

К ВОПРОСУ О ПОГРАНИЧНОЙ КИНЕМАТИКЕ СМЕЖНЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

С.В. Горяйнов

*Украинский научно-исследовательский институт природных газов (УкрНИИГаз)
Гимназическая наб. 20, г. Харьков 61010, Украина (gorjajnov@mail.ru)*

При рассмотрении кинематики относительных движений литосферных плит использован новый методический подход. Он состоит в том, что анализировалось не движение одной плиты относительно другой, а движения обеих плит относительно их границы. Данный подход потребовал дополнений в структурно-геологическую терминологию, а также позволил провести формализацию ориентировок движений плит и дальнейшее оперирование с ними в символической форме. Это дало возможность теоретически вычислить 36 вариантов сочетаний направлений движений плит, из которых 8 — хорошо известны, 4 — отражают варианты смещений древних (неактивных) границ, а 24 — новые для геодинамической теории. Для 18 новых вариантов показаны участки их современной реализации в разных регионах мира; еще 6 вариантов пока не обнаружены, их открытие — дело будущего. С учетом результата впоследствии можно перейти к анализу взаимодействий разнонаправленных мантийных потоков.

Ключевые слова: литосферные плиты, тектонические движения, пространственные особенности.

Краткий обзор предшествующих представлений. В тектонике литосферных плит (ТЛП) изначально (с 1960-х годов) было принято три типа относительных движений плит: субдукционные (сходящиеся), спрединговые (расходящиеся) и трансформные (скользящие, сдвиговые) [2–6]. Эти типы движений появились как модель рассмотрения движений одной плиты относительно другой. Такое описание границ сохраняется и по сей день в учебниках и популярных изданиях, посвященных ТЛП. При этом в данную модель в неявном виде были заложены следующие допущения.

1. Векторы движения плиты перпендикулярны к субдукционной и спрединговой границам и параллельны трансформным границам.

2. Векторы движений смежных плит параллельны, но противоположно направлены (рис. 1).

3. Право- и левосторонние сдвиги считаются равнозначными, трансформными (не различаются).

Назовем это “первым приближением” кинематических отношений плит.

Такая упрощенная модель неизбежно приводила к представлениям о литосферной плите как о прямоугольном (на сфере — трапециевидном) образовании. Но первые же глобальные карты литосферных плит Дж. Уилсона, Дж. Дьюи, Дж. Берда, К. Ле-Пишона показали, что плиты имеют более сложную конфигурацию [2]. На более поздних картах это видно еще лучше. “Непрямоугольность” каждой литосферной плиты предусматривала возможность не только ортогональных соотношений векторов движений плит и их границ, но и “косые” варианты со

сдвиговой составляющей как для субдукционных, так и для спрединговых зон [4]. Современные карты показывают широкое распространение таких ситуаций, что рассмотрено ниже.

Появление в моделях ТЛП сдвигово-спрединговых и сдвигово-субдукционных ситуаций назовем “вторым приближением” кинематической модели (рис. 2). Это сняло первое из приведенных выше допущений — ортогональность движений плит по отношению к их границам не обязательна.

Второе из приведенных выше допущений (о параллельности, но противоположности направлений движений плит) вытекало из тогдашней недостаточности знаний об их реальных движениях. Первоначально (примерно в начале 70-х годов прошлого века) рассматривались относительные движения каких-либо двух соседних плит без их увязки в общую глобальную картину движений. Это был вполне естественный этап познания, поскольку само движение плит тогда еще было новым и недостаточно изученным явлением. Накопленные таким образом частные данные позволили воссоздать общую картину несколько позже, к середине 80-х годов XX в. [6]. Во многом этому поспособствовало развитие общей геодезии — повышение точности измерений сверхдлинных баз длины и появление систем глобального позиционирования, что позволило выявить и измерить “абсолютные” (относительно географических полюсов) движения реперов на материках и в океанах [8, 9].

