ТИХООКЕАНСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

№ 4 1991

М. И. Стрельцов

СДВИГОВАЯ ТЕКТОНИКА И МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОСТРОВНЫХ ДУГ

Структурно-геологические характеристики островодужных ассоциаций позволяют обсуждать принадлежность эшелонных разрывов островных дуг или к сколам типа Риделя, или к трещинам отрыва, или к дилатантным трещинам обрамления, а относительно пликативных дислокаций заключить, что их эшелонная структура связана с проявлениями драпирующей складчатости. Вне зависимости от того, к какой из отмеченных групп дизъюнктивов будут принадлежать кулисообразно расположенные разрывы, характер их эшелонирования однозначно указывает, что левые и правые фланги островных дуг (наименование флангов определяется наблюдателем, смотрящим на дугу из центра соответствующей ей окружности) характеризуются соответственно правыми и левыми сдвиговыми смещениями по продольным срединно-дуговым разломам. Эти закономерности сдвиговой тектоники противоречат широко распространенным представлениям о явлениях «косой субдукции» в островодужных регионах и удовлетворительно объясняются, если представить механическую модель островной дуги в виде изгибающегося слоистого бруса.

Сам факт эшелонного расположения структур в островных дугах бесспорен и, казалось бы, анализ сдвиговой тектоники дуг, опирающийся на данные о вполне определенных соотношениях кулисообразных структур со сдвиговыми дислокациями [33], не должен вызывать особых осложнений. Тем не менее, исключительное многообразие точек зрения по этому вопросу свидетельствует об обратном. Представляется, что основная причина сложившейся ситуации кроется в противоречивости тектонической интерпретации кулисообразно расположенных структурных элементов. Так, одни и те же звенья одного и того же эшелонного ряда структур (например, южной части Большой Курильской гряды островов) определялись и как осевые линии складок [7, 11, 13, 49, 53 и др.] и как линии надвигов (?) [53], и как сколы Риделя [25], и как трещины сжатия [43], и как разломы, образовавшиеся в условиях растяжения [1, 11, 26].

Рассмотрим перечисленные точки зрения, стремясь, по возможности, оставаться вне влияния на ход суждений глобальных геотектонических концепций, которые в силу своей привлекательности зачастую вольно или невольно «подводят» исследователей, мешая им непредвзято относиться к имеющимся данным. По-видимому, в подобном положении оказался С. Каизука (рис. 1). По его мнению, там, где вектор движения океанической плиты перпендикулярен простиранию островных дуг (дуга северо-восточной части о. Хонсю, северная часть Курило-Камчатской островной дуги), продольные сдвиги и кулисообразное расположение структурных элементов, согласно модели «косой субдукции», должны отсутствовать, и их действительно нет на приведенной схеме, а, между тем, именно эшелонная структура неоднократно отмечалась как характернейшая черта строения указанных регионов (рис. 2). «Не заметил» эшелонной структуры северной части Курило-Камчатской дуги и В. А. Леглер [13—15], хотя и считал, в отличие от С. Каизуки, что обоим флангам этой дуги свойственны проявления «косой субдукции». Он посчитал представления [27] об эшелонном расположении рядов вулканов Восточно-Камчатского вулканического пояса ошибочными, ибо они позволили сделать вывод «...о правостороннем продольном сдвиге на Камчатке, что противоположно действительному» [13, с. 137].

Каково же все-таки действительное направление сдвиговых перемещений по продольным разломам островных дуг? Полагая, что ответ на этот вопрос можно получить, лишь выяснив структурно-геологическую природу эшелонированных элементов островных дуг, начнем обзор существующих на этот счет точек зрения с появившихся первыми представлений о кулисообразно расположенных островах и горных хребтах как о складках.

Первым высказался в пользу именно такой тектонической интерпретации геоморфологических элементов С. Токуда [53], который полагал, что вулканические цепочки располагаются на о. Хоккайдо вдоль третичных складок или надвигов (?). Заметив затем, что кулисы четвертичных вулканов Курильских островов параллельны структурам о. Хоккайдо, он заключил, что и острова, и кулисообразно расположенные на них хребты являются антиклиналями. Однако более поздними исследованиями точка зрения о параллельности вулканиче-

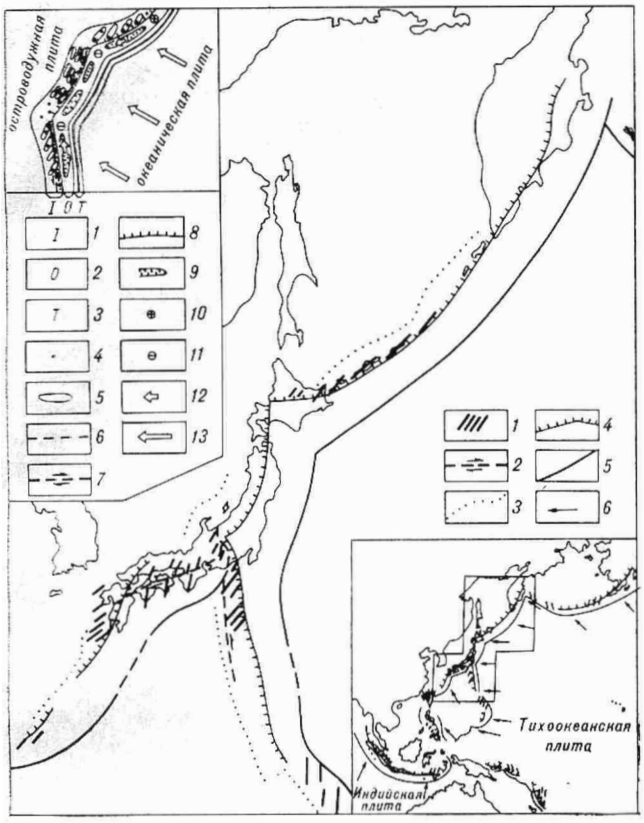

Рис. 1. Некоторые черты тектоники островных дуг [46].

Справа, внизу — обзорная схема: *1* — эшелонированные хребты, *2* — срединно-дуговые сдвиги, *3* — внутренняя граница вулканической дуги, *4* — вулканический фронт, *5* — ось желоба, *6* — движения плиты относительно островной дуги; слева, вверху — тектоническая модель систем дуга — желоб: *1* — внутренняя вулканическая дуга, *2* — внешняя вулканическая дуга, *3* — желоб и его осевая линия, *4* — вулканы, *5* — хребты внутренней дуги, *6* — разломы со смещением по падению, *7* — срединно-дуговые сдвиги, *8* — вулканический фронт, *9* — поднятия внешней дуги, *10* — положительные гравитационные аномалии, *11* — отрицательные гравитационные аномалии, *12* — движения внешней дуги относительно вулканической зоны, *13* — движения океанической плиты относительно островодужной.

ских цепей и складчатых структур о. Хоккайдо не подтвердилась. Например, отчетливо выраженный ряд вулканов п-ова Сиретоко имеет северо-восточное простирание, тогда как осевые линии складок этого же района ориентированы в север-северо-восточном направлении [47].

