

ПОЛЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КОРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМЛИ

© 2020 г. Ю. Л. Ребецкий*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Б. Грузинская, д. 10, 123242, Москва, Россия*

**e-mail: reb@ifz.ru*

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принята к публикации 28.07.2020 г.

Результаты тектонофизической инверсии глобального поля тектонических напряжений рассматриваются с позиции объяснения активных сил, обуславливающих движение литосферных плит. Выполнен анализ закономерностей напряженного состояния главных структурных элементов литосферы Земли – океанского спрединга, трансформов, активных континентальных окраин, внутриконтинентальных орогенов. Показано, что напряжения в большей части океанской литосферы, включая зоны субдукции, отвечают активным тяговым силам от погруженной и утяжеленной части литосферы. Установлен низкий уровень девиаторных напряжений в зонах субдукции и наличие динамо-пары с резко различающимся режимом напряженного состояния. В коре континентального склона наблюдается горизонтальное сжатие, в океанской литосфере – горизонтальное растяжение, поэтому границы литосферных плит не следует рассматривать в виде источника напряжений повышенного горизонтального сжатия в коре континентов. Формирование режима горизонтального сжатия в коре внутриконтинентальных орогенов, как и в коре орогенов активных континентальных окраин связано с остаточными напряжениями пород, подвергшихся экзугмации из глубин коры. Предлагается обобщающая схема формирования глобального поля коровых напряжений Земли, отвечающая современным данным о движениях литосферных плит и глубинному строению верхней мантии.

Ключевые слова: механизмы очагов землетрясений, тектонические напряжения, генезис напряжений, инверсия напряжений, движущие силы, литосферные плиты

DOI: 10.31857/S0016853X20060119

ВВЕДЕНИЕ

После того как в первой половине XX в. работами большой группы ученых были введены основные понятия новой парадигмы эволюции верхней оболочки Земли [10–12, 25, 19, 59], начался длительный этап сбора геологических, сейсмологических и геофизических данных, призванных закрепить и уточнить основные положения тектоники литосферных плит. Предполагалось, что основную роль в тектонических процессах оказывают две внешние оболочки Земли – литосфера и астеносфера, которая частично находится в расплавленном состоянии. Непрерывность смещений и деформаций литосферы прерывается в узких активных зонах, которые разбивают ее на жесткие плиты. Литосферные плиты способны перемещаться в горизонтальном направлении по астеносфере, обладающей пониженной вязкостью. В Срединно-океаническом хребте происходит наращивание литосферы, здесь плиты расходятся в стороны. В других активных зонах литосферные плиты исчезают с поверхности Земли, погружаясь в мантию – активные континенталь-

ные окраины, и горизонтально смещаются друг относительно друга – трансформные разломы.

Важно отметить, что причина латеральных движений литосферных плит была дискуссионной с самого начала возникновения концепции новой глобальной тектоники. Считалось, что литосфера представляет собой пластину, пассивно реагирующую на процессы, протекающие в астеносфере в которой формируются конвективные ячейки, создающие более эффективный процесс переноса тепла из нижней мантии.

Вегенер, основоположник концепции новой глобальной тектоники, связывал источник движущих плиты сил с эллипсоидальной формой физической поверхности Земли. В этом случае даже при гидростатическом состоянии планеты, когда форма физической поверхности Земли и земного геоида совпадают, изменение радиуса кривизны геоида с глубиной определяет возникновение в поле силы тяжести тангенциальных массовых сил [52]. Однако расчеты таких сил [53] показали, что они малы – порядка 0.01 кг/см^3 , соответству-

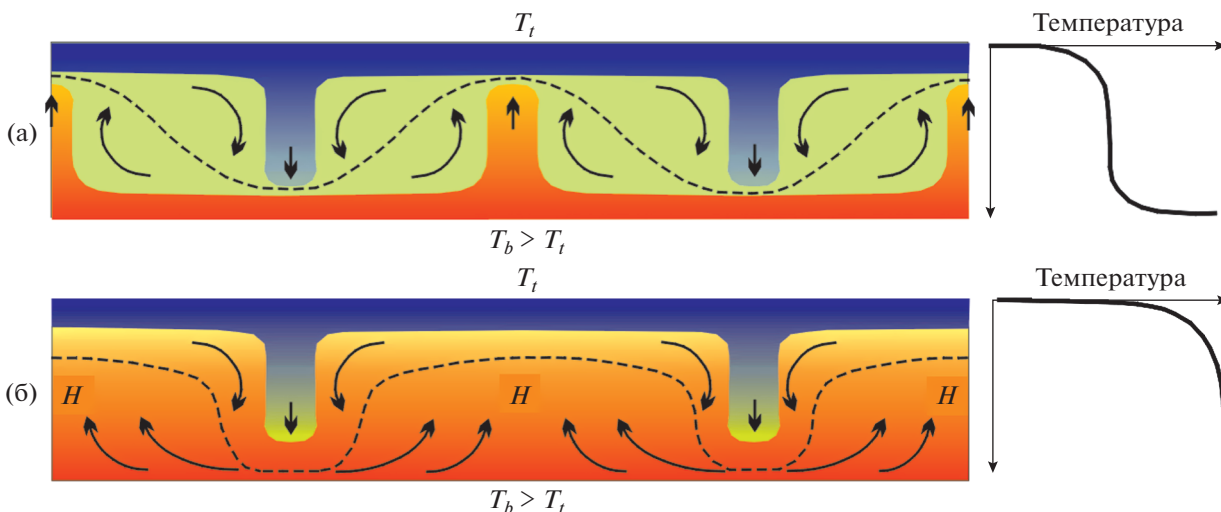


Рис. 1. Вертикальное сечение 2D модели термогравитационной конвекции в слое. Конвекция: (а) — вызываемая только разностью температур на верхней и нижней границе слоя; (б) — дополнительно обусловленная распределенными по глубине источниками тепла (H). Температура: T_t — поверхности слоя, T_b — подошвы слоя.

ющие максимальному отклонению отвеса от нормали к физической поверхности Земли порядка 2 секунд. Позднее начали развиваться идеи об определяющей роли в движении плит тепла, идущего из ядра и мантии. Базисом концепции новой глобальной тектоники, определяющем генезис движения плит, стала гипотеза Вилсона [73] о циклическом развитии литосферы, связанном с последовательным проявлением этапов раскрытия и закрытия океанов.

В рамках этой концепции первопричиной движения плит был определен раскол континента и раскрытие океана — зон рождения новой литосферы, т.е. заложение континентальных рифтов. Формирование зон поглощения — субдукции литосферы является реакцией на расширение океанского дна в зонах спрединга литосферных плит и развития Срединно-океанического хребта. Таким образом, считалось, что горизонтальные силы со стороны хребта являются причиной формирования зоны субдукции.

Целью работы является анализ концепции механизмов движения литосферных плит на основе полученных тектонофизическими методами новых данных о поле современных глобальных напряжений не только в части ориентации их главных осей, но и величин напряжений.

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ В НОВОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕКТОНИКЕ

Общемантийная тепловая конвекция

Современные представления о механизме движения литосферных плит базируются на взглядах о возможности возникновения тепловой мантий-

ной конвекции, в рамках которых было сделано два предположения:

- для переноса тепла от ядра через нижнюю мантию к поверхности Земли недостаточно кондуктивного механизма и поэтому для сохранения близ-адиабатического распределения температуры в большей части мантии необходимо, чтобы в ней происходила термогравитационная конвекция;
- вязкость в нижней мантии достаточно низка, что позволяет рассматривать возможность формирования в ней конвективного течения [31].

Под влиянием данных предположений о тепловой конвекции при низкой вязкости мантии, составивших основу шестого положения тектоники литосферных плит, во второй половине двадцатого века было выполнено много численных расчетов двуслойной с двумя смежными по вертикали ячейками в верхней и нижней мантии, а также общемантийной конвекции [8, 18, 34, 47]. Результаты этих расчетов выглядели столь убедительно, что приведенные предположения стали восприниматься как реальный факт.

В этих расчетах было установлено, что при формировании тепловой мантийной конвекции:

— возникает два пограничных слоя мощностью 50–200 км вблизи поверхности Земли и вблизи ядра им соответствует океанская литосфера и слой D'' (рис. 1, а);

— существуют периодически повторяющиеся, локализованные до нескольких сотен километров горячие восходящие и холодные нисходящие мантийные потоки, соединяющие эти два пограничных слоя и образующие 3–4 конвективные ячейки;

– вещество мантии между двумя этими потоками находится при температуре, близкой к адиабатической температуре. Таким образом, источником сил горизонтального движения литосферных плит стали считать вертикально действующие силы тяжести и плавучести, последние из которых были порождены тепловым потоком, идущим от ядра Земли.

Из результатов численных расчетов по термогравитационной конвекции [8, 33, 34, 46] было сложно выделить, какая из ветвей конвекции, восходящая или нисходящая, играет первичную роль в механизме латерального движения плит. Эти расчеты тепловой конвекции в мантии подтвердили концепцию Вилсона. Восходящий горячий мантийный поток, воздействуя снизу на континентальную плиту или группу сближенных плит, разрывает ее, что приводит к расхождению континентов, формированию океанского рифта и разрастанию за счет кристаллизации из астеносферного расплава новой океанской литосферы. Сокращение площади литосферных плит осуществляется в зонах конвергенции через механизм субдукции и коллизии плит.

Другой вариант общемантийной конвекции в виде термохимической конвекции имел в верхней мантии более сложную и более мелкую структуру, в которой период повышенной активности был связан с аваланжем холодной литосферной плиты, испытывающей быстрое субрадиальное перемещение в нижнюю мантию, по [18]. Вслед за этим происходит растяжение литосферной плиты и формируется структура океанского спрединга. Таким образом, из расчетов следовало, что источником начального выхода из устойчивого состояния могут являться нисходящие движения холодных литосферных плит в зонах субдукции. Эти результаты лучше соответствовали модели Эльзассера [50, 51], которая появилась почти одновременно с моделью Вилсона [73].

Модель Вилсона

В случае формирования в мантии тепловой конвекции в литосферной плите возникает давление на зону субдукции, обусловленное соскальзыванием плиты под действием силы тяжести с возвышенности Срединно-океанического хребта [10, 11]. Поскольку погруженная часть литосферной плиты на глубинах более 100 км претерпевает метаморфические преобразования и уплотняется [55], то в ней создается отрицательная плавучесть, которая и определяет возникновение в литосферной плите сил затягивания.

При таком механизме движения активные силы в большей части находятся прямо в океанской литосферной плите и связаны с силой тяжести.

В зоне субдукции холодная и уплотняющаяся литосфера погружается в верхнюю мантию, а в зоне спрединга также под действием силы тяжести возникает боковое давление на литосферу [10, 11, 33]. Астеносфера также влияет на это движение за счет касательных напряжений на подошве океанской плиты, направленных к океанскому желобу, по Вилсону [73].

Согласно модели Вилсона на начальной стадии формирования субдукционного поддвига основным активным усилием может являться только давление со стороны Срединно-океанического хребта [19, 33], формирование которого является причиной начала движения литосферной плиты. Таким образом, согласно этой модели движущих сил сжатие вдоль океанской литосферы возрастает при приближении к тальвегу желоба и ослабевает в глубинной части литосферной плиты, где вдоль океанского желоба могут действовать напряжения минимального сжатия (рис. 2, а).

Модель Эльзассера

Практически уже при рождении теории новой глобальной тектоники стали появляться факты, ставящие под сомнения некоторые ее положения, в основном касающиеся сил, движущих литосферные плиты [50, 51]. В частности, выяснилось, что скорости движения плит зависят не от их площади или протяженности Срединно-океанического хребта, а от наличия большой доли в общем протяжении границ плиты зон субдукции плит. Таким образом, был поставлен под сомнение факт астеносферных течений как движущих сил литосферных плит. Были сделаны предположения о сопротивлении астеносферы движению плит и соответствующем направлении действия касательных напряжений [10, 11, 33] (см. рис. 2, б). При таком механизме воздействия в океанской литосферной плите практически повсеместно может формироваться горизонтальное растяжение в направлении, ортогональном зонам спрединга.