Выявление противоречия. Рассмотрение движений одной плиты относительно другой неизбежно

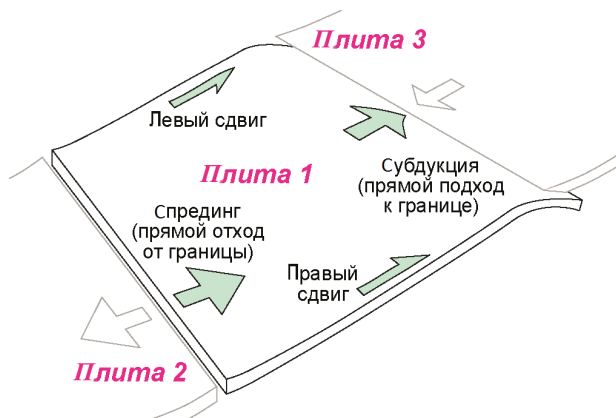


Рис. 1. Кинематические соотношения плит “первого приближения”

Fig. 1. Kinematic relations of plates of the “first approximation”

(чисто геометрически) приводило к представлениям о противоположности, но параллельности векторов относительных смещений плит независимо от их “абсолютных” (относительно полюсов) направлений перемещений.

Рассмотрим это на примере двух произвольно расположенных на разных плитах точек A и B , “абсолютные” векторы движения которых равны соответственно $\vec{a}$ и $\vec{b}$ (рис. 3, а). Векторы сориентированы друг относительно друга произвольным образом. Векторы относительных перемещений плит равны по величине и противоположны по направлению (рис. 3, б): $(\vec{a} - \vec{b}) = -(\vec{b} - \vec{a})$.

Ориентировка векторов $(\vec{a} - \vec{b})$ и $(\vec{b} - \vec{a})$ по отношению к ориентировке границы этих плит также произвольна. С изменением ориентировки границы относительно векторов *относительно* перемещения плит получим разные геодинамические результаты:

- возможно расхождение плит с образованием оси спрединга (в данном случае — с правосторонне-сдвиговой составляющей, рис. 3, в);
- возможно схождение плит с возникновением зоны субдукции (в данном случае с правосторонне-сдвиговой составляющей, рис. 3, г);
- трансформное правосторонне-сдвиговое скольжение при параллельности простираения границы векторам $(\vec{a} - \vec{b})$ и $(\vec{b} - \vec{a})$ (рис. 3, д).

Нетрудно видеть, что *относительные* движения плит вполне можно описать представлениями “второго приближения” кинематической модели, не выходя за их рамки.

Вместе с тем ни одна из предложенных (рис. 3, в—д) ориентировок границ плит относительно “абсолютных” перемещений точек A и B (векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$) классическим представлениям о спрединге, субдукции или трансформном смещении не соответствует.

Геодезические измерения векторов движений плит относительно полюсов Земли показали боль-



Рис. 2. Кинематические соотношения плит “второго приближения”

Fig. 2. Kinematic relations of plates of the “second approximation”

шое разнообразие направлений движений плит и всю сложность их пространственных сочетаний. Кроме параллельных обнаружилось сходящиеся, расходящиеся и даже перпендикулярные направления. В то же время в геодинамике продолжают оперировать представлениями об относительных перемещениях соседних плит без должного теоретического осмысления полученных глобальных данных. Поэтому на сегодня накопилось некоторое расхождение между локальными моделями кинематического взаимодействия плит в отдельной точке (или небольшом районе), оставшимися на уровне “второго приближения” кинематической модели, и глобальными данными об “абсолютных” движениях плит. Связь этих данных позволила бы значительно расширить множество кинематических моделей взаимодействий плит, происходящих на их границах.

Постановка проблемы. Следует учитывать, что каждая литосферная плита отражает на поверхности существование на глубине определенного объемного мантийного потока, в том числе участка его горизонтального приповерхностного течения [1]. Границы плит отражают и границы смежных мантийных потоков. Движения плит, соответственно, отображают вергентности смежных мантийных потоков. Многообразие сочетаний тектонических движений литосферных плит у их границ отражает и многообразие кинематических соотношений соседних мантийных потоков на глубине. Указанное выводит на передний план проблему выявления данного многообразия.

Метод решения. Для выявления многообразия сочетаний разнонаправленных мантийных потоков воспользуемся изменением точки отсчета — рассмотрим не движение одной плиты относительно другой, а *движения двух соседних литосферных плит относительно их общей границы*. Это позволит учесть соотношения вергентностей мантийных потоков на глубине. Будем считать такой подход “третьим приближением” кинематической модели.

