

ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

*Р.Г.Кулинич**, *Л.А.Маслов***, *Г.З.Гильманова**, *О.С.Комова***

**Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, г.Владивосток*

*** Вычислительный Центр ДВО РАН, г. Хабаровск*

На основе результатов геофизических исследований последних лет выполнено гравитационное моделирование и рассчитано геодинамическое состояние земной коры в северо-западной части Японского моря. Уточнено районирование коры по генетическим типам вдоль профиля, протягивающегося от Южно-Приморского шельфа через подводную возвышенность Первенца, Центральную котловину до возвышенности Ямато. Уточнена глубинная структура возвышенности Первенца и тектонической зоны, отделяющей ее от Южно-Приморского шельфа. Сделан вывод о континентальной природе возвышенности и ее отторжении от материковой окраины в период формирования япономорского бассейна. Выявлена двухслойная структура геодинамического состояния коры и подстилающей мантии. Определены области с различным режимом напряжений и возможного движения коро-мантийного вещества: восходящего, нисходящего и латерального. В краевой части шельфа и склона Приморья имеют место нисходящие движения и переток вещества от континента в сторону возвышенности Первенца, что соответствует продолжающемуся режиму отторжения указанной морфоструктуры от континента. Сама возвышенность испытывает активный подъем. Глубоководная котловина характеризуется нисходящим движением коро-мантийных масс. В пределах возвышенности Ямато преобладают восходящие движения и некоторое латеральное перемещение вещества в сторону глубоководной котловины. Это можно рассматривать как признак надвигания указанной морфоструктуры на котловину и начала процесса ее одностороннего закрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Японское море можно отнести к одному из наиболее изученных окраинных бассейнов Востока Азии. В настоящее время известны или достаточно хорошо прогнозируются генеральные черты его глубинного строения, успешно формируются общие представления о происхождении этой морфоструктуры. Так, по мнению многих исследователей, в том числе и авторов статьи, возникновение Японского моря, как и других приконтинентальных морей Восточной Азии, связано с деструкцией и рифтогенезом материковой окраины, спредингом и образованием глубоководной котловины с молодой океанической корой [7, 13, 15, 17 и др.].

На этом фоне остаются неясными вопросы механизма бывших эволюционных процессов и пространственного распределения структур растяжения. Именно это требует детального изучения внутренней структуры и динамического состояния коры.

В течение последних пяти лет Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН выполнялись детальные геофизические работы в северной части Японского моря. В район исследова-

ний была включена Центральная глубоководная котловина и обрамляющие ее морфоструктуры: континентальный шельф и склон Приморья, а также северная окраина подводной возвышенности Ямато.

Одним из методов в комплексе исследований была гравиметрия. Наблюдения выполнялись шестью наборными гравиметрами ГМН-К с цифровой и аналоговой регистрацией. Навигационное обеспечение осуществлялось на базе спутниковых систем СЧ-2 и GPS. Плотная сеть наблюдений (в среднем 1.5 x 10 км) и небольшая суммарная погрешность вычисленных аномалий (2.1-2.3 мгал) позволили использовать гравиметрию для решения широкого круга задач: от детального моделирования внутренней структуры земной коры до оценки общего динамического состояния изученного района.

Ниже излагаются некоторые результаты интерпретации аномалий гравитационного поля в свободном воздухе. В основу положено плотностное моделирование и расчет напряжений в земной коре с использованием профиля, пересекающего Центральную котловину Японского моря от юго-

