

В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко

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

ГЛУБИННЫЙ ПРОЦЕСС И СКОРОСТИ Р-ВОЛН В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН АТЛАНТИЧЕСКОГО ТИПА

Рассмотрена геологическая история переходных зон атлантического типа. Построена схема глубинных процессов в мантии. Ее проявления согласуются с мощностью осадков, тепловым потоком и гравитационным полем. Построена скоростная модель верхней мантии. Она не противоречит распределениям скоростей, установленным по тепловой модели.

Ключевые слова: переходная зона от континентов к океанам, верхняя мантия, скоростные модели.

Введение

Океанические окраины атлантического типа явно преобладают среди контактов двух основных разновидностей земной коры — континентальной и океанской. На их долю приходится около 65% общей протяженности переходных зон. Среди оставшихся («тихоокеанских») можно выделить сопровождаемые фокальными зонами с максимальными глубинами гипоцентров землетрясений до 70 и 200–250 км — около 25–30% (примерными равными долями) и до 600–700 км — 5–10%. Пассивные окраины не полностью асейсмичны, здесь случаются землетрясения с небольшими глубинами очагов, поэтому построение скоростных разрезов мантии под ними в принципе осуществимо. Такая работа актуальна, так как в «пассивных» переходных зонах мало информации для построения полноценных схем глубинных процессов и их контроля. Но перед началом этого исследования необходимо хотя бы в основных чертах представить известную геологическую историю этих регионов для выделения площадей, на которых следует сконцентрировать работы. Эту информацию можно использовать затем для построения схем глубинных процессов в соответствии с

© В.В. ГОРДИЕНКО, Л.Я. ГОРДИЕНКО, 2017

представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ) [4 и др.]. По ним создается современная тепловая модель региона, восстановленные по этой модели геологические явления сопоставляются с известными по геологическим данным. Она же применяется для вычислений теплового потока (ТП) через поверхность и объяснения аномалий гравитационного поля. По распределению температур могут быть рассчитаны скорости сейсмических волн в верхней мантии, которые сравниваются с экспериментально установленными. Такой комплексный подход позволяет существенно повысить достоверность результатов.

Геолого-геофизические данные

Информация, которая может быть использована в нашем случае, наиболее широко представлена в переходных зонах Атлантического океана, особенно в его центральной части [1–3, 7, 9–11, 13–15 и др.]. Но и здесь она не позволяет судить об основных чертах глубинного процесса в каждом из фрагментов зоны. Кажется необходимым использовать обобщение данных для многих близких по характеру развития фрагментов. Такой подход заставляет обратиться к восточному побережью Северной Америки, почти на всем протяжении которого океан контактирует с каледонско-герцинской геосинклиналью Аппалачей шириной более 500 км. Многие отмеченные здесь особенности геологической истории близки наблюдаемым у восточной окраины океана на контакте с каледонидами Скандинавии, каледонидами и герцинидами Великобритании, Франции и др.

Для восточной окраины Северной Америки по результатам геологических и сейсмических исследований построены разрезы осадочного слоя и земной коры вдоль 10 профилей длиной от 300 до 1400 км от Лабрадора до Багамского плато, здесь довольно детально изучены магнитное и гравитационное поля, ТП (но в основном – на суше). Прибрежную часть суши, шельф, материковый склон и часть континентального подножия охватывает Северо-Американский Приатлантический периокеанический прогиб длиной около 4500 км и шириной около 500 км. Он делится на две впадины – Внутреннюю (на шельфе и сопредельной суше) и Внешнюю (на склоне и подножии). Впадины разделены выступом фундамента и имеют заметно различающуюся геологическую историю. В пределах Внешней впадины у границы с выступом фундамента во многих случаях глубина прогиба резко увеличена. Структура шириной около 60 км (т.е. отвечающая размерам одного кванта тектонического действия – КТД [4 и др.]) напоминает заполненный осадками глубоководный желоб. Она не будет рассматриваться отдельно, т.к. процесс ее образования принципиально не отличается от такового в остальной части впадины.

Ширина Внутренней впадины составляет около 150 ± 20 км, разделяющего впадины выступа – около 70 км, Внешней впадины – 190 ± 30 км, т.е. во всех случаях размеры структур кратны размерам КТД.

