

Строение литосферы Камерунской зоны разломов по данным глубинного сейсмического зондирования

© Ю. В. Тулина, В. Ю. Бурмин, И. Б. Шемелева, 2012

Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

Поступила 30 марта 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. Д. Омельченко

Порівняно дві моделі будови літосфери, які відповідають двом варіантам трактування хвильових полів ГСЗ, що зареєстровані на перетині Анголо-Бразильського геотраверсу з Камерунською зоною розломів на ділянці переходу від східного флангу Серединно-Атлантичного хребта до Ангольської улоговини. Виявлено і переінтерпретовано особливості полів, які підтверджують модель із субвертикальними низькошвидкісними проникненнями у високошвидкісну розшаровану мантію за реально досягненої глибини проникання сейсмічних коливань порядку 40 км проти опублікованої раніше моделі з чергуванням у мантії субгоризонтальних шарів з відносно підвищеними та пониженими швидкостями і глибинністю освітлення розрізу до 80 км.

Two models of the lithosphere structure are being compared corresponding to two variants of interpretation of DSS wave fields registered on the intersection of the Angola-Brazil geotransverse with Cameroon fracture zone in the area of transition between the east flank of middle ridge and the Angola basin. Special features of the fields have been revealed and interpreted by the authors, which prove the model with subvertical low-velocities intrusions into high-velocity layered mantle with really reached depth of seismic waves penetration about 40 km opposite the previously published model with the alternation of the high-velocity and low-velocity subhorizontal layers with relatively increased and decreased velocities and the depth of the lighting the section up to 80 km.

Введение. Работа продолжает собой повторный анализ и переинтерпретацию материалов глубинного сейсмического зондирования, полученных на Анголо-Бразильском геотраверсе в 1980—1986 гг. и опубликованных вместе с первыми вариантами их интерпретации в 1996 г. в работе [Глубинное ..., 1996]. О необходимости пересмотра представленных тогда результатов интерпретации, в силу их предварительности на многих участках, говорилось уже в указанной выше публикации.

К настоящему времени повторный анализ выполнен по профилям в гребневой зоне срединного хребта [Тулина и др., 2001], в Ангольской котловине [Тулина и др., 2003а, б] и частично на континентальном подножье Африки [Тулина и др., 2006].

Рассматриваемый в настоящей работе профиль расположен в очень сложной зоне на-

ложения разных структурных образований — субмеридионально простирающегося стыка восточного фланга Срединно-Атлантического хребта с Ангольской котловиной и пересечения субширотной системы окончаний трансформных разломов с вулканическими цепями северо-восточного простиранья Камерунской зоны разломов.

Главная из особенностей зарегистрированных на профиле волновых полей — наличие нарушений в прослеживании первых на записях волн в виде резких смещений во временах их прихода. Нарушения наблюдаются в зависимости, с одной стороны, от расстояния источник — приемник, проявляясь не ближе чем 150—200 км, с другой стороны, от места на профиле, будучи приуроченными по данным отдельных групп станций к определенным пикетам.

После первого смещения на сейсмограммах всех станций регистрируются сложные волновые картины, содержащие в большинстве случаев малоупорядоченные приходы колебаний, прокоррелировать которые с целью выделения отдельных регулярных волн весьма затруднительно. Можно лишь наметить локальные разрастания амплитуд на отдельных участках различной протяженности, образующие собой подобие ступеней в приходах колебаний со смещениями на все большие и большие времена и с резкими обрывами регистрации по мере удаления от источника.

В работе сопоставляются качественно и количественно две принципиально разные трактовки природы отмеченных выше особенностей в прослеживании волн, предложенные в [Салахова, Ярошевская, 1996] и [Тулина, 1996]. В первой трактовке [Салахова, Ярошевская, 1996] они рассматриваются как свидетельства чередования в разрезе мантии субгоризонтально простирающихся слоев с относительно повышенными и пониженными скоростями. Предлагается модель с четырьмя высокоскоростными и двумя низкоскоростными мантийными слоями при общем охвате глубин до 80 км. Во второй трактовке, детальное рассмотрение которой дается в настоящей статье, указанные особенности увязываются с наличием в высокоскоростной верхней мантии низкоскоростных вертикальных включений, вершины которых располагаются в нескольких километрах глубже ее поверхности,

а низы прослеживаются на всю глубину проникания зарегистрированных на профиле сейсмических волн, составляющую в предложенной модели порядка 40 км.

Все материалы, характеризующие обсуждаемые модели, даются на каждом этапе их рассмотрения параллельно в следующей несколько необычной последовательности. Сразу после описания района работ и систем наблюдений демонстрируются сами модели. Затем излагаются с соответствующими иллюстрациями их авторские обоснования. В конце обсуждения рассматриваются результаты проверки моделей решением по ним прямой задачи, проводится их сравнение.

Район работ, системы наблюдений. Профиль расположен в пределах восточного фланга Срединно-Атлантического хребта, проходя по 12° ю. ш. между 1° в. д. и 7° з. д. (рис. 1) и пересекая три структурные системы разных простираций. Одна из них, субмеридиональная, согласуется с простираем Срединного хребта и выражена здесь в располагающихся примерно на одинаковых расстояниях от него группами вулканов в пределах от 7° до 8° з. д. с одной стороны и таким же простираем западной границы Ангольской котловины на долготе около 0° — с другой. Вторая система, субширотная, определяется простираем дизъюнктивных нарушений трансформных разломов. Третья система, северо-восточного простираем, обусловлена тектоническими нарушениями Камерунской разломной зоны.

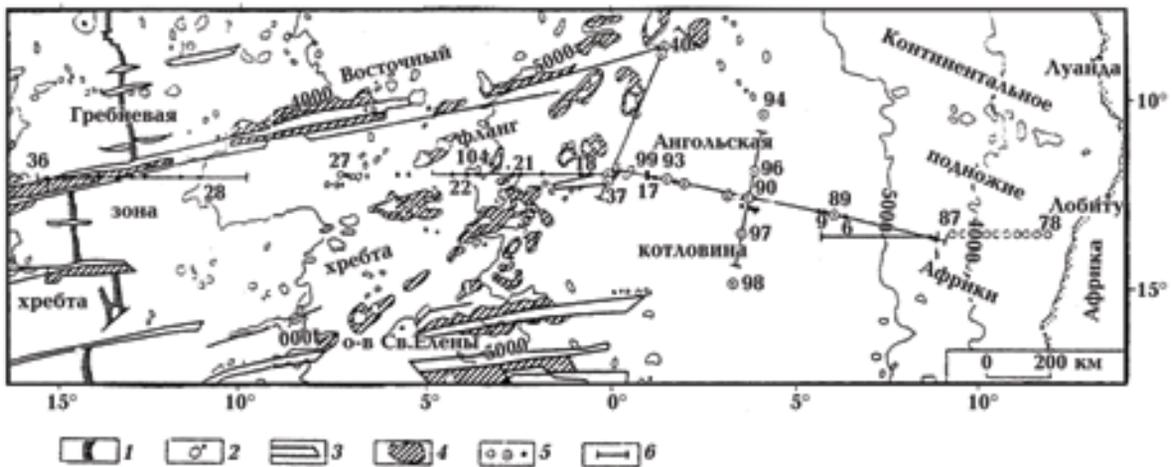


Рис. 1. Положение рассматриваемого профиля в системе геотраверса [Глубинное ..., 1996] на схеме основных структур и линейментов дна океана, в соответствии с [Международный ..., 1989]: 1 — рифтовая долина; 2 — вулканы; 3 — дизъюнктивные нарушения и трещины; 4 — области, лишенные осадков; 5 — положения донных станций на разных профилях; 6 — линии взрывов.

Положение линии профиля на схеме батиметрии и система наблюдений показаны на рис. 2. Наблюдения выполнены в два этапа, в 1982 и 1986 гг. В 1982 г. на базе 800 км парами были расставлены донные ст. 18—27 и произведены приповерхностные взрывы 1—27. Станции 19 и 20 не сработали. Не удалось провести взрывы на западном участке расстановки, поэтому ст. 24—27 оказались выносными при их расстояниях от участка прострелки от 60 (ст. 24) до 240 (ст. 27) км. В 1986 г. на базе 550 км с перекрытием предыдущего участка прострелки были расставлены ст. 99—104 и произведены взрывы 128—194. Одна из этих станций (99) стояла восточнее линии прострелки на расстоянии около 100 км от нее, почти совпадая по расположению со ст. 17 1980 г. в Ангольской котловине. В результате записи последней восполнили собой недостающую информацию на указанных 100 км в волновом поле ст. 99. Таким образом, общее количество донных станций, получивших материалы, — 15, общая длина профиля — около 900 км, из которых более 600 км перекрыто приповерхностными взрывами, на большей части с двукратной прострелкой.