Эльзассер [50, 51] предположил, что силой, перемещающей плиты, является отрицательная плавучесть их краев в зонах Беньюфа. Освободившись от излишней воды и испытав метаморфизм на глубине, погруженная часть океанской плиты затягивает себя в мантию, создавая силы растяжения в рифтовых зонах [41]. При этом в астеносфере формируется возвратный поток к хребту (см. рис. 2, б), создающий обратный знак касательных напряжений по сравнению с первоначальной моделью Вилсона (см. рис. 2, а). Такое возвратное течение в астеносфере также объясняло деплетированный состав магм Срединно-океанического хребта.

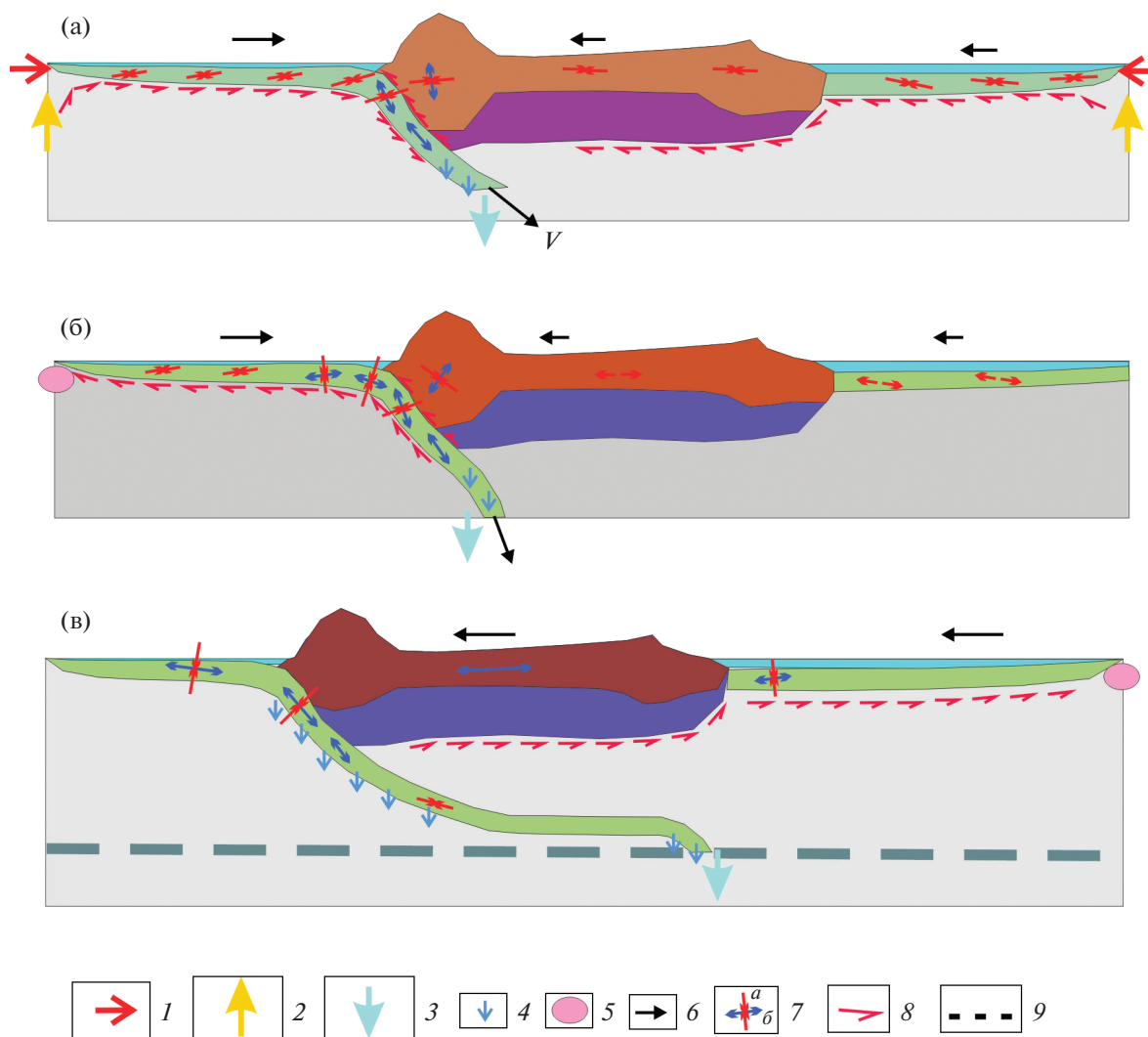


Рис. 2. Геодинамические модели активных сил, формирующих движения океанских литосферных плит и напряжений в литосфере.

(а) – по Вильсону, с активными силами в зоне спрединга, создающими давление от хребта и силы тяжести погруженной океанской литосферы;

(б) – по Эльзассеру, только за счет затягивания погруженной части океанской литосферы;

(в) – по модифицированной модели Эльзассера, для случая стагнации погруженной части океанской литосферы в переходной зоне.

1 – давление со стороны Срединно-океанического хребта; 2 – вертикальное давление на Срединно-океанический хребет от восходящего конвективного потока в мантии; 3 – сила тяги со стороны погруженной части литосферной плиты; 4 – дополнительные массовые силы тяжести утяжеленного участка литосферной плиты; 5 – аномальная мантия, формирующаяся за счет декомпрессии; 6 – направления движения плит; 7 – напряжение: a – максимального сжатия, b – минимального сжатия (девиаторное растяжение); 8 – направления касательных напряжений на подошве литосферы и на границе контакта океанской и континентальной литосферных плит, 9 – верхняя граница переходной зоны мантии

Однако и к модели Эльзассера также возникли вопросы [17]. В частности, из модели неясно, если давление со стороны формирующегося Срединно-океанического хребта низкое или отсутствует, что тогда является начальной причиной погружения океанской литосферы в мантию. Модель Эльзассера не соответствовала результатам расчетов тепловой общемантийной и двуслойной конвекции из-за отсутствия дальнедействующего

давления со стороны хребта. Генезис сил, которые производят движение литосферных плит до момента формирования зоны субдукции, также необходимо было выяснить. Из модели Эльзассера следует, что вдоль погружающейся литосферной плиты с глубин выше уплотненного участка должны действовать растягивающие напряжения.

Ясаманов [38] предположил, что причиной начала субдукционного процесса является достиже-

ние океанской литосферой определенной предельной мощности. Океанская литосфера более тяжелая, чем астеносфера, создает в зоне сочленения с континентальной литосферой сдвиговые напряжения, превышающие предел прочности. Здесь начинается разрушение литосферной плиты, запускающее субдукцию. Подобное предположение соответствует факту наличия зон субдукции по контуру Тихоокеанской литосферной плиты, имеющей наибольший площадной радиус, и отсутствию субдукции для Атлантической литосферы, поперечный размер которой является наименьшим. Предположение Ясаманова [38] дополняет идею Эльзассера, но оно не отвечает на вопрос о силах, раздвигающих континенты и создающих раскол океанской плиты.

Модель субдукции с надвиганием континентов

Отказ от наличия горизонтальных сил давления со стороны Срединно-океанического хребта и определение сил тяжести погруженной части океанской литосферы в качестве главного источника деформаций [50, 51] можно использовать для обоснования субдукции с отодвиганием океанского желоба (см. рис. 2, в), именуемой в англоязычной научной литературе механизмом “rollback subduction” (дословный перевод – субдукция с откатом) [69]. В работах [19, 44] этому механизму субдукции предложен термин “псевдосубдукция” из-за того, что в той или иной степени механизм пододвигания океанской литосферы под континентальную заменен надвиганием континентальной литосферы и вертикальным погружением океанской литосферы [41]. Но этот термин не вошел в системное употребление, поэтому будем в настоящей статье такой механизм определять как субдукцию с надвиганием континентальной литосферы на океанскую литосферу.

Обычно такой механизм движения плит предполагает сочетание поддвига океанской литосферы под континентальную и надвигание континентальной литосферы на океанскую [19, 44], сопровождающегося отодвиганием тальвега желоба в сторону Срединно-океанического хребта. Но также возможен и вариант этого механизма, при котором не происходит поддвига океанской литосферы под континентальную. В обоих вариантах, – как в океанской, так и в континентальной литосферах, должно появляться дополнительное напряжение горизонтального растяжения [46], а вдоль дуги большого земного круга, ортогонального простиранию зоны субдукции, должны наблюдаться деформации растяжения с рождением молодой океанской литосферы (рис. 2, в).

Модель Эльзассера позволяет объяснить надвигание субконтинентальной литосферы на оке-

анскую, реальность существования которого следует из изгиба островной дуги в зонах субдукции. При этом, в середине прошлого века, когда закладывались основы тектоники литосферных плит, отсутствовали данные о литосферных блоках, стагнирующих на глубинах переходной зоны мантии [10, 11, 55, 58]. Этот элемент механизма движения литосферных плит в модели Эльзассера отсутствовал.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Данные о напряжениях, получаемые тектонофизическими методами из геологических и сейсмологических индикаторов разрывных деформаций, с самого начала их создания интерпретировались не только в рамках прикладных задач горного дела и сейсмических опасностей [2, 3, 26, 27, 32, 37], но и для решения фундаментальных задач геодинамики [5, 6, 13, 24, 28, 30, 64]. Однако до сих пор решение проблемы генезиса сил, определяющих глобальную закономерность движения литосферных плит, оставалось за рамками вопросов тектонофизики.

В этой работе, вероятно, впервые результаты тектонофизической инверсии напряжений в части самих величин напряжений будут интерпретироваться для объяснения механизма формирования движущих сил в тектонике литосферных плит.

Такая возможность возникла после длительного этапа изучения природных напряжений в коре континентальных орогенов [29, 30] и активных континентальных окраин. Ключевым элементом, позволившим перейти к изучению механизма формирования поля глобальных напряжений, явились данные о напряженном состоянии зон спрединга и данные о механизмах очагов сильных землетрясений для океанских плит на участках между зонами субдукции и спрединга. Ценность представляемых исследований подчеркивается выдержанностью одной методики исследования напряжений для всех основных геодинамических типов глобальной тектоники.

Методика инверсии напряжений

Тектонофизические методы оценки некоторых параметров напряженного состояния массива относятся к обратным методам. Они принципиально отличаются от геомеханических подходов в изучении напряжений, опирающихся на решения прямой краевой задачи механики. Инверсия напряжений в настоящей работе выполнялась методом катакластического анализа разрывных смещений (МКА), который соединил в себе основные положения расчета параметров на-

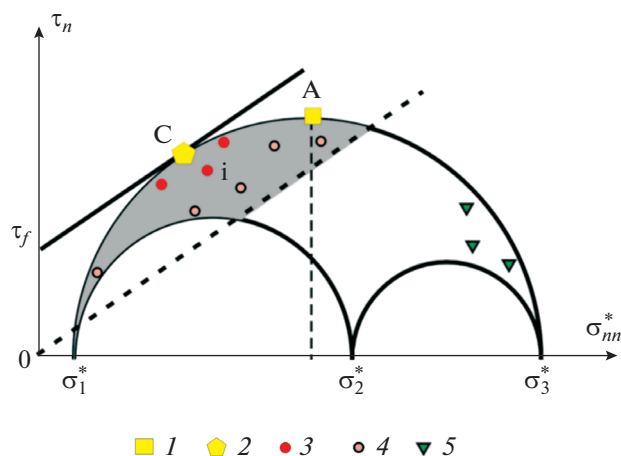


Рис. 3. Полоса хрупкого разрушения на моровской области.

Напряжения, действующие на площадке разрыва: эффективные нормальные (по горизонтали, справа); касательные τ_n (по вертикали).

Показаны: предел хрупкой прочности (прямая линия, касающаяся большого круга Мора); минимальное сопротивление трения (пунктирная линия); полоса хрупкого разрушения (пространство между пределом хрупкой прочности и минимальным сопротивлением трения).

Показаны (символы): точки, соответствующие разной ориентации плоскости разрыва по отношению к осям главных напряжений.