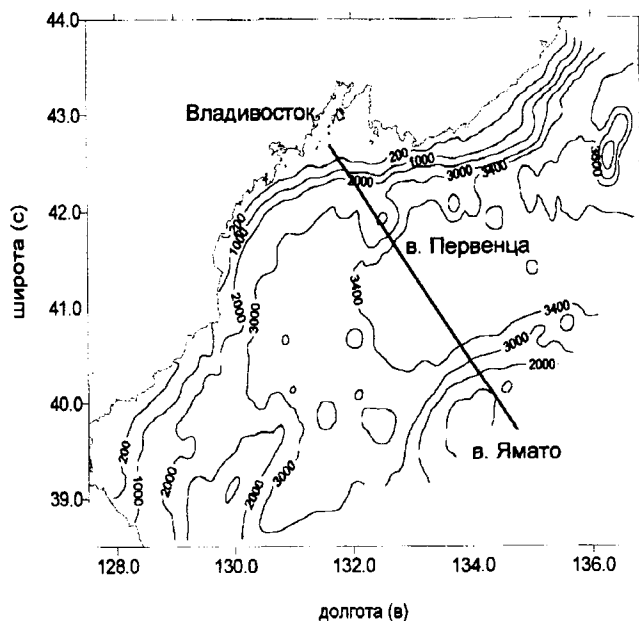


Рис. 1. Батиметрическая схема исследуемого района Японского моря и положение расчетного профиля (жирная прямая линия). Изобаты оцифрованы в метрах.

западного Приморья через подводную возвышенность Первенца до северного хребта подводной возвышенности Ямато (Рис. 1).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Исходная плотностная модель строилась с использованием новейших сейсмических и батиметрических данных, а также с учетом результатов геологического опробования коренных пород и осадков, полученных когда-либо в окрестностях профиля. В частности, сведения о рельефе дна и мощности осадочных отложений под профилем были получены по данным эхолотного промера и сейсмического профилирования, проводившихся одновременно с гравиметрическими наблюдениями.

В качестве опорной информации о глубинах залегания и скоростных параметрах консолидированных слоев коры, а также поверхности Мохо использовались результаты сейсмического зондирования с автономными донными станциями, выполненного в 1990 г. Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН совместно с Токийским университетом в пределах глубоководной котловины восточнее расчетного профиля и в непосредственной близости от него [3,12]. Кроме того, была использована карта изоглубин поверхности Мохо, построенная нами ранее для рассматриваемого района по результатам совместного анализа сейсмических и гравиметрических данных [2].

Для трансформации скоростных характеристик в плотностные были использованы известные статистические зависимости по Дж. Нейфу и К. Дрейку [16] и С. С. Красовскому [5]. Из-за отсутствия достоверных сведений о латеральных вариациях скоростных характеристик поверхности Мохо в зоне профиля плотность мантии на границе с корой была принята постоянной и равной 3.25 г/см^3 .

Расчеты выполнялись в интерактивном режиме по программе, в основу которой были положены разработки В.Н. Страхова о вычислении гравитационного эффекта от двухмерных тел, поперечное сечение которых аппроксимируется многоугольником.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена плотностная модель земной коры рассматриваемого района. В ее пределах наибольший интерес представляют участки коры под возвышенностью Первенца и ближайшего к нему континентального подножия Приморья, а также возвышенности Ямато.

Первый из них характеризуется максимальным знакопеременным возмущением гравитационных аномалий (от $+60$ мгал до -50 мгал), что оказалось следствием очень сложного глубинного строения этого участка.

Возвышенность Первенца, располагающаяся вблизи южного подножия континентального склона Приморья, изучалась и ранее. Уже по первым гравиметрическим наблюдениям было предположено, что эта морфоструктура не является одной из многочисленных вулканических построек глубоководной котловины Японского моря, поскольку вызывает необычное для таких случаев понижение гравитационных аномалий. На этой основе и в результате соответствующих расчетов было сделано предположение о наличии в фундаменте данной возвышенности фрагмента коры континентального происхождения, а сама возвышенность стала рассматриваться в качестве отторженца Южно-Приморской материковой окраины по широтному тектоническому шву, проходящему вдоль основания континентального склона [6].

Результаты геодинамического моделирования, представленные здесь, на наш взгляд, подтверждают указанные выводы и существенно детализируют внутреннее строение данной морфоструктуры.

Прежде всего обращает на себя внимание присутствие в разрезе коры возвышенности мощного (до 10-12 км) комплекса пород с диапазоном плотностей, характерных для гранитно-метаморфических образований соседнего континента ($2.55-2.8 \text{ г/см}^3$). Во-вторых, общая мощность коры под возвышенностью превышает 20 км. Эти особеннос-