Скоростные модели. Модель с субгоризонтальной слоистостью представлена в двух видах по той причине, что в [Салахова, Ярошевская, 1996] она показана от осредненного горизонтального дна (рис. 3, а), а предстоящими расчетами предусматривалась проверка полного разреза. Поэтому модель дополнена водным слоем со скоростью 1,5 км/с (рис. 3, б). Соответственно, началом отсчета глубин стала земная поверхность, несколько изменились наклоны границ раздела в модели наряду с изменениями их абсолютных уровней по глубинам, так как мощность добавленного водного слоя существенно меняется вдоль профиля, увеличиваясь с запада на восток в среднем от 4,5 до 5,5 км (см. рис. 2 а, в). В дополненном варианте не воспроизведена граница M_2 , показанная на рис. 3, а пунктирной линией западнее пикета 500. Согласно предположению авторов, она связана с тонким слоем, который не играет существенной роли в распределении скоростей. Отмечен уровень минимальных скоростей в мантии, равных 7,7 км/с, согласно рис. 3, а, в средней части верхнего инверсионного слоя — для обеспечения определенности в его описании при расчетах. Кроме того, введены обозначения L_1 и L_2 , которых ранее не было, для границ с отрицательными скачками скорос-

тей — для обеспечения возможностей маркировки соответствующих этим границам расчетных годографов.

Предлагаемая в настоящей работе модель (рис. 3, в) сопоставима с предыдущей лишь одной своей частью — корой на восточной части профиля с ее скоростными характеристиками и общей мощностью. Все остальное в новой модели — радикально иное.

Понимая, что столь большие различия в моделях — опубликованной ранее и вновь предложенной — не могут не вызвать недоумения, как и сомнений в однозначности исходных данных, мы, тем не менее, надеемся показать, что ни для того, ни для другого оснований нет. Как видно из дальнейшего, главная причина различий кроется именно в разной трактовке зарегистрированных волновых полей, проистекающей (и мы подчеркиваем это) из различного объема учтенных разными авторами конкретных особенностей полей при построении предложенных вариантов моделей. Рассмотрим, какие из волновых особенностей и с какой их трактовкой были приняты во внимание при составлении каждой модели.

Обоснование моделей — выделенные волны, трактовка их природы и построенные по ним элементы скоростных разрезов, положенные в основу авторских заключений. *Первая модель (рис. 3, а, б).* Основой для составления модели были годографы, построенные ее авторами по выделенным ими волнам [Салахова, Ярошевская, 1996]. Они показаны на рис. 4 сплошными и пунктирными линиями с соответствующими буквенными обозначениями.

Выделено шесть волн со следующей трактовкой их природы: преломленная в коре (волна К), три преломленные на границах слоев M , M_1 , M_2 в верхней части мантии (волны M , M_1 , M_2 , последняя из которых выделена только на нескольких сейсмограммах ст. 27) и две предположительно отраженные от границ N_1 и N_2 — поверхностей более глубоких высокоскоростных мантийных слоев, отделенных от верхних двумя толщами с относительно пониженными скоростями (волны N_1 , N_2).

Выделены также две локальные области с нарушениями в прослеживании волн в верхней части мантии, приуроченные к пикетам 300—330 км по данным восточных станций 99, 100 и к пикетам 450—460 км по данным западных станций 25, 27. В соответствии с нарушениями, авторами показана в модели между пикетами 310 и 500 км “аномальная

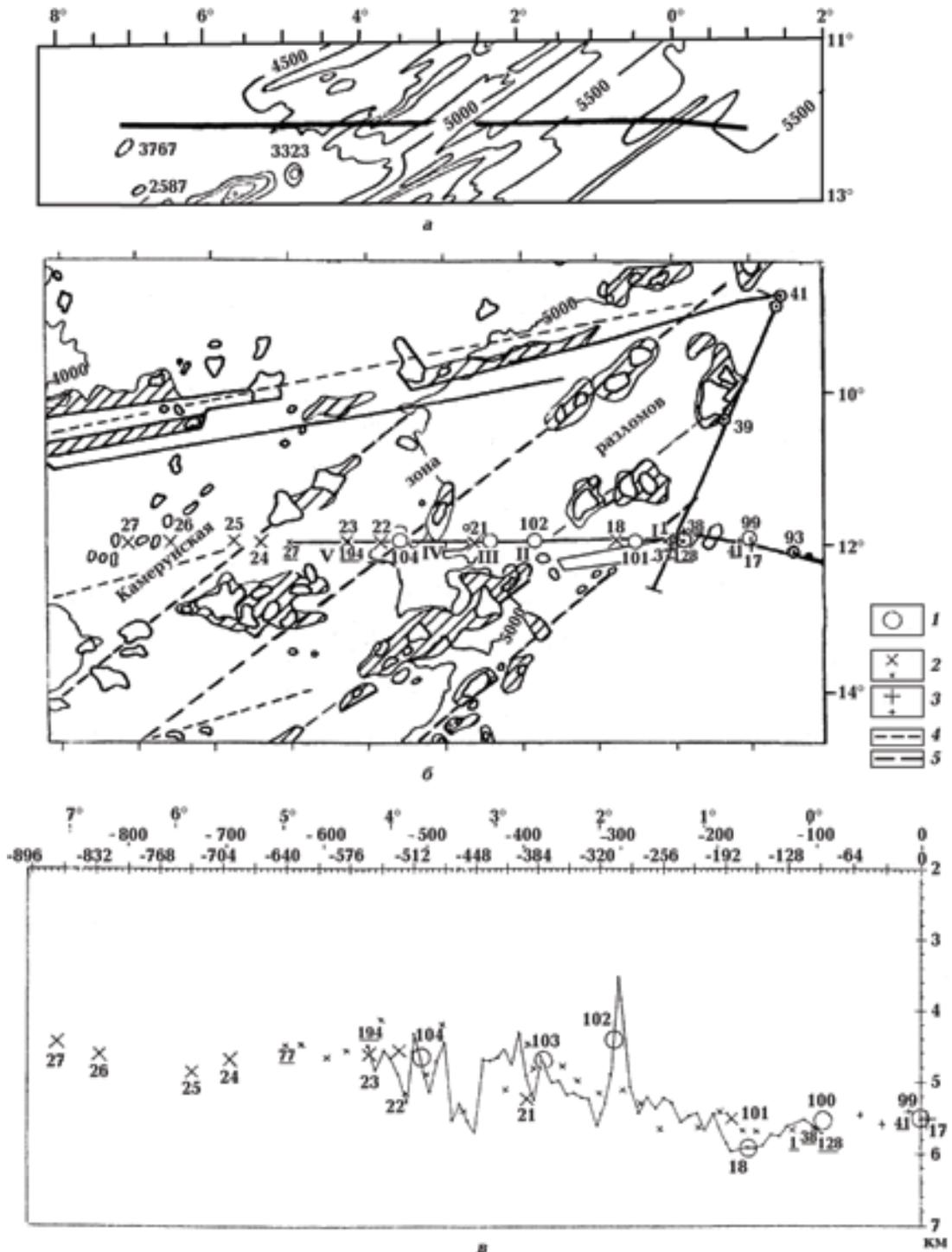


Рис. 2. Положение линии профиля на схеме батиметрии (а), взрывов и проекций станций на схеме структур дна (б), станций и проекций взрывов на донной поверхности (в): 1 — станции и крайние взрывы (номера взрывов подчеркнуты) 1986 г.; 2 — то же, 1982 г.; 3 — то же, 1980 г.; 4 — оси трансформных разломов, по [Глебовский и др., 1986]; 5 — тектонические нарушения северо-восточного простирания Камерунской зоны разломов, по [Глебовский и др., 1986]. Римские цифры — места приуроченности нарушений в прослеживании мантийных волн согласно рис. 4. Остальные обозначения см. на рис. 1.

