

В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко

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

СКОРОСТНЫЕ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ВОСТОЧНО-АФРИКАНСКОГО РИФТА И КРАСНОГО МОРЯ

Представлены результаты по изучению скоростного разреза верхней мантии зон молодого рифтогенеза и океанизации. Построены скоростные разрезы для мантии Красного моря и частей рифта. Полученные модели позволяют провести независимый контроль схемы глубинного процесса в тектоносфере континентального рифта и зоны океанизации.

Ключевые слова: *рифт Восточной Африки, Красное море, скоростной разрез, океанизация.*

Введение

Статья продолжает серию публикаций авторов, посвященных одномерным скоростным моделям (по Р-волнам) верхней мантии различных регионов. В предыдущих работах были рассмотрены модели океанических структур [4—7, 11, 12 и др.]. На данном этапе предполагается исследование преимущественно молодых континентальных рифтов, однако предварительное рассмотрение имеющихся данных по современным процессам и геологической истории этих регионов показывает не только близость происходящих в них глубинных процессов изученным в океанах, но и наличие непосредственных переходов между ними. Такие «связки» как хребет Карлсберг — рифт Аденского пролива — Красное море — зона Афар — Восточно-Африканский рифт (ВАР), рифт Калифорнийского залива — провинция Бассейнов и Хребтов в северо-американских Кордильерах, хребет Гаккеля (Нансена) в Арктическом океане — Момский рифт (хребет Черского) в Тихоокеанском складчатом поясе демонстрируют возможность распространения сходных по характеру теплопереноса глубинных процессов, переходящих из океанических условий в континентальные. Такая связь может рассматриваться как косвенное подтверждение близости глубинных процессов рифтогенеза и океанизации [13]. Этот случай заслуживает специального изучения, в котором сейсмологические исследования могут сыграть заметную роль.

© Е.Ф. ШНЮКОВ, В.П. КОБОЛЕВ, 2018

Геологическая история

Альпийский рифтогенез в Африке распространен очень широко (рис. 1). Кроме ВАР здесь представлена Рейно-Ливийская система, протягивающаяся до Гвинейского залива. Возможно ее ответвление из Ливии к юго-востоку к ВАР. На остальной территории континента от Марокко до Гвинеи и Намибии встречаются молодые интенсивные поднятия, проявления магматизма, активные разломы.

В изучаемом регионе необходимо разделить обычно не соприкасающиеся глубинные процессы — континентальный рифтогенез и образование Срединно-океанического хребта (СОХ). Согласно адвекционно-полиморфной гипотезе (АПГ) в первом случае происходит преобразование континентальной земной коры разной степени, иногда приводящее к возникновению океанической или субокеанической коры. Во втором — процесс рифтогенеза накладывается на уже ранее существовавшую океаническую кору. Последняя ситуация по всем признакам складывается на хр. Карлсберг. Его северо-западное ограничение Оуэнской разломной зоной северо-северо-западного простирания маркирует переход к региону, где преобразуется континентальная кора, причем в центральных частях Аденского пролива и Красного моря океанизация почти завершена. Полоса коры океанического типа появилась в Красном море только в плиоцене [1]. Часто можно встретить утверждение о том, что кора в центрах этих впадин в полосе шириной около 100 км не преобразована, а разорвана, раздвинута и образовавшийся пробел заполнен новообразованной океанической корой [8 и др.]. В общем виде океанизация рассмотрена в [13 и др.], где показано, что новая кора, потеряв «гранитный» слой и сильно изменив состав нижней части, все же сохраняет значительную мощность и породы основно-гранулитового этажа. Поэтому она и может генерировать региональные («полосовые») аномалии магнитного поля. В данном случае такие аномалии обнаружены и дополняются возмущениями магнитного поля иного простирания, продолжающимися наблюдаемые вне преобразованной коры, в том числе на платформенных участках Синая и Аравийского полуострова. Кроме того, очевидна континентальная кора у северного окончания моря, на Синае. Далее на север рифт продолжается кулисообразно расположенными структурами поднятий, активных разломов и проявлений магматизма вплоть до Предкавказья (Ставропольского поднятия). На участках наиболее сильно переработанной коры образуются локальные опускания (Мертвое море и др.).