Установлено, что «переход от континентальной коры к океанической происходит под континентальным склоном и местами отмечен выступом океанического фундамента, который создает магнитную аномалию восточного побережья» [3, т. 2, с. 99]. В юра-голоценовое время активные события происходили по обе стороны от этой линии.

Во Внутренней впадине «... сбросово-глыбовые движения проявились в позднем триасе—ранней юре... Бассейны, ограниченные сбросами, заполнялись обломочными образованиями... В то же время происходили вулканические извержения» [3, т. 2, с. 118]. Т.е. по геологическим признакам процесс можно отнести к рифтогенезу, хотя в приведенных данных отсутствует указание на стадию поднятия. В последующий период осадконакопление в мелководном бассейне происходило с сокращающейся интенсивностью. Однако представляется весьма вероятным, что имела место еще одна фаза активизации. На Багамском плато она отмечена деформациями в раннем мелу или поздней юре. На Бразильском шельфе и прилегающей суше этому периоду (около 150 млн лет назад) отвечает магматизм мантийного происхождения. Мощность коры под впадиной составляет около 30 км, что на 10–15 км меньше, чем в континентальных регионах, расположенных западнее.

Во Внешней впадине процесс начинается накоплением юрских осадков при глубине дна бассейна менее одного километра. С начала или середины мела (т.е. примерно 100 млн лет назад) они сменяются пелагическими или гемипелагическими образованиями (средняя современная глубина моря во впадине — около 4 км). Такие «стартовые условия» не могут быть увязаны с заложением впадины на океанической коре (где современная глубина океана — 5.5 км) доюрского или раннеюрского возраста. Кроме того, мощность консолидированной части коры здесь составляет около 7.5 км, под типичными плитами Атлантического океана — около 4–5 км. Необходимо предположить, что блок коры под Внешней впадиной перед началом рассматриваемого процесса не был океаническим. Скорее он напоминал современный блок под Внутренней впадиной. Восточнее Внешней впадины располагается блок типичной океанической коры с глубиной дна 5–5.5 км и мощностью осадков 1–1.5 км (обычной для северо-западной Атлантики). Таким образом, смысл событий в переходной зоне — в изменениях на окраине континента, в последовательном разрушении его коры. Этот процесс облегчен наличием в коре большого количества мафических блоков, легко поддающихся переработке. Они фиксируются под Внутренней впадиной в виде мощных высокоскоростных ($V_p=7.0-7.4$ км/с) слоев с кровлей на глубине 5–10 км — «нижнепалеозойской протоатлантической офиолитовой корой» по терминологии работы [3]. Наличие такого слоя — необходимый атрибут переходной зоны [2].

В структуре осадочного чехла Внешней впадины на нескольких профилях фиксируются высокоскоростные «выступы фундамента», представленные предположительно такими же основными породами, которыми сложен верхний океанический слой. Их кровли достигают отложений эоцена, возраст создавшего их процесса можно оценить примерно в 50 млн. лет. Синхронный этап магматизма отмечен на Бразильском участке переходной зоны.

Еще одним подтверждением того, что процессы на окраине атлантического типа — изменения континентальной коры, могут служить геолого-геофизические данные по Мексиканскому заливу. История осадконакопления и магматизма во впадинах Галф Коста и Сигсби (и Кампече), размещающихся на периферии той же герцинской геосинклинали и разделенных поднятием фундамента, практически аналогична истории Внутренней и Внешней впадин атлантического побережья Северной Америки вплоть до современной глубины моря в центральной части впадины Сигсби (до 3,5–4 км). В этом прогибе с маломощной высокоско-

ростной консолидированной корой в низах осадочной толщи развиты мощные слои юрских эвапоритов, которые могли возникнуть только в мелководном, а не типичном глубоководном океаническом бассейне. Со всех сторон впадина окружена массивами современной континентальной коры. Следовательно, здесь происходила явная (но не завершившаяся) океанизация, а объяснение имеющихся данных с позиции тектоники плит затруднительно.

Глубинный процесс и тепловая модель

Таким образом, с большей или меньшей долей вероятности можно наметить основные параметры событий в приповерхностной зоне, которым должен соответствовать глубинный процесс в тектоносфере, моделируемый по адвекционно-полиморфной схеме. Он включает по два акта тепломассопереноса в каждой впадине, разделенные временными интервалами примерно в 50 млн. лет.

Эволюция тепловой модели рассмотрена с учетом таких факторов.