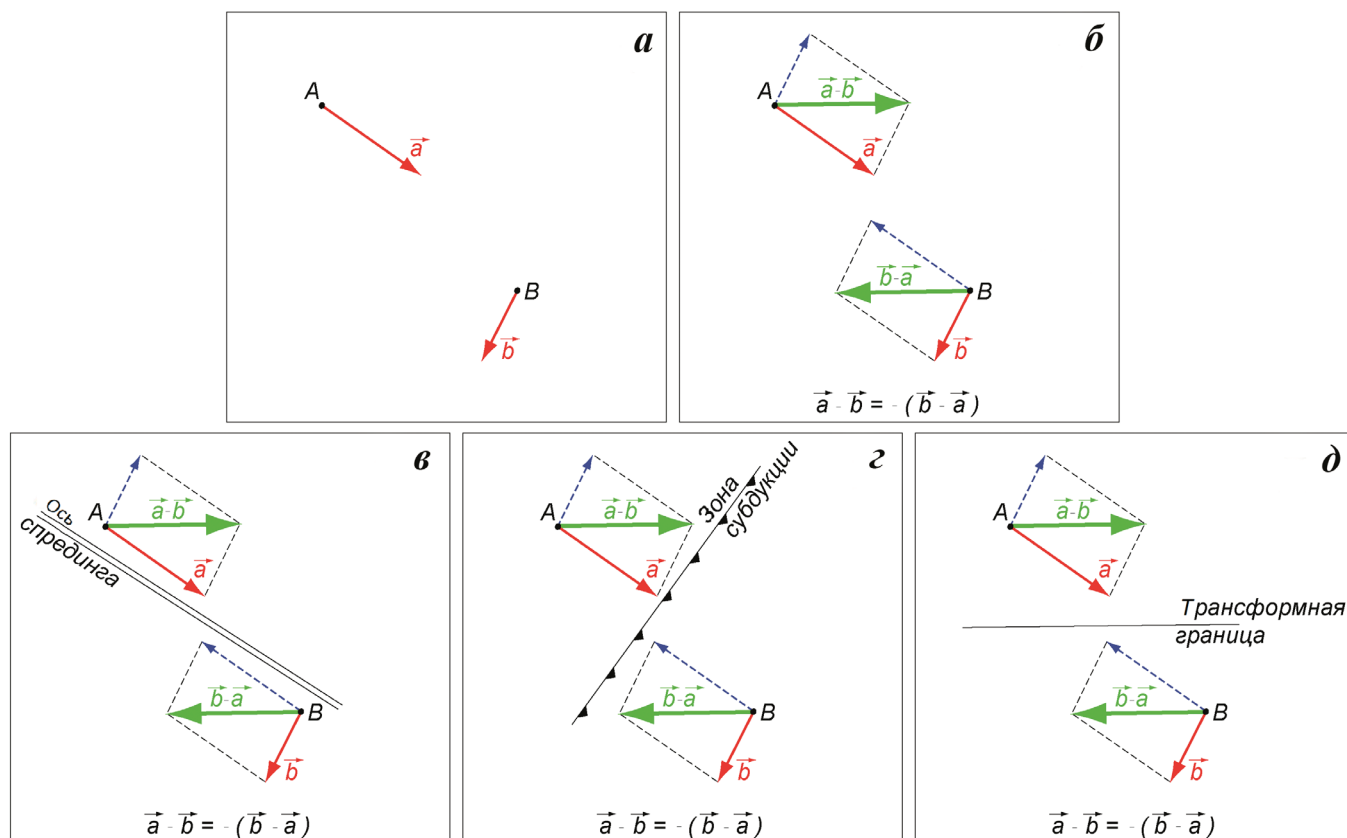


Рис. 3. Соотношения возможных границ плит и направлений их “абсолютных” и относительных движений

Fig. 3. Relations of possible boundaries of plates and directions of their “absolute” and relative movements

Многообразие сочетаний тектонических движений соседних литосферных плит (условно 1 и 2) представляет собой комбинацию вариантов направлений движений плиты 1 относительно их общей границы с вариантами движений плиты 2 относительно той же границы. Сделаем следующие допущения и упрощения в предлагаемой теоретической модели.

1. Векторы вергентности каждой плиты равны по абсолютной величине (но в общем случае не по направлению).

2. Граница плит прямолинейная. Это означает рассмотрение относительной кинематики плит в локальной области в окрестностях прямолинейного участка границы, с учетом того что по простиранию реальной, т. е. изогнутой, границы кинематика может и будет изменяться.

3. Азимуты вергентностей плит относительно простирания границы примем кратными 45° .

4. Ориентировкой направления (полярностью) субдукции при сходящихся движениях плит пренебрегаем — надвигание плиты 1 на плиту 2 или наоборот считаем временно равнозначными.

5. Рассмотрение проводим в горизонтальной плоскости.