Многие исследователи и в настоящее время придерживаются воззрений С. Токуды на прямую связь пликативных дислокаций и геоморфологических элементов, но какие-либо новые доказательства в пользу этой точки зрения обычно не приводятся. «Антиклинали-острова разделяются синклиналями-проливами»,— так охарактеризовал структуру Большой Курильской гряды А. В. Горячев [7, с. 81], на что К. Ф. Сергеев, подробно рассмотревший строение островодужных кайнозойских комплексов, вполне резонно заметил: «...антиклинальная структура островных глыб в большинстве случаев представляется по меньшей мере проблематичной» [24, с. 90] и «...острова представляют собой совокупность тектонических блоков, в которых обнаружены фрагменты как антиклинальных, так и синклинальных структурных форм» [Там же, с. 137]. Полностью разделяя взгляды К. Ф. Сергеева, нельзя все

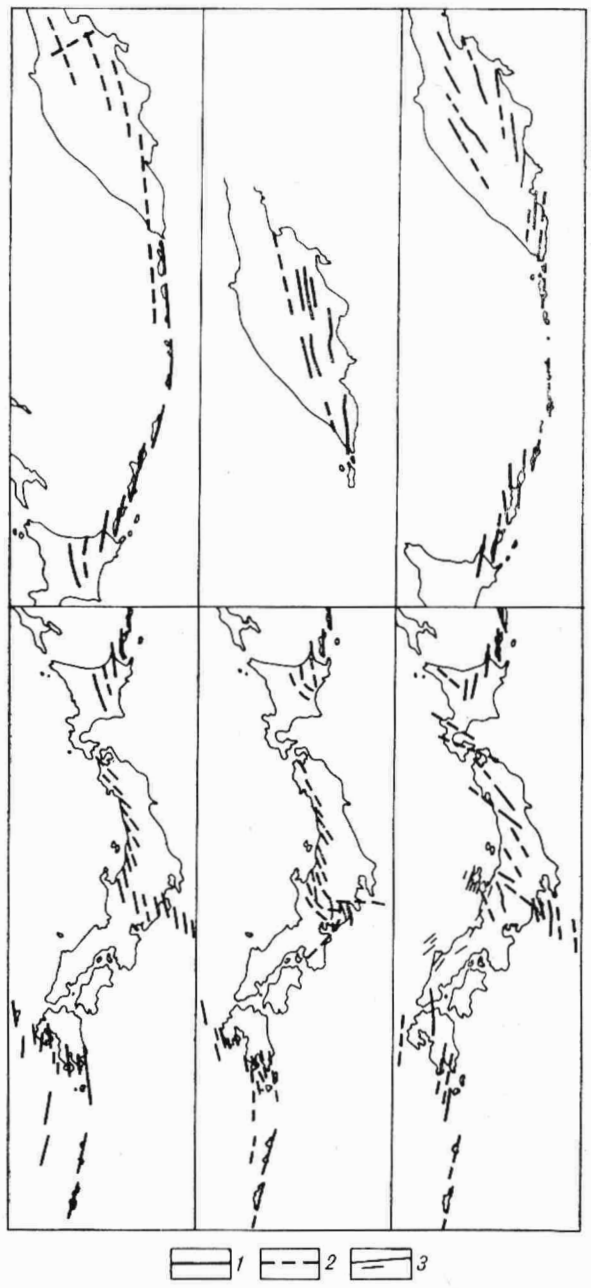

Рис. 2. Эшелонное строение островных дуг.

Слева — данные С. Токуды [53]; центр: вверху — разломы и эшелонные ряды вулканов Камчатки [8]; внизу — эшелонные структуры Японии [4]; справа — осевые линии зон повышенной проницаемости земной коры в квартере [27, 30]. *1*, *2* — установленное (*1*) и предполагаемое (*2*) положение осей эшелонированных структур, *3* — раннемиоценовые глубокие трещины, с которыми связано излияние андезитов [4].

же забывать, что складчатые и разрывные нарушения островов Большой Курильской гряды в значительной своей части перекрыты продуктами четвертичного вулканизма.

Этого «недостатка» лишены Командорские острова, которые, по мнению А. В. Горячева [7], также представляют фрагменты двух крупных складок северо-западного простирания. С. Каизука [46] рассматривал их в составе правостороннего эшелонированного ряда хребтов. Если интерпретировать хребты вслед за С. Каизукой как структуры сжатия, то подобное их расположение могло бы свидетельствовать о левостороннем сдвиге вдоль западного фланга Алеутско-Аляскинской дуги. Именно такое направление сдвиговых смещений устанавливается вдоль дуги в районе Командорских островов Э. Н. Эрлихом и соавторами [20], по мнению которых поднятия островов Беринга и Медный представляют антиклинальные складки волочения. Однако в данном случае сугубо геоморфологический подход к выделению структурно-геологических элементов вступает в противоречие с представлениями о правосторонних относительно дуги перемещениях Тихоокеанской плиты, которые должны иметь здесь место согласно концепции «тектоники плит» [16, 42]. В. А. Леглер, считавший острова Большой Курильской гряды складками, был вынужден в данном случае придти к заключению, что «...теоретически (т. е. с точки зрения гипотезы „тектоники плит“ — **М. С.**) Командорские острова представляют собой зону правого сдвига...» и что «...сами острова представляют собой абразионные останцы на поверхности поднятия, а их очертания определяются степенью сопротивляемости слагающих их пород» [14, с. 163].

Эшелонное правостороннее расположение геоморфологических элементов (уступов и линейных поднятий) проявлено на достаточно большом отрезке западного фланга Алеутско-Аляскинской островной дуги и имеет все-таки тектоническую, а не абразионную природу. В то же время, складчатые структуры кайнозойских толщ этого региона подобного эшелонного расположения не обнаруживают. Скорее даже наоборот, широкое развитие субширотных простираний кайнозойских образований (рис. 3) наводит на мысль о левостороннем расположении складчатых структур, чему не противоречат, в частности, и субширотная ориентировка оси предположительно брахиморфной синклинальной структуры северной части о. Беринга, и отдельные субширотные складки о. Медный, а также антиклиналь субширотного простирания, сложенная кайнозойскими комплексами о. Атту [44]. Степень пликативной дислоцированности кайнозойских отложений Командорских и Ближних островов, судя по частоте встречаемости углов их падения (см. графики на рис. 3), возрастает вкрест простирания островной дуги от глубоководного желоба в сторону глубоководных котловин Берингова моря. Из этих же графиков, а также из результатов полевых наблюдений [10, 44] следует вывод о складчато-блоковом строении островов.

Отмеченное несоответствие между характером эшелонирования древних структурных форм и современным расположением геоморфологических элементов может говорить о смене знака сдвиговых смещений на заключительных этапах развития западного фланга Алеутско-Аляскинской дуги, что, возможно, и послужило причиной отмирания здесь вулканизма. Однако эта догадка в значительной степени основана на пока еще малочисленных данных о механизме очагов неглубоких землетрясений [9, 42], согласно которым для западного фланга дуги характерны правосдвиговые смещения по продольным разрывам. Если знак сдвига именно такой, то правостороннее расположение геоморфологических элементов в данном случае может быть обусловлено разрывными нарушениями типа сколов Риделя или трещин отрыва.

Вероятно, с неменьшим основанием, чем это сделал В. А. Леглер в отношении Командорских островов, можно было бы и острова южной части Большой Курильской гряды рассматривать как абразионные останцы, особенно учитывая палеогеографические построения И. В. Мелекесцева и соавторов [11]. Однако тектоническая природа эшелонного расположения геоморфологических элементов этого региона до сих пор не вызывала сомнений. Продолжая обсуждение структурно-геологической интерпретации этого явления, следует отметить, что имеющиеся данные о простираниях разновозрастных островодужных комплексов южной части Большой Курильской гряды свидетельствуют о левостороннем расположении образованных ими складчатых структур [28, рис. 23]. При этом простирание пликативных дислокаций среднемиоцен-плиоценовых отложений отклоняется всего на 30° к северу от простирания островной дуги, а аналогичное отклонение для складок олигоцен(?)-среднемиоценовых толщ уменьшается еще на 5—10°.