В пределах Африканского континента рифтогенезу на явно континентальной коре предшествовал длительный перерыв в тектоно-магматической активности [8 и др.], явно достаточный для накопления энергии. Вероятное исключение составляет только южная часть ВАР. Здесь предполагается киммерийская активизация (200—150 млн лет назад) [2, 8 и др.]. Не исключено, что именно поэтому проявления рифтогенеза на юге ослаблены по сравнению с северной частью ВАР (рис. 1). Но и в этом случае необходимо признать теплогенерацию мантийных пород в регионе несколько более высокой, чем под средней докембрийской платформой. Косвенным подтверждением этого могут служить встречающиеся среди мантийных ксенолитов биотитовые пироксениты и глиммериты [1].

Расчет параметров магматических очагов (преимущественно — в верхней мантии) привел к обычным для рифтового процесса величинам глубин их кро-

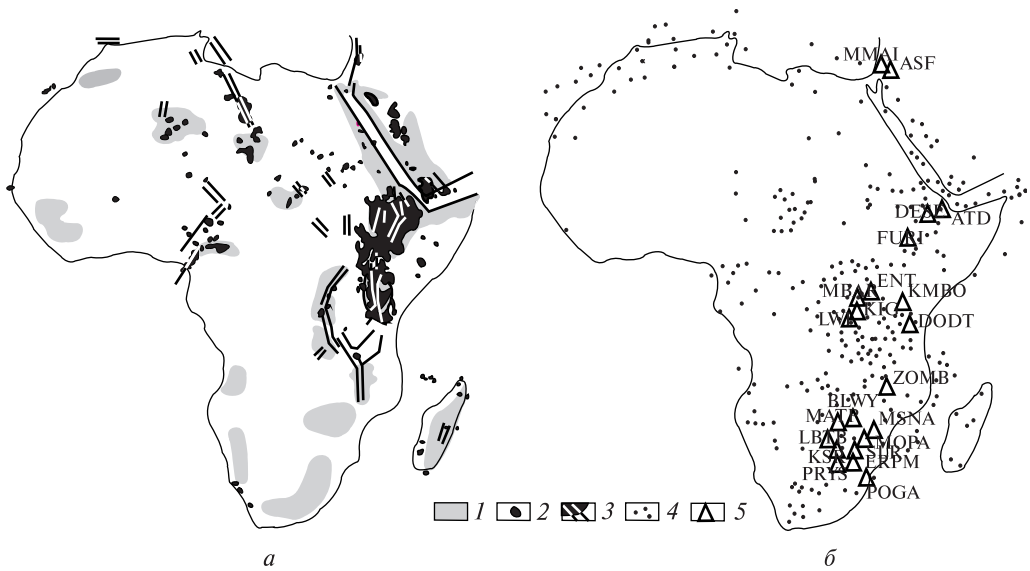


Рис. 1. Альпійський рифтогенез в Африці. А — проявлення інтенсивних піднятих (1), магматизма (2), активних розломів (3), як правило, обрамляючих рифтові трого. Б — епіцентри землетрясень (4) і розміщення сейсмостанцій (5), дані по яким використані в роботі

вель і температур: 185 км і 1650 °C, 145 км і 1500 °C, 95 км і 1350 °C, 55 км і 1200 °C, 20 км і 1150 °C. В останньому випадку мова йде про плавлення в очагах основної магми, а не кислої або середньої, які також утворюються на цій глибині, але в наших роботах не вивчалися [3 і др.]. Для найбільш молодих порід характерні очоги магматизма з параметрами 80—100 км і 1300—1400 °C [1 і др.].