1 – напряженное состояние на площадке максимальных касательных напряжений (A); 2 – прочность и напряжения вновь образующейся трещины (C); 3–4 – состояния на трещинах: 3 – вблизи предела прочности, 4 – прочности трения; 5 – состояния, при которых старые трещины не реактивируются

пряжений и необратимых деформаций, следующих из положений теории пластичности [64].

Метод катакластического анализа разрывных смещений, состоящий из четырех этапов реконструкции, последовательно определяет компоненты полного тензора напряжений и нормированный тензор приращений сейсмоструктурных деформаций. Основу алгоритма метода составляют энергетические представления теории пластичности, определяющие отыскание компонент тензора напряжений, которые доставляют максимум разгрузки внутренней энергии упругих деформаций для тензора сейсмоструктурных деформаций. Эти положения определяют необходимость совместного расчета тензора напряжений и необратимых деформаций, что отсутствует в приведенных тектонофизических методах.

В методе катакластического анализа разрывных смещений, как и в кинематическом методе Гущенко [6], имеется формализованный алгоритм создания однородных выборок данных о разрывных смещениях. Он базируется на требовании снижения внутренней упругой энергии массива после каждого смещения на разрыве. Это означает наличие острого угла между направлением смещения и касательным напряжением на плоскости разрыва для искомого тензора напряжений. Таким образом, в обоих методах допускается отклонение ориентации касательных напряжений

на плоскости разрыва от направления смещения его бортов, реализованном при хрупком разрушении. В этом смысле неверно утверждение Мухамедиева [23] об использовании в методе катакластического анализа разрывных смещений и в методе Гущенко гипотезы Ботта и Валеса [43, 71] о совпадении направления смещения на разрывах с касательными напряжениями, действующими на них.

Возможность определения не только ориентации осей главных напряжений, но и величин напряжений методом катакластического анализа разрывных смещений основана на использовании кроме механизмов очагов землетрясений еще и дополнительных сейсмологических данных о сброшенных напряжениях, геофизических данных о рельефе поверхности и плотности пород коры, а также обобщающих положений экспериментальной геомеханики и теории хрупкого разрушения. Так, на втором этапе метода возможность определения нормированных на прочность сцепления τ_f величин максимальных касательных напряжений τ и эффективного давления p^* (тектоническое давление минус давление флюида в трещинах) связана с использованием полосы хрупкого разрушения на диаграмме Мора (рис. 3). Математический алгоритм этого этапа реализует замеченный и хорошо понятный факт о большей вариабельности сколов в однородной выборке в

случае низкого уровня всестороннего давления в сравнении со случаем высокого давления.

Результаты инверсии в части ориентации главных напряжений

Автором приводятся здесь данные о поле глобальных напряжений, полученные в основном только по алгоритмам первого этапа метода катакластического анализа разрывных смещений, т.е. в конечных результатах известна ориентация осей главных напряжений, коэффициент Лоде–Надаи, характеризующий форму эллипсоида напряжений.

Показаны эпицентры 43664 фокальных механизмов землетрясений каталога Global CMT Project [78] для верхнего слоя литосферы 0–60 км, по которым выполнялась инверсия тектонических напряжений на основе метода катакластического анализа разрывных смещений [64] (рис. 4, а).

Инверсия напряжений осуществлялась с помощью нового алгоритма создания однородных выборок сейсмологических данных в авторской программе STRESSseism [65]. Эта версия программы позволяет рассчитывать напряжения в едином режиме, но с разным масштабом усреднения напряжений, в сейсмоактивных районах — с существенно разной плотностью эпицентров очагов землетрясений.

Расчеты выполнялись по сетке 0.1×0.1 градус для верхнего слоя литосферы 0–60 км, т.е. данные о напряжениях отвечали усреднению в масштабе коры в целом. Результаты инверсии получены для 76400 точек сетки. Показан геодинамический тип напряженного состояния в узлах сетки расчета (см. рис. 4, б), который хорошо соответствует кинематическим типам механизмов очагов землетрясений, служивших основой расчета (см. рис. 4, а).

Для изображения осей напряжений в топоцентрической системе координат результаты расчета были переведены на сетку 0.5×0.5 град. путем интерполяции, в редких случаях проводилась экстраполяция на дистанциях не более 0.25 град. Представлены результаты расчета компонент тензора в виде ориентации напряжений наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия (рис. 5). Здесь для рисунка с направлениями наибольшего горизонтального сжатия цветом показаны их значения, нормированные на прочность сцепления. При этом следует иметь в виду, что прочность сцепления является эффективной, отвечающей масштабу усреднения напряжений, т.е. средней для земной коры. Она имеет разные значения для коры континентов, зон субдукции в океанской литосфере и континентальной литосфере, также в коре молодой литосферы зон спрединга. Допустимо полагать, что прочность сцепления в пределах однотипных элементов тектоносферы приблизи-

тельно одинакова, что дает возможность анализировать уровень в пределах одной тектонической зоны, одного тектонического режима напряженного состояния (см. рис. 4, б).

Анализ результатов реконструкции напряжений для океанской литосферы в зонах спрединга и для активных континентальных окраин позволяет выделить закономерности напряженного состояния, связанные с ориентацией главных осей напряжений.

Зоны океанического спрединга и трансформы

Зоны океанского спрединга в своей осевой части характеризуются ориентацией напряжений максимального горизонтального сжатия, как правило, параллельной или с углами $\sim 20^\circ$ – 30° к их простирацию (рис. 5, а). Косая ориентация этих осей означает наличие в зонах спрединга растяжения одновременно с горизонтальной сдвиговой компоненты смещения — трансенсия (см. рис. 4, б, см. рис. 5, б). При этом некоторые участки этих зон имеют компоненту левого сдвига, а какие-то участки имеют компоненту правого сдвига. Исключение составляет Арктическая зона спрединга, для которой оси максимального горизонтального сжатия на нескольких участках вблизи полюса почти ортогональны простирацию оси хребта. Для таких участков зоны спрединга возможен сдвиг в обстановке сжатия — транспрессия (рис. 6, а).

В полосе около 500 км по обе стороны от оси спрединга молодой океанской литосферы существует небольшое число данных о напряженном состоянии, которые показывают, что здесь оси максимального горизонтального сжатия становятся ортогональными простирацию зон спрединга, например, Индо-Австралийская плита.

По мере удаления от оси спрединга ориентация главных напряжений в океанской литосфере изменяется (см. рис. 5). Выделены типичные пространственные изменения главных напряжений в плане и в поперечном сечении (рис. 7, схема). В этой части океанской литосферы характерным является параллельное простирацию спрединга расположение напряжения наибольшего горизонтального сжатия на дистанциях более 500 км от оси спрединга и вплоть до тальвега океанского желоба зон субдукции.

Зоны спрединга не представлены единым геодинамическим режимом (см. рис. 4, б) и они сочетают на разных участках напряженное состояние горизонтального растяжения или горизонтального сдвига. К таким зонам, прежде всего, относятся Антарктическая и в южном полушарии Атлантическая зоны спрединга (см. рис. 6). Другая ситуация для Атлантической зоны спрединга

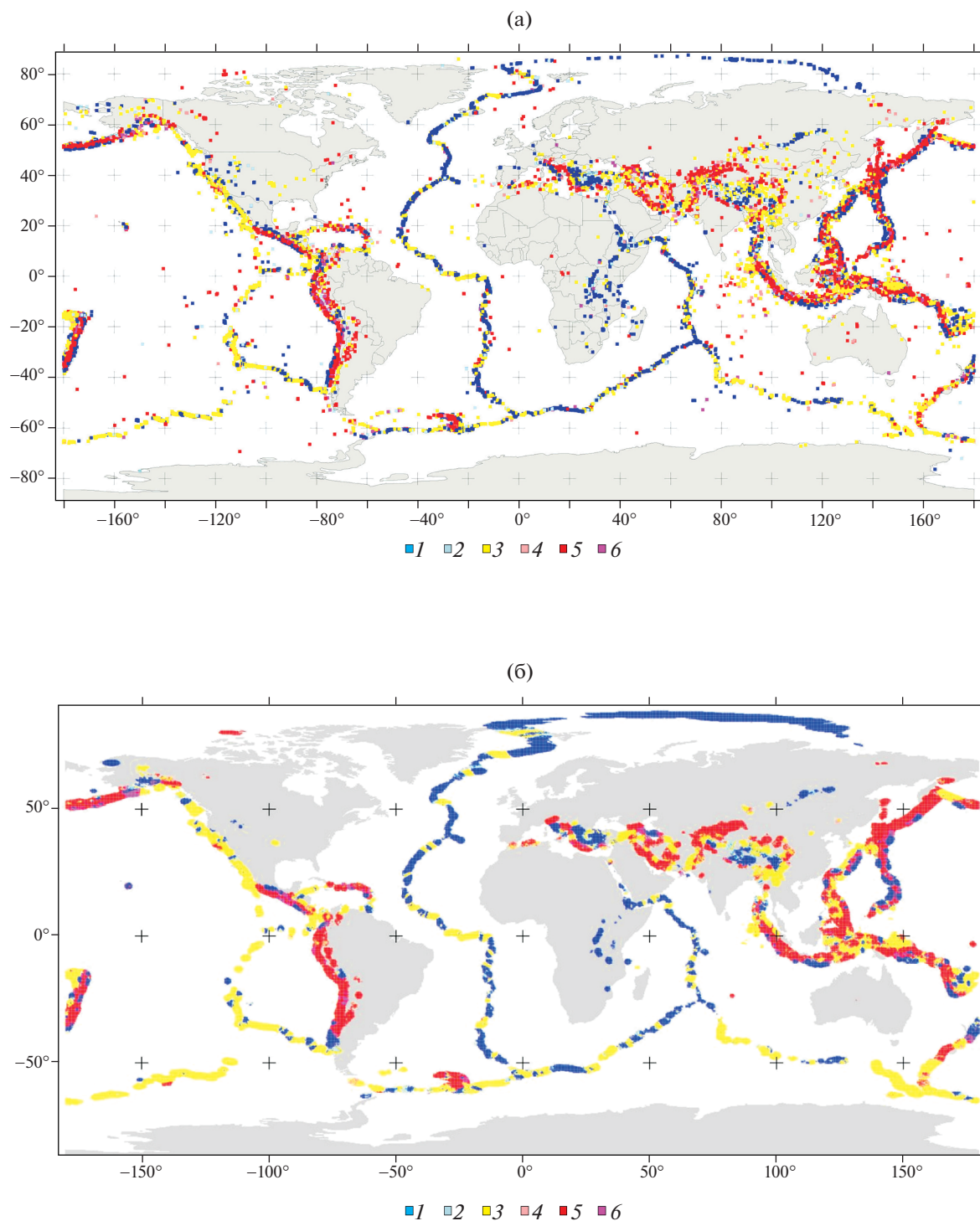


Рис. 4. Геодинамические типы глобального напряженного состояния.