Подобное поведение осей разновозрастных складчатых структур могло бы свидетельствовать о далеко зашедших процессах правостороннего сдвигообразования по продольным разрывам дуги, если полагать, что формирование пликативных дислокаций происходило в зарождающейся зоне скалывания. Однако складчатые структуры южной части Большой Курильской гряды существенно отличаются от складок, образовавшихся подобным образом,

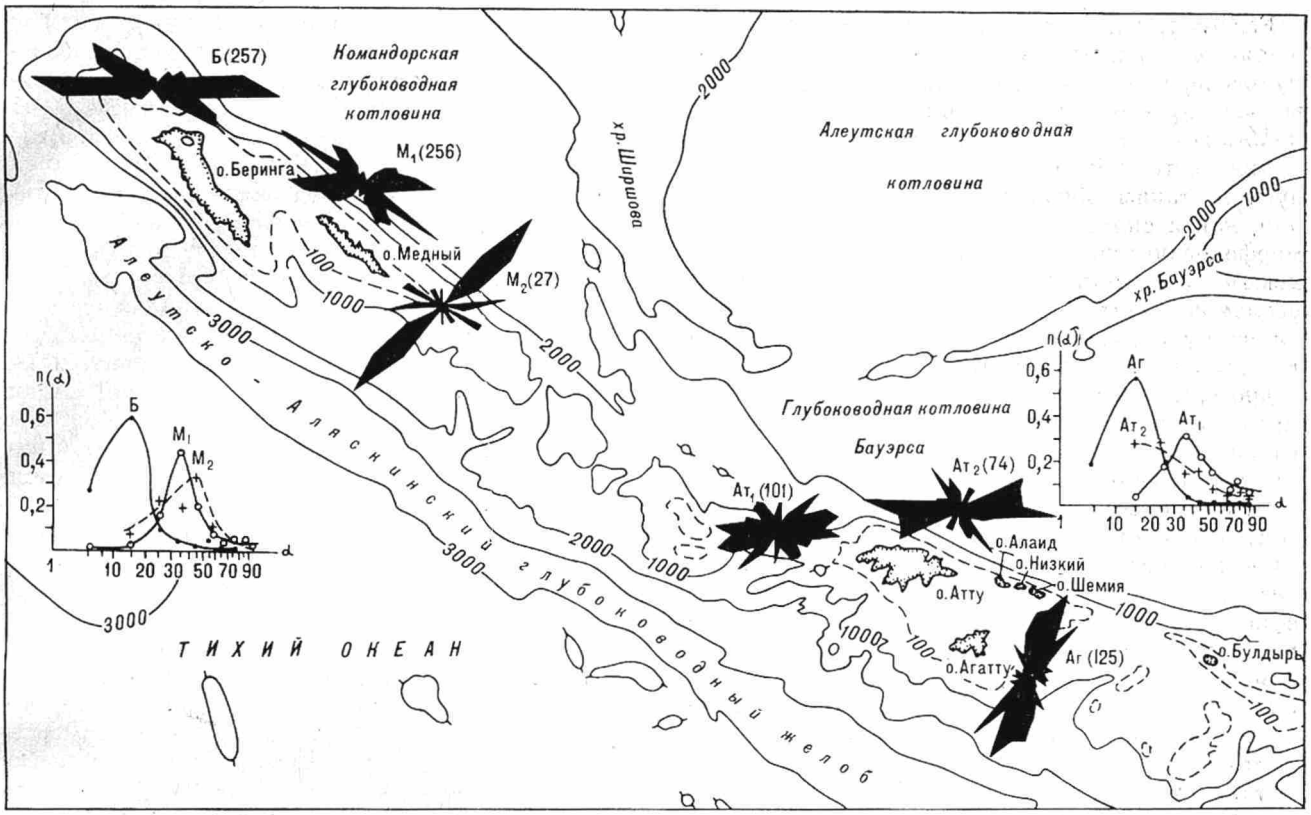

Рис. 3. Рельеф и пликативные дислокации западного фланга Алеутско-Аляскинской островной дуги (изобаты в фатомах по [40]).

Розы — диаграммы простираний и частота встречаемости n углов падения α кайнозойских островодужных комплексов (в скобках — число замеров). Командорские острова: миоцен-плиоценовые отложения о. Беринга (Б), а также доплиоценовые (M_1) и плиоценовые (M_2) образования о. Медный. Ближние острова (данные О. Гайтса и др. [44]): породы фундамента о. Агатту (Аг) и о. Атту ($Ат_1$), а также плиоценовые отложения ($Ат_2$) о. Атту.

т. е. по схеме Риделя, в пластичной среде, прежде всего своей морфологией. Чаще всего даже в наиболее древних олигоцен(?)-среднемиоценовых островодужных образованиях углы падения на крыльях складчатых структур составляют всего лишь ~20°, а в более молодых среднемиоцен-плиоценовых ~10°; более крутые падения встречаются, главным образом, вблизи нарушений, что подтверждает представления [24, 28] о складчато-блоковом строении рассматриваемого региона и определяющей роли в формировании пликативных дислокаций движений по продольным по отношению к островам, т. е. тоже эшелонированным разрывам.

Особый интерес представляют поперечные по отношению к простиранию островов складчатые структуры, появление которых вызвано сигмоидальными изгибами кайнозойских комплексов с увеличением углов падения пород до 40—60° вблизи разломов северо-западного простирания. Образование подобных складчавых структур в зарождающихся зонах скалывания не наблюдалось [33]; трудно представить себе механизм формирования таких поперечных пликативных дислокаций и в случае образования складок волочения, оперяющих сдвиговое нарушение.

Таким образом, в южной части Курило-Камчатской островной дуги складчатые структуры олигоцен(?)-плиоценовых островодужных комплексов, образовавшиеся за счет блоковых подвижек доостроводужного фундамента, характеризуются, с одной стороны, левосторонним эшелонированием, а с другой — проявлением поперечных к эшелонам пликативных дислокаций, причем формирование этих направлений складчатости было предопределено движениями по соответствующим разломам. Единственное определение складчатых структур четвертичного возраста, фиксируемых антиклинальными перегибами абразионных террас, приводится для о. Симушир [12], но, судя по значительному (до 10—15°) наклону крыльев и наблюдающимся здесь же разрывам, ограничивающим складки и смещающим на 50—60 м отмеченные плейстоценовые террасы, можно думать, что и в данном случае имеют место проявления складчато-блоковой тектоники.

Разломы, определившие эшелонное расположение складчатых структур, располагаются кулисообразно и в дальнейшем будут именоваться просто эшелонными разрывами. Их простирание отклоняется к северу от основной северо-восточной ориентировки южной части дуги и, таким образом, можно говорить, что они, как и складчатые структуры, а также геоморфологические элементы, характеризуются левым эшелонированием. Зоны эшелонных разломов контролировали пути поступления на земную поверхность и в верхние горизонты земной коры магматических расплавов и гидротермальных растворов, что позволяет думать об этих разрывах как о структурах растяжения, а морфокинематически определить их как левосторонние сбрососдвиги [28].

Если же согласиться с представлениями о том, что «...ряды вулканов естественно связывать с существованием разломов в земной коре» [8, с. 466], то необходимо будет признать существование эшелонных разрывов и в четвертичное время. Правда, мнения исследователей о расположении этих разрывов не были однозначными, в связи с чем и была предпринята попытка выделения не рядов вулканов, а так называемых зон повышенной проницаемости земной коры, которые определялись по изоденсам (линиям равных плотностей вулканов на единицу площади) четвертичных вулканических построек Курило-Камчатской островной дуги [27]. Удалось установить, что осевые линии зон повышенной проницаемости, которые тоже можно рассматривать как эшелонные разрывы, имеют различный знак эшелонирования на флангах Курило-Камчатской дуги: левый — на южном и правый — на северном. Эти закономерности находят подтверждение в независимо полученных другими исследователями, в том числе и в последнее время [2], данных (см. также рис. 2).