За даними про вік базальтоїдів Східно-Африканської рифтової системи мантійний джерело магматизма з'явився тут приблизно 25 млн років тому [2, 9 і др.]. Активний процес в Аденській протоці, Червоному морі, районі Афар і, ймовірно, в ефіопській частині власне ВАР (до широти появи західної гілки рифта) почався трохи раніше — приблизно 40 або більше млн років тому [8].

Ці частини ВАР відрізняються ще і шириною системи. В південній, між гілками рифта, з'являється неактивізований або лише місцями активізований масив шириною до 700 км. Проявлення магматизма в західній гілці значно слабше, ніж в східній, але вона далі тягнеться на південь. Є всі підстави вважати, що розвиток глибоких процесів в більшій частині ВАР відбувався за схемою континентального рифтогенезу, відповідно до уявлень АПГ [10, 11]. На крайньому півдні системи можлива заміна рифтогенезу одноактною активізацією, але достовірної аргументації такої точки зору немає.

Априорна сейсмологічна інформація

Різноманітні сейсмологічні дослідження проводилися на території ВАР і навколо Червоного моря протягом багатьох десятиліть [1, 2, 15—18, 19, 20 і др.]. Отриманий матеріал дуже різноманітний за охопленням території, інтервалом глибин, методикою інтерпретації даних. Дуже складно оці-

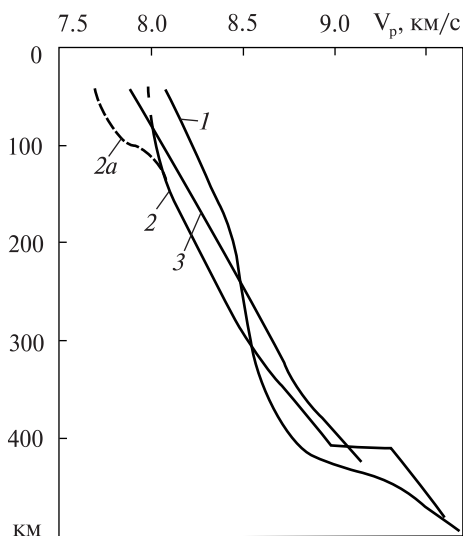


Рис. 2. Распределения скоростей в верхней мантии изучаемого региона по данным указанных выше публикаций. 1 — Африканская платформа, 2 — рифты Красного моря и ВАР (2а — Афар и Эфиопский рифт), 3 — средняя модель для Восточной Африки

нить степень достоверности части скоростных разрезов. Некоторые данные приведены на рис. 2.

Данные о скоростном разрезе платформы оказываются довольно близки к обычным для таких регионов. Несколько понижены скорости в верхних 150 км мантии (в пределах 0,1 км/с, что можно считать объяснимым погрешностью). Для учета этой особенности ниже в качестве фона при расчете скоростных аномалий использовалось именно это распределение V_p по глубине. Информация о скоростных разрезах рифтов оказывается довольно противоречивой, расхождения между данными разных авторов велики. На рис. 2 приведены в основном осредненные модели. Выделяется яркая отрицательная аномалия блока Афар и Эфиопско-Кенийского рифта. Западная ветвь ВАР обладает существенно меньшей аномалией, как и Красное море. В последнем случае скорости продольных сейсмических волн во всей верхней мантии значительно выше, чем под обрамляющими море районами Аравийской и Африканской платформ [16 и др.]. Из геологических соображений такая скоростная аномалия представляется невероятной. Скоростной разрез для Восточной Африки в целом, как и следовало ожидать по геологическим данным, в значительном интервале глубин похож на средний между собственно рифтовым и платформенным.

Использованные данные и экспериментальные годографы

На изучаемой территории были подобраны [14] данные для очагов с глубинами гипоцентров 5—55 км, времена пробега волн пересчитаны для глубины 35 км, что близко к средней глубине раздела Мохо в регионе. Использовались данные о скоростной структуре земной коры [18, 20 и др.]. 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.