(а) – распределение эпицентров землетрясений, участвовавших в расчетах напряжений, и их кинематический тип: 1 – сброс; 2 – сбросо-сдвиг; 3 – сдвиг; 4 – взбросо-сдвиг; 5 – взброс; 6 – взрез или пологий надвиг

(б) – типы напряженного состояния в узлах сетки расчета:

1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – вертикальный сдвиг

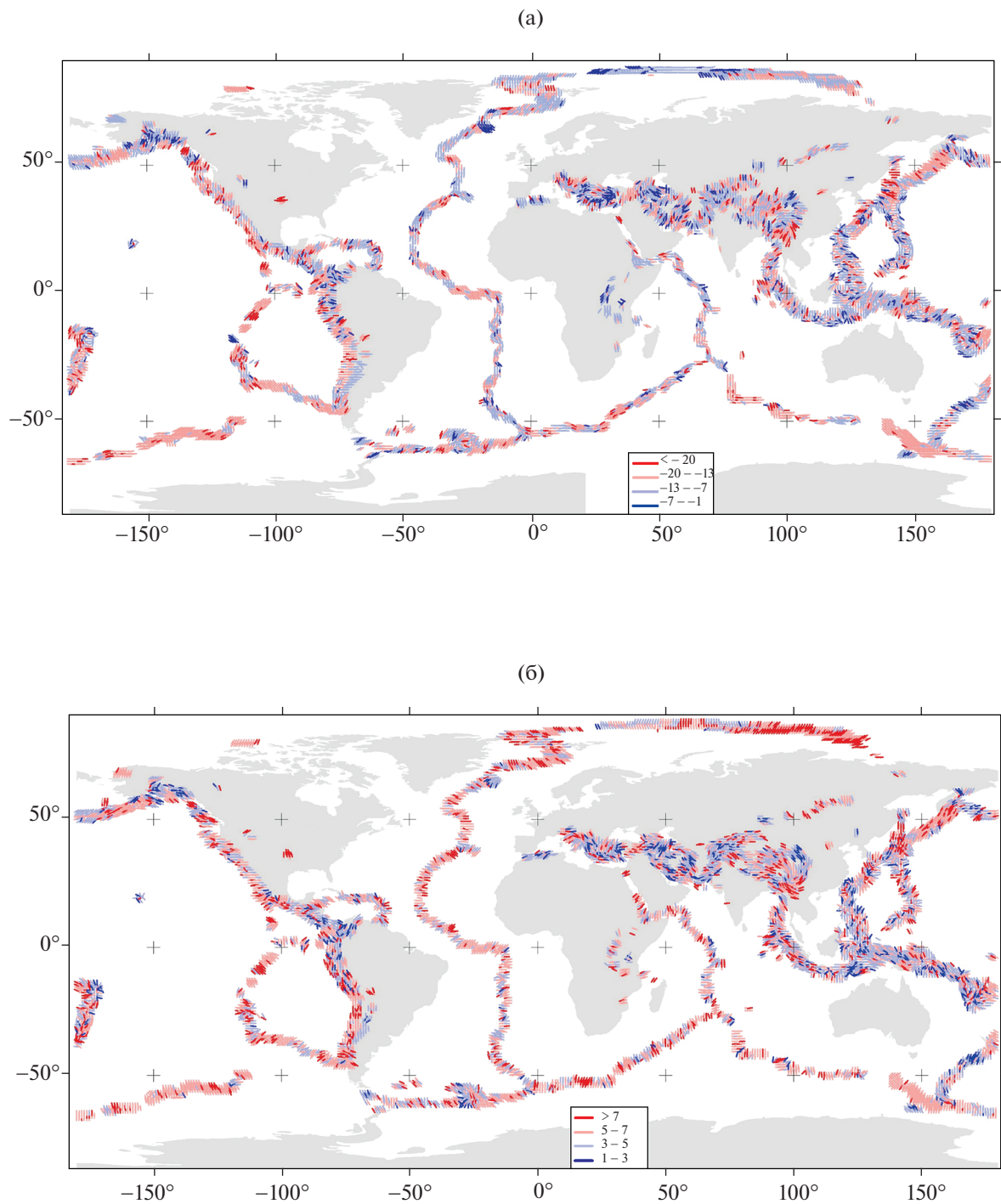


Рис. 5. Ориентация осей наибольшего (а) и наименьшего (б) горизонтального сжатия в узлах прореженной сетки (0.5×0.5 град.). Показаны (цвет): диапазоны значений напряжений максимального горизонтального сжатия (а) и максимального касательного напряжения (б), нормированных на прочность сцепления.

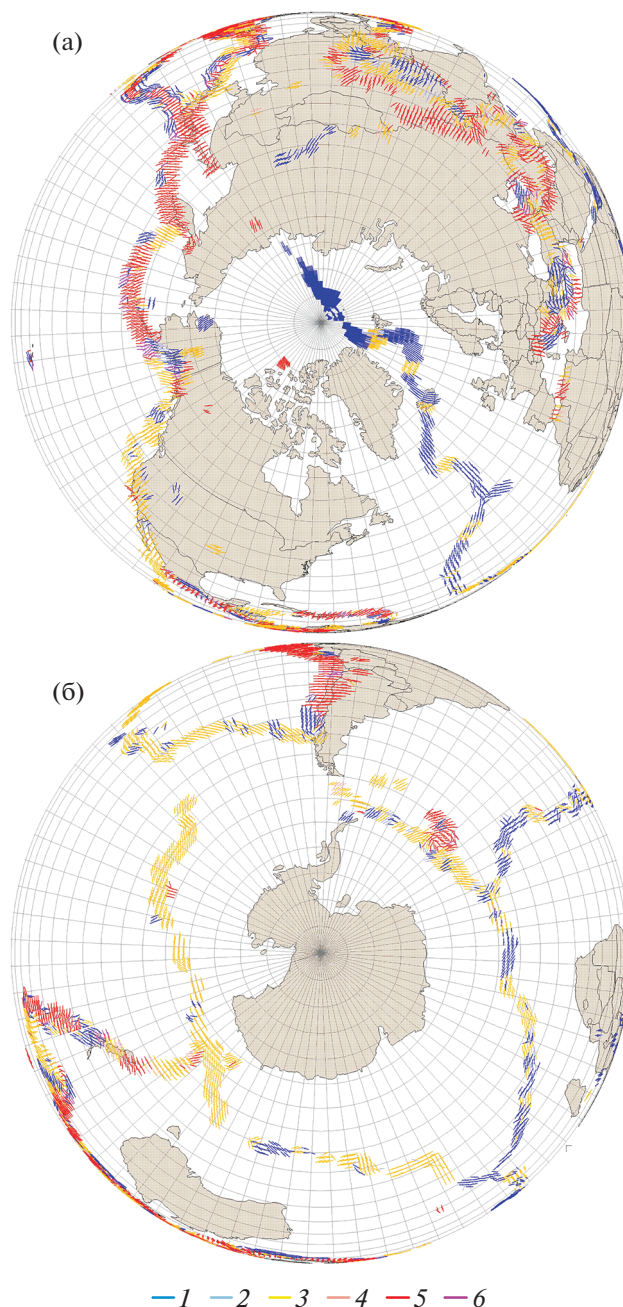


Рис. 6. Ориентация осей максимального горизонтального сжатия в узлах прореженной сетки (0.5×0.5 град.) и геодинамический тип напряженного состояния.

В сферических проекциях: (а) – Арктика, (б) – Антарктика.

1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – вертикальный сдвиг

в северном полушарии, где наиболее длинные и непрерывные участки горизонтального растяжения достигают 1500–2000 км. Наиболее однородное состояние наблюдается для Арктической зоны спрединга, которая без прерывания отвечает режиму горизонтального растяжения. Особенностью этой спрединговой зоны является то, что в

ней практически отсутствуют поперечные трансформные разломы.

В зонах спрединга, ориентация поддвиговых касательных напряжений, возникающих на подошве коры и литосферы, как правило, хаотичная, поэтому стрелки, показывающие устойчивое направление действия этих напряжений, в зонах

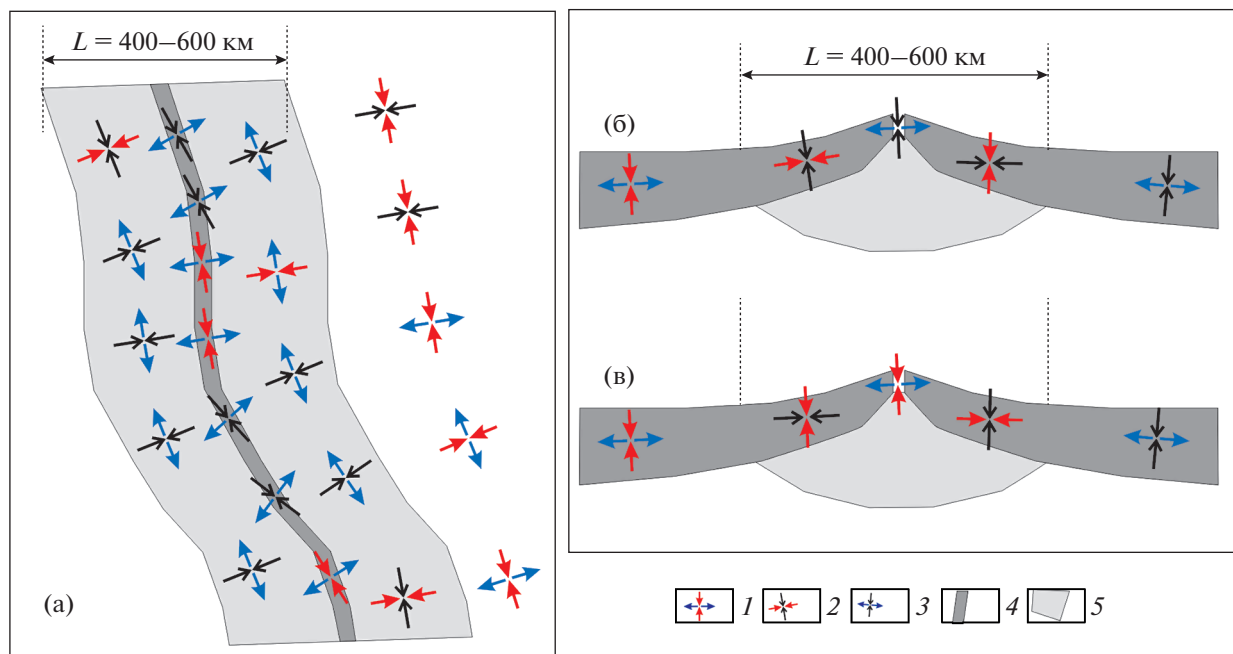


Рис. 7. Схема распределения напряжений вблизи зоны океанского спрединга.

(а) – план, (б) – поперечное сечение на участках горизонтального сдвига, (в) – поперечное сечение на участках горизонтального растяжения.

1 – оси главных напряжений наибольшего и наименьшего сжатия; 2 – оси максимального сжатия и промежуточного главного напряжения; 3 – оси минимального сжатия и промежуточного главного напряжения; 4 – осевая часть зоны спрединга; 5 – аномальная часть земной мантии в зоне спрединга

спрединга изображены только для небольшого числа участков (рис. 8, а). Данный факт объясняется низким уровнем касательных напряжений на горизонтальных площадках из-за того, что одна из главных осей напряжений является субвертикальной (см. рис. 8, б). Показаны поддвиговые касательные напряжения для двух систем ориентаций главных напряжений (см. рис. 8, а, схема). Только для небольших участков направление этих касательных напряжений может быть достаточно выдержанным. Такое устойчивое направление возникает для протяженного сегмента зоны спрединга Индо-Австралийской плиты вблизи экватора. Закономерная направленность поддвиговых касательных напряжений в коре трансформных зон отсутствует, например – в зоне сдвига трансформного разлома Сан-Андреас между тихоокеанской и североамериканской плитами.

Наиболее протяженные трансформные зоны представлены геодинамическими режимами горизонтального сдвига, хотя в них на отдельных участках могут наблюдаться режимы горизонтального растяжения и даже сжатия. Здесь оси максимального горизонтального сжатия составляют с простиранием зоны углы, немногим большие 45° .

Трансформные зоны сочленяются с зонами спрединга с минимальной сменой ориентации осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия.

Активные континентальные окраины

Большая часть зон субдукции имеет однотипное строение поля напряжений вдоль своего простирания и сложное, изменяющееся строение вкрест простирания (см. рис. 5). Исключение из этого правила составляют участки сопряжения зон субдукции с существенно разными азимутами простирания, например, Курило-Камчатская и Алеутская зоны субдукции. Основным является геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сжатия в коре островной дуги и континентального склона с направлением оси максимального горизонтального сжатия ортогонально простиранию дуги (см. рис. 6 и рис. 9). В сопряженной литосфере океанского склона, за тальвегом желоба наблюдается режим горизонтального растяжения с ориентацией оси минимального сжатия вкрест простирания островной дуги.