Разломы поперечного к островам направления, в противоположность эшелонным разрывам, амагматичны и сопровождаются повышенной пликативной дислоцированностью кайнозойских образований, что позволяет говорить о них как о структурах сжатия. Судя по характеру сигмоидальных изгибов кайнозойских толщ, это правосторонние взбрососдвиги, которые неоднократно образовывались в островодужный период развития региона.

Попытаемся теперь сопоставить приведенные выше данные о дислокациях южной части Курило-Камчатской островной дуги с изложенными ранее [33] сведениями о соотношении эшелонных структур со сдвигами.

Прежде всего, обращает на себя внимание практически полное совпадение ориентировки и морфокинематических характеристик разрывов южной части Курило-Камчатской дуги и зоны простого левого сдвига, образующейся в глиняной суспензии при проведении экспериментов по схеме Риделя. Однако последовательность образования структур, наблюдавшаяся в эксперименте (сначала эшелонные складки, затем поперечные правосторонние взбрососдвиги и лишь на заключительном этапе — кулисообразные левосторонние сбрососдвиги [39]), не соответствует изложенным выше данным. Эшелонные и поперечные разрывы южной части Большой Курильской гряды развивались, скорее всего, как сопряженные дизъюнктивные дислокации, а эшелонная складчатость кайнозойских отложений никак не может характеризовать начальные этапы развития зоны скалывания, поскольку пликативные дислокации этого региона являются следствием блоковых движений фундамента по эшелонным разрывам дуги. К тому же складчатые структуры южной части дуги образуют левые эшелоны, тогда как в рассматриваемой схеме знак эшелонирования складок противоположен знаку сдвиговых смещений.

И все-таки модель простого сдвига представляется перспективной для объяснения закономерностей расположения исследуемых разрывов. В частности, в рамках этой модели легко находят «свое» место поперечные разрывы южной части Курило-Камчатской островной дуги, которые можно, вслед за С. С. Стояновым [25], сопоставлять с поперечными антитетическими сколами R'. Труднее определяется природа эшелонных разрывов. С учетом того, что они являются магмоконтролирующими структурами и образуют с простиранием дуги углы в пределах 20—30°, их можно интерпретировать как трещины растяжения [28]. Как показал С. С. Стоянов, в зонах скалывания «...начальный угол трещин отрыва нормально должен быть меньше 45°, но нижним пределом его значения является угол скалывания...» [25, с. 103]. Оценивая последний величиной 30° и полагая, что трещины отрыва не могут проникать на значительные глубины, С. С. Стоянов пришел к выводу, что эшелонные разрывы южной части Курило-Камчатской дуги, простирающиеся под углом 15—20° к главному разлому, следует считать синтетическими сколами типа R.

Тем не менее, представляется, что вопрос о природе эшелонных разрывов следует пока считать открытым. Действительно, допуская возможность отнесения части эшелонных разрывов, отклоняющихся на небольшой (15—20°) угол от простирания дуги, к сколам типа R, необходимо определиться в отношении тех из них, у которых величина этого угла характеризуется заметно большими значениями. Продолжая оставаться на позициях, что и эти разрывы следует относить к сколам типа R,

необходимо будет допустить, что сдвигообразование сопровождалось значительным вращением блоков, которое должно было бы привести к правосторонним сдвиговым перемещениям по эшелонным разрывам [33, рис. 1, д], тогда как последние — левосторонние сбрососдвиги.

Что же касается существующих представлений о возможных глубинах проникновения в глубь Земли различного типа разрывов, в том числе и трещин растяжения, то они крайне разнообразны. «Пессимистические» оценки, основанные главным образом на суждениях о зависимости физического состояния земных недр от давления и температуры, позволяют исследователям заключить, что разломообразование затрагивает лишь верхние горизонты литосферы до глубин 25 км или 35 км, а глубина проникновения трещин растяжения вообще ограничивается первыми километрами [19, 38, и др.]. «Оптимисты» же, учитывая флюиды и магматические расплавы, способные создавать добавочное внутреннее давление на стенки разрывов [22, 35, 51], а также процессы физико-химического характера [23], существенно снижающие прочность материалов и способствующие проявлению хрупкого разрушения пород, значительно расширяют диапазон глубин, на которых могут появляться трещины растяжения. Известное обоснование эти взгляды находят в геологических фактах, свидетельствующих о проявлениях трещин растяжения (дайки, жилы) в глубоко эродированных регионах [22], а также в ксенолитах лав Гавайских островов, которые образуются на глубинах, достигающих 65 км [54].

По-видимому, определенного компромисса между крайними точками зрения на эшелонные разрывы Курило-Камчатской дуги как на трещины типа R или T можно достичь, если вслед за П. Гэнкоком [45] допустить возможность существования трещин промежуточного (скол—отрыв) генезиса. Но это совсем не означает, что проблема генезиса эшелонных разрывов будет тем самым исчерпана. Дело в том, что в их расположении наблюдается вполне определенная закономерность, которая, кстати, была ясна еще С. Токуде [53]: по мере продвижения от флангов Курило-Камчатской дуги к ее центру значения угла ω, характеризующего положение трещин относительно оси эшелонного ряда, становятся все меньше и меньше, достигая в центральной части значений, близких к 0°. Объяснить это явление, оставаясь в рамках модели простого сдвигания, конечно же можно, но в этом случае придется прибегать к не всегда достаточно обоснованным ее усложнениям. Так, если считать, что исследуемые разрывы относятся к типу R, то подобные вариации угла можно связывать либо с увеличением угла скалывания геоматериалов до 45° в центральной части дуги, что, по-видимому, маловероятно, либо предположить, что в центральной части дуги и на ее флангах простое сдвигание происходит соответственно в условиях дополнительного растяжения и дополнительного сжатия.

Закономерно изменяется не только величина угла ω, но и другие параметры эшелонного ряда южной части Курило-Камчатской дуги, причем связи между ними намечаются в соответствии с приведенными ранее [33] формулами 5 и 6. Эти изменения можно охарактеризовать примерно следующим образом: от южного фланга Курило-Камчатской дуги к ее центру величина угла ω уменьшается от 30° до 0°, расстояния между кулисами ($2s$) и величина взаимного перекрытия кулис ($2o$) уменьшаются соответственно от 40—50 км и 60—70 км до 10 км и 0 (и менее) километров, а расстояния между центрами кулис по простиранию ряда ($2c$) и по простиранию кулис ($2k$) увеличиваются соответственно от 90 и 70 км до 150 и 120 км. Закономерные изменения величины $2b$, характеризующей протяженность кулис на земной поверхности, не устанавливаются; в среднем она составляет около 120 км. Перечисленные характеристики свойственны схеме образования эшелонных трещин обрамления [33, рис. 2, 3], а наблюдаемые вариации угла ω могут быть следствием изменения угла поворота осей региональных напряжений α от 0° в центральной части дуги до 90° на ее флангах.

Вероятно, впервые догадку о возможной роли материнской трещины в образовании эшелонных разрывов высказал Е. К. Мархинин, который рассматривал их в качестве «...раскрывающихся снизу трещин „питающего“ разлома...» [18, с. 23], замечая, правда, несколько ниже, что «такой „питающий“ вулканы разлом нельзя, конечно, представить себе в виде единой трещины» [18, с. 27]. Это замечание, к которому можно присоединиться, а также то обстоятельство, что рассматриваемым эшелонным разрывам присущи левосторонние перемещения, а не правосторонние, как того требует модель образования трещин обрамления, заставляют пока относиться к ней с осторожностью. Но, по-видимому, не стоит исключать возможность подобного механизма образования для эшелонных структур второго порядка, таких как, например, кулисообразные вулканические хребты о. Уруп [26] или кулисные зоны повышенной проницаемости Ключевской группы вулканов [27], где существование на глубине единой материнской трещины, заполненной магмой, с определенными оговорками можно считать вполне вероятным.