Как видно из рис. 1 и таблицы, распределение использованной информации по изучаемой территории крайне неравномерно. В некоторых случаях были объединены данные, полученные на нескольких территориально близких сейсмостанциях. Только при таком подходе можно построить протяженный отрезок годографа. Но в целом удается обеспечить построение годографов с приемлемой погрешностью. Как показано на одном из примеров выполнения этой операции (рис. 3), среднее отклонение точек от усредняющего годографа составляет око-

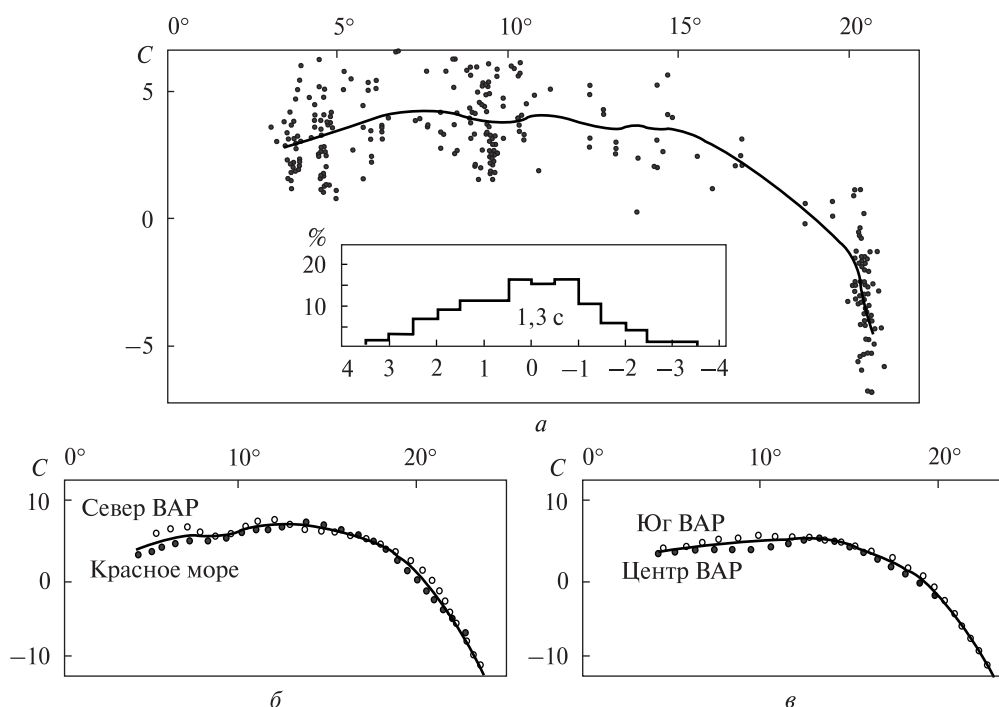


Рис. 3. Редуцированные годографы: А — для одной из сейсмостанций (КМВО), Б — осредненные для северной части региона, В — осредненные для центральной и южной частей ВАР. Линии — результат осреднения

ло 1.3 с. Для остальных годографов получены примерно такие же величины. Они не превышают отклонений, фиксируемых в других районах подобных исследований [4—7, 12 и др.].

Проведенные ранее оценки связи погрешности в построении годографа с ошибкой определения скорости показывают, что можно рассчитывать на точность около 0,1 км/с. Речь идет о вариациях скоростей в сравнительно больших интервалах глубин — не менее 50—100 км.

Построение индивидуальных (для отдельных сейсмостанций или их групп в случае малого количества материала на каждой станции) годографов в различных частях изучаемого региона проведено: Красное море и северная часть ВАР — по три, центральная часть ВАР — пять, южная часть ВАР — восемь. В перечис-

Количество землетрясений, данные по которым привлечены для построения годографов на каждой из сейсмостанций или их групп

Станция	№	Станция	№	Станция	№
MMAI	78	DESE,AAE	18	MSMA,МОРА,РОГА,ZOMB	271
ASF	73	KMBO	474	SLR	182
ATD	31	ERPM	88	LBTB	832
Красное море	182	DODT	62	KSR	108
FURI	39	BLWY	30	PRYS	133
ENT, KIG, LWI	56	MATP	89	Восточно-Африканский рифт	2618
MBAR	205				