В ряде случаев, например Филиппинская и Явская островные дуги, зоны субдукции имеют

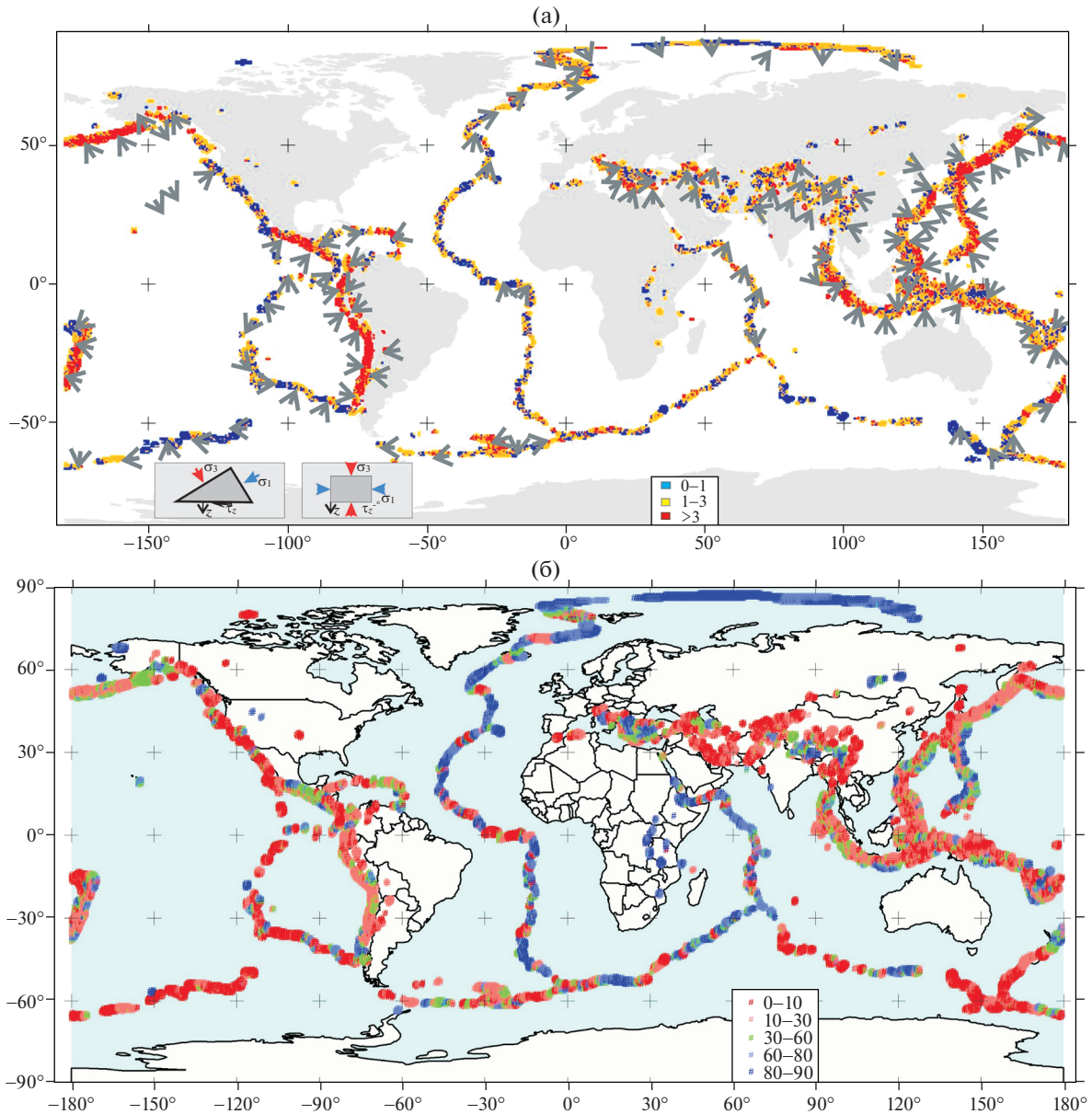


Рис. 8. Карты, определяющие отклонение геодинамических режимов от основных режимов горизонтального сжатия, растяжения и сдвига.
 (а) – касательные напряжения на горизонтальных площадках с нормальными, направленными вниз, нормированные на прочность сцепления;
 (б) – углы погружения осей максимального сжатия.

сложное строение, когда области горизонтального растяжения с обеих сторон ограничивают осевую зону горизонтального сжатия в центральной части островной дуги. При этом направление наибольшего горизонтального сжатия в коре островной дуги ортогонально ее простиранию. В океанской плите за тальвегом желоба и в литосфере задугового прогиба оси этих напряжений становятся параллельными простиранию дуги.

Наличие горизонтального растяжения в океанской литосфере за тальвегом желоба не всегда

может быть выявлено в результатах инверсии напряжений из-за малого числа данных о механизмах очагов землетрясений. Это связано не только с количеством происходящих здесь землетрясений, но и с малым числом сейсмических станций на островах океанов. Оси минимального горизонтального сжатия в океанской литосфере до желоба направлены ортогонально тальвегу желоба. В коре континентального склона эти напряжения параллельны ему и совпадают с ориентацией оси промежуточного главного напряжения.

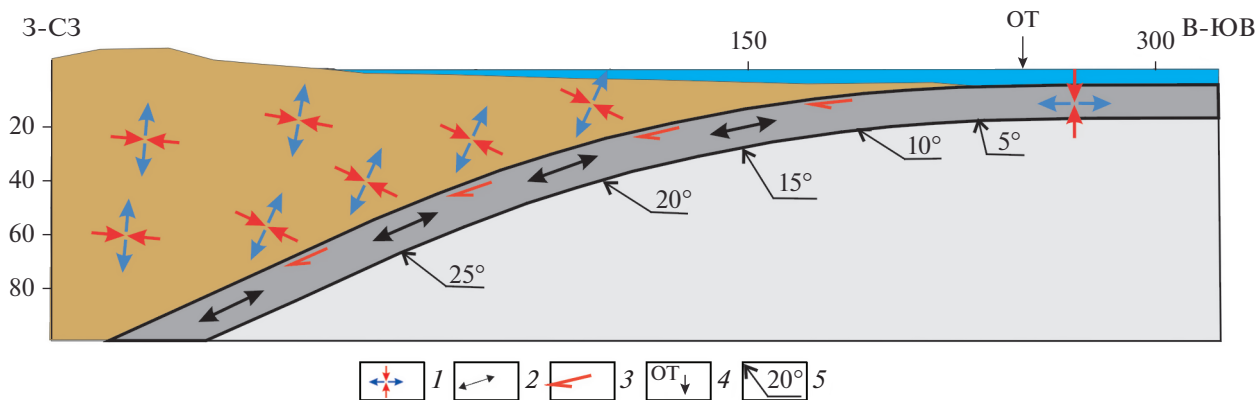


Рис. 9. Схема ориентации осей главных напряжений в континентальном и океаническом склоне зон субдукции с углами погружения литосферной плиты. Показана (пример) зона субдукции Японских островов, размерность по вертикали и горизонтали дана в километрах. 1 – оси максимального девиаторного сжатия и растяжения по результатам инверсии; 2 – предполагаемые оси растяжения в океанской литосфере; 3 – направления действия касательных напряжений на подошве субконтинентальной или континентальной коры; 4 – положение тальвега океанского желоба; 5 – углы погружения океанической литосферы

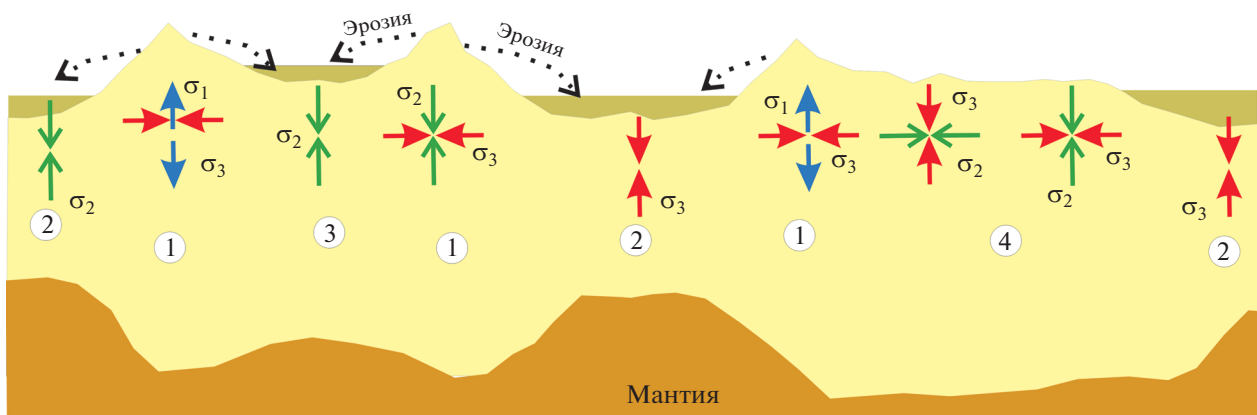


Рис. 10. Схема распределения типов напряженных состояний, определяемых ориентацией главных напряжений, в различных зонах коры континентальных орогенов. 1 – горные поднятия в виде хребтов; 2 – внутригорные впадины и передовые прогибы; 3 – внутригорные впадины, вовлеченные в поднятия; 4 – плато и нагорья

Примером такой закономерности является Южно-Американская зона субдукции.

Оси главных напряжений наибольшего сжатия в коре континентального склона погружаются с углами 20°–30° в направлении океана, а оси главных напряжений минимального сжатия круто погружаются (60°–70°) под континент или островную дугу (см. рис. 9). В коре континентального или субконтинентального склона зон субдукции поддвиговые касательные напряжения строго упорядочены и ориентированы от океана к континенту, что отвечает взаимодействию океанской литосферы и континентальной или субконтинентальной.

Обсуждаемые закономерности напряженного состояния океанской литосферы могут быть объяснены с затягиванием более тяжелой, глубинной

части литосферной плиты и передачей от нее растяжения в приповерхностную область.

Континентальные орогены

Поле глобальных напряжений, полученное в зонах континентальных орогенов из результатов тектонофизической инверсии, не имеет достаточной детальности из-за небольшой плотности эпицентров очагов землетрясений. Произведено обобщение результатов инверсии напряжений для коры континентальных орогенов, выполненных ранее для нескольких регионов Центральной и Юго-Восточной Азии и систематизированных в работе [28] (рис. 10).

В коре горных поднятий с рельефом хребтов наиболее часто имеют место режимы горизонтального сжатия или сдвига (см. рис. 5, см. рис. 10).

В обоих случаях субгоризонтальными являются оси главного напряжения наибольшего сжатия, которые здесь достаточно полого погружаются с углами 10° – 20° . Оси максимального горизонтального сжатия, как правило, ортогональны хребтам, но встречаются регионы, например, горная система Алтай, где это не соблюдается. Для горных поднятий в виде плато и нагорьев геодинамический тип напряженного состояния — горизонтальное растяжение или горизонтальный сдвиг (см. рис. 5, см. рис. 10) при пологом погружении оси главного напряжения наименьшего сжатия 10° – 20° (см. рис. 8, б). В коре внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, наиболее часто представлен режим горизонтального сдвига (см. рис. 5). Для крупных межгорных впадин и передовых прогибов имеет место геодинамический режим горизонтального сдвига или горизонтального растяжения. В обоих случаях субгоризонтальна ось напряжения минимального сжатия, девиаторного растяжения.

Представленные в этом разделе данные позволяют детализировать картину поля напряжений, которая оказалась более сглаженной в результатах глобальной инверсии (см. рис. 6, см. рис. 9, см. рис. 10).

Величины напряжений

После второго этапа метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) на основе геомеханического анализа диаграммы Мора определяются величины напряжений, нормированные на прочность сцепления. Ключевыми данными, позволяющими оценить абсолютные величины природных напряжений, являются динамические параметры землетрясений, представленные в виде сброшенных напряжений в очаге [65]. Опыт ранее выполненных расчетов показывает, что они соотносятся с прочностью сцепления в отношении $1 : 1.2$ – $1 : 1.7$. В силу технологии расчета осей главных напряжений и того, что в МКА для определения величин напряжений используются динамические параметры наиболее сильных региональных землетрясений, усреднение параметров прочности отвечает масштабу земной коры.