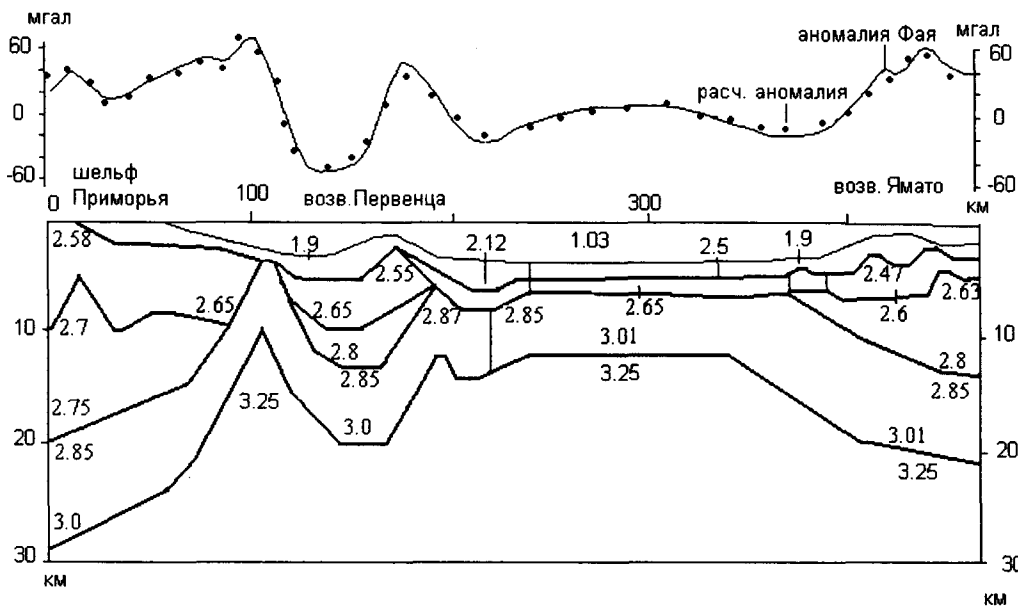


Рис. 2. Плотностная модель земной коры вдоль расчетного профиля.

Цифрами обозначены величины плотности основных слоев земной коры и верхней мантии (в г/см^3).

ти, на наш взгляд, являются существенными признаками того, что данная морфоструктура сложена редуцированной корой континентального происхождения и может рассматриваться в качестве фрагмента краевой части прилегающего материка.

Глубинным выражением разломной зоны, обособившей возвышенность Первенца, может служить необычно высокий локальный подъем нижнекоровых и мантийных масс между этой морфоструктурой и основанием континентального склона Приморья. Как видно из разреза, на указанном участке базит-гипербазитовые комплексы ($2.8-3.25 \text{ г/см}^3$) практически выходят на уровень дна, а поверхность Мохо образует клинообразный выступ с подъемом до глубины около 10 км. Подобные перемещения могли реализоваться только в тектонически ослабленных зонах. Этот участок отмечается также высокими магнитными аномалиями, что дополняет сведения в пользу магматогенного заполнения указанной ослабленной зоны [11].

Кроме этого, драгированием в северной части возвышенности Первенца были обнаружены преимущественно базальты от нижнемиоценовых низкощелочных толеитовых разностей до верхнемиоценовых-плиоценовых разностей щелочного состава [1]. По нашему мнению, это лишь излившаяся часть базитовых масс, занимающих гораздо больший объем уже на незначительной глубине.

К участку между материковым склоном и возвышенностью Первенца приурочено накопление мощного слоя слабоуплотненных пород (1.9 г/см^3), в состав которых, видимо, входят осадочные и осадочно-вулканогенные отложения. Образование благоприятных седиментационных условий мы

связываем с растяжением и тектоническим разрушением ранее существовавшей краевой части материкового шельфа и склона, транзитным выносом осадков с материка и образованием барьера на этом пути в виде возвышенности Первенца.

Южная часть рассматриваемой возвышенности существенно отличается от северной. Здесь на коротком расстоянии резко выклинивается и исчезает сиалическая составляющая коры, а также существенно сокращается мощность осадочных отложений. В результате, на стыке южного подножия возвышенности Первенца с глубоководной котловиной происходит полная трансформация субконтинентальной коры в субокеаническую. К заметным деталям участка сочленения возвышенности с глубоководной частью Японского моря можно отнести существование здесь менее значительного по амплитуде, но столь же узко локализованного выступа границы Мохо, как и на северном ограничении данной морфоструктуры, а также существование небольшого осадочного прогиба у ее подножия.