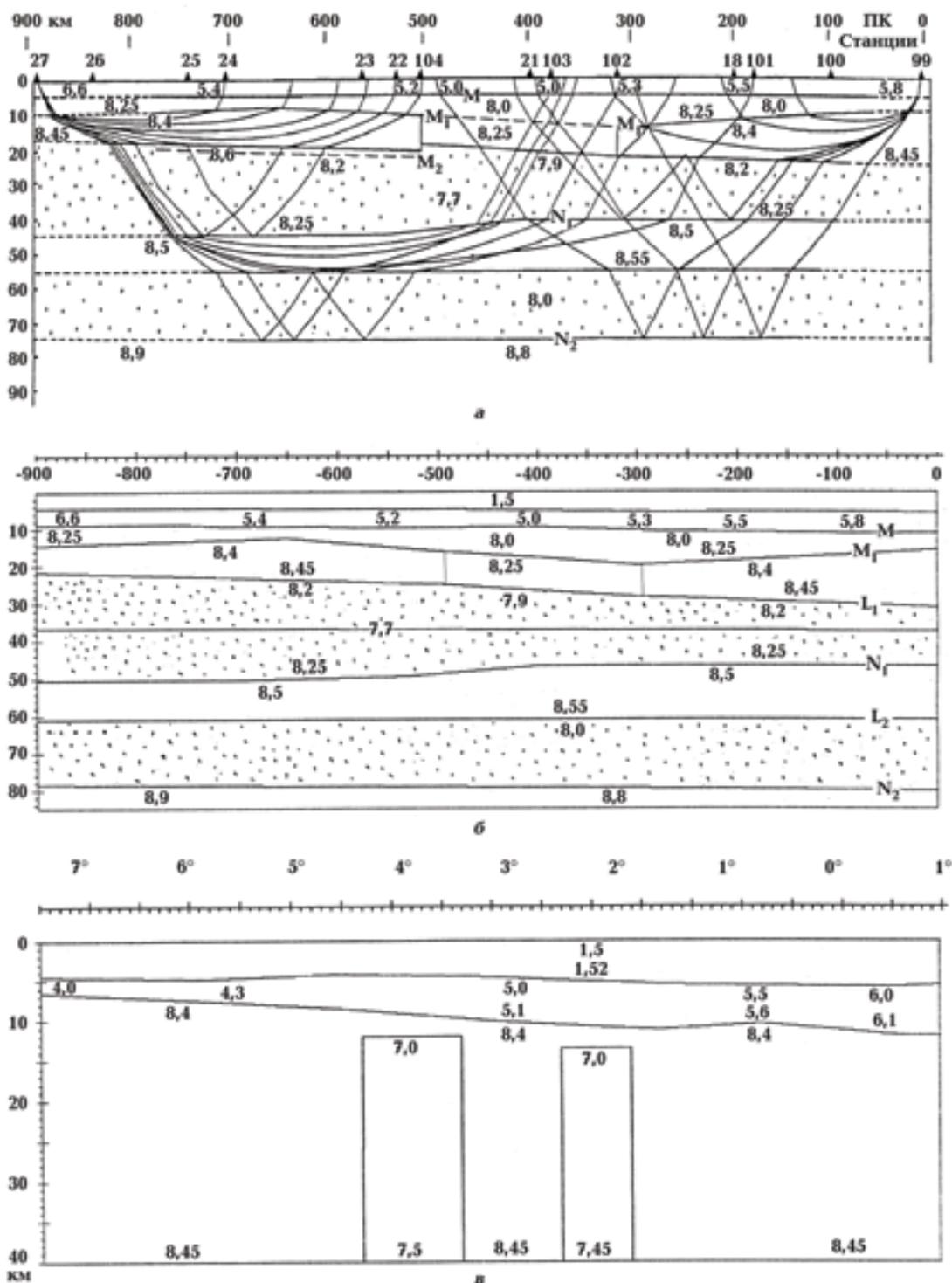


Рис. 3. Обсуждаемые модели строения литосферы: *а* — опубликованная [Салахова, Ярошевская, 1996], показано размещение станций на осредненном горизонтальном дне (треугольнички), приведены значения скоростей в слоях (км/с), обозначения границ (буквы), слоев с пониженными скоростями (точки), а также расчетных лучей для ст. 27 и 99; *б* — та же модель с добавленным слоем воды со скоростью 1,5 км/с, помеченным уровнем минимальной скорости в мантии 7,7 км/с и введенными обозначениями границ с отрицательными скачками скоростей L₁ и L₂; *в* — предложенная в настоящей работе модель, показаны осредненные поверхности дна и верхней мантии, положение субвертикальных блоков и распределение скоростей в слоях и блоках.

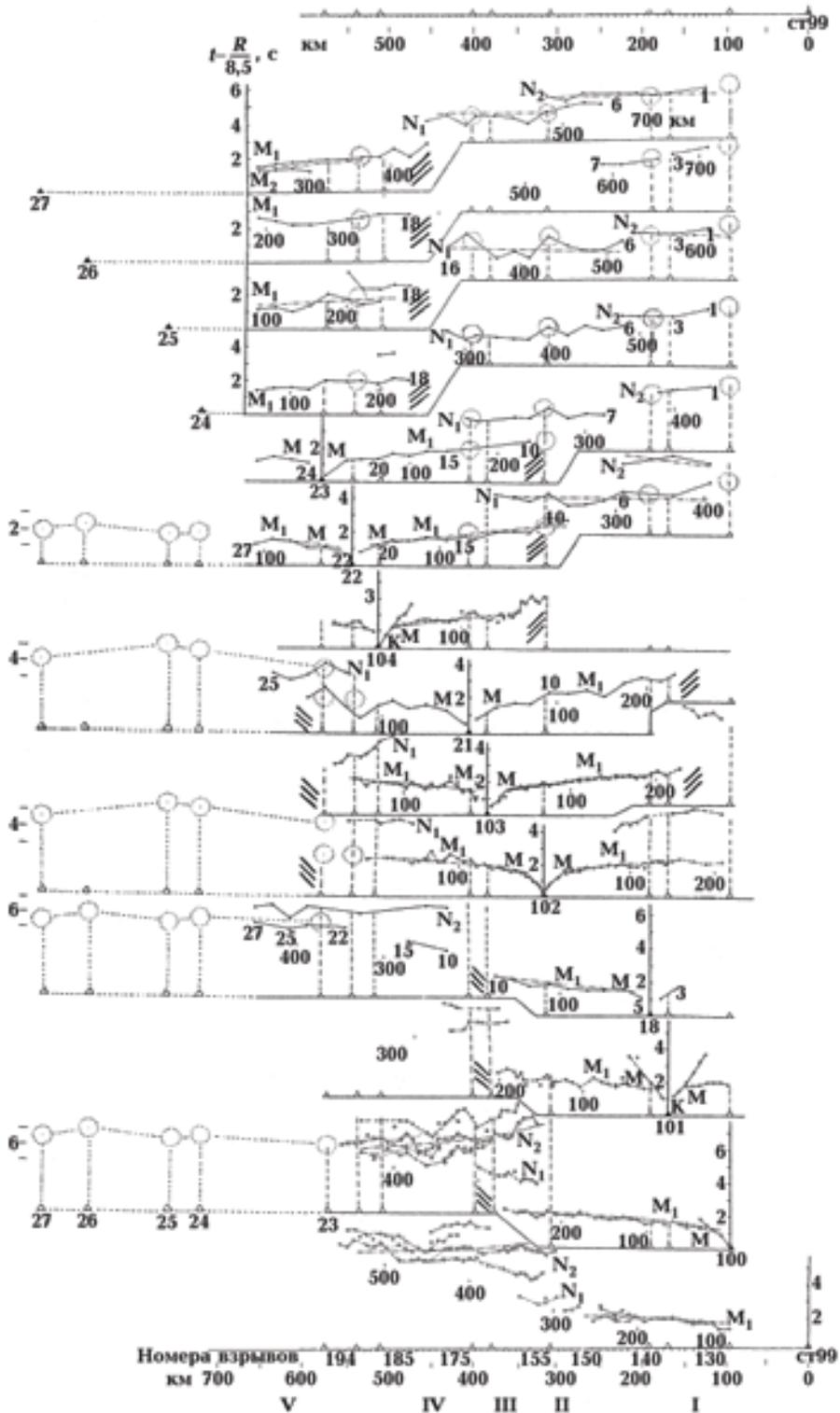


Рис. 4. Годографы, опубликованные авторами первой модели (сплошные и пунктирные линии с буквенными обозначениями волн — экспериментальные, штрихпунктирные — расчетные) и дополненные в рамках настоящей работы построениями с использованием значений времен прихода волн во взаимных точках для некоторых станций (точечные кружки и соединяющие их линии), а также обозначениями мест приуроченности зон нарушений (косые штриховки) с их номерами I—V (внизу рисунка). Вдоль годографов указаны расстояния источник—приемник и номера взрывов 1982 г., под горизонтальной осью внизу — номера взрывов 1986 г. и пикетаж (в верхней части рисунка). Временные характеристики приведены к поверхности дна, скорость редукции 8,5 км/с.