Другой путь, по которому можно пойти, принимая идею об изменении напряженного со-

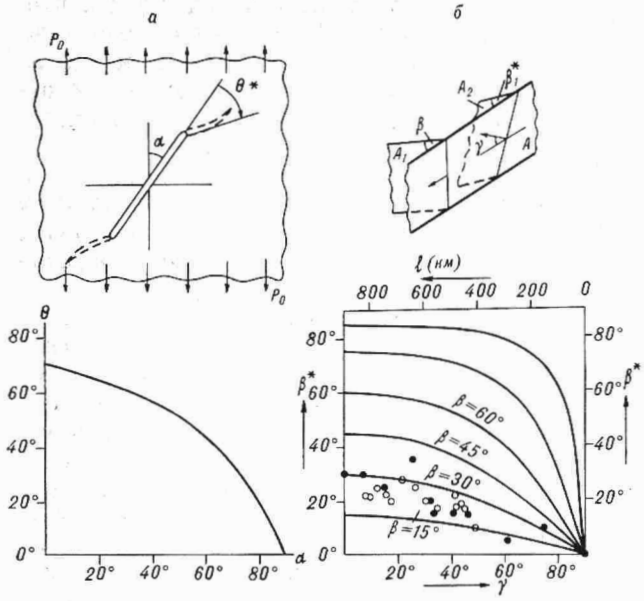

Рис. 4. Зависимость угла разрушения Θ^* от угла наклона α трещины относительно направления растягивающих усилий p_0 [21] (*а*) и зависимость угла между простираниями главного разлома и оперяющей его трещины β^* от угла γ, характеризующего направление смещения в плоскости главного разлома (*б*).

Черные кружочки — оперяющие разрывы четвертичного возраста, белые — неогеновые разрывы; l — расстояние от центра Курило-Камчатской островной дуги.

стояния вдоль дуги для объяснения закономерностей ориентации эшелонных разрывов,— использование схемы, предусматривающей образование оперяющих трещин у окончаний разлома конечной протяженности. Известное обоснование этот вариант находит, с одной стороны, в установленной по сейсмическим данным незначительной протяженности вдоль дуги очаговых областей крупнейших землетрясений, а с другой — в существовании так называемых сейсмических брешей [36], которые можно интерпретировать как ослабленные участки продольных разломов островной дуги или, другими словами,— разломы конечной протяженности. Для простейших случаев теоретически [21] и экспериментально [41] доказана зависимость угла оперяющей трещины Θ^* от угла α, под которым ориентирована материнская трещина по отношению к направлению одноосного растяжения p_0. Графически эта зависимость представлена на рис. 4, *а*, а соответствующее ей аналитическое выражение $\sin\Theta^* + (3\cos\Theta^* - 1)\operatorname{ctg}\alpha = 0$, $\alpha \neq 0$ приведено здесь исключительно в иллюстративных целях. Применить его на практике пока затруднительно, и, к тому же, оно справедливо для однородных пластин, тогда как интересующий нас разлом (в данном случае Срединно-Курильский [26]) разделяет блоки литосферы (внешнюю и внутреннюю зоны островной дуги), сложенные различными по составу и физическим свойствам образованиями.

Не исключено, что эшелонные разрывы оперяют Срединно-Курильский левосторонний сбрососдвиг, ибо по мере удаления от него они выклиниваются, что устанавливается по уменьшению в этом направлении плотности вулканических построек [1, 27] и количества изверженного материала, а также степени дислоцированности кайнозойских комплексов. Считая, как и ранее [26], что с точки зрения динамики образования трещин оперения, сбросы, взбросы и сдвиги идентичны между собой, и полагая, в то же время, что сделанное ранее предположение о равенстве между собой углов, образуемых трещинами растяжения и сжатия с плоскостью главного разлома, или вообще некорректно, или справедливо лишь для какого-нибудь частного случая, заметим, что $\operatorname{tg}\beta^* = \cos\gamma \cdot \operatorname{tg}\beta$, где β — угол между вертикальной плоскостью разлома A (см. рис. 4, *в*) и оперяющей его трещиной (плоскость A_1). На графике в соответствии с указанным выражением приведены теоретические кривые для различных значений β и значения угла β^* для неогеновых и четвертичных разломов в предположении, что в центральной части дуги $\gamma \approx 90°$, а на окончании южного фланга дуги угол γ приближается к 0°. Это предположение сродни изложенной выше идее о том, что закономерности ориентации эшелонных разрывов определяются изменением вдоль дуги напряженного состояния. Из графика следует, что большинство точек попадает в область, заключенную между кривыми со значениями $\beta = 15°$ и $\beta = 30°$. При определении природы эшелонных разрывов в данном случае возникают те же проблемы, что и при анализе модели простого сдвига в приложении к исследуемому эшелонному сообществу.

Таким образом, левосторонние сдвиговые перемещения вдоль южного фланга Курило-Камчатской дуги устанавливаются независимо от того, будут ли эшелонированные разрывы этого региона определяться как сколы Риделя, или как трещины отрыва, или как трещины переходного между ними типа, или, наконец, как трещины обрамления. Если же признать справедливым предположение о том, что эшелонные разрывы оперяют Срединно-Курильский разлом, то об эшелонированных пликативных дислокациях можно говорить как о драпирующих складках. Распространяя установленные в южной части Курило-Камчатской дуги закономерности сдвиговой тектоники на островодужные регионы северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса, можно, как и ранее [29, 30], утверждать, что левым и правым флангам островных дуг (наименование флангов при этом определяется по их располо-