Итоговая модель должна отвечать таким требованиям:

- независимости от положения наблюдателя относительно границы плит (на одной плите или на другой), т. е. относительно поворота на 180° ;
- неповторимости кинематических ситуаций;
- неравнозначности право- и левосторонне-сдвиговых ситуаций.

Необходимые дополнения к терминологии. Как известно, в структурной геологии при анализе перемещений тектонических блоков рассматриваются только относительные смещения их друг относительно друга. В соответствии с данным подходом и разработана терминология типов смещений (“сброс”, “правосторонний взбросо-сдвиг” и т. д.) [5]. Нетрудно видеть, что данная система терминов примерно соответствует “второму приближению” кинематической модели. В рамках предлагаемого подхода “третьего приближения” такая терминология оказывается недостаточной и представляет собой только некоторые частные случаи. Системе терминов потребуется модифицировать и расширить. Предлагаемые термины выделены жирным шрифтом.

Начнем с кинематических ситуаций “первого приближения”.

- прямой спрединг = “раздвиг” в традиционной системе терминов = *прямой отход*;
- прямая субдукция/обдукция = надвиг/подвиг = *прямой подход*;

— трансформные сдвиги = *правый/левый*, как обычно принято в структурной геологии.

Для кинематических ситуаций “второго приближения” добавляются следующие термины:

— косой спрединг = *право(лево-)сторонне-сдвиговый отход*;

— косая субдукция = *право(лево-)сторонне-сдвиговый подход*.

Ситуации “третьего приближения” будем описывать как комбинацию приведенных выше терминов попарно, для смежных плит, например:

— правый сдвиг с левосторонне-сдвиговым отходом;

— правосторонне-сдвиговый подход с левосторонне-сдвиговым отходом;

— прямой отход с правосторонне-сдвиговым отходом, и пр.

Понятно, что в такой системе терминов ситуация прямого спрединга (из “первого приближения”) выглядит как “прямой отход с прямым отходом”, а ситуация левосторонне-сдвиговой субдукции (из “второго приближения”) — как “левосторонне-сдвиговый подход с левосторонне-сдвиговым подходом”. Таким образом, кинематические ситуации “первого” и “второго” приближений в системе терминов “третьего приближения” становятся частными случаями более широкого множества. Все виды субдукций и обдукций становятся модификациями различных *подходов*, а все виды спредингов — *отходов*.

Формализация и построение абстрактной модели. Выше было принято, что мы рассматриваем векторы смещения плиты относительно границы с интервалом в 45° . Обозначим эти векторы и соответствующие им типы смещений буквенными индексами (для плиты 1):

a — левый сдвиг;

b — левосторонне-сдвиговый отход;

c — прямой отход;

d — правосторонне-сдвиговый отход.

Нетрудно видеть, что при принятых ограничениях вектор левого сдвига будет противоположно направленным вектору правого сдвига, вектор левосторонне-сдвигового отхода — вектору правосторонне-сдвигового подхода, и т. д. Поэтому данные векторы можно обозначить теми же буквами, но со знаком минус:

—**a** — правый сдвиг;

—**b** — правосторонне-сдвиговый подход;

—**c** — прямой подход;

—**d** — левосторонне-сдвиговый подход.

Для плиты 2, расположенной по другую сторону выбранной границы, векторы тех же типов смещений, обозначенных выше буквенными индексами, должны иметь противоположные направления. Например, для *правого сдвига* (—**a**) стрелка на плите 1 направлена вправо, а на плите 2 — влево. Так принято в структурной геологии, и будем этого

правила придерживаться. Оно использовано и для других векторов.

Итак, имеем 8 различных вариантов движения каждой плиты относительно границы и, соответственно, $8 \times 8 = 64$ варианта комбинаций данных движений для двух плит. Это можно описать соответствующей матрицей решений. В каждой клетке матрицы разместим буквенный индекс комбинаций движений в соответствии с принятыми выше обозначениями. Пусть первым стоит индекс движений плиты 1. Учтем, что перемещение наблюдателя с плиты 1 на плиту 2 эквивалентно повороту комбинации векторов в клетке матрицы на 180° , или, что то же самое, перестановке ее буквенных индексов. Это описывает одно и то же сочетание движений. Поскольку, например, **ab** $\equiv$ **ba**, можно использовать только полуматрицу решений (рис. 4). Таким образом, мы сокращаем количество возможных решений с 64 до 36 неповторимых комбинаций. Комбинации в таблице обозначены и стрелками, и буквенными индексами. В столбцах таблицы приведены движения плиты 1, а в строках — плиты 2 относительно их общей границы. Проанализируем полученный формальный результат.