зона", увязываемая ими с областью во втором мантийном слое, характеризующейся несколько пониженной скоростью (8,25 км/с) по сравнению со скоростями к западу и востоку от нее (8,4 км/с, см. рис. 3, а).

Заключение о наличии слоев с инверсиями скоростей в более глубоких частях мантии сделано на основании больших сдвигов во временах прихода предположительно отраженных, как уже указывалось, волн от границ N_1 и N_2 , подстилающих в модели слои с пониженными скоростями. Какие-либо другие критерии не обсуждаются. По поводу причин отсутствия в системе рис. 4 годографов преломленных волн, распространяющихся в высокоскоростных слоях под указанными границами, авторами высказывается предположение, что эти волны, вероятнее всего, имеют малую интенсивность, поэтому не видны на записях и, соответственно, не представлены в системе годографов.

Заметим, что сами авторы предложенной модели допускали, "что это лишь один из вариантов трактовки полученного волнового поля" [Салахова, Ярошевская, 1996, с. 43].

Для иллюстрации степени выразительности волн, взятых авторами при построении системы годографов, на рис. 5 в качестве примеров даны монтажи сейсмограмм четырех станций — двух западных (27, 25) и двух восточных (18, 100), с временными характеристиками, приведенными, как и характеристики годографов на рис. 4, к поверхности дна и с показанными на них волнами с их буквенными обозначениями. Расстояния источник—приемник указаны под каждым из монтажей. Взаимное расположение монтажей в рамках рисунка соответствует их положениям на профиле и в системе годографов, контролируется по номерам взрывов, указанным над монтажами сверху, и единой для всех станций шкале пикетов, показанной внизу. Подчеркнем, что примеры в достаточной мере иллюстрируют общий характер зарегистрированных на профиле волновых полей и конкретные их особенности, отображающие основные черты строения, а также те из них, которые включены в интерпретацию авторами первой модели.

На монтажах показаны все волны, годографы которых представлены на рис. 4, кроме коровой волны К, в связи с малой областью ее прослеживания в первых вступлениях (не далее 30 км от станции) и трудностью выделения ее в последующих вступлениях. Области, занятые волнами M , M_1 и M_2 , показаны

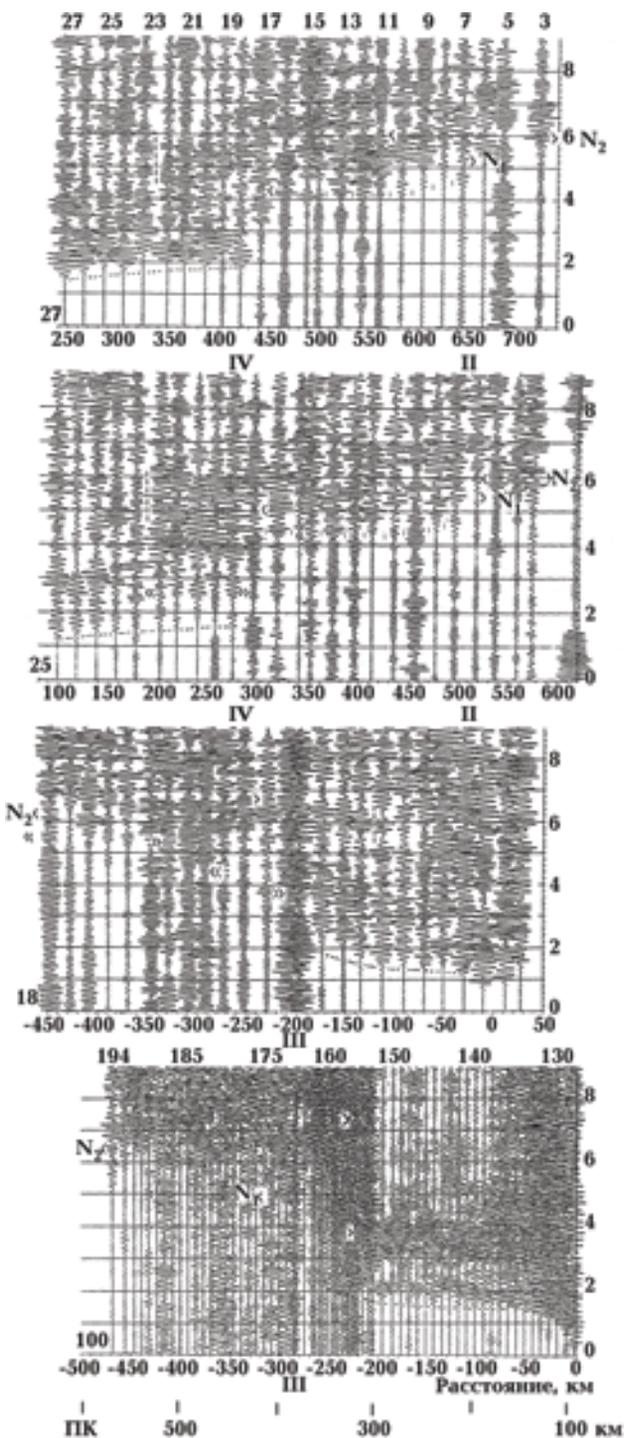


Рис. 5. Примеры монтажей сейсмограмм с временными характеристиками, приведенными к поверхности дна. Фильтрация 5—11 Гц. Скорость редукции 8,5 км/с. Номера станций указаны слева. Над монтажами — номера взрывов, под монтажами — расстояния источник—приемник и номера зон нарушений. Объяснения знаков, нанесенных на волновые поля, — в тексте.

точечными линиями. Волны N_1 и N_2 помечены скобками в началах и концах областей их регистрации с соответствующими буквенными обозначениями. Двойными скобками без обозначений показаны области регистрации волн, не имеющих буквенных знаков на годографах.

Остальные из нанесенных знаков объяснены ниже при обосновании второй модели и обсуждении результатов решения по моделям прямой задачи. Здесь же обратим внимание лишь на то, что волны N_1 и K_2 , которые в интерпретации авторов свидетельствуют о чередовании в разрезе мантии слоев с пониженными и повышенными скоростями, по интенсивности, степени коррелируемости и величинам интервалов прослеживания не отличаются от других волн, в большом количестве зарегистрированных на этих же участках и не увязываемых авторами с какими-либо особенностями разреза и, соответственно, не попавших в систему годографов.

Согласно построениям, выполненным по годографам рис. 4 с привлечением данных КМПВ и использованием разных методов количественной интерпретации, авторами получен разрез (рис. 6), представленный большим количеством отдельных фрагментов. На их основе в результате математического моделирования составлена модель от поверхности дна (см. рис. 3, а) с показанными на ней примерами расчетных лучевых картин.

Вторая модель (рис. 3, в). Обоснование модели базируется на результатах рассмотрения тех же годографов (рис. 4) и сейсмограмм (примеры на рис. 5), только с другой по сравнению с изложенной выше трактовкой содержащейся в них информации. По этой причине часто проводится параллель с первой моделью. Начнем с участков волновых полей до зон нарушений. В пределах данных участков после ухода из первых вступлений коровой волны K авторами первой модели на всех станциях, расположенных в пределах ли-