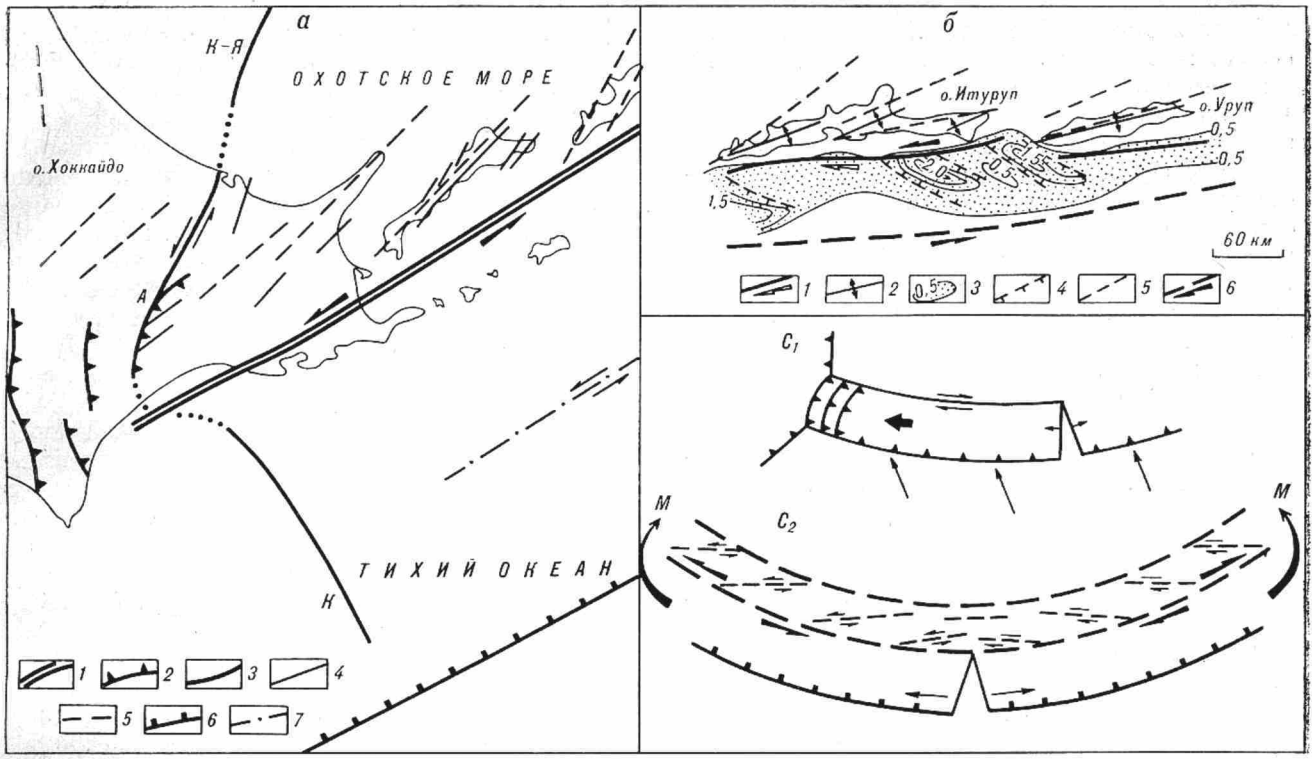

Рис. 5. Дизъюнктивные дислокации Курильских островов и о. Хоккайдо и механические модели островных дуг.

а — дизъюнктивные дислокации южных Курильских островов и о. Хоккайдо по данным Г. Кимуры [47—49] и автора [27, 28, 30]: *1* — Срединно-Курильский левосторонний сбрососдвиг; *2* — надвиги; *3* — тектонические линии (*К* — *Я* — Китами-Ямото, *А* — Абасири, *К* — Кусиро); *4* — прочие разломы; *5* — осевые линии зон повышенной проницаемости земной коры в квартере; *6* — ось Курило-Камчатского глубоководного желоба; *7* — осевая линия сейсмотектонической зоны Курило-Камчатской островной дуги. *б* — мелководный прогиб во фронтальной части Курильской вулканической дуги: *1—4* — данные Г. Кимуры [49]: *1* — главный разлом; *2* — антиклинали; *3* — изопахиты осадков (км); *4* — сбросы; *5* — см. *5* на рис. 5, *а*; *6* (совместно с *1*) — границы зоны скалывания (зоны Срединно-Курильского левостороннего сбрососдвига). *с* — механические модели дуг: c_1 — механическая модель Курильской дуги, характеризуемая фронтальным скольжением вследствие «косой субдукции» и коллизией с другой островной дугой; c_2 — предлагаемая механическая модель Курило-Камчатской островной дуги — изгибающийся слоистый брус (*М* — изгибающий момент).

жению относительно наблюдателя, смотрящего на дугу из центра соответствующей ей окружности) свойственны противоположные по наименованиям сдвиговые перемещения по продольным разломам.

В рамках журнальной статьи нет возможности для анализа всех механических моделей островных дуг, количество которых с трудом поддается исчислению. Остановимся лишь на популярной сегодня модели «косой субдукции», учитывающей сдвиговые перемещения по продольным разломам островных дуг.

Ранее мы вскользь затрагивали вопросы сочленения Курило-Камчатской дуги со структурами о. Хоккайдо, упоминая, вслед за рядом исследователей [17], о торцовом его характере. Но, как справедливо заметил В. А. Леглер, «...представление о левостороннем сдвиге южных Курил требует рассмотреть вопрос о его окончаниях...» [23, с. 137]. Проведенные Г. Кимурой исследования на о. Хоккайдо позволяют учесть это замечание.

Тектоническая модель южной части Курило-Камчатской островной дуги (рис. 5, *а*) показывает, как левосторонние движения по Срединно-Курильскому разлому и явления расширения, свойственные внутренней зоне дуги [24, 29], реализуются в районе сочленения с меридиональными структурами о. Хоккайдо в виде надвигов. Первым из них, если вести счет от дуги, является надвиг Урахоро, составляющий южный отрезок тектонической линии Абасири [47]. По-видимому, как свидетельство в пользу левосторонней природы Срединно-Курильского сдвига можно рассматривать и позднемиоценовые левосторонние сдвиги вдоль северного отрезка тектонической линии Абасири; о том же, вероятно, свидетельствует и видимое левостороннее смещение по Срединно-Курильскому разлому каньона Кусиро, если полагать, что Г. Кимура не ошибается, считая этот каньон продолжением тектонической линии Абасири [48].

Однако сам Г. Кимура, на данные которого мы здесь ссылаемся, придерживается совершенно противоположных взглядов относительно знака сдвиговых смещений по разлому, разделяющему внешнюю и внутреннюю зоны юж-

ной части Курило-Камчатской островной дуги. По его мнению, это правосторонний сдвиг, образовавшийся вследствие «косой субдукции» Тихоокеанской плиты. Это расхождение во взглядах приобретает принципиальное значение при обсуждении глобальных геотектонических проблем, и поэтому на Международном симпозиуме по геолого-геофизическому картированию Тихоокеанского региона (11—19 сентября 1989 г., г. Южно-Сахалинск) между автором настоящей статьи и Г. Кимурой развернулась оживленная дискуссия. Думается, что, будучи вынесенной на страницы печати, эта дискуссия станет более предметной и плодотворной.

Прежде всего, вызывают возражения принципы, которыми руководствуется Г. Кимура, выделяя продольный сдвиг. Судя по правой части рис. 3 [49], срединно-дуговой сдвиг проводится в районе о. Уруп вдоль осевой линии современной депрессии, разделяющей подводный хребет Витязя и поднятие островов Большой Курильской гряды, тогда как на рис. 2 в этой же работе указанный разлом, названный Главным, сдвинут к островам Большой гряды и ограничивает с северо-запада Срединно-Курильский прогиб, выполненный кайнозойскими отложениями. Последний рисунок воспроизведен с некоторыми дополнениями в настоящей статье (см. рис. 5, *в*).

Схема тектоники, приведенная на данном рисунке, составлена Г. Кимурой по данным сотрудников нашего института, но, сравнивая ее с оригиналом, можно заметить, что некоторые детали на ней оказались «пропущенными», тогда как другие без какой-либо аргументации добавлены. «Пропущенным» оказался разлом, ограничивающий, по данным Г. С. Гнибиденко и соавторов [6], Срединно-Курильский прогиб (Центрально-Курильский грабен-мегасинклинорий) с юго-востока. Характерно, что этот «пропущенный» разлом на оригинальной тектонической карте [6] служит ограничением прогиба на всем его протяжении, а разлом, названный Г. Кимурой Главным, проявлен далеко неповсеместно. Добавленными же оказались так называемые нормальные разломы, ограничивающие в Срединно-Курильском прогибе синклинальные структуры второго порядка, в результате чего эшелонная складчатая структура прогиба сразу же «превратилась» в аналогичного знака эшелонированные структуры растяжения. Что же касается антиклинальных складок, выделяемых в пределах Большой Курильской гряды, то этот вопрос уже обсуждался выше. Заметим лишь, что, например, о. Уруп в осевой своей части представляет на ряде разрезов не анти-, а синклинальную складку [5].

Если теперь вновь обратиться к оригиналу [6] и только к нему, то правосторонний ряд эшелонированных складок Срединно-Курильского прогиба, являющегося поверхностным выражением Срединно-Курильского сдвига, можно интерпретировать как образовавшийся в зоне простого левостороннего скола. Данные Г. С. Гнибиденко с соавторами [6] «льют воду на нашу мельницу», и все-таки, объективности ради, следует заметить, что материалы сейсмических исследований не дают пока еще однозначного представления о структуре прогиба, ибо наряду с рассматриваемой схемой [6] существует и другая интерпретация тех же сейсмических данных [5].