Строение коры в пределах глубоководной котловины значительно упрощается, ее образуют три субгоризонтальных слоя, присущие океанической коре. Лишь большая мощность осадочных отложений ($1.5 - 2.0 \text{ км}$) отличает ее от последней и дает основание рассматривать в качестве субокеанической. Согласно расчетам, глубина залегания границы Мохо здесь составляет около 13 км.

Разрез коры возвышенности Ямато в редуцированном виде повторяет структуру континентальной окраины. Глубина залегания поверхности Мохо под изученной частью этого поднятия со-

ставляет 22 км. Обращает на себя внимание большая мощность верхней части коры, включающей два верхних слоя с весьма низкой плотностью масс: 1.9 г/см^3 и $2.47\text{-}2.6 \text{ г/см}^3$. Мощность первого из них, отождествляемого с осадочными отложениями, достигает 3-х км, а второго, куда, по всей вероятности, входят вулканогенные и верхние (катаклазированные?) части кислых интрузивных образований составляет около 3.5 км. По данным И. И. Берсенева здесь действительно широко развит сложный комплекс разновозрастных гранитоидов и их производных, разбитых на многочисленные тектонические блоки [1]. Мощность нижележащего слоя ($2.63\text{-}2.8 \text{ г/см}^3$) составляет около 9 км, что хорошо согласуется, например, с оценками мощности гранито-гнейсового комплекса в пределах Ханкайского массива в Приморье.

При наличии общих черт в составе коры возвышенности Ямато и ближайшей материковой окраины, указанная возвышенность существенно отличается высокой степенью деформированности коровых слоев. Безусловно, это связано с различием характера геодинамического воздействия на указанные морфоструктуры, как в прошлом, так и, возможно, в настоящее время. Для исследования этой проблемы нами были выполнены соответствующие исследования.

На основе описанной плотностной модели произведены расчеты геодинамического состояния изучаемого разреза по методике, изложенной в работе [9, см. также: 4, 8]. Согласно данной методике, в структуре рассчитываются напряжения, создаваемые ее собственными плотностными неоднородностями. В этом случае учитываются только силы, создаваемые глубинными неоднородностями среды и

рельефом поверхности. Но даже в таком простом случае нельзя провести простого соответствия (не основанного на расчетах) между аномалиями гравитационного поля, создаваемого данными неоднородностями и структурой напряжений и движений среды. Дело в том, что массы рельефа и глубинные плотностные тела, находящиеся под этим рельефом могут создавать систему сил, приводящую к движениям, фиксируемым на поверхности, например, как восходящие. В то же время, в гравитационном поле в силу близости измерительного прибора к массам рельефа могут наблюдаться аномалии поля как положительные, так и отрицательные. В первом случае восходящие движения поверхности будут коррелировать с положительными аномалиями силы тяжести, во втором - с отрицательными. Если же к рассматриваемому объему приложены другие силы, то качественная оценка напряжений на основе геофизических данных становится вообще невозможной. Поэтому, мы подчеркиваем: всегда необходимо проведение расчетов, основанных на решении строгой математической задачи.

Аномалии плотности определялись как разность между плотностью в данной точке разреза и арифметической средней для всего слоя, которому принадлежит эта точка.

На рис.3 показана векторная картина современного мгновенного поля скоростей вязкого движения среды. Здесь же дана нулевая изолиния аномалий плотности, разграничивающая области повышенных и пониженных значений этого параметра. Максимальный вектор скорости (отмечен на рисунке буквой V) составляет 0.12 мм/год . Исходя из его длины можно оценивать численное значение