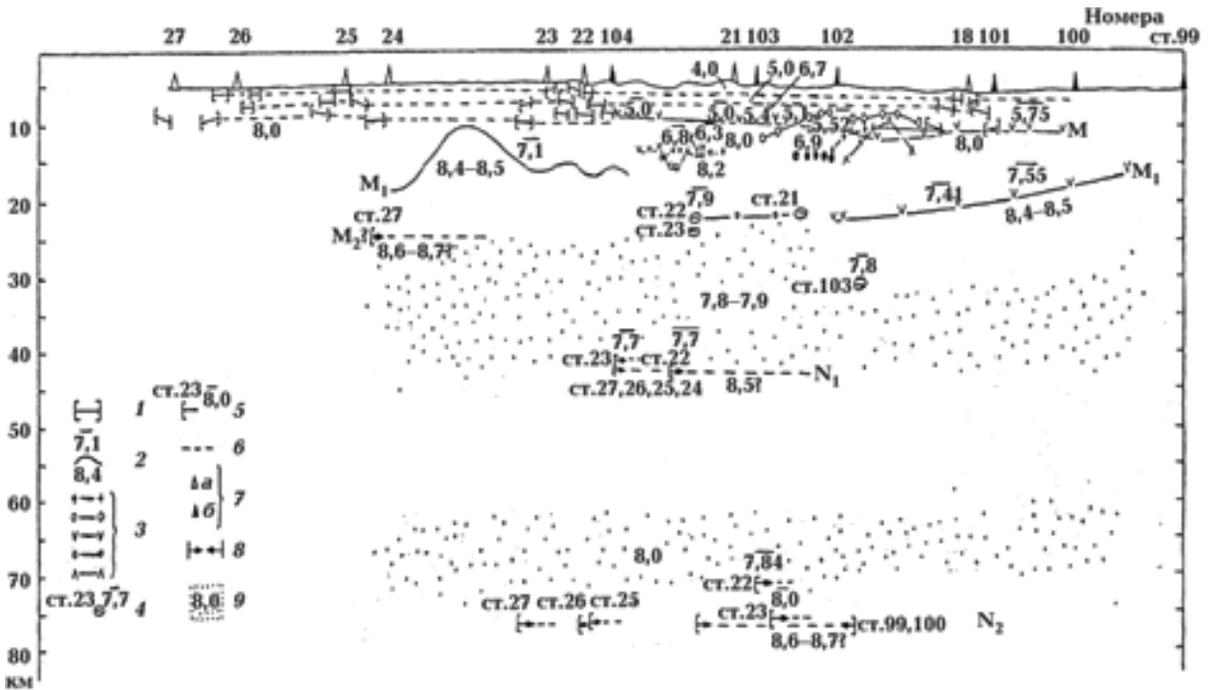


Рис. 6. Результаты построений элементов границ разными методами, выполненных авторами работы [Салахова, Ярошевская, 1996] по годографам рис. 4 и по данным КМПВ, основа для подбора параметров модели рис. 3, а. Построения выполнены: 1 — методом t_0 по данным КМПВ, 2 — методом полей времен (указаны принятая средняя и полученная граничная скорости), 3 — методом t_0 по отдельным ветвям (указаны использованные средняя и граничная скорости); 4 — положение кровли зоны инверсии скоростей с указанием номера использованной станции и взятого значения средней скорости; 5 — положения границ N_1 и N_2 , рассчитанные методом t_0 по областям начала регистрации отраженных от них волн; 6 — области интер- и экстраполяции границы; 7 — положения станций соответственно 1982 и 1986 гг.; 8 — аномальная зона; 9 — зоны инверсии с указанием принятого значения скорости.

нии прострелки, показаны сменяющие одна другую преломленные волны M и M_1 . Однако анализ образованных указанной парой волн нагоняющих годографов на участках, проведенный в [Тулина, 1996], показал, что они в подавляющем числе случаев параллельны между собой (с точностью до случайного разброса точек), а значит, принадлежат одной и той же волне, распространяющейся вдоль границы скачка скоростей с малозаметным нарастанием скорости в слое под нею. Большие перекрытия на нагоняющих ветвях позволили построить по ним на всем протяжении линии прострелки уверенные прямой и обратный сводные годографы. Из 19 использованных ветвей, полученных ст. 99—104, 18, 21, 24, не вписалась в эти годографы лишь левая ветвь ст. 21, характеризующаяся большим разбросом точек (см. ее годограф на рис. 4). По полученным сводным годографам методом полей времен со средними скоростями в коре, определенными по точкам пересечения с го-

дографами волны K на каждой станции, построена граница, которая по положению в разрезе согласуется с границей M_1 в Ангольской котловине, согласно [Тулина, 1996], будучи ее продолжением на рассматриваемом профиле (рис. 7, а). Граница, погружаясь в целом с запада на восток от 7—9 до 10—12 км, характеризуется достаточно выраженным рельефом и переменной граничной скоростью, составляющей в среднем 8,4 км/с.

На рис. 7, б эта граница сопоставлена с мантийными границами M и M_1 первой модели. Видно, что она удовлетворительно согласуется по глубинам с границей M , что вполне понятно, так как обе строились с использованием одних и тех же средних скоростей \bar{V} в коре, определенных по точкам выхода мантийной волны в первые вступления. Но скоростные характеристики мантийных границ, как следует из указанных величин на разрезе, существенно различаются. Это объясняется тем, что для границы M , построенной ее

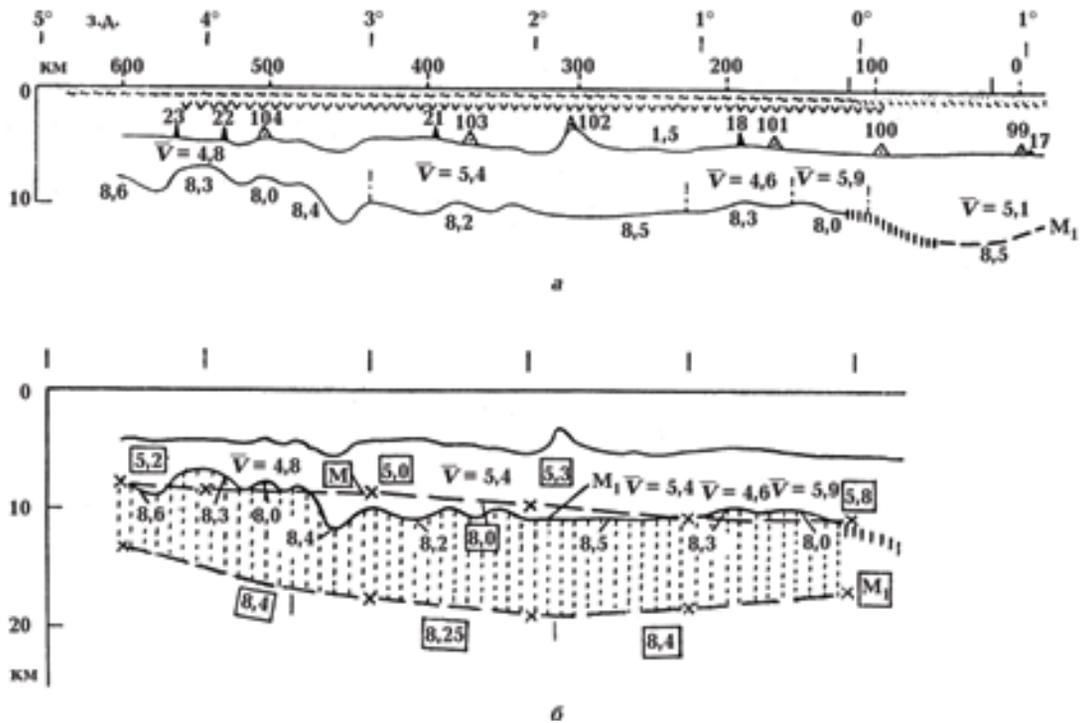


Рис. 7. Результаты построений, выполненных [Тулина, 1996] по годографам первых мантийных волн, согласно рис. 4, на участках до зон нарушений (а), и сопоставление полученной границы M_1 и ее скоростных характеристик на разных участках с положениями границ M и M_1 и их скоростными характеристиками в первой модели (б): а — показаны участки прострелки разных лет (разные знаки под земной поверхностью), положения станций на дне, средние скорости \bar{V} в коре, положение поверхности мантии M_1 и граничные скорости вдоль нее; б — пунктирные линии с крестиками, буквы и цифры в рамках — границы с их буквенными обозначениями и значения скорости согласно первой модели; заштрихована полоса расхождений в положении границ, характеризующихся близкими скоростями в разных моделях.

авторами методом t_0 , значение граничной скорости $V_r = 8,0$ км/с было просто принято (на основании осреднения кажущихся скоростей вдоль ближайших к станциям участков годографов), в то время как для границы M_1 второго варианта все показанные на разрезе значения, давшие в среднем 8,4 км/с, получены в результате построений, выполненных методом полей времен. В первой модели такие высокие скорости показаны (см. рис. 7, б) на значительно больших глубинах, характеризуя ее вторую мантийную границу M_1 .

Переход к более удаленным от станций участкам (далее 150—200 км), как уже указывалось, отмечается нарушениями в прослеживании первых волн в виде резких скачков во временах их прихода. По наиболее выразительным из нарушений авторы первой модели наметили "аномальную зону", подчеркнув [Салахова, Ярошевская, 1996, с. 35], что для областей западнее и восточнее зоны характерны спокойные черты волнового поля, близкие к наблюдаемым волновым полям в соседней Ангольской котловине.