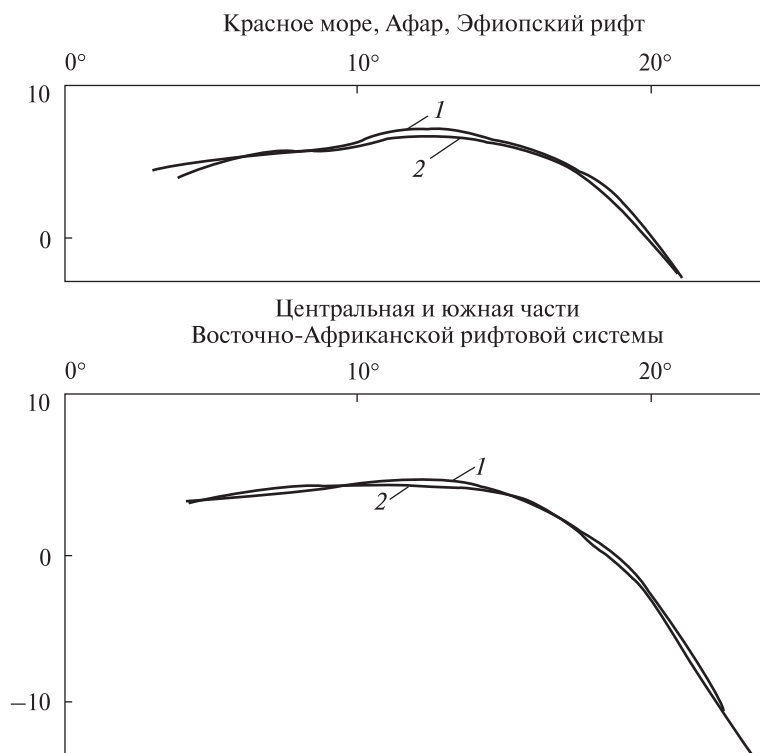


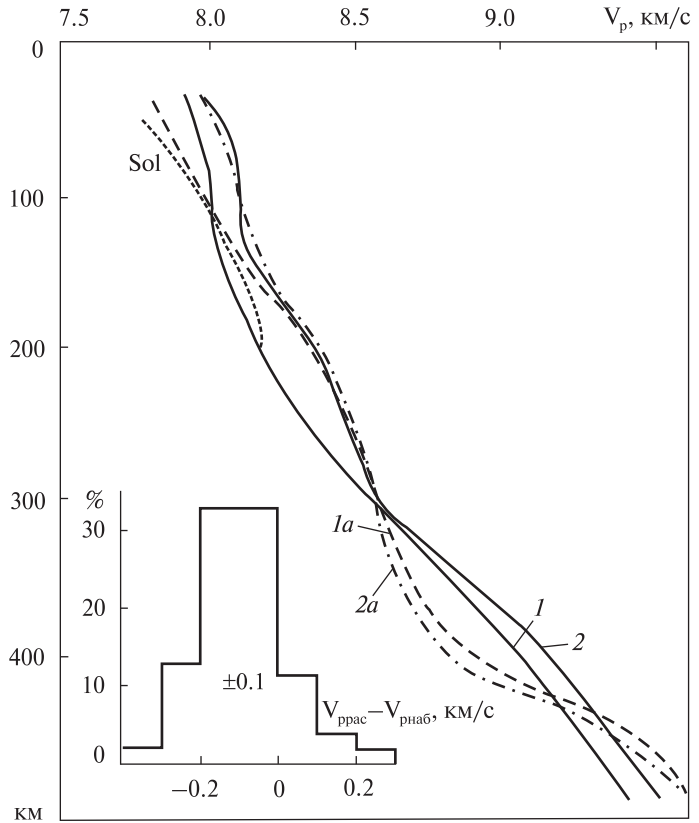
Рис. 4. Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) годографов для двух частей изучаемой территории