Проведенные расчеты показали [29, 65], что основной диапазон изменений напряжений, нормированных на прочность сцепления, составляет около 10–12 единиц при наиболее представительных значениях, отвечающих нормированным напряжениям в 3–5 единиц. Эти закономерности проявляются в зонах с различной геодинамической обстановкой как для коры внутриконтинентальных орогенов, так и для коры зон субдукции литосферных плит. Выполненная реконструкция глобального поля напряжений показала, что это

соотношение верно и для литосферы трансформов и зон спрединга. При этом следует иметь в виду, что величина прочности сцепления, на которую производится нормировка напряжений, зависит от тектоники и геодинамической обстановки.

Анализ сейсмических данных показывает, что величины сброшенных напряжений достаточно сильно вариабельны для слабых и среднесильных землетрясений с $2 < M_w < 6.5$ [41, 42] и менее вариабельны при больших магнитудах межплитных землетрясений [39]. Считалось, что величина сброшенных напряжений в большей степени зависит от тектонического режима [36, 72]. Но современные исследования показывают, что сброс напряжений определяется также и неоднородностью напряженного состояния [56]. При более высокой неоднородности напряжений выше и интенсивность сброшенных напряжений.

На основе данных о величинах сброшенных напряжений в очагах наиболее сильных землетрясений ($M_w > 8.0$), в рамках третьего этапа МКА для разных зон субдукции выполнялась оценка прочности сцепления и на их основе величин напряжений в региональных тектонофизических инверсиях [65]. Уровень сброшенных напряжений для мега-землетрясений переходных зон редко превышает 1 Мпа, стандартным значением является 0.3–0.5 Мпа. Оценки прочности сцепления, выполненные по этим данным, дают значения в диапазоне 1–2 Мпа. Поэтому для коры Курильских остров, Японии и Западного фланга Зондской дуги уровень максимальных касательных напряжений не превышает 7–10 Мпа, при наиболее представительных значениях в диапазоне 2–5 Мпа. Это очень низкий уровень девиаторных напряжений, которому отвечает и низкий уровень эффективного давления (тектоническое давление минус давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород). Используя эти данные, находим, что величина напряжений горизонтального сжатия превышает литостатическое давление не более чем на 5–10 Мпа.

При этом для коры Алтайского орогена по данным о сброшенных напряжениях в 4 Мпа Алтайского землетрясения 2003 г. [29] было получено значение прочности сцепления в 6 Мпа. Из этих оценок следует, что уровень максимальных касательных напряжений составляет 70–120 Мпа при наиболее представительном диапазоне значений в 20–30 Мпа. Таким образом, напряжения горизонтального сжатия в континентальных орогенах превышают литостатическое давление на 40–60 Мпа, что почти на порядок выше этих напряжений на границах литосферных плит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При создании новой глобальной тектоники ее основные положения были связаны с взаимодействием литосферы и астеносферы. В силу большого линейного масштаба литосферных плит во многие тысячи километров одна конвекция в верхней мантии мощностью в 700 км не может рассматриваться как источник сил, определяющий их движение. В работах [18, 33, 34, 48, 66] в качестве энергетического источника движущих сил предлагалось рассматривать общемантийную термогравитационную конвекцию. С другой стороны, существование верхней деплетированной мантии, ответственной за базальты (MORB), и менее истощенной нижней мантии [14, 57] свидетельствует о затрудненном обмене веществом нижней мантии с верхней. Этот факт послужил основой рассмотрения модели двухъярусной конвекции в мантии [8]. В обоих случаях тепловая или термохимическая конвекция в нижней мантии рассматривается как источник движения литосферных плит.

Однако современные данные сейсмотомографии демонстрируют отсутствие простой схемы формирования нисходящей, холодной и восходящей, горячей ветвей единой ячейки тепловой конвекции, когда основной поток тепла идет из ядра Земли [10, 11]. Известно, что фазовые переходы базальтов и габбро в эклогит в литосферной плите, погружающейся в зонах субдукции, создают дополнительную вертикальную силу тяжести, тянущую вниз литосферную плиту. Это неоспариваемые экспериментальные данные, подтвержденные в первых сейсмотомографических изображениях верхней мантии [67, 68]. Современные сейсмотомографические данные показывают также возможность длительного существования на границе 660 км холодной литосферной плиты в виде стагнирующих блоков [9, 10, 61], которые протягиваются от зон субдукции под континент до тысячи километров и, возможно, более [54, 77]. Метаморфические преобразования, происходящие в погружающихся литосферных плитах, формируют дополнительные силы тяжести во всем диапазоне глубин мантии, позволяя плитам достичь подошвы мантии [10, 11, 62]. Погружаясь в нижнюю мантию, литосфера становится источником существования слоя D'' [76], который в сейсмотомографических изображениях формирует два суперплюма (Тихоокеанский и Африканский). Эти суперплюмы рассматриваются как главные источники выноса тепла в верхнюю мантию [15, 16, 62, 75]. Важно отметить, что в сейсмотомографических изображениях не выделяется других единых восходящих ветвей от ядра до зон спрединга, которые можно рассматривать сов-

местно с погружающимися холодными литосферными плитами, как ячейку тепловой конвекции.

Основным источником данных, позволяющим произвести верификацию модельных представлений на глобальную геодинамику, является геологическая и сейсмологическая информация. Далее такая верификация будет сделана на основе данных о закономерности природных напряжений, полученных из тектонофизической инверсии.

Предлагаемая модифицированная модель Эльзассера

Ориентация осей максимального сжатия в континентальном склоне зон субдукции (см. рис. 9) соответствует схеме (см. рис. 2, а), т.е. взглядам Вилсона, которые соответствуют концепции о мантийной конвекции в качестве источника движущих сил литосферных плит. Также им соответствует ориентация напряжений максимального горизонтального сжатия, ортогональная простирацию оси спрединга, в зоне, охватывающей до 1000 км по обе его стороны (см. рис. 7). Далее оси максимального горизонтального сжатия изменяют ориентацию на 90° и становятся параллельными оси спрединга и тальвегу желоба, например Индо-Австралийская плита. Такая их ориентация сохраняется вплоть до зон субдукции.

Таким образом, на расстояниях от оси спрединга более 500 км со стороны этих зон уже не действуют повышенные напряжения горизонтального сжатия. Поэтому во всем этом диапазоне расстояний напряженное состояние в океанской литосфере не соответствует схеме активных движущих сил Вилсона. Растяжение, ортогональное оси спрединга (см. рис. 7) и тальвегу океанского желоба в большей части океанской литосферы (см. рис. 9), прямо указывает на то, что активным механизмом погружения океанской литосферы следует считать тяговое усилие со стороны ее заглубленной, тяжелой части [54], т.е. происходит самозатягивание океанской литосферы по Эльзассеру (см. рис. 2, б).

Если следовать оригинальной концепции Эльзассера, то силы тяги со стороны погружающейся океанской литосферы обязательно должны формировать эффект надвигания континента на океан и отодвигание тальвега океанского желоба в направлении зоны спрединга на фоне поддвига океанской литосферы [9, 10, 18] (рис. 11).

Развивая идею модели Эльзассера, полагаем, что в тех случаях, когда глубоко погруженная часть океанской литосферы относительно полого опускается на границу перехода верхней и нижней мантии, не происходит латерального продвижения литосферы в мантии в направлении под континент. Эта модель движения и деформации

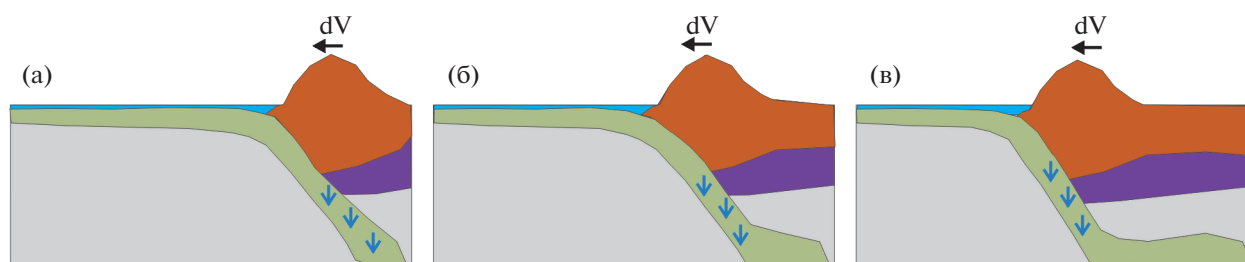


Рис. 11. Схема формирования стагнент-блока в переходной зоне мантии за счет отодвигания тальвега желоба и надвигания островной дуги на океанскую литосферу.

1 – направление движения континентальной литосферы, 2 – дополнительные массовые силы тяжести утяжеленного участка литосферной плиты

литосферной плиты не требует приложения горизонтальных сил, которые в концепции Эльзассера ничем не обеспечены.

Будем далее эту модель именовать как модифицированную модель Эльзассера, главным отличием которой от оригинала является отсутствие латерального движения океанской плиты вдоль границы 660 км. Результаты численного моделирования от действия такого механизма субдукции представлены в работе [45].

Данная модель субдукции, именуемая псевдосубдукцией, по [18, 43], в связи с тем, что отсутствует подвиг океанской литосферы под континентальную литосферу, объясняет формирование пассивных континентальных окраин Атлантики. Здесь активными структурами являются зоны субдукции западной и восточной границ Тихоокеанского сейсмогенного пояса, которые растягивают плиты Атлантики и Индийского океанов. Дополнительное силовое воздействие на этот процесс дает растяжение со стороны субдукции Западного фланга Зондской дуги. Вероятно, именно процесс растяжения вместе с влиянием суперплюма [61] следует считать главным фактором влияния на формирование Африканского рифта.

Даже в отсутствии больших перемещений океанской литосферы в направлении активной континентальной окраины раздвигание в зоне спрединга обеспечивается за счет необходимости сохранения длин больших кругов на сфере Земли.

Полностью противоречат оригинальной модели Эльзассера данные о природных напряжениях коры континентального склона зон субдукции. Здесь оси главных напряжений минимального сжатия (девиаторного растяжения) имеют крутое погружение с углами 70° – 80° в направлении континентальной плиты, при пологом, с углом 10° – 25° , погружении под нее океанской литосферы. Если напряженное состояние в коре континентального склона определяется механизмом надвигания континентальной литосферы на океанскую литосферу, то тогда в континентальной

литосфере должно действовать дополнительное растяжение, ортогональное кровле погружающейся океанской литосферы (см. рис. 2, б). Таким образом, возникает необходимость объяснения факта существования в коре континентального склона надлитостатического уровня напряжений горизонтального сжатия.

Горизонтальное сжатие в коре орогенов и островных дугах

Предлагаемый в виде модифицированной модели Эльзассера механизм формирования напряженного состояния зон субдукции, где в переходной зоне мантии наблюдаются стагнирующие блоки [10, 11, 55, 58], хорошо согласуется с существующим в зонах субдукции низким уровнем девиаторных напряжений, оцененный по результатам тектонофизической реконструкции. То, что величины девиаторных напряжений здесь невелики, подтверждается не только тектонофизическими оценками, но и чисто сейсмологическими данными. Они показывают изменение кинематического типа механизмов очагов землетрясений в области очага Великого Японского землетрясения Тохоку $M = 9.0$ – 9.1 , произошедшего 11 марта 2011 г. До этого землетрясения в коре континентального склона наблюдался режим горизонтального сжатия, при котором в коре континентального склона преимущественно реализовались землетрясения в виде взбросов [64]. После крупного землетрясения в верхней части коры (глубины до 30 км) для большого участка афтершоки имели механизмы в виде сбросов [56, 57]. Выполненная оценка сброшенных напряжений в очаге крупного землетрясения подтверждает наши результаты расчета уровня девиаторных напряжений в зонах субдукции [55, 73].