Однако детальный анализ годографов, в том числе с выполненным нами продлением их ветвей на запад до выносных ст. 24—27 по данным о временах вступлений в их взаимных точках со станциями на востоке (см. рис. 4, продления для ст. 22, 21, 102, 18, 100, нанесенные точечными линиями), показывает, что на профиле имеется не менее пяти зон нарушений, в том числе за пределами "аномальной зоны", намеченной авторами первой модели. В работе [Тулина, 1996] зоны пронумерованы от I до V и показаны на рис. 4 косыми штриховками разных наклонов в зависимости от направления соответствующих ветвей годографов. За пределами "аномальной зоны" выделены два нарушения: V — в области пикета 580 км по данным ст. 21 с подтверждением данными ст. 102, 103; I — в районе пикета 150 км по данным ст. 21 и 103. Нарушения IV и II примерно совпадают с краями "аномальной зоны" первой модели.

На основе результатов анализа полученной картины нарушений с учетом направлений ветвей годографов, по которым они выделяются, авторы статьи пришли к заключению, что нарушения маркируют собой грани низкоскоростных субвертикальных блоков, внедренных в высокоскоростной мантийный разрез. При этом с определенностью можно говорить о двух блоках, один из которых, более масштабный, заключен между нарушени-

ями V и IV, второй — между нарушениями III и II. Весьма вероятно, что есть и третий блок, одну из граней которого фиксирует нарушение I. Тогда ответное нарушение, связанное со второй гранью блока, следует искать в волновом поле ст. 99, что вполне допустимо, в соответствии с характером ее волнового поля на участке западнее пикета 250 км. Однако это нарушение мы не рассматривали за неимением дополнительных данных для его подтверждения и уточнения места на профиле.

О степени выразительности нарушений в волновых полях в зависимости от количества блоков, которые пересекают проходящие колебания, и о жесткости их привязки к местам на профиле по данным разных станций, в том числе далеко отстоящих одна от другой, можно судить по приведенным примерам монтажей сейсмограмм на рис. 5, где отмечены номера проявившихся здесь нарушений, а о количестве подтверждений каждого из всех выделенных на профиле — по тем же годографам на рис. 4, где отмечены, как указывалось, места их первых проявлений на записях косыми штриховками. Заметим, что зоны нарушений определенным образом увязываются с вулканическими цепями (см. рис. 2, б), попадая в основном на бортовые участки последних.

В результате анализа всех особенностей волновых полей авторами сделано заключение, что зарегистрированные на профиле волновые поля сформированы разрезом, содержащим кроме водного слоя и толщи коры один высокоскоростной мантийный слой, по меньшей мере, с двумя содержащимися в нем локальными субвертикальными блоками, при пересечении каждого из которых происходит запаздывание во временах прихода волн.

В зависимости от того, один или два блока пересекает волна, она приходит с меньшим или с большим запаздыванием, не будучи связанной с глубоко залегающими мантийными слоями. Помимо этого, могут регистрироваться и, судя по характеру записей, регистрируются в действительности волны, обусловленные разного рода дополнительными отражениями от боковых граней блоков, одинаковым образом усложняя волновые поля разных станций на одних и тех же участках профиля. Подтверждение этому — повторение многих особенностей в структуре волновых полей на разных станциях в привязке к местам на профиле. При сопоставлении, например, монтажей сейсмограмм ст. 25 и 27 отчетливо видно по-

добие полей в области перед регистрацией волны N_1 . Если провести корреляцию, ориентируясь на самые ранние из вступлений (показана вертикальными штрихами), можно видеть, что картина на станциях полностью повторяется и сходна с картиной дифракции. В предыдущей корреляции это отмечено не было, хотя, в принципе, и высказывалась возможность регистрации на профиле дифрагированных волн. Повторяется еще одна особенность — наличие мест на профиле, после пересечения которых в последующих вступлениях начинает регистрироваться большое количество интенсивных колебаний. Эти места на приведенных монтажах (см. рис. 5) отмечены вертикальными штриховыми линиями.

Вся совокупность указанных особенностей свидетельствует о том, что главные черты волновых полей, начиная с расстояния от источника 150—200 км, определяются особенностями строения, связанными с изменениями разреза не по глубине, как трактуется в первой интерпретации, а по латерали.

При составлении модели, приведенной на рис. 3, в, были осреднены формы рельефа дна и поверхности мантии, а также значения скоростей в слое коры. В качестве пластовой скорости в мантии взято среднее значение граничной скорости вдоль ее поверхности со слабым нарастанием с глубиной, заданным принятым авторами значением скорости в основании модели. Форма внутримантийных блоков взята наипростейшей, а положения их в разрезе и значения скоростей в них при большом нарастании с глубиной подобраны по результатам моделирования.

Проверка моделей решением прямой кинематической задачи и обсуждение результатов. Примеры расчетов по обеим моделям в их сопоставлении для каждой из рассмотренных станций показаны на рис. 8 и 9. Здесь на сейсмограммы тех же станций (25, 27, 18, 100), монтажи которых представлены на рис. 5, наложены теоретические годографы, полученные при расчетах. Разница только в том, что на рис. 5 временные характеристики даны для поверхности дна, а на рис. 8, 9 — для земной поверхности разреза. Кроме того, на рис. 8 к монтажу ст. 18 добавлены записи взрыва 4, полученные выносными ст. 24—26 (запись самой удаленной ст. 27 не приводится, так как оказалась неоцифрованной) в областях их взаимных точек со ст. 18. Хорошо видно, что приходы колебаний на этих записях удовлетворительно согласуются с волновым полем на

монтаже ст. 18, подтверждая зафиксированные ею большие времена на достигнутых здесь расстояниях.

Рассмотрим сначала, как и ранее, ближние к станциям участки волновых полей, доходя в каждом случае до зоны нарушения. На рис. 8 представлены результаты расчетов для ст. 18 и 100, расположенных в восточной части профиля на расстоянии 100 км одна от другой. Согласно полученным ими данным наблюдений, подтвержденным данными расположенной между ними ст. 101 (см. рис. 4), фиксируется зона нарушений в прослеживании первых мантийных волн на участке около пикета 380 км (зона III). В соответствии с расчетами по первой модели, как видно из рис. 8, а, нарушение на этих станциях оказывается в области между пикетами 450 и 470, т. е. не менее чем на 70 км западнее его фактического положения. При этом расчетные годографы для первых мантийных волн ложатся на времена, на 0,5 с более поздние, чем наблюдаемые. В связи с такими результатами выполненной проверки вызывает недоумение то обстоятельство, что у авторов этой модели на рис. 4 демонстрируется хорошая согласованность расчетов с наблюдаемыми данными на указанных станциях.

Вторая модель (рис. 8, б) дала расчетные результаты, весьма близкие к наблюдаемым как по месту нарушения III на профиле, показав отклонение 20 км на запад для ст. 18 и 20 км на восток для ст. 100, так и по временам вступлений первых мантийных волн до этого нарушения, полностью совпавшим с наблюдаемыми.

По расчетам для ст. 25 и 27 получены следующие результаты (рис. 9). Наблюдаемые данные этих станций, подтвержденные данными ст. 24 и 26 (см. рис. 4), зафиксировали зону нарушения в прослеживании первых мантийных волн, расположенную в области пикета 470 км, — зону IV.

