999. - 104, B3. - P. 4783-4794

Побудовано швидкісну модель верхньої мантії Алеутської, Курильської та Японської островних дуг у північній частині Тихого океану за часом приходу подовжніх сейсмічних хвиль на сеймостанції Аляски, Алеут, Камчатки, Сахаліну, Японії і Тайваню. Визначено аномалії, що можуть вказувати на дуже молодий геосинклінальний процес.

We construct a velocity model of the upper mantle beneath the Aleutian, Kurilian and Japanese Island Arcs in the north part of the Pacific Ocean by the arrival time of longitudinal seismic waves to seismic stations in Alaska, Aleutian islands, Kamchatka, Sakhalin, Japan and Taiwan. Revealed anomalies may indicate very young geosynclinal process.

Поступила 27.08.2012 г.