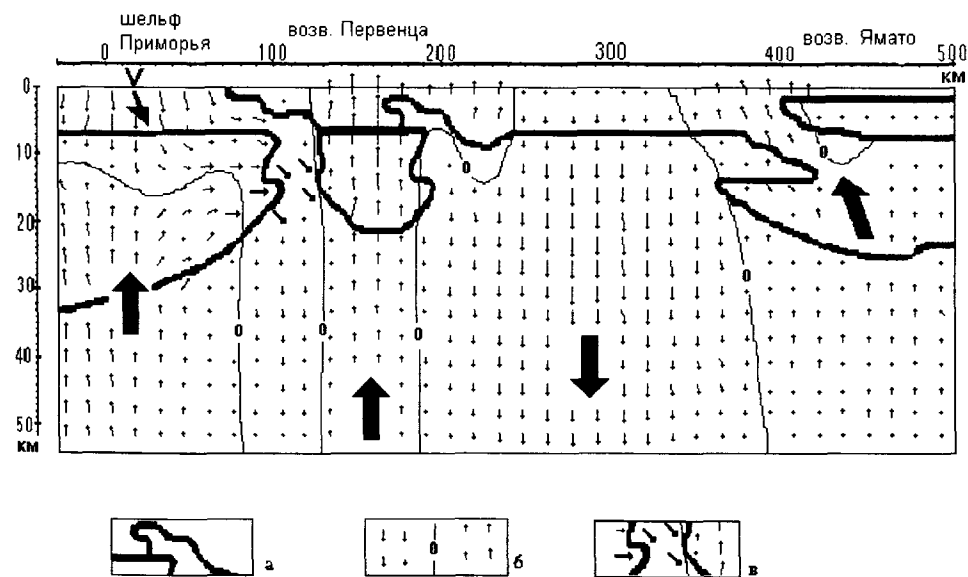


Рис. 3. Векторное поле скоростей вязкого движения среды.

а. Нулевая изолиния аномальной плотности,

б. Изолинии нулевой вертикальной компоненты скорости, т.е., границы, разделяющие области восходящих и нисходящих потоков вещества,

в. Область горизонтального перетока вещества верхней мантии в районе возвышенности Первенца.

V - максимальный вектор вязкого движения среды, равный по абсолютной величине 0.12 мм/год :

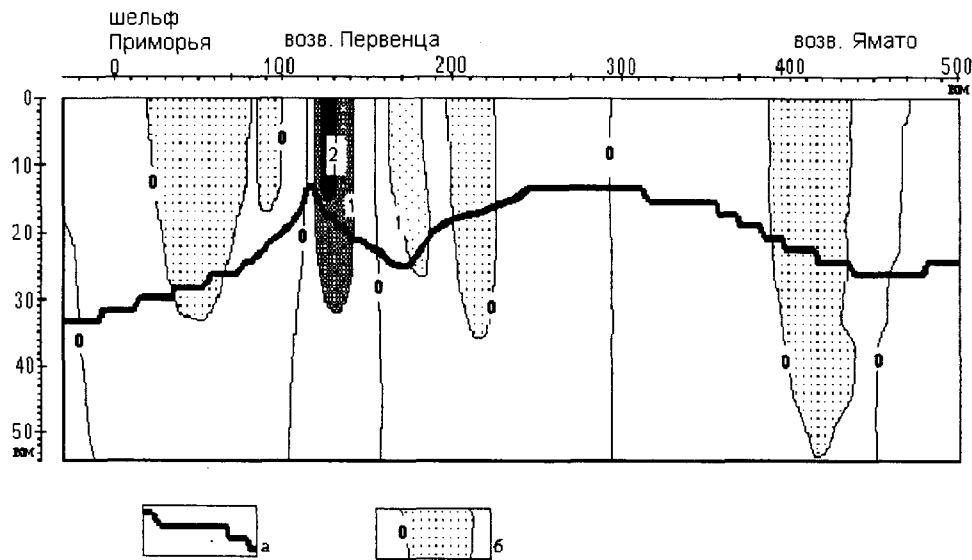


Рис. 4. Изолинии касательных напряжений и плотностная модель среды:

а. Граница Моховоричича, построенная по рис.2,

б. Области повышенных значений и изолинии скоростей касательных напряжений : 0 - 0 МПа, 1 - 317 МПа, 2 - 634 МПа.

векторов и их горизонтальной и вертикальной составляющих в других точках разреза. Вязкость среды принята равной 10^{20} Па с.