Г. Кимура считает, что в южном окончании дуги сдвиг, разделяющий внешнюю и внутреннюю зоны, проходит вдоль северо-западного борта Срединно-Курильского прогиба. По крайней мере, именно так он приводится на схеме [49, рис. 3] в районах мыса Весло (о. Купашир) и г. Сибецу (о. Хоккайдо). Однако далее, к юго-западу, этот сдвиг на схеме Г. Кимуры отклоняется к северу от борта впадины Нисибецу, являющейся наземным продолжением Срединно-Курильского прогиба, и сочленяется с тектонической линией Абасири примерно там, где на схеме (см. рис. 5, *а*) поставлена буква *А*. Может быть, в других работах Г. Кимура и поясняет (или пояснит) причину указанного отклонения. Автору же настоящей работы представляется предпочтительнее считать границей внешней и внутренней зон дуги на о. Хоккайдо впадину Нисибецу. Глубокие различия между внешней и внутренней зонами дуги на всем своем протяжении находят отчетливое выражение в геофизических полях (магнитном и гравитационном); в частности, гравитационная ступень между зонами, получившая на о. Хоккайдо наименование «линия Сибецу — Цуруи» [4, 50], а также местоположение границы региональных магнитных аномалий, свойственных зонам [5], свидетельствуют в пользу нашей интерпретации.

К числу данных, которые, с первого взгляда, казалось бы противоречат изложенным представлениям о сочленении дуги со структурами о. Хоккайдо, относятся результаты проведенных здесь повторных триангуляций и радиогеодезических наблюдений. Они позволили японским исследователям [52] утверждать, что часть о. Хоккайдо, ограниченная с северо-запада линией вулканического фронта (междуговым правосторонним сколом по Г. Кимуре), а с юго-запада — тектонической линией Абасири, в полном соответствии с гипотезой «косой субдукции» смещалась в период с 1886 по 1984 гг. как единое целое к юго-западу. Однако в силу самых общих соображений можно думать, что в протяженной (~2000 км)

Курило-Камчатской дуге на ее стыке с меридиональными структурами о. Хоккайдо при сдвиговых смещениях должны проявляться концевые эффекты, которые могут выражаться, в частности, в неустойчивости наблюдаемой здесь картины деформации. И действительно, как следует из данных тех же исследователей за последний двадцатилетний отрезок периода наблюдений (с 1964 по 1984 гг.), практически тот же блок о. Хоккайдо и примерно с той же по модулю скоростью двигался, но уже к юго-востоку, имея даже левостороннюю компоненту смещения относительно простирания дуги. Характерно, что неустойчивость поля напряжений, а также характера деформаций устанавливается в этой части о. Хоккайдо и для геологического прошлого [48], тогда как в районах Курило-Камчатской дуги, удаленных от зоны сочленения, напротив, выявляется относительно устойчивая динамическая обстановка с олигоцена (?) и до настоящего времени [28].

Эта устойчивость динамической обстановки позволяет воспользоваться для понимания сдвиговой тектоники исследуемого региона данными о современных движениях литосферы, обратившись к имеющимся сведениям о сейсмодислокациях Курило-Камчатской дуги [32]. В ее южной части для узкой и протяженной приосевой зоны сейсмотектонического пояса дуги и по числу сейсмических толчков, и по выделившейся энергии характерными оказались землетрясения, имеющие механизмы очагов с крутыми, субпараллельными островной дуге левосдвиговыми нодальными плоскостями. Заканчивая обзор имеющихся данных о левосторонних сдвигах по продольным разломам южной части Курило-Камчатской дуги ссылкой на известные пока, к сожалению, лишь в тезисной форме результаты палеомагнитных исследований, согласно которым в регионе выявляются повороты минблоков дуги по часовой стрелке [3], перейдем теперь к непосредственному обсуждению предлагаемой механической модели островной дуги.

Как следует из рис. 5, c_1, с помощью механической модели островных дуг, основанной на представлениях о «косой субдукции», предпринимаются попытки объяснить внутриостроводужный сдвиг, надвигообразование в окончаниях дуг и растяжение в их фронтальной части, выражающееся в образовании здесь поперечных грабенов. Коль скоро все предыдущее изложение было посвящено доказательству левостороннего характера сдвиговых перемещений по продольным разрывам южной части Курило-Камчатской дуги, а надвигообразование в районе сочленения с меридиональными структурами о. Хоккайдо связывалось еще и с расширением внутренней зоны дуги, то ясно, что гипотеза «косой субдукции» оказывается в данном случае неприемлемой и необходимы поиски иной механической модели.

Многие исследователи не без оснований полагают, что кривизна островных дуг изменялась во времени [20, 37 и др.], и предложенная механическая модель островной дуги в виде изгибающегося слоистого бруса [46] удовлетворяет этому требованию. Действительно, столь протяженную и узкую структуру, как островная дуга, подстилаемая астеносферным слоем, по формальным признакам можно считать брусом, а наличие активных продольных разломов сдвигового типа позволяет считать последний слоистым и изгибающимся. Если кривизна островной дуги с течением времени увеличивалась под действием изгибающего момента M, природа которого здесь не обсуждается, то в простейшем случае, т. е. при незакрепленных концах, в брусе, моделирующем дугу, должны проявиться разнонаправленные продольные сдвиги (см. рис. 5, c_2), которые, как уже отмечалось выше, характерны для островных дуг северо-запада Тихого океана. Процесс же образования поперечных грабенов во фронтальной части изгибающегося островодужного бруса, где растягивающие нормальные напряжения достигают, как известно [34], максимальных значений, думается, ясен из приведенной схемы и не нуждается в особых пояснениях.

Модель островной дуги в виде изгибающегося слоистого бруса уже сыграла определенную роль при выяснении возможных причин изогнутости дуг [29, 30], при анализе особенностей островодужных сейсмодислокаций [32], а также при обсуждении вопросов, касающихся происхождения внутриостроводужных деформаций первого порядка [31]. Теперь ее, по-видимому, следует учитывать, обсуждая проблемы, связанные с субдукцией океанических плит. Кроме того, по мнению многих исследователей, аналоги островодужных ассоциаций широко распространены в ископаемом состоянии в структурах континентов, а, возможно, и океанов, и, в связи с этим, хотелось бы надеяться, что предложенная модель может оказаться полезной при решении не только сугубо островодужных проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдейко Г. П.* Закономерности распределения вулканов Курильской островной дуги: к проблеме генезиса магм // Докл. АН СССР.— 1989.— Т. 304, № 5.— С. 1196—1200.

2. *Апрелков С. Е., Попруженко С. В.* Особенности глубинного строения Восточно-Камчатского вулканического пояса // Тихоокеан. геология.— 1984.— № 3.— С. 68—73.