1. Западная часть модели (500 км) представлена тектоносферой с температурами посткаледонского (местами – постгерцинского, с возрастом складчатости около 300 млн лет) региона, несколько превышающими платформенные.

2. Восточная часть – тектоносфера океанического региона, в котором активный процесс завершился около 50 млн лет назад. Сведения о возрастах магматизма в котловинах с океанической корой северо-западной Атлантики [8] можно воспринять (абстрагируясь от значительного разброса датировок) как указание на предыдущие этапы тепломассопереноса 100 и 150 млн лет назад. Модель дополняет повышенная теплогенерация пород мантии в течение последних 100 млн лет. Под Внешней и Внутренней впадинами последний эффект также присутствует, но ограничен по интенсивности и длительности.

На фоне релаксации тепловых аномалий тектоносферы, связанных с активными процессами прошлого, под впадинами происходит по два акта адвективного тепломассопереноса, во время которых перегретое вещество из астеносферы поступает под кору, а холодное подкоровое – на его место. Процесс дополняется опусканием крупных эклогитизированных блоков коры, что ведет к утонению коры и понижению температуры мантии. Глубина кровли второго КТД принята большей, чем первого, т.е. процесс напоминал незавершенный рифтогенез. Это связано с заметным предварительным охлаждением нижней тектоносферы процессами в соседних регионах. В результате расчетов получена современная тепловая модель тектоносферы (и модели для различных периодов истории региона), представленная на рис. 1.

В ней отсутствует западная часть Аппалачей, охваченная современной активизацией. Интересно отметить, что для восточных Аппалачей получено распределение T , несколько превышающее солидус на максимальных глубинах, т.е. установлена возможность начала активизации. Расчетный тепловой поток вполне согласуется со средними наблюдаемыми значениями, отклонения не превышают 3 мВт/м². Как неоднократно отмечено при изучении других районов океанов и переходных зон [4 и др.], это согласование представляется необходимым элементом контроля модели, но не может служить сильным аргументом в ее пользу. Величина расчетного ТП в значительной мере определяется сравнительно неглубокими источниками тепла.

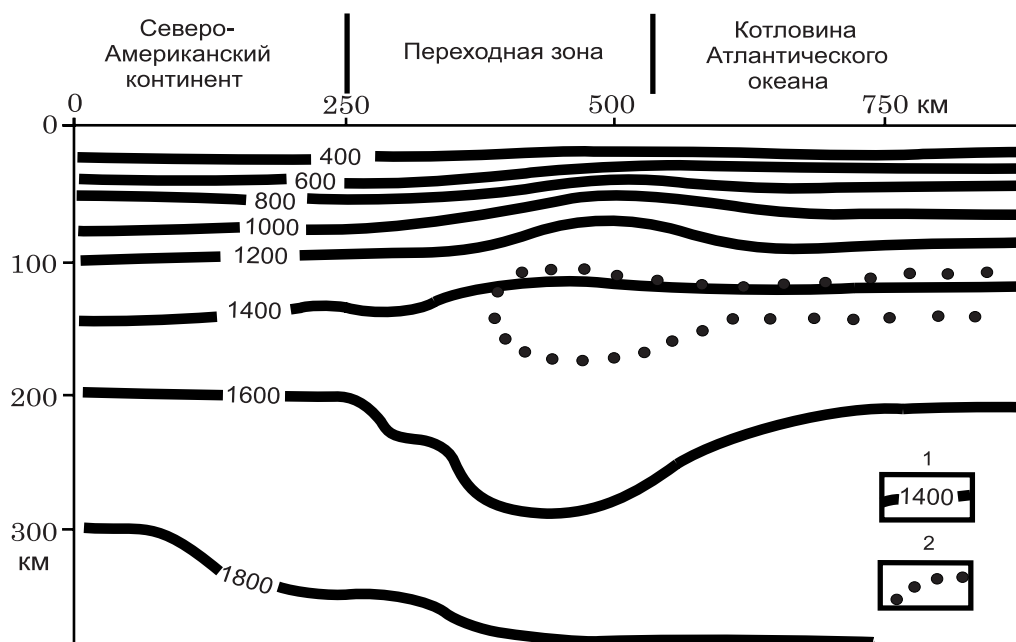


Рис. 1. Тепловая модель тектоносферы переходной зоны и соседних районов. 1 – изотермы (°С), 2 – границы зоны частичного плавления

Геолого-геофизические следствия глубинного процесса

Расчет погружения поверхности во Внутренней и Внешней впадинах выполнен для одномерной задачи и без учета многих факторов, которые могут повлиять на его результат. Тем не менее он должен быть довольно реалистичен, так как основной эффект связан с преобразованием коровых базитов со средней плотностью 2.9 г/см^3 в эклогиты с плотностью $3.4\text{--}3.45 \text{ г/см}^3$. Уплотнение на 17% слоев мощностью около 18 км под каждой из впадин должно обеспечить примерно половину амплитуды опускания. Вторая половина связана с изменением температуры тектоносферы и глубины поверхности слоя полиморфных преобразований у подошвы верхней мантии.