Как видно из рисунка, в структуре поля скоростей до глубины примерно 10 км отчетливо проявляются по две области восходящего и нисходящего движения коровых масс. Приповерхностное нисходящее движение (погружение) отмечается для внешнего шельфа и склона Приморья (0.12 мм/год). Если предположить, что указанная скорость сохраняется, например, с миоцена, то суммарная амплитуда погружения, должна составить около 3 км, что неплохо согласуется с общей глубиной морского дна в Центральной котловине Японского моря. Избыточное погружение данного бассейна на величину мощности осадочного комплекса может быть объяснено дополнительной нагрузкой последнего. Более слабое погружение (со скоростью, примерно на порядок меньшей) отмечается для Центральной котловины.

Восходящие движения достаточно интенсивно проявляются на возвышенности Первенца (около 0.1 мм/год) и менее интенсивно в районе банки Ямато.

На глубинах 10-30 км распределение скоростей имеет иные особенности. Нисходящее движение мантийного субстрата со скоростью порядка 0.08 мм/год наблюдается в области Центральной котловины. Кроме этого обнаруживается латеральное перетекание коро-мантийных масс от континента в сторону корневой части возвышенности Первенца со скоростью порядка 0.03 мм/год. Такое перемещение отвечает высказанным выше представлениям о данной структуре как отторжение материковой окраины. Расчеты однако показывают, что указанная скорость недостаточна, чтобы за период с миоцена возвышенность Первенца заняла свое современное положение.

Действительно, если использовать формулу $S=Vt$, где $V=0.03$ мм/год, $t=25$ млн лет, то суммарное смещение данной морфоструктуры окажется равным порядка 750 метрам, что весьма далеко от реальной ситуации. Данное несоответствие мы склонны объяснять упрощенностью исходной физической модели, которая не учитывает прежде всего двухфазности среды и динамики расплавленной компоненты в ней. Кроме того скорость рассматриваемых движений могла меняться во времени.

В пределах возвышенности Ямато на указанных глубинах в общем сохраняется режим восходящих движений. Помимо этого по всему разрезу данной морфоструктуры наблюдается и латеральная составляющая векторов скоростей перемещения, направленная в сторону глубоководной котловины. Это может служить признаком надвигания возвышенности Ямато на указанную котловину и, следовательно, начавшегося ее одностороннего закрытия (?).

На рис.4 приводятся изолинии касательных напряжений. Как видно, напряжения концентрируются в виде узких вертикально ориентированных полос, приуроченных к участкам повышенных градиентов плотностных границ разреза. На уровне изолинии 1 напряжения составляют 317 МПа; на уровне изолинии 2 - 634 МПа. Напряжений данной величины вполне достаточно для образования в земной коре вертикально ориентированных разломов или ослабленных зон [14]. С этой позиции наиболее мощная зона разрывов должна иметь место между краем континента и возвышенностью Первенца, что предполагалось по другим вышеописанным признакам. Формирование зон тектонических разрывов весьма вероятно также в пределах континентально-