3. *Бретштейн Ю. С., Климова А. В., Чуйко В. С.* Палеомагнетизм и геодинамика малых геоблоков Азиатско-Тихоокеанской окраины // Тектоника, энергетические и минеральные ресурсы Северо-Западной Пацифики: (тезисы). Т. 1. Межд. симпозиум, СССР, Хабаровск, 2—11 сентября.— Хабаровск, 1989.— С. 17—18.
4. *Геологическое* развитие Японских островов.— М.: Мир, 1968.
5. *Геолого-геофизический* атлас Курило-Камчатской островной системы/Ред. К. Ф. Сергеев, М. Л. Красный.— Л., 1987.
6. *Гнибиденко Г. С., Быкова Т. Г., Веселов О. В. и др.* Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба.— М.: Наука, 1980.
7. *Горячев А. В.* Основные закономерности развития Курило-Камчатской зоны.— М.: Наука, 1966.
8. *Заварицкий А. Н.* Об изучении движений земной коры на Камчатке // Избр. тр. Т. I.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.— С. 465—472.
9. *Зобин В. М.* Механизм очагов землетрясений и сейсмотектоническое деформирование Камчатско-Командорского региона в 1964—1982 гг. // Вулканология и сейсмология.— 1987.— № 6.— С. 78—92.
10. *Иващенко Р. У., Казакова Э. Н., Сергеев К. Ф. и др.* Геология Командорских островов/СахКНИИ ДВНЦ АН СССР.— Владивосток, 1984.
11. *Камчатка, Курильские и Командорские острова.*— М.: Наука, 1974.
12. *Кучай В. К.* Остров Симушир в плейстоцене // Тихоокеан. геология.— 1987.— № 3.— С. 33—41.
13. *Леглер В. А.* Деформация погружающейся литосферной плиты и продольные сдвиги Курило-Камчатской островной дуги // Тектоника литосферных плит (динамика зоны поддвига)/Ин-т океанологии АН СССР.— М., 1976.— С. 103—147.
14. *Леглер В. А.* Развитие Камчатки в кайнозое с точки зрения теории тектоники литосферных плит // Тектоника литосферных плит (источники энергии тектонических процессов и динамика плит)/Ин-т океанологии АН СССР.— М., 1977.— С. 137—169.
15. *Леглер В. А., Парфенов Л. М.* Системы разломов островных дуг // Тектоническое районирование и структурно-вещественная эволюция Северо-Востока.— М.: Наука, 1979.— С. 134—156.
16. *Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж.* Тектоника плит.— М.: Мир, 1977.
17. *Марков М. С., Аверьянова В. Н., Соловьева И. А., Шуваев А. С.* Мезо-кайнозойская история и строение земной коры Охотского региона.— М.: Наука, 1967. (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 168).
18. *Мархинин Е. К.* Роль вулканизма в формировании земной коры (на примере Курильской островной дуги).— М.: Наука, 1967.
19. *Механика.*— М.: Мир, 1982. (Новое в зарубежной науке; Вып. 28).
20. *Островные дуги*/Ред. А. Н. Заварицкий.— М.: ИЛ, 1952.
21. *Разрушение.* Т. 7.— М.: Мир, 1976.
22. *Робертс Дж.* Внедрение магмы в хрупкие породы // Механизм интрузий магмы.— М.: Мир, 1972.— С. 230—283.
23. *Сальников Д. И., Траскин В. Ю.* Основные представления физико-химической геомеханики // Изучение тектонических деформаций/ГИН АН СССР.— М., 1987.— С. 33—83.
24. *Сергеев К. Ф.* Тектоника Курильской островной системы.— М.: Наука, 1976.
25. *Стоянов С. С.* Механизм формирования разрывных зон.— М.: Недра, 1977.
26. *Стрельцов М. И.* Об эшелонном расположении структур в южной части Курильской островной гряды // Геотектоника.— 1970.— № 1.— С. 108—116.
27. *Стрельцов М. И.* К вопросу о закономерностях расположения вулканов Курило-Камчатской дуги // Докл. АН СССР.— 1974.— Т. 216, № 6.— С. 1372—1375.
28. *Стрельцов М. И.* Дислокации южной части Курильской островной дуги.— М.: Наука, 1976.
29. *Стрельцов М. И.* О сдвигах на флангах и кривизне островных дуг // Докл. АН СССР.— 1977.— Т. 236, № 1.— С. 184—187.
30. *Стрельцов М. И.* О сдвигах на флангах островных дуг // Восточно-азиатские островные системы (тектоника и вулканизм)/СахКНИИ ДВНЦ АН СССР.— Южно-Сахалинск, 1978.— С. 67—75.
31. *Стрельцов М. И.* О кривизне островных дуг и глубине желобов северо-западной части Тихого океана // Тихоокеан. геология.— 1988.— № 3.— С. 117—120.
32. *Стрельцов М. И.* О сейсмодислокациях Курило-Камчатской островной дуги // Вулканология и сейсмология.— 1989.— № 4.— С. 59—73.
33. *Стрельцов М. И.* Эшелонные структуры и сдвиговые дислокации // Тихоокеан. геология.— 1991.— № 3.— С. 20—30.
34. *Тимошенко С. П.* Сопротивление материалов. Т. I, II.— М.: Наука, 1965.
35. *Файф У., Прайс Н., Томпсон А.* Флюиды в земной коре.— М.: Мир, 1981.
36. *Федотов С. А., Чернышов С. Д.* 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981—1985 гг., в целом за 1965—1985 гг. и прогноз на 1986—1990 гг. // Вулканология и сейсмология.— 1987.— № 6.— С. 93—109.
37. *Хаин В. Е.* Общая геотектоника.— М.: Недра, 1973.
38. *Шерман С. И.* Физические закономерности развития разломов земной коры.— Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977.
39. *Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования).— Новосибирск: Наука, Сиб. отдние, 1983.
40. *Bathymetric* Atlas of the North Pacific Ocean/ U. S. Naval oceanographic office.— Washington, D. C., 1973.
41. *Brace W. F., Bombolakis E. G.* A Note of Brittle Crack Growth in Compression // J. Geophys. Res.— 1963.— V. 68, N 12.— P. 3709—3713.
42. *Cormier V. F.* Tectonics near Junction of the Aleutian and Kuril — Kamchatka Arcs and a Mechanism for Middle Tertiary Magmatism in the Kamchatka Basin // Bull. Geol. Soc. Amer.— 1975.— V. 86, N 4.— P. 443—453.
43. *Fujiwara S.* On the Echelon Structure of Japanese Volcanic Ranges and its Significance from the Vertical Point of View // Gerland Beitr. z. Geophys.— 1927.— XVI, Heft 1/2.— P. 1—14.
44. *Gates O., Powers H. A., Wilcox R. E.* Geology of the Near Islands, Alaska // U. S. Geol. Surv. Bull.— 1971.— N 1028—U.— P. 709—822.
45. *Hancock P. L.* The analysis of en-échelon veins // Geol Mag.— 1972.— V. 109, N 3.— P. 269—276.
46. *Kaizuka S.* A Tectonic Model for the Morphology of Arc-Trench Systems, Especially for the Echelon Ridges and Mid-Arc Faults // J. Geol. and Geoph.— 1975.— V. 45.— P. 9—28.

47. *Kimura G.* Abashiri tectonic line (With special reference to the tectonic significance of the southwestern margin of the Kuril Arc) // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ, Ser. IV, Geology and Mineralogy.— 1981.— V. XX, N 1.— P. 95—111.
48. *Kimura G.* Tectonic evolution and stress field in the south-western margin of the Kuril Arc // J. Geol. Soc. Japan.— 1981.— V. 87, N 11.— P. 757—768.
49. *Kimura G.* Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril Arc // Geology.— 1986.— V. 14, N 5.— P. 404—407.
50. *Minato M., Yagi K., Hunahashi M.* Geotectonic synthesis of the Green Tuff regions in Japan // Bull. Earthquake Inst.— 1956.— V. 34, N 3.— P. 237—265.
51. *Secor R. T.* Role of fluid pressure in jointing // Amer. J. Sci.— 1965.— V. 263, N 8.— P. 633—646.
52. *Tada T., Kimura G.* Collision tectonics and crustal deformation at the southwestren margin of the Kuril Arc // J. Seismol. Soc. Japan.— 1987.— V. 40, N 2.— P. 197—207.
53. *Tokuda S.* On the echelon structure of the Japanese Archipelagoes // Japan J. Geol. and Geograph.— 1926.— V. 5.— P. 41—76.
54. *Wilshire H. G., Kirby S. H.* Dikes, joints and faults in the upper mantle // Tectonophys.— 1989.— V. 161, N 1—2.— P. 23—31.

ИМГиГ ДВО АН СССР
Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию
4 июля 1990 г.