Расчеты по первой модели (см. рис. 9, а), проведенные для ст. 27, дают положение зоны нарушения на пикете 500, т. е. на 30 км западнее фактического, что вполне допустимо, а для ст. 25 — на пикете 350, т. е. на 120 км восточнее. Последнее в корне противоречит фактической волновой ситуации на профиле. При этом получены несколько завышенные по сравнению с наблюдаемыми расчетные времена прихода первых волн и заниженные кажущиеся скорости, особенно для ст. 25. Обращаясь снова к рис. 4, видим, что у авторов

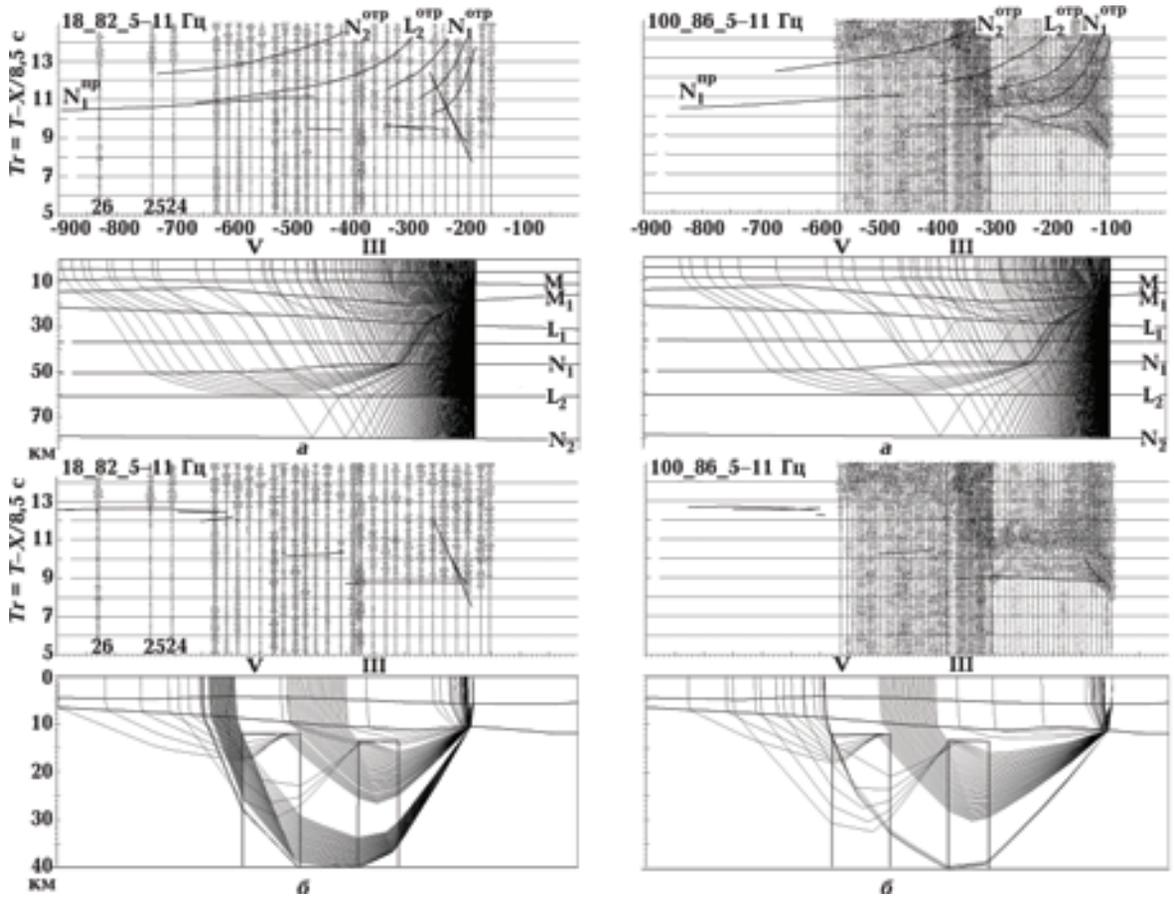


Рис. 8. Результаты расчетов лучевых картин и соответствующих им теоретических годографов с наложением последних на волновые поля для ст. 18 и 100: а — по модели, показанной на рис. 3, б; б — по модели, представленной на рис. 3, в. Временные характеристики наблюдаемых полей приведены к земной поверхности. Скорость редукции 8,5 км/с. Вдоль горизонтальных осей дан пикетаж.

первой модели никаких противоречий результатов их расчетов с наблюдаемыми данными не получено, и это опять, как и по результатам ст. 18 и 100, для авторов настоящей статьи остается непонятным. Могут быть высказаны лишь некоторые предположения, на которых мы остановимся ниже.

По результатам расчетов согласно второй модели для рассмотренных ст. 25 и 27 (см. рис. 9, б) зона нарушения IV располагается в области пикета 470 (ст. 25), т. е. близко к фактической, и в области пикета 500 (ст. 27), отклоняясь не далее чем на 30 км к западу. Временные и скоростные характеристики расчетов при этом полностью согласуются с наблюдаемыми данными.

Перейдем к областям волновых полей, регистрирующихся после выделенных зон нарушений. Из рис. 8 и 9 видно, что результаты расчетов для этих областей по рассматриваемым

моделям радикально различаются между собой.

По первой модели на всех станциях получены по три протяженных годографа: двух для отраженных волн $N_2^{отр}$ и $L_2^{отр}$ и одного для преломленной волны $N_1^{пр}$. Первые два не согласуются с наблюдениями тем, что в большинстве случаев секут волновое поле своими высокими кажущимися скоростями, аналогов которым нет среди коррелирующихся колебаний на монтажах сейсмограмм. И лишь на расстояниях источник—приемник более 400 км скорости начинают согласовываться с наблюдаемыми. Третий годограф, соответствующий волне $N_1^{пр}$, лишь своей начальной частью попадает на места сейсмограмм, где есть колебания, которые можно с ним сопоставить, а именно: на записях ст. 25 и 27 не далее места пересечения зоны нарушения II и на записях ст. 18 и 100 не далее места пересечения зо-

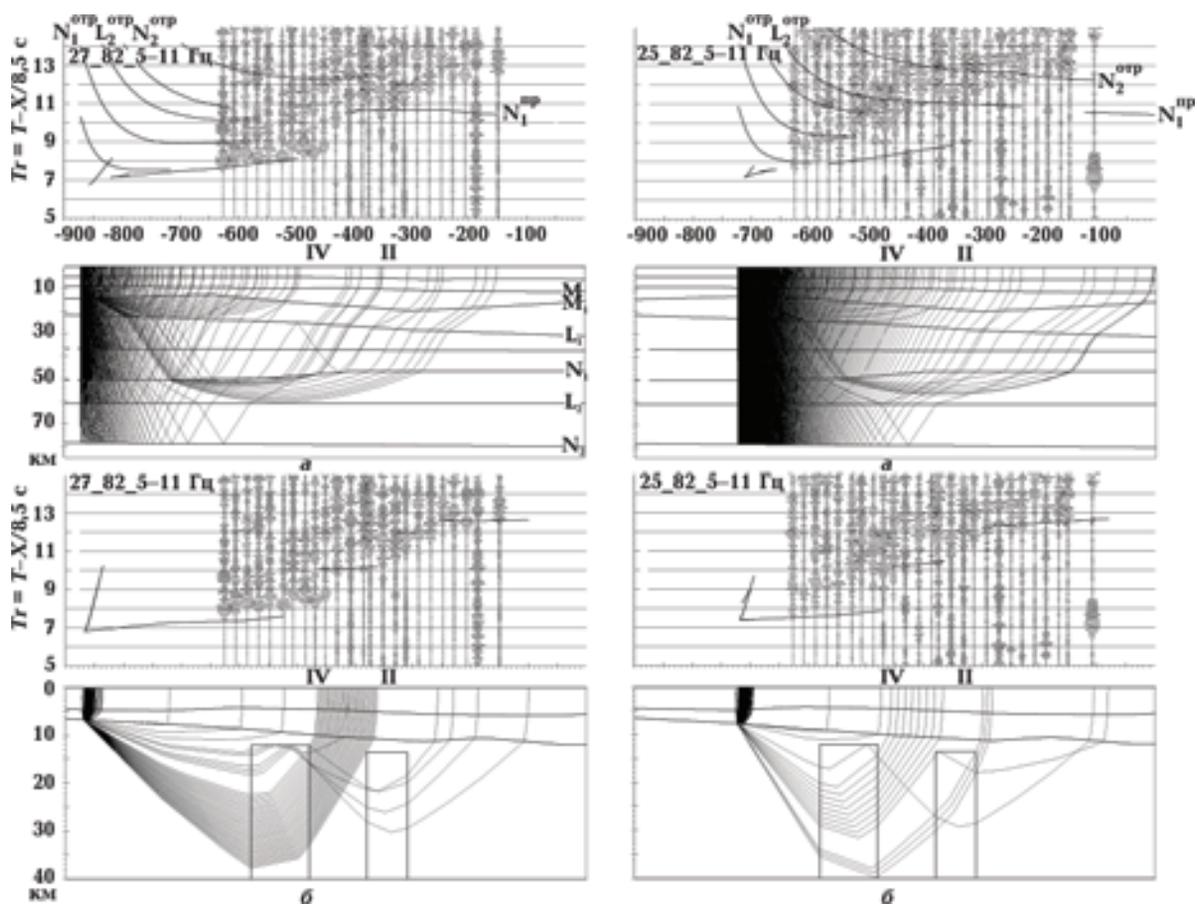


Рис. 9. Результаты расчетов лучевых картин и соответствующих им теоретических годографов с наложением последних на волновые поля для ст. 27 и 25: а — по модели, показанной на рис. 3, б; б — по модели, представленной на рис. 3, в. Временные характеристики наблюдаемых полей приведены к земной поверхности. Скорость редукции 8,5 км/с. Вдоль горизонтальных осей дан пикетаж.