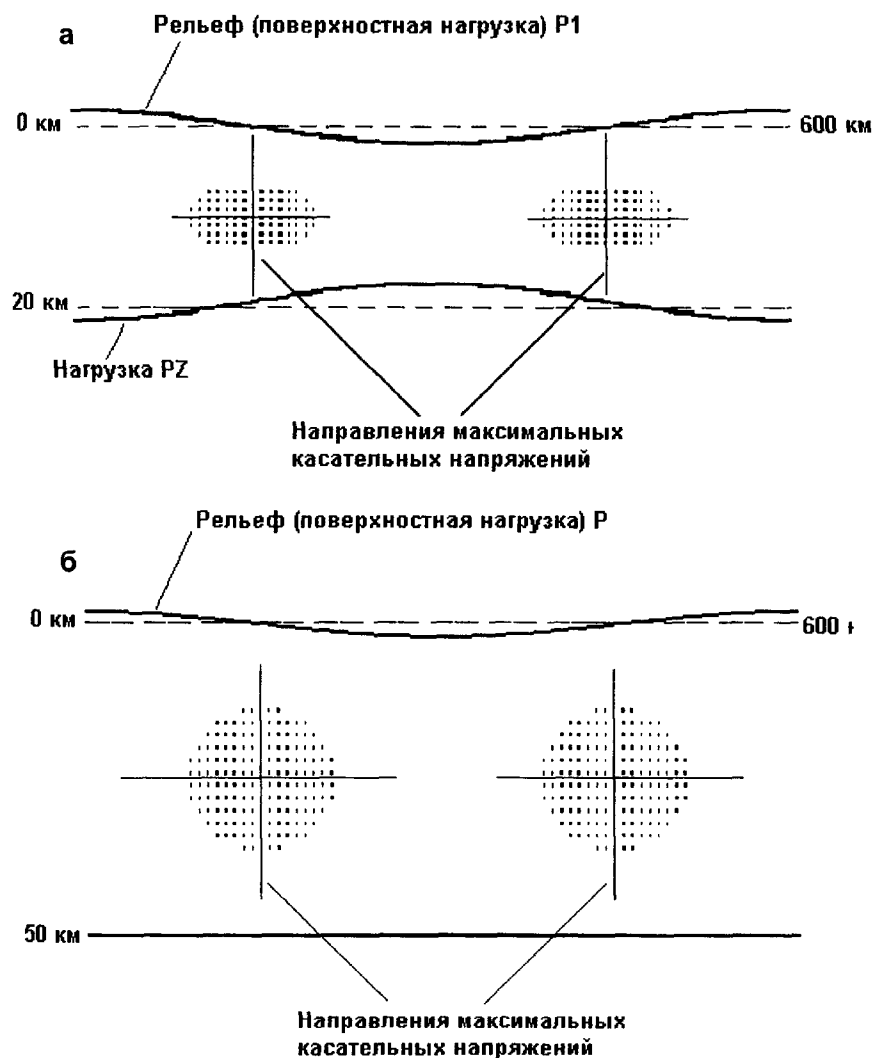


Рис. 5. Распределение касательных напряжений в слое Эри и в слое Пратта. Модельная задача.

а. Слой Эри средней мощностью 20 км. Вариации рельефа создают в слое механические напряжения. Точками показаны области, в которых абсолютное значение касательных напряжений $abs(\tau)$ больше 12 МПа.

б. Слой Пратта средней мощностью 50 км. Точками показаны области, где абсолютное значение касательных напряжений $abs(\tau)$ больше 45 МПа.

Указаны направления главных касательных напряжений.

го склона Приморья и вдоль северной периферии возвышенности Ямато.

В работе [10] показано, что наибольшие касательные напряжения в слое концентрируются в областях максимальных градиентов его мощности (Рис.5), что приводит к образованию разломов (ослабленных областей), внедрению в них мантийного вещества и последующего раздвижения разделенных таким образом блоков. Расчеты механических напряжений для рассмотренного выше разреза подтверждают выводы, сделанные на теоретической модели и дают дополнительные аргументы в пользу представлений об одностороннем характере рифтогенеза и несимметричном спрединге при формировании приконтинентальных окраинных морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа позволила получить новую информацию по одному из интересных районов северо-западной приконтинентальной части Японского моря. К наиболее значимым результа-

там описанных исследований можно отнести следующее:

1. Уточнена общая структура земной коры вдоль профиля: шельф Южного Приморья - возвышенность Первенца - Центральная котловина - возвышенность Ямато.

2. Детализирован глубинный разрез возвышенности Первенца и тектонической зоны, отделяющей ее от материка. Поддержано ранее высказанное предположение о континентальной природе этой морфоструктуры, отторгнутой от материка в период формирования глубоководной япономорской котловины. Обнаружен аномально высокий подъем поверхности Мохо и базитового корового комплекса в тектонической зоне между возвышенностью Первенца и основанием континентального склона.

3. Оценено современное геодинамическое состояние изученного района. Выявлены области с различными режимами напряжений и движения коро-мантийных масс. К областям с нисходящими