Возможность преобразования столь большой части коры в эклогиты нуждается в специальном обосновании. В слоях консолидированной коры содержится: в «гранитном» – около 13%, в переходном – 62%, в «базальтовом» – 80% базитов. Учитывая, что около трети блоков коры переходной зоны – чисто мафические, можно увеличить среднее содержание основных пород в двух верхних слоях до 40 и 75%. При последовательных активизациях в двух нижних слоях коры заменяется основными выплавками из мантии около 50% объема, в верхнем – 25%. Средние содержания базитов в слоях достигают 55, 88 и 90%. Учитывая относительные мощности слоев, можно оценить суммарное содержание основных пород в преобразуемой коре как эквивалентное слою мощностью 35 км. При его полном переходе в эклогиты и погружении в мантию мощность оставшейся консолидированной коры составит около 7.5 км. Следует отметить, что для обычной континентальной коры, не содержащей базитовых блоков, и для коры, основные породы которой предварительно хотя бы частично эклогитизированы, такое ра-

дикальное изменение мощности в ходе описанного процесса недостижимо. Оно может быть получено только при существенном поднятии и размыве верхнего слоя консолидированной коры на первом этапе активного процесса.

В рассматриваемом регионе нельзя установить имел ли место предюрский размыв консолидированной коры. Но в пользу высказанных соображений говорит тот факт, что во Внутренней впадине на блоках с мафической корой опускание было более интенсивным: в среднем здесь накопилось за весь период с юры до голоцена 9.3 км осадков, в то время как на остальных блоках — в среднем 6.4 км.

Следует отметить одну особенность «рифтогенеза» в переходной зоне атлантического типа, которая отличает его от континентального. Утонение коры под впадиной не сопровождается ее утолщением на периферии [4]. Возможно, в данном случае теплоперенос не включает заметной горизонтальной ветви.

К настоящему времени суммарное расчетное погружение поверхности составляет 6.4 км. Оно неплохо согласуется с наблюдаемым, но кривая зависимости мощности осадочного слоя от времени несколько отличается от наблюдаемой для Внешней впадины.

Глубины магматических очагов, установленные по составу изверженных пород во Внешней впадине [5] укладываются в диапазон 40–70 км, что меньше глубины кровли современной астеносферы (см. рис. 1). Но возраст пород — многие десятки млн лет, в тот период прогрев верхней тектоносферы впадины был больше.

Таким образом, развиваемые представления о характере глубинного процесса удается в первом приближении согласовать с фактами геологической истории впадин, формирующихся в переходной зоне атлантического типа.

В сложившейся ситуации гравитационное моделирование представляется значимым методом геофизического контроля рассматриваемой схемы глубинного процесса. Наблюдаемое гравитационное поле, с которым сопоставляется расчетное, в пределах всего региона довольно выдержано по простиранию [3, 6]. Это позволяет провести его осреднение, выявляющее типичные особенности распределения силы тяжести (аномалии Буге на суше и аномалии Фая на море) вдоль сводного поперечного профиля.

При подборе плотностей коровых пород по скоростям продольных сейсмических волн в соответствующих интервалах глубин, учитывались и результаты плотностного моделирования, проведенного ранее в регионе вдоль большинства рассматриваемых профилей [3]. В блок коры под Внутренней впадиной было внесено уплотнение на 0,05 г/см³ в связи с тем, что третья часть разрезов, пересекающих блок, обнаруживает высокоскоростную кору.

Расчетное гравитационное поле для случая нормальной мантии по уровню резко отличается от наблюдаемого: на восточном конце профиля разница составляет около 230 мГл, на западном — около 80 мГл. Аномальные плотности в модели мантии были связаны: 1) с наличием под тонкой корой плагиоклазового перидотита до глубины около 30 км; 2) распространением до 100 км в прогретой мантии шпинелевого перидотита; 3) изменениями плотности в пределах положительных и отрицательных аномалий температуры; 4) подъемом кровли зоны полиморфного преобразования пород мантии в аномально охлажденной на соответствующих глубинах части региона.