Таким образом, границы литосферных плит нельзя рассматривать как единственный источник генерации напряжений в коре континентов. Напряженное состояние орогенов обусловлено

не передачей латерального сжатия на большие расстояния, а другими факторами. Какие явления способны объяснить формирование аномально больших сжимающих горизонтальных напряжений в орогенах?

Здесь следует обратить внимание на то, что согласно результатам тектонофизической инверсии напряженное состояние горизонтального сжатия свойственно не любым горным поднятиям. Оно формируется исключительно в тех поднятиях, где морфология рельефа имеет вид хребтов. Для коры внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, этот режим напряженного состояния не типичен. Здесь, как правило, действует режим горизонтального сдвига. Для горных поднятий в виде плато и нагорья наиболее представительны горизонтальное растяжение и сдвиг. Для обоих этих типов напряженных состояний горизонтальное сжатие не превышает вертикального, обусловленного весом горных пород.

Для горных поднятий в виде хребтов и в виде плато принципиальное различие в интенсивности имеют экзогенные процессы. Для склонов хребтов имеется высочайшая скорость эрозии, а для плато и внутригорных впадин — минимальная. Данные фишин-трек анализа показывают, что породы, находящиеся сейчас на склонах хребтов, еще 5–10 млн лет назад были на глубине около 3–4 км (например, для Тянь-Шаня [60] и Кавказа [59]). Это в 5–7 раз больше, чем разница их современного положения на склоне и высоты пика хребтов, которые для Алтая и Тянь-Шаня часто представлены пенепленом [34, 60].

Показано, что аномально высокий уровень напряжений латерального сжатия внутриконтинентальных орогенов связан с денудационно-эрозийными процессами, приводящими к выводу к поверхности пород, которые на глубине были в закритическом состоянии [3, 29, 69]. В таких породах пластические деформации, происходящие на глубине в условиях вертикального уплотнения, приводят к увеличению уровня латерального сжатия. Эти напряжения в два и более раз превосходят напряжения в упругом состоянии, т.е. в породах создается дополнительное горизонтальное сжатие. При выводе породы к поверхности вертикальная нагрузка снимается почти полностью, а значительная часть дополнительного горизонтального сжатия остается. В конечном итоге и горные механики пришли к выводу о том, что аномально горизонтальное сжатие обеспечивается остаточными напряжениями гравитационного напряженного состояния [19–21].

Приведенные данные объясняют, с одной стороны, механизм формирования аномального латерального сжатия в коре континентальных орогенов, с другой стороны, объясняют генезис лате-

рального сжатия в коре островных дуг и горных поднятий, сопряженных с субдуцирующей океанской литосферой. В обоих случаях этот механизм прямо не связан с движениями литосферных плит.

Обобщенная схема глобальных напряжений

Сформулированная интерпретация закономерности распределения природных напряжений в литосфере океанов соответствует модифицированной модели Эльзассера. Важным выводом из этой интерпретации является отсутствие горизонтального продвижения погружающейся литосферной плиты и объяснение формирования стагмент-блоков надвиганием континента или островной дуги на океанскую литосферу. Для зон субдукции и континентов она дополняется влиянием остаточных напряжений, возникающих в результате действия экзогенных процессов и выведения горных пород с больших глубин ближе к поверхности. Для островных дуг процесс эскарпогенеза, определяющий эрозию поверхности островов и снос эродированного материала в океанический желоб, может за несколько миллионов лет неоднократно полностью изменять топографию островов, выводя к поверхности породы с глубин 1–3 км [8].

Формирование стагмент-блоков преимущественно наблюдается для зон субдукции с высокой скоростью погружения океанской литосферы. Вероятной причиной длительного нахождения стагмент-блоков на глубине переходной зоны является большое содержание воды в литосфере. После определенного периода времени и освобождения стагмент-блоков от излишков воды они под действием силы тяжести проваливаются в нижнюю мантию. Оценки показывают, что возникающие дополнительные вертикальные напряжения могут достигать 4–6 Мпа. Факт длительного существования стагмент-блоков показывает, что нижняя мантия обладает упругой текучестью с уровнем предельных напряжений не менее 2–3 Мпа.

Предложенная интерпретация показывает, что влияние плюмов на напряженное состояние литосферы может быть либо достаточно локальным в зонах вулканических островов, либо региональным в моменты мощных магматических процессов и континентального рифтогенеза, определяя формирование геодинамического режима горизонтального растяжения с ориентацией оси максимального сжатия в субвертикальном направлении. В современной геодинамике подобные режимы должны формироваться в литосфере над двумя — Африканским и Тихоокеанским — суперплюмами.

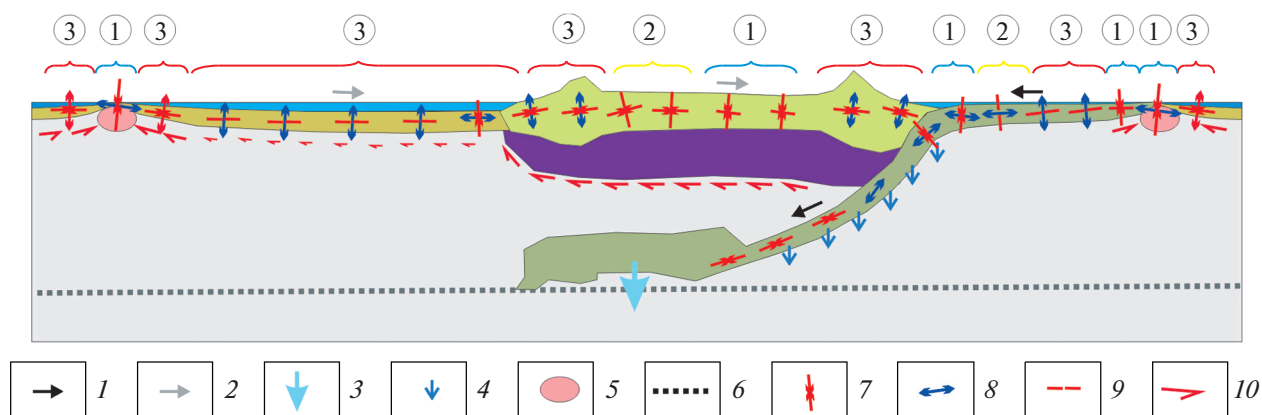


Рис. 12. Обобщенная схема напряжений в литосфере, вызванных механизмом затягивания утяжеленной и погруженной части литосферной плиты, накатыванием континента на океанскую плиту и остаточными напряжениями горизонтального сжатия, формирующимися в результате эрозии склонов хребтов. Объединены (фигурные стрелки) участки одного геодинамического типа напряженного состояния с одинаковой ориентацией двух главных напряжений, действующих в субгоризонтальном направлении ортогонально и вдоль простирания структуры (цифры в кружках): 1 – горизонтальное растяжение, 2 – горизонтальный сдвиг, 3 – горизонтальное сжатие. 1 – направление движения литосферной плиты, вызванные тягой со стороны погруженной литосферной плиты; 2 – направление движения континента и сочлененной с ним океанской литосферы, обусловленное механизмом надвигания континентальной литосферы на океаническую литосферу; 3 – вертикальная сила тяги со стороны погруженной части литосферной плиты; 4 – массовые силы тяжести утяжеленного участка литосферной плиты; 5 – аномальная мантия, формирующаяся за счет декомпрессии; 6 – граница переходной зоны в мантии; 7–9 – главное напряжение сжатия: 7 – наибольшего, 8 – наименьшего, 9 – промежуточное; 10 – направления касательных напряжений, действующих на подошве литосферы

Предложенная концепция генерации напряжений в литосфере позволяет создать схему распределения коровых напряжений, включающую в себя континентальную литосферу с активной и пассивной континентальной окраиной и сочлененные с ней океанские литосферы с их зонами спрединга (рис. 12). На такой схеме показаны ориентации осей главных напряжений и геодинамические типы напряженного состояния. Эта схема соответствует всем представленным данным, полученным по результатам тектонофизической инверсии напряжений.

ВЫВОДЫ

1. Глобальное поле коровых напряжений Земли, полученное по результатам тектонофизической инверсии, позволило оценить достоверность двух механизмов активного воздействия, обуславливающего движение литосферных плит, – модели Вильсона и модели Эльзассера. Установлено, что распределение осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия и растяжения соответствует механизму пассивного раздвигания зоны спрединга. Результаты оценки величин напряжений показывают, что движения литосферных плит могут создавать дополнительные напряжения горизонтального сжатия, превышающие вертикальные напряжения, вызванные силой тяжести, не более чем на 5–10 Мпа, однако этого

недостаточно для объяснения аномально высоких напряжений горизонтального сжатия в коре континентальных орогенов.

2. Характер напряженного состояния в зонах субдукции показывает, что силу тяги со стороны погруженной и утяжеленной части литосферы, находящейся на глубинах более 100 км, следует рассматривать как одну из главных причин движения плит (см. рис. 1, б). Предлагается модифицированная модель Эльзассера зон субдукции там, где в переходной зоне мантии наблюдаются стагнирующие блоки. Латеральные надвиговые движения континентальной литосферы в зонах субдукции связаны с отодвиганием океанского желоба в направлении Срединно-океанического хребта. Возможно также существование иных факторов, определяющих латеральные движения литосферных плит, не связанных с мантийной термогравитационной конвекцией [1], но в данной работе они не рассматривались.

3. Повышенный уровень напряжений горизонтального сжатия в коре континентальных орогенов не связан с дальнедействием напряжений, формирующихся на границах плит. Генезис надлитоэстатических значений латеральных напряжений обусловлен остаточными напряжениями, возникающими после подъема к поверхности пород с глубин 2–3 км и более. Это явление также возникает и в результате эскарпогенеза континентального склона в островной дуге зон субдук-

ции, определяя повышенный уровень напряжений горизонтального сжатия.

Благодарности. Автор выражает большую благодарность акад. Н.Л. Добрецову (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) и акад. М.И. Эпову (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) – организаторам Всероссийских семинаров “Геодинамика, геомеханика и геофизика” (г. Новосибирск, Россия), в рамках которых представленная работа была инициирована и прошла многократное обсуждение. Автор искренне признателен акад. К.Е. Дегтяреву (ГИН РАН, г. Москва, Россия), проф. В.Г. Трифонову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и акад. В.В. Ярмолюку (ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия) за обсуждение и полезные рекомендации.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-05-01193а, 16-05-01115а, 19-55-53025 ГФЕН_а; работа выполнена в рамках Госздания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авсюк Ю.Н.* Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
2. *Васильев Н.Ю., Мострюков А.О.* Особенности рудолокализирующих условий деформации геологической среды в характеристиках тектонических полей напряжений / Мат-лы XL Тектонического совещания “Фундаментальные проблемы геотектоники”. М.: ГЕОС. 2007. Т. 1. С. 126–130.
3. *Гзовский М.В.* Соотношение между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре // Разведка и охрана недр. 1956. № 11. С. 7–22.
4. *Гудман Р.* Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
5. *Гуценко О.И.* Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. Сер. геофиз. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560.
6. *Гуценко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений / В кн.: Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25.
7. *Гуценко О.И.* Кинематический метод определения параметров напряжений и характеристика их связей с тектоническими движениями по разрывам разных структурных уровней. – Автореф. дис. ... к. г.-м.н. М.: ИФЗ, 1981. 21 с.
8. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика. – Новосибирск: Гео, 2001. 2-е изд. 409 с.
9. *Ермаков В.А.* Островные дуги и их роль в эволюции континентальной окраины (новый взгляд на известные факты) // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 3–18.
10. *Жарков В.Н.* Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
11. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет / В кн.: Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: Наука и образование, 2013. 414 с.
12. *Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев В.М.* Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. М.: Недра, 1976. 231 с.
13. *Копп М.Л.* Новейшие деформации Скифской и юга Восточно-Европейской плит как результат давления Аравийской плиты // Геотектоника. 2000. № 2. С. 26–42
14. *Кузьмин М.И.* Тектоника литосферных плит и геохимия / В кн.: Современные проблемы теоретической и прикладной геохимии. Новосибирск: Наука, 1987. С. 19–26.
15. *Кузьмин М.И., Ярмолук В.В.* Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 153–184.
16. *Кузьмин М.И., Ярмолук В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 11–30.
17. *Леонов Ю.Г.* Континентальный рифтогенез: современные представления, проблемы и решения / В кн.: Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 155–173.
18. *Лобковский Л.И., Котелкин В.Д.* Двухъярусная термохимическая конвекция в мантии и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 29–53.
19. *Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 610 с.
20. *Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 211 с.
21. *Марков Г.А.* О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры // Инженерная геология. 1980. № 1. С. 20–30.
22. *Марков Г.А.* Закономерности распределения тектонических напряжения в верхней части земной коры. Новые данные и практические приложения / В кн.: Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявлений избыточной напряженности. Апатиты: КНЦ АН СССР. 1985. С. 72–84.
23. *Мухамедиев Ш.А.* Методы локальной реконструкции тектонических напряжений по кинематическим данным: физическая несостоятельность и ложные цели. Ч. I // Физика Земли. 2018. № 6. С. 3–36.
24. *Николаев П.Н.* Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических на-