ленных группах годографы близки. Лишь в одном фрагменте обнаружено отклонение около 2,5 сек части годографа длиной около 3° от компактно расположенных остальных. Гистограммы различий показывают, что частные годографы отклоняются от усредняющего в среднем менее, чем на 1 с. С другой стороны, между двумя северными и двумя южными группами обнаруживаются заметные различия. Они, в общем, ожидаемы по геологическим данным и материалам предшествующих исследований. Следует отметить, что годографы для северной части ВАР и Красного моря не указывают на существенное различие скоростных разрезов по всей верхней мантии (как это следует из некоторых приведенных выше априорных данных). Намечается только незначительное понижение скорости в верхних 100 км под северной частью ВАР по сравнению с Красным морем. Но и оно, скорее всего, не превышает обусловленного погрешностью построения годографа. Отличия среднего годографа для этой части региона от полученного южнее (в центральной и южной частях Восточно-Африканской рифтовой системы) заставляют рассмотреть их отдельно (см. рис. 3).

Скоростные разрезы

При построении расчетных годографов в качестве стартовых моделей использованы данные предшествовавших исследований (см. выше). Вычисления проведены с использованием программы SEIS—83 И. Пшенчика и В. Червени. Принципиальные отличия скоростных разрезов, использованных для расчетных годографов, от разрезов первого приближения не встречены. Несколько итераций позволили достичь совмещения расчетных и наблюдаемых годографов, показанного на рис. 4. Их согласование можно считать вполне удовлетворительным.

Рис. 5. Скоростные разрезы верхней мантии Красного моря, Афа́ра и Эфиопского рифта (1) и центральной и южной частей Восточно-Африканской рифтовой системы (2). Разрезы 1а и 2а представляют собой расчетные варианты для рассмотренных частей региона, построенные в соответствии с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы о глубинных процессах в тектоно-сфере. Sol — распределение скорости при достижении солидуса мантийных пород. На врезке — гистограмма распределения отклонений наблюдаемых величин скорости от расчетных



Подобранные скоростные разрезы отличаются от полученных ранее другими авторами в верхней и нижней третях верхней мантии несколько более высокими значениями скорости продольных сейсмических волн (см. рис. 2 и 4). В центральной трети величины V_p близки. Существенные отличия фиксируются в соотношениях скоростных разрезов Красного моря, Афа́ра и Эфиопского рифта. Согласно полученным данным они практически совпадают в пределах погрешности построений. В опубликованных ранее результатах этого не наблюдалось (см. выше). Варианты скоростных разрезов верхней мантии региона представлены на рис. 5. На скоростном разрезе северной части региона выделяется интервал глубин, в пределах которого скорости отвечают начальной стадии частичного плавления пород мантии. Можно предположить, что на глубине около 100 км располагается кровля астеносферы. На втором разрезе столь низкие значения V_p не представлены. Можно предположить, что это — результат осреднения двух скоростных разрезов — платформенного и рифтового. В последнем астеносфера вполне может отмечаться.

Обсуждение результатов

Построенные скоростные разрезы характеризуют регионы с различными типами эндогенных режимов. Как показано выше, в северном фрагменте присутствуют два варианта глубинного процесса (возможно, две стадии одного). В одном мы имеем дело с недавно завершившим развитие типичным

континентальным рифтом, в котором сохранилась, пусть измененная (базифицированная) и сокращенная по мощности (в Афаре), но все же континентальная кора. Во втором (скорее всего, это произошло в районе с более основной корой) процесс достиг стадии океанизации, т.е. континентальная кора заменилась океанической или субокеанической. Оба варианта мантийного теплопереноса рассмотрены детально в работах [11—13 и др.]. Здесь упомянем только, что процесс включает подъем трех перегретых астенолитов из нижней половины верхней мантии в подкоровое пространство. На смену им оттуда опускаются относительно холодное вещество верхних горизонтов мантии и эклогитизированные породы нижней коры.