Введение аномального эффекта мантии позволило достаточно полно уравнивать расчетное и наблюдаемое поля. Среднее расхождение составляет 22 мГл, что следует признать величиной, объясняемой, скорее всего, осредненным характером используемого материала, не содержащего локальных аномалий наблюдаемого поля и локальных особенностей модели.

Скоростная модель верхней мантии

В известных авторам публикациях распределения скоростей P -волн в верхней мантии под переходными зонами атлантического типа отсутствует. В какой-то мере к этой категории можно отнести данные из работы [12]. Однако приведенный в ней скоростной разрез относится к гораздо большей территории (включает значительный фрагмент мантии под океанической котловиной) и содержит априорное ограничение модели. По мнению авторов [12] скорости в нижней части верхней мантии не должны отличаться от представленных моделью АК135.

Для исследования была выбрана восточная окраина Северной Америки и северная окраина Южной Америки (рис. 2). На территориях и акваториях впадин были подобраны данные [16] для очагов с глубинами гипоцентров 35–55 км, времена пробега волн пересчитаны для глубины 35 км, введенные поправки учитывали распределение V_p , изменявшееся по ходу подбора разреза. Они (время пробега как функция расстояния в градусах координат) использовались для построения годографов, редуцированных к скорости 8.2 км/с. Применялось сглаживание с использованием скользящего окна размером 3–4 градуса. Скоростной разрез коры под станциями на глубинах менее 35 км был принят по осредненным данным из указанных выше источников. Наблюдаемые годографы строились начиная с углового расстояния около 3°, так как на меньших расстояниях резко увеличивался разброс экспериментальных данных. Возможно, сказывалась неоднородность земной коры или самых верхних горизонтов мантии.

Всего использованы сведения о временах пробега волн от примерно 440 землетрясений, расположенных таким образом, что волны между их очагами и станциями распространялись по верхней мантии под переходной зоной. Это сузило выбор источников и привело к ограничению длины экспериментального годографа. Соответственно максимальная глубина проникновения лучей рефрагированных волн составила не более 350 км. Наблюдаемые годографы для Северной и Южной Америки заметно различаются на небольших угловых расстояниях (рис. 3).

По абсолютной величине расхождение между ними довольно обычно для такого экспериментального материала (в среднем около 1.5 с, что эквивалентно вариациям скорости продольных волн примерно в 0.1 км/с), но все точки на одном годографе смещены в одну сторону от точек на другом. Не исключено, что причина — в сложности тепловой модели регионов. Как видно по рис. 1, в разных частях переходной зоны заметно разная степень прогрева, под Внешней впадиной превышен солидус. При преимущественном прохождении лучей в каждом из случаев по той или иной части переходной зоны можно получить заметные расхождения годографов.

Расчетный годограф получен по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени. Модель первого приближения для подбора скоростного разреза взята из [12].