Анализ полученного решения. Нетрудно видеть, что модели соотношений движений плит, сформулированные в “первом приближении” (см. рис. 1), располагаются на главной диагонали матрицы — это сочетания **aa**, **cc**, (—**c**)(—**c**), (—**a**)(—**a**). Они помечены зеленым цветом ячеек.

Модели “второго приближения” — сочетания **bb**, **dd**, (—**b**)(—**b**), (—**d**)(—**d**) — также располагаются здесь (см. рис. 2). Они помечены голубым цветом ячеек. Таким образом, модели “первого” и “второго” приближений отражаются в общем множестве полученных решений, занимают в нем закономерную позицию на главной диагонали матрицы и далеко не исчерпывают всего многообразия возможных кинематических ситуаций. Назовем подмножество решений, расположенных на главной диагонали матрицы, “классическим”.

Анализ матрицы показывает и наличие еще одного особого подмножества. Оно помечено на рис. 4 ячейками желтого цвета, располагающимися на малой полудиagonали матрицы. Это сочетания **a**(—**a**), **b**(—**b**), **c**(—**c**), **d**(—**d**). Такие сочетания отражают ситуации, когда смещений по границе плит нет, “плиты срослись” и только сама граница смещается как целое вместе с наблюдателем и обеими плитами. Такие ситуации в геодинамике упоминаются обычно вскользь и особо не анализируются, например: движения океанических плит по разные стороны трансформных разломов за пределами срединно-океанических хребтов, перемещения отмерших осей рифтов, зон субдукции или коллизионных швов.

Матрица решений показывает, что и в такой относительно “неактивной” ситуации есть несколько различающихся вариантов, за-

2 \ 1	a ←	b ↖	c ↑	d ↗	-d ↙	-c ↓	-b ↘	-a →
a →	aa ←→							
b ↖	ab ←↖	bb ↖↖						
c ↓	ac ←↓	bc ↖↓	cc ↑↓					
d ↗	ad ↖↗	bd ↖↗	cd ↑↗	dd ↗↗				
-d ↙	a(-d) ←↙	b(-d) ↖↙	c(-d) ↑↙	d(-d) ↗↙	(-d)(-d) ↙↙			
-c ↑	a(-c) ←↑	b(-c) ↖↑	c(-c) ↑↑	d(-c) ↗↑	(-d)(-c) ↙↑	(-c)(-c) ↑↑		
-b ↘	a(-b) ←↘	b(-b) ↖↘	c(-b) ↑↘	d(-b) ↗↘	(-d)(-b) ↙↘	(-c)(-b) ↑↘	(-b)(-b) ↘↘	
-a ←	a(-a) ←←	b(-a) ↖←	c(-a) ↑←	d(-a) ↗←	(-d)(-a) ↙←	(-c)(-a) ↑←	(-b)(-a) ↘←	(-a)(-a) ←←

Рис. 4. Возможные сочетания движений смежных литосферных плит

Fig. 4. Possible combinations of movements of adjacent lithospheric plates

висимых от положения наблюдателя (на плите 1 или 2):

— вариант **a** (**-a**) — *правосторонне-сдвиговая* трансляция границы с точки зрения наблюдателя на плите 1 (и *левосторонне-сдвиговая* — с точки зрения наблюдателя на плите 2);

— вариант **b** (**-b**) — трансляция границы *вперед-влево* с точки зрения наблюдателя на плите 2 (и *назад-вправо* с точки зрения наблюдателя на плите 1);

— вариант **c** (**-c**) — трансляция границы *вперед* с точки зрения наблюдателя на плите 2 (и *назад* с точки зрения наблюдателя на плите 1);

— вариант **d** (**-d**) — трансляция границы *вперед-вправо* с точки зрения наблюдателя на плите 2 (и *назад-влево* с точки зрения наблюдателя на плите 1).

Нетрудно видеть, что, например, комбинация “правосторонне-сдвиговый подход с левосторонне-сдвиговым отходом” дает в сумме параллельную трансляцию типа “назад-вправо” (для плиты 1).

Зависимость направления трансляции границы от местоположения наблюдателя не противоречит заданному требованию к построенной модели (“независимость от положения наблюдателя относительно границы плит”). В данном случае относительные движения плит равны нулю и решения “желтых” клеточек описывают трансляционные движения собственно границы. Таким образом, предложенный матричный метод построений оказался довольно конструктивным, поскольку позволил получить даже решения, выходящие за рамки поставленных задач. Назовем подмножество решений, расположенных на малой полудиagonали матрицы, “тривиальными”.