ны V. После указанных зон расчетный годограф на каждой станции ложится на времена, где никаких приходов колебаний не наблюдается. Как и ранее, обращает на себя внимание показанная авторами модели хорошая согласованность результатов их расчетов с наблюдаемыми годографами на рис. 4 — и по областям прослеживания всех выделенных волн, и по временам их регистрации, и по кажущимся скоростям. При этом у них нет таких расчетных годографов, которые ложились бы на места сейсмограмм, где нет приходов регулярных колебаний.

В связи с очередными несоответствиями результатов наших и предыдущих расчетов по обсуждаемой модели мы попытались разобраться в их причине, воспользовавшись тем, что авторы модели опубликовали наряду с расчетными годографами примеры лучевых схем (см. рис. 3, а), в частности для рассмотренной

здесь ст. 27. Оказалось возможным на ее примере провести полное сравнение всех результативных составляющих — лучевых схем, соответствующих им годографов, степени согласованности последних с зарегистрированным этой станцией волновым полем — по нашим расчетам и предыдущим. Из сравнения следует, что лучевые схемы на интересующих нас расстояниях практически идентичны. Однако обеспеченные этими схемами расчетные годографы нанесены на наблюдаемые данные по-разному. Результаты наших расчетов нанесены полностью (см. рис. 9, а). Хорошо видно, что, например, граница N_1 должна быть представлена в расчетных годографах и отражениями, и преломлениями, причем до очень больших удалений источник—приемник, более 700 км (до пикета 150). Рассматривая же рис. 4, видим, что, во-первых, на него не попали расчетные годографы по отражениям, представ-

ленным лучами начиная с расстояний около 360 км (от пикета ~ 530), во-вторых, не нанесены преломления на ней, соответствующие лучам до расстояний, как и при наших расчетах, более 700 км. Иначе говоря, авторы взяли из всех результатов расчетов только ту их часть, которая укладывается на выделенную ими волну N_1 , не приводя того, что не вписывается в их концепцию в целом. Расчетный годограф волны N_2 , показанный на рис. 4, также не соответствует лучевой схеме для этой волны на рис. 3, а. Он значительно длиннее.

Обратившись к результатам, представленным на рис. 4 для ближайшей к ст. 27 из рассмотренных нами станций, для ст. 25 видим аналогичную картину с хорошей согласованностью нанесенных авторами расчетных годографов отраженных волн с приведенными наблюдаемыми годографами. Этого не было бы, если бы полученные расчетные годографы наносились на наблюдаемое волновое поле не выборочно в виде отдельно взятых фрагментов, а полностью, включая участки, характеризующиеся высокими кажущимися скоростями, а также годограф преломленной волны $N_1^{пр}$.

На основании выполненного сравнения можно сделать вывод: показанные на рис. 4 результаты сопоставления расчетных годографов с наблюдаемыми не соответствуют истинной картине соотношений между ними, поэтому не могут рассматриваться как свидетельства близости предложенной модели к реальному строению.

При расчетах по второй модели для всех четырех станций получены по две ступени годографов, которые своими временными характеристиками и по кажущимся скоростям на большинстве участков хорошо согласуются с наблюдаемыми полями. Заслуживает внимания то, что переход от ступени к ступени через зону нарушения по горизонтали в волновых полях растянут, с заполнением пространства между ступенями большим количеством малоупорядоченных колебаний, которые можно отнести к своего рода помехам, в том числе к дифрагированным волнам, о которых говорилось ранее. Воспроизвести их путем расчетов, не зная подлинной структуры низкоскоростных включений, как уже подчеркивалось, практически невозможно.

В целом приведенные выше результаты расчетов по рассмотренным двум моделям показывают, что вторая из них, предложенная авто-

рами в настоящей работе, лучше согласуется с наблюдаемыми данными, т. е. ближе к реальному строению, чем первая, опубликованная в [Салахова, Ярошевская, 1996]. Вторая модель с однозначностью свидетельствует об определяющей роли в глубинном разрезе на исследованном участке структурных образований под вулканическими цепями, проявившихся в виде субвертикальных низкоскоростных блоков в толще мантии.

Однако подчеркнем, что это всего лишь модель, воспроизведшая черты строения, наиболее ярко отразившиеся в волновых полях ГСЗ. При этом заметим, что в данном случае только материалы ГСЗ со взрывными источниками оказались действительно информативными, содержащими такие по качеству и количеству наблюдаемые данные, которые самодостаточны для обоснования выводов о глубинной структуре. Ни один из других методов, как можно судить по опубликованным работам, не дал результатов, позволяющих с такой же степенью однозначности судить об особенностях строения литосферы на этом участке геотраверса.

Заключение. Различия в рассмотренных моделях, построенных разными авторами по одним и тем же весьма выразительным по информативности экспериментальным материалам глубинного сейсмического зондирования, в очередной раз продемонстрировали, насколько ответственным этапом интерпретации является системный анализ зарегистрированных при наблюдениях волновых полей. Недоучет информации об имеющейся в волновых полях множественности упорядоченных зон нарушений привел авторов опубликованной ранее модели к ошибкам в трактовке природы волн, а соответственно, и в определении параметров разреза. В результате ими была представлена многослойная модель с чередованием по глубине субгоризонтально прослеживающихся слоев с относительно повышенными и пониженными скоростями, которая не выдержала проверки решением прямой кинематической задачи.

Более близка к реальному строению модель, представленная в настоящей работе. Предлагаемая модель учитывает указанную выше особенность путем введения в высокоскоростной разрез мантии субвертикальных блоков с пониженными скоростями. Блоки располагаются в местах пересечения профилем вулканических цепей и могут представлять собой магматические камеры.

Список литературы

- Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на Анголо-Бразильском геотраверсе / Под ред. С.М. Зверева, И.П. Косминской, Ю.В. Тулиной. — Москва: НГК РАН, 1996. — 148 с.*
- Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Осипов В.А. Структура аномального магнитного поля в пространстве от Срединного хребта до Ангольского шельфа // Литосфера Ангольской котловины и восточного склона Южно-Атлантического хребта / Под ред. И.М. Мирчинка, Ю.Е. Погребницкого. — Ленинград: ПГО "Севморгеология", 1986. — С. 70—80.*
- Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана. — Москва: ГУГК СССР, 1989. — 156 с.*
- Салахова Е.А., Ярошевская Г.А. Восточный склон Срединно-Атлантического хребта // Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на Анголо-Бразильском геотраверсе / Под ред. С.М. Зверева, И.П. Косминской, Ю.В. Тулиной. — Москва: НГК РАН, 1996. — С. 34—47.*
- Тулина Ю.В. Ангольская котловина и прилегающие участки континентального подножья Африки и фланга Срединно-Атлантического хребта // Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на Анголо-Бразильском геотраверсе. — Москва: НГК РАН, 1996. — С. 48—75.*
- Тулина Ю.В., Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б. Литосфера гребневой зоны Срединно-Атлантического хребта на 12° ю. ш. — пределы однозначности данных ГСЗ о ее строении // Геофизика XXI столетия: 2001 год; Сб. тр. Третьих геофиз. чтений им. В.В. Федынского. — Москва: Науч. мир, 2001. — С. 117—123.*
- Тулина Ю.В., Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б. Нарушения в литосфере Ангольской котловины по данным глубинного сейсмического зондирования // Геофизика XXI столетия: 2002 год; Сб. тр. Четвертых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. — Москва: Науч. мир, 2003а. — С. 149—158.*
- Тулина Ю.В., Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Алексеева Н.А. О геологической природе различий в сейсмических полях на разных направлениях в Ангольской котловине // Физика Земли. — 2003б. — № 6. — С. 44—59.*
- Тулина Ю.В., Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б. Правомерно ли построение скоростных разрезов в ГСЗ по данным только первых вступлений сейсмических волн? // Геофизика XXI столетия: 2005 год; Сб. тр. Седьмых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. — Москва: Науч. мир, 2006. — С. 114—128.*