Анализ завершается построением тепловых моделей верхней мантии для соответствующих этапов развития. Эти модели сопоставляются с характерной для докембрийской платформы, вычисляются аномалии и по их величинам вносятся поправки в скоростную модель верхней мантии платформы. В данном случае использовалась скоростная модель Африканской платформы [20]. Поскольку для сравнения имеется один наблюденный скоростной разрез (1 на рис. 5), для расчетной модели использована температурная модель средняя между рифтовой и океанизированной. Конечно, между ними существует заметная разница, достигающая в некоторых интервалах глубин первых сотен градусов.

Для сравнения со скоростным разрезом мантии центральных и южных районов ВАР использованы расчетные модели континентального рифта и докембрийской платформы. Как показано выше, платформенные массивы занимают значительную часть рифтовой зоны между двумя рифтовыми рвами — восточным и западным. Построение среднего из двух таких расчетных разрезов предполагает их равное участие в формировании наблюденного разреза. Практически меру их вклада оценить нельзя, что вносит, естественно, дополнительную неопределенность в оценку результатов сопоставления. Осложняет ситуацию отсутствие данных о достигнутых в настоящее время фазах рифтогенеза. Не исключено, что на крайнем юге ВАР последний этап теплопереноса в мантии еще не произошел (см. выше). В таком случае расчетные скорости в верхней части разреза окажутся несколько ниже, а в нижней — несколько выше приведенных на рис. 5. Можно предполагать, что роль платформенной мантии в формировании скоростного разреза южной части рифтовой зоны больше принятой.

Тем не менее, расчетные значения V_p все же удовлетворительно согласуются с наблюденными в значительных интервалах глубин верхней мантии. Гистограмма расхождений между ними обнаруживает среднюю величину около 0,1 км/с. Такое значение вполне можно объяснить погрешностями использованных процедур расчетов и исходного материала. Этого нельзя сказать о расхождении обоих наблюденных моделей с расчетными в интервале глубин 300—400 км. Оно слишком велико и сохраняет знак на протяжении более 100 км. В работе [20] упоминается неопределенность полученных результатов в этом интервале глубин: «Над границей на глубине 410 км должна располагаться зона высокого градиента скорости, однако имеющиеся данные допускают наличие на глубине 410 км как резких, так и плавных границ» [20, с. 4783]. Возможно, полученная нами модель ближе к реальной с более высоким градиентом на глубинах несколько меньше 400 км. Во всяком случае, при ее построении использовано намного больше исходных данных, чем это было при построении модели из работы [20].

Заключение

Проведенное исследование скоростных разрезов мантии рифтовой системы Восточной Африки и Красного моря позволило установить прежде всего близость проявлений глубинных процессов в этих регионах, которые по формальным причинам должны быть отнесены к различным типам эндогенного режима. Под Красным морем, блоком Афар и Эфиопским рифтом обнаружена отрицательная скоростная аномалия, отвечающая астеносфере. Под Восточной Африкой явного возмущения такого рода не установлено, но оно, скорее всего, отсутствует из-за включения в объем вещества, для которого построен разрез, значительной части платформенной мантии. Глубина выявленной зоны частичного плавления отвечает составу молодых изверженных пород региона.

Скоростные разрезы могут быть в пределах погрешности построений согласованы со схемой глубинных процессов, отвечающей адвекционно-полиморфной гипотезе.