движениями отнесены внешний шельф и склон Южного Приморья и Центральная котловина, с восходящими перемещениями глубинных масс - возвышенности Первенца и Ямато. Наиболее активно поднимается первая из них. Помимо этого отмечается латеральный отток вещества со стороны континента под возвышенность Первенца и движение коро-мантийных масс от возвышенности Ямато в сторону Центральной котловины. Это позволяет высказать предположение, что в приконтинентальной зоне Японского моря продолжает существовать режим деструкции материковой коры, в то время как перемещение глубинных масс возвышенности Ямато в сторону глубоководной котловины, возможно, знаменует начало процесса ее одностороннего закрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Т., Терехов Е.П., Цой И.Б. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 40 с.
2. Геологическое строение западной части Японского моря и прилегающей суши/Отв. ред. Е. Н. Леликов. Владивосток: Дальнаука, 1993. 210 с.
3. Карп Б.Я., Хирата Н., Киношита Х., Суехиро К., Здоровенин В.В., Карнаух В.Н. Советско-Японский сейсмический эксперимент в Японском море. Предварительные результаты //Тихоокеан. геология. 1992. N5. С.138-147.
4. Комова О.С., Маслов Л.А., Туезов И.К. Решение прямой трехмерной задачи геомеханики для аномальных плотностных тел // Тихоокеан. геология. 1984. №3. С.110-115.
5. Красовский С. С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 264 с.
6. Кулинич Р. Г. О геологической природе подводной возвышенности Первенца в Японском море//Тр. ТОИ

- ДВНЦ АН СССР. 1976. Т.8. С.23-28.
7. Кулинич Р.Г., Заболотников А.А., Марков Ю.Д., Журавлев А.В., Здоровенин В.В., Головань А.А., Обжиров А.И., Николаева Н.А. Кайнозойская эволюция земной коры и тектогенез Юго-Восточной Азии. М.: Наука, 1989. 256 с.
 8. Маслов Л.А., Строев П.А., Комова О.С. Геодинамика Япономорской переходной зоны//Гравиметрические исследования на море/Ред. Буланже Ю.Д. и Сагитов М.У. М.: Наука, 1988. С.92-97.
 9. Маслов Л.А. Геодинамика литосферы Тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1996. 199 с.
 10. Маслов Л.А. Простая модель расчетов напряжений в земной коре и литосфере и результаты ее интерпретации // Тихоокеан. геология. 1997. Т.16, № 2. С.38-45.
 11. Шевалдин Ю.В. Аномальное магнитное поле Японского моря. М.:Наука, 1978. 74 с.
 12. Hirata N., Karp B.Ya., Yamaguchi T. et al. Oceanic crust in the Japan Basin of the Japan Sea by the 1990 Japan-USSR expedition//Geophys. Res. Letters. 1992. V.19, N 20. P.2027-2030.
 13. Karnaukh V. and Karp B. The structure of the rift zone in the Japan Sea. Abstracts of the 30th International Geological Congress, Beijing. 1996. P.223.
 14. Kohlstedt D.L., Evans B., Mackwell S.J. Strength of the lithosphere:Constraints imposed by laboratory experiments //Journal of Geophys. Res. 1995. V.100, NB9. P.17587-17602.
 15. Kulinich R. and Karp B. Opening of the Japan Sea and evolution of adjacent continental crust. Abstracts of the 30th International Geological Congress. Beijing. 1996. P.231.
 16. Nafe J. E. and Drake C. L. Physical properties of marine sediments/Hill M.N. (Editor), The Sea, 3. Wiley-Interscience, New York, N. Y. 1963. P.794-815.
 17. Tamaki K. Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. Bull. of the Geol. Surv. of Japan, 1988. V.39, N 5. P.269-365.

Поступила в редакцию 9 июля 1997 г.

R.G.Kulinich, L.A.Maslov, G.Z.Gilmanova, O.S.Komova

Density model and crust stress in the northern part of the Sea of Japan

On the basis of new geophysical data, density modeling and calculation of the geodynamic conditions of the Earth's crust in the NW part of the Sea of Japan were carried out. The Earth's crust zonation for genetic types was specified. The structure of the Siberian Seamount and the tectonic fracture zone separating it from the continent during the Sea of Japan Basin opening was specified. Areas with various modes of geodynamic stress and possible movement of the crust-mantle substance were defined. Descending movement of the substance takes place on the continental shelf's edge and slope of Primorye. The substance flow moving from the continent to the Siberian Seamount is additionally revealed, which corresponds to a proceeding mode of crust stretching in this area. Now the Siberian Seamount is actively rising. Deep-water Japan Basin is characterized by a descending movement of crust-mantle masses. An ascending movement and some lateral motion of crust-mantle substance to the Japan Basin prevail in the Yamato Rise area. This may be regarded as an attribute of the Yamato Rise, moving onto the deep-water basin, and the beginning of its one-sided closure.