- пряжений. // Изв. ВУЗов. Сер. Геол. и разведка. 1977. № 12. С. 113–127.
25. Новая глобальная тектоника / Л.П. Зоненшайн, А.А. Ковалев (ред.). М.: Мир, 1974. 182 с.
 26. Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шукин С.И. Разломная тектоника и неотектонические напряжения в районе Стрельцовской кальдеры, ЮВ Забайкалье // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 4. С. 310–320.
 27. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматитов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 2. С. 95–117.
 28. Петров В.А., Нью Анфу, Смирнов В.Б., Мострюков А.О., Ли Зхиксионг, Пономарев А.В., Джиянг Зайсен, Шен Ксиху. Поле тектонических напряжений по механизмам очагов землетрясений и современные движения земной коры по данным GPS-измерений для территории Китая // Физика Земли. 2008. № 10. С. 101–112.
 29. Ребецкий Ю.Л. Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. Вып. 4. С. 437–466.
 30. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины, Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 4. С. 263–280.
 31. Сим Л.А. Неотектонические напряжения Восточно-европейской платформы и структур обрамления. – Автореф. дис. ... д. г.-м.н. М.: МГУ, 1996. 41 с.
 32. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир, 1985. Т. 1. 374 с.
 33. Трубицын В.П. Реология мантии и динамическая теория тектоники литосферных плит // Физика Земли. 2012. № 6. С. 3–22.
 34. Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция с плавающими континентами / В сб.: Проблемы глобальной геодинамики / Д.В. Рундквист (ред.). М.: ГЕОС, 2000. С. 7–28.
 35. Чедия О.К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1986. 315 с.
 36. Штейнберг В.В. О параметрах очагов и сейсмическом эффекте землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 7. С. 49–63.
 37. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.
 38. Ясаманов Н.А. Современная геология. М.: Недра, 1987. 191 с.
 39. Allmann B.P., Shearer P.M. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. B01310.
 40. Baltay A., Ide S., Prieto G., Gregory Beroza G. Variability in earthquake stress drop and apparent stress // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. P. L06303.
 41. Billen M. Slab dynamics in the transition zone // Phys. Earth Planet. Inter. 2010. Vol. 183. P. 296–308.
 42. Boatwright J., Choy G.L. Teleseismic Estimates of the Energy Radiated by Shallow Earthquakes // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91(B2). P. 2095–2112.
 43. Bott M.H.P. The mechanics of oblique slip faulting // Geol. Mag. 1959. № 96. P. 109–117.
 44. Bouysse Ph., Westercamp D. Effect de la subduction de rides oceaniques sur l'evolution d'un arc insulaire: l'exemple des Petites Antilles // Geol. France. 1988. № 2–3. P. 3–38.
 45. Brown L., Wang K., Sun T. Static stress drop in the Mw 9 Tohoku-oki earthquake: Heterogeneous distribution and low average value // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. № 24. P. 10595–10600.
 46. Cížková H., Bina C.R. Effects of mantle and subduction-interface rheologies on slab stagnation and trench rollback // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. Vol. 379. P. 95–103.
 47. Davies G.F. Dynamic Earth. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, GB, 1999), 458 p.
 48. Davies G.F., Richards M.A. Mantle convection // J. Geology. 1992. Vol. 100. P. 151–206.
 49. De Grave J., Glorie S., Buslov M.M., Izmer A., Fournier-Carrie A., Batalev V.Yu., Vanhaecke F., Elburg M., Van den Haute P. The thermos-tectonic history of the Song-Kul plateau, Kyrgyz Tien Shan: Constraints by apatite and titanite thermochronometry and zircon U/Pb dating // Gondwana Res. 2011. Vol. 20. P. 745–763.
 50. Elsasser W.M. Convection and stress propagation in the upper mantle // In: The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors, Ed. by S.K. Runcorn, (Wiley, NY, USA, 1969), P. 223–246.
 51. Elsasser W.M. Two-layer model of upper-mantle circulation // J. Geophys. Res. 1971. Vol. 76. Is. 5. P. 1101–1112.
 52. Eötvös L. Verhandlungen der 17. Allgemeinen Konferenz der International en Erdmessung. Teil I. Berlin, 1913. S. 111.
 53. Epstein P.S. Über die Polflucht der Kontinente. Die Naturwissenschaften. 1921. Vol. 9. № 25. P. 499–502.
 54. Fukao Yu., Obayashi M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity // Solid Earth. 2013. Vol. 118. P. 5920–5938. <https://doi.org/10.1002/2013JB010466>
 55. Forsyth D.W., Uyeda S. On the relative importance of driving force of plate motion // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1975. Vol. 43. P. 163–200.
 56. Goebel T.H.W., Hauksson E., Plesch A., Shaw J.H. Detecting Significant Stress Drop Variations in Large Micro-Earthquake Datasets: A Comparison Between a Convergent Step-Over in the San Andreas Fault and the

- Ventura Thrust Fault System, Southern California // Pure Appl. Geophys. 2017. Vol. 174. P. 2311–2330.
57. *Hardebeck J.* Coseismic and postseismic stress rotations due to great subduction zone earthquakes // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39 P. L21313.
58. *Hasegawa A., Yoshida K., Asano Y., Okada T., Inuma T., Ito Y.* Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake // Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 355. P. 231–243.
59. *Holmes A.* Radioactivity and earth movements // Geol. Soc. Glasgow Trans. 1931. Vol. 18. P. 559–606.
60. *Kral J., Gurbanov A.G.* Spaltspure-Alterswerte von Apatite aus dem voralpinen Grundgebige des Groben Kaukasus // Chem. Erde. 1996. Vol. 56. P. 177–192.
61. *Makarov V.I.* Neotectonics and geodynamics of mountain systems of Central Asia // Quaternary Int. 1995. Vol. 25. P. 19–23.
62. *Maruyama S., Santosh M., Zhao D.* Superplume, supercontinent, and postperovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core–mantle boundary // Gondwana Res. 2007. Vol. 11. № 1–2. P. 7–37.
63. *O’Nions R.K., Hamilton P.J., Evensen N.M.* The chemical evolution of the Earth’s mantle // Sci. Amer. 1980. Vol. 202. № 5. P. 91–101.
64. *Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu.* The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. Moment Tensor Solutions – A Useful Tool for Seismotectonics / Ed. by S. D’Amico, (Springer, N.Y., USA, 2018), P. 111–162.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6
65. *Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Kuchay O.A., Sycheva N.A.* The stress state of seismic areas of the Central and Eastern Asia. Moment Tensor Solutions – A Useful Tool for Seismotectonics / Ed. by S. D’Amico, (Springer, N.Y., USA, 2018), P. 519–556.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_23
66. *Schubert G., Turcotte D.L., Olson P.* Mantle Convection in the Earth and Planets. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, GB, 2004), 940 p.
67. *Spakman W.* Upper mantle delay time tomography / Thesis, Geol. Ultrajectina. Vol. 53, (Univ. Utrecht, Utrecht, 1988), 200 p.
68. *Spakman W., Stein S., van der Hilst R., Wortel R.* Resolution experiments For NW Pacific subduction zone tomography // Geophys. Res. Lett. 1989. Vol. 16. № 10. P. 1097–1100.
69. *Uyeda S.* Subduction zones: an introduction to comparative subductology // Tectonophysics. 1982. Vol. 81. P. 133–159.
70. *Voight B., St Pierre B.H.P.* Stress history and rock stress / 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mechanics. Denver. Proc. 1974. Vol. 2. P. 580–582.
71. *Wallace R.E.* Geometry of shearing stress and relation to faulting // J. Geol. 1951. № 59. P. 18–130.
72. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bul. Seism. Soc. Amer. 1994. Vol. 84. № 4. P. 974–1002.
73. *Wilson J.T.* Did the Atlantic close and then re-open? // Nature. 1966. Vol. 211. P. 676–681.
74. *Xie Z., Cai Y.* Inverse method for static stress drop and application to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake // J. Geophys. Res. Ser. Solid Earth. 2018. Vol. 123. P. 2871–2884.
75. *Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E.* Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // J. Asian Earth Sci. 2014. Vol. 93. P. 158–179.
76. *Yuen D.A., Maruyama S.H., Karato S.I., Windley B.F.* Superplumes: Beyond plate tectonics. (Springer, NY, USA, 2007), pp. 569.
77. *Zhao D.* Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes // Gondwana Res. 2007. Vol. 12. P. 335–355.
78. URL: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch> (Accessed March 27, 2020).

Pattern of Global Crustal Stresses of the Earth

Yu. L. Rebetsky*

Schmidt Institute of physics of the Earth, RAS, B. Gruzinskaya str. 10, 123242, Moscow, Russia

**e-mail: reb@ifz.ru*

The results of tectonophysics inversion of the global tectonic stress field presented in this paper are considered from the position of explaining the active forces that cause the movement of lithospheric plates. The analysis of regularities of the stress state of the main structural elements of the earth’s lithosphere – oceanic spreading, transformations, active continental margins, and intracontinental orogeny is performed. It is shown that the stresses in most of the lithosphere of oceanic plates, including subduction zones, correspond to active traction forces from the submerged and weighted slab. A low level of deviatoric stress in subduction zones and the presence of a dynamo-pair with a sharply different stress state in the crust of the continental slope (horizontal compression) and in the ocean lithosphere (horizontal tension) have been established. Thus, the boundaries of lithospheric plates should not be considered as a source of stress of increased horizontal compression in the crust of continents. The formation of a horizontal compression regime in the crust of intracontinental orogens, as well as in the crust of active continental margins orogens, is associated with residual stresses of rocks undergoing exhumation due to the simultaneous action of two processes of erosion of the slopes of

mountain elevations and their continuing uplifting. A generalizing scheme of the global crustal stress field of the Earth is given. The planetary regularity of stress distribution corresponds to the concept of the mechanism of movement of lithospheric plates along the Elsasser. The results of tectonophysical inversion of the global tectonic stress field are considered from the position of explaining the active forces that cause the movement of lithospheric plates. The analysis of regularities of the stress state of the main structural elements of the earth's lithosphere – ocean spreading, transformations, active continental margins, and intracontinental orogeny is performed. It is shown that the stresses in most of the ocean lithosphere, including subduction zones, correspond to active traction forces from the submerged and weighted part of the lithosphere. A low level of deviatoric stresses in subduction zones and the presence of a dynamo pair with sharply different mode of stress state were found. Horizontal compression is observed in the crust of the continental slope, and horizontal stretching is observed in the ocean lithosphere, so the boundaries of lithospheric plates should not be considered as a source of stress of increased horizontal compression in the crust of continents. The formation of a horizontal compression regime in the crust of intracontinental orogenes, as well as in the crust of active continental margins orogenes, is associated with residual stresses of rocks that have been exhumed from the depths of the crust. A generalizing scheme for the formation of the global crustal stress field of the Earth is proposed, which corresponds to modern data on the movements of lithospheric plates and the deep structure of the upper mantle.

Keywords: earthquake focal mechanisms, tectonic stress, the Genesis of voltages, invert voltages, the driving forces, lithospheric plate