Два наблюдаемых скоростных разреза различаются на всех изученных глубинах (т.е. в верхней мантии и части переходной зоны к нижней мантии) на 0,1—0,2 км/с. Знак различия сохраняется во всем изученном интервале глубин. Эта ситуация не соответствует распределению аномальных температур при адвективном мантийном тепломассопереносе. Соответствие достигалось во всех ранее изученных авторами регионах континентов и океанов. Возможно, в данном случае сказывается влияние какой-то систематической помехи. Поэтому нарушение следует отметить и обратить на него внимание при изучении других аналогичных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. М.: Недра. 1981. 432с.
2. Восточно-Африканская рифтовая система. Т.III. Ред. В.В. Белоусов. Москва: Наука. 1974. 288 с.
3. Гордиенко В.В. О РТ-условиях в магматических очагах мантии Земли. *Геофиз. журнал*. 2014. № 6. С. 28—57.
4. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростной разрез верхней мантии под Алеутской, Курильской и Японской островными дугами. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2012. № 3. С. 37—46.
5. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростная модель верхней мантии под островными дугами и береговыми хребтами Тихого океана. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2015. № 3. С. 69—81.
6. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростная модель верхней мантии под срединноокеаническими хребтами. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2016. № 1. С. 33—42.
7. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростные разрезы верхней мантии океанических котловин и глубоководных желобов. *Доповіді Національної академії наук України*. 2016. № 4. С. 62—68.
8. Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли. Москва: Недра. 1983. 279с.
9. Ashwal L., Burke K. African lithospheric structure, volcanism and topography. *Earth and Planetary Sc. Letters*. 1989. v.96. P. 8—14.
10. Gordienko V. Essential points of the advection-polymorphism hypothesis. *NCGT Journal*, 2015. v. 3, № 2, P. 115—136.
11. Gordienko V. Deep-seated processes in the tectonosphere of continental rifts. *NCGT Newletters*. 2016. 3. P. 361—388.

12. Gordienko L., Gordienko V. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Newletters*. 2016. 3. P. 389—405.
13. Gordienko V. Deep-seated processes in the tectonosphere of oceans. *NCGT Newletters*. 2016. 4. P. 553—581.
14. International Seismological Centre. *On-line Bulletin*. URL: <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2014.
15. Jakovlev A., Rumpker G., Schmeling H. et al., Seismic images of magmatic rifting beneath the western branch of the East African rift. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. 11. P. 4906—4920.
16. Koulakov I., Burov E., Cloetingh S. et al., Evidence for anomalous mantle upwelling beneath the Arabian Platform from travel time tomography inversion. *Tectonophysics*, 2016. 667. P. 176—188.
17. Qiu, X., Priestley K., McKenzie D., Average lithospheric structure of southern Africa, *Geophys. J. Int.*, 1996. 127, P. 563—587,
18. Rihm R., Makris J., Moller L. Seismic surveys in the Northern Red Sea: asymmetric crustal structure. *Tectonophysics*. 1991. 198. P. 279—295.
19. Weeraratne, D., Forsyth D., Fischer K. et al., Evidence for an upper mantle plume beneath the Tanzanian craton from Rayleigh wave tomography, *J. Geophys. Res.* 108(B9), 2427.
20. Zhao M., Langston C., Nyblade A. et al. Upper mantle velocity structure beneath southern Africa from modelling regional seismic data. *J.G. R.* 1999.104, B3. P. 4783—4794.

Статья поступила 16.05.2017

В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко

ШВИДКІСНІ МОДЕЛІ ВЕРХНЬОЇ МАНТІЇ СХІДНО-АФРИКАНСЬКОГО РИФТУ ТА ЧЕРВОНОГО МОРЯ

Представлено результати з вивчення швидкісного розрізу верхньої мантії зон молодого рифтогенезу і океанізації. Побудовано швидкісні розрізи для мантії Червоного моря і частин рифту. Отримані моделі дозволяють провести незалежний контроль схеми глибинного процесу в тектоносфері континентального рифта і зони океанізації.

Ключові слова: рифт Східної Африки, Червоне море, швидкісний розріз, океанізація.

V.V. Gordienko, L.Ya. Gordienko

VELOCITY MODELS OF THE UPPER MANTLE OF THE EASTERN AFRICAN RIFT AND THE RED SEA

The results of studying the velocity section of the upper mantle of the zones of young riftogenesis and oceanization are presented. High-speed sections for the mantle of the Red Sea and parts of the rift were built. The obtained models allow an independent control of the scheme of the deep process in the tectonosphere of the continental rift and the oceanic zone.

Key words: Rift of East Africa, Red Sea, velocity section, oceanization.