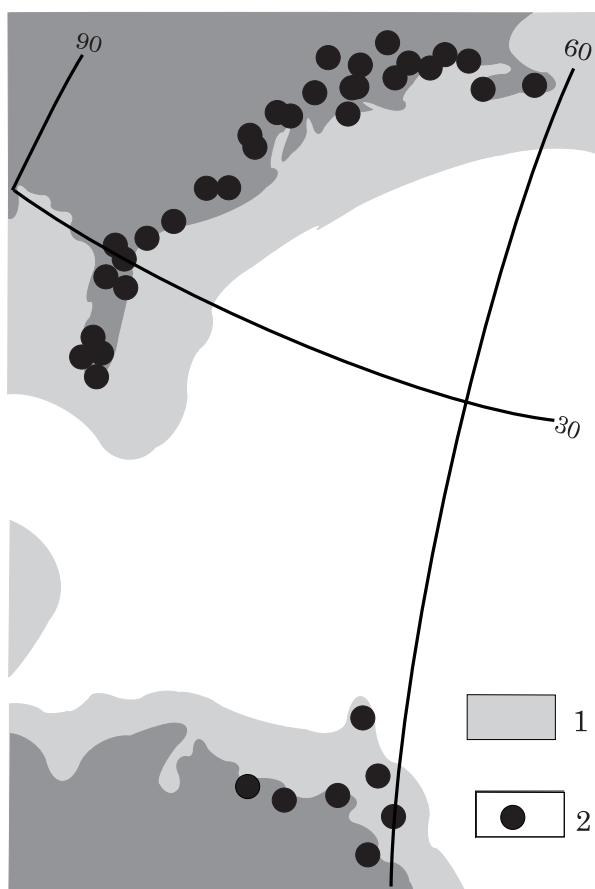


Рис. 2. Размещение сейсмостанций, данные по которым использованы в работе. 1 – шельф и континентальный склон, 2 – сейсмостанции

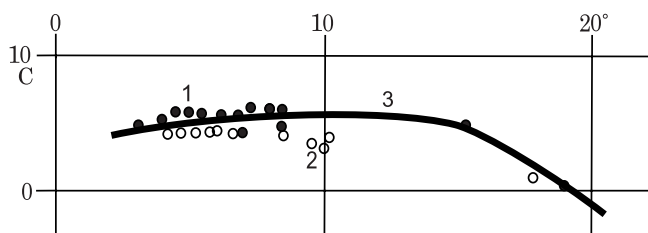


Рис. 3. Сравнение точек наблюдаемых географов для Южной (1) и Северной (2) Америк с расчетным географом (3)

Отклонения экспериментальных точек от него (см. рис. 3) незначительны, можно рассчитывать на погрешность скоростного разреза на уровне 0.1 км/с. Но речь идет об одномерном разрезе, полученном при произвольном смещении данных по двум различающимся частям. Поэтому для сравнения с экспериментальной скоростной моделью использованы две, построенные для частей тепловой модели (см. рис. 1). Они представлены на рис. 4. Отличия построенного скоростного разреза от платформенного явно указывают на адвективный характер процесса,

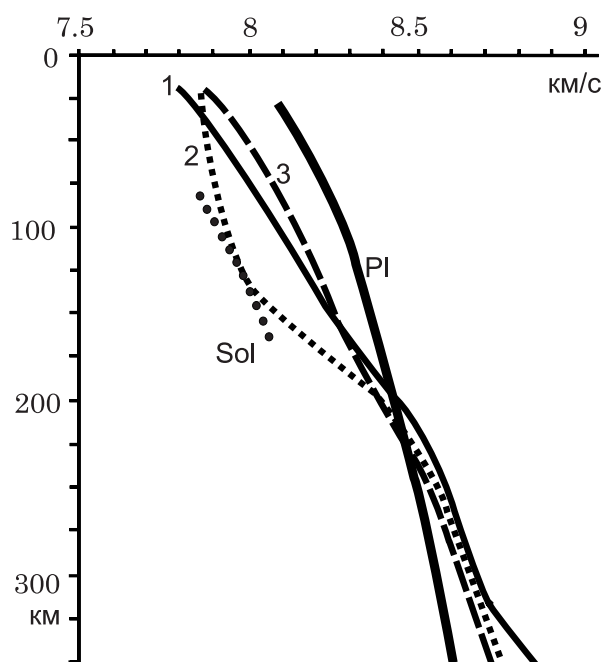


Рис. 4. Скоростные модели верхней мантии переходных зон атлантического типа

1 — экспериментальная, 2, 3 — расчетные (2 — для прогретого участка, 3 — для сравнительно холодного участка). Sol — распределение скорости Р-волн при температуре начала плавления (максимальное содержание магмы в центре астеносферы — 2%), Pl — скорости под неактивированной докембрийской платформой.

приведшего к образованию переходной зоны. Сопоставление экспериментальной скоростной модели с полученными по тепловым моделям для Внешней и Внутренней впадин показывает, что средняя из «тепловых» моделей довольно близка к установленной по сейсмологическим данным. Это повышает достоверность расчетного скоростного разреза верхней мантии переходной зоны, но одновременно демонстрирует непригодность одномерной конструкции для изучения такого объекта.

Выводы

Проведенный анализ геолого-геофизических данных, относящихся к зоне перехода атлантического типа, позволил установить, что:

1. Развитие переходной зоны представляет собой преобразование континентальной коры в кору промежуточного типа и затем — в океаническую. Прилегающие к зоне районы, имевшие океаническую кору до начала преобразования, не участвуют в активном процессе. Такой контакт континента и океана принципиально не отличается от существующего на окраинах тихоокеанского типа. Отличие — в альпийских геосинклиналях, располагающихся на континентальных окраинах вокруг Тихого океана и в возрасте процесса океанизации.

2. Для объяснения всей имеющейся геологической и геофизической информации можно использовать представления об адвекционно-полиморфном про-

цессе в недрах региона. Их применение приводит к модели эволюции тектоносферы, близкой рифтовой активизации, но обладающей специфическими чертами (в частности, ограниченной подъемом только двух КТД).

3. Применение для контроля правильности выбранной модели глубинного процесса в тектоносфере переходной зоны атлантического типа одномерного скоростного разреза верхней мантии оказалось не очень эффективным из-за существенных различий температур (и, соответственно, скоростей сейсмических волн) во внешней и внутренней частях зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. М.: Недра. 1981. 432 с.
2. Белоусов В.В. Переходные зоны между континентами и океанами. М.: Недра. 1982. 152 с.
3. Геология континентальных окраин. Ред. К. Берк и Ч. Дрейк. Т. 1, 2, 3. 1978, 1978, 1979. М.: Мир. 356 с, 372 с, 402 с.
4. Гордиенко В.В. Процессы в тектоносфере Земли (адвекционно-полиморфная гипотеза). Saarbrücken: LAP. 2012. 256 с.
5. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. РТ-условия в мантийных магматических очагах под Атлантическим океаном. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2013. № 3. С. 76–90.
6. Изостазия и гравитационное поле Северной Атлантики. Ред. С.С. Красовский. М.: Наука. 1987. 156 с.
7. Кунин Н.Я. Структура литосферы континентов и океанов. М.: Недра. 1989. 288 с.
8. Рудич Е.М. Движение континентов и эволюция дна океана. М.: Недра. 1983. 272 с.
9. Удинцев Г.Б. Топография и структура дна океанов. М.: Недра. 1987. 240 с.
10. Усенко С.В. Особенности строения земной коры и верхней мантии Северной Атлантики по данным взрывной сейсмологии. *Сравнительная тектоника континентов и океанов*. М.: Межвед. геофиз. комитет. 1987. С. 52–70.
11. Хаин В.Е. Региональная тектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка. М.: Недра, 1971. 548 с.
12. Gudmundsson O., Sambridge M. A regionalized upper mantle (RUM) seismic model. *J.G.R.* 102, B 4. 1998. P. 7121–7126.
13. Levin V., Kim W., Menke W. Seismic velocities in shallow crust of western New England and northern New York. *Dull. Seis. Soc. Of Am.* 1996. **85**, № 1. P. 207–219.
14. Major structural features of southeastern Canada and the Atlantic continental margin. *Geol. Surv. Can.* 1994. **90**. P. 1–7.
15. Ulrike V., Jannis V., O'Reilly B. et al. The Hatton Basin and continental margin. *J.G.R., B.* 1998. **103**, №. 6. P. 12545-1266.
16. U.S. Geological Survey Albuquerque Seismological Laboratory. URL: http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic_Data/

Статья поступила 12.09.2017

В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко

ГЛУБИНИЙ ПРОЦЕС І ШВИДКОСТІ Р-ХВИЛЬ У ВЕРХНІЙ МАНТІЇ ПЕРЕХІДНИХ ЗОН АТЛАНТИЧНОГО ТИПУ

Розглянуто геологічну історію перехідних зон атлантичного типу. Побудовано схему глибинних процесів у мантиї. Її прояви узгоджуються з потужністю осадів у зоні, тепловим потоком та гравітаційним полем. Побудовано швидкісну модель верхньої мантиї. Вона не протирічить розподілу швидкостей, що встановлені за тепловою моделлю.

Ключові слова: перехідна зона від континентів до океанів, верхня мантия, швидкісні моделі.

V.V. Gordienko, L.Ya. Gordienko

DEPTH PROCESS AND SPEED OF R-WAVES IN THE UPPER MANTLE OF TRANSITION
AREAS OF ATLANTIC TYPE

We consider the geological history of the transition zones of the Atlantic type. A scheme of the deep-seated processes in the mantle is constructed. Its symptoms are consistent with the sediment thickness, heat flow and gravity field. Constructed velocity model in the upper mantle. It is not contrary to the velocity distribution established by the thermal model.

Keywords: transition zone from the continents to the oceans, the upper mantle, velocity models.