“Классические” и “тривиальные” варианты занимают в сумме 12 клеточек таблицы. Нетрудно видеть, что в принятой системе обозначений они индексируются одинаковыми буквами с одинаковыми знаками для “классических” вариантов и с разными знаками — для “тривиальных”. Остальные 24 варианта и нетривиальны, и не

предусмотрены современными геодинамическими моделями. Рассмотрим геологическое содержание полученных формальных решений.

Практическая проверка полученных результатов. “Классические” и “тривиальные” варианты приведем на примере Южной Атлантики (рис. 5).

ся активный Чилийский спрединговый хребет. По разные стороны от оси спрединга плиты движутся в разные стороны, что и дает приведенные сочетания векторов движения плит.

Вариант **ас** реализуется в случае параллельного расположения спредингового хребта, поддвигаемого

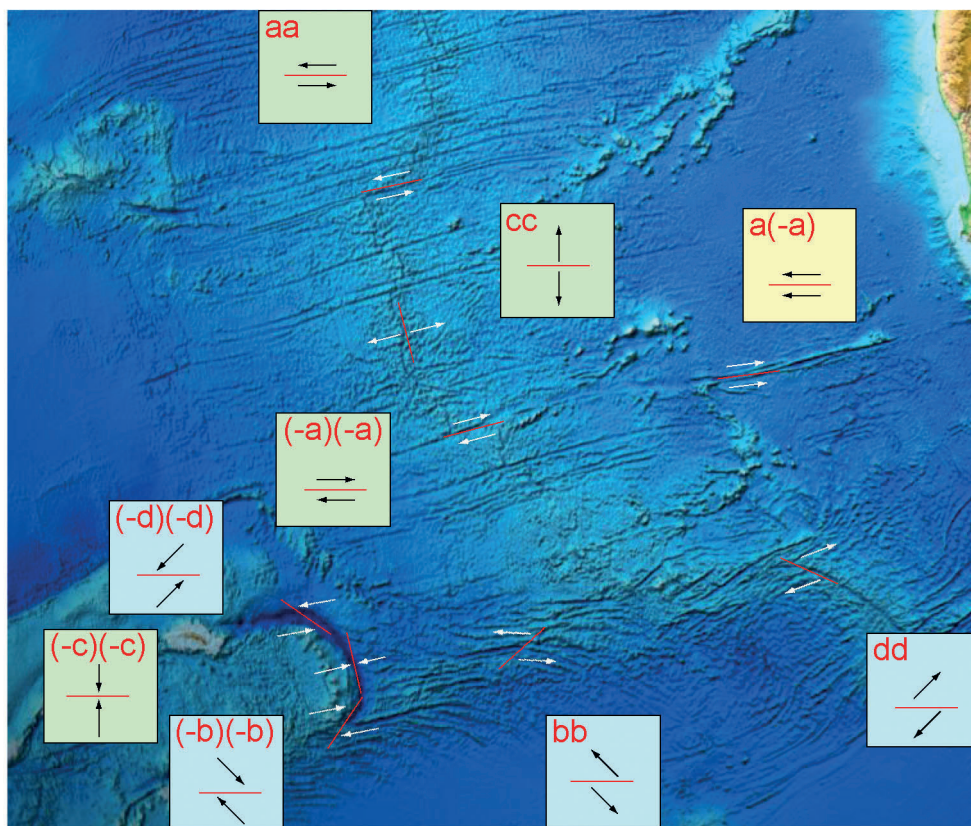


Рис. 5. “Классические” соотношения движений литосферных плит на примере Южной Атлантики

Fig. 5. “Classical” relations of lithospheric plate movements on the example of the South Atlantic

На Срединно-Атлантическом хребте видны варианты прямого спрединга (**cc**), лево- и правосторонних трансформных смещений — соответственно **aa** и **(-a) (-a)**. Примеры “косых” спредингов видны южнее “тройного сочленения” Южной Атлантики (южный фланг рисунка) — вариант **bb** с левосторонне-сдвиговой компонентой и вариант **dd** с правосторонней. В пределах Южно-Сандвичевой островной дуги реализованы как вариант прямой субдукции **(-c) (-c)**, так и “косые” варианты — **(-b) (-b)** с правосторонне-сдвиговой компонентой смещения и **(-d) (-d)** с левосторонне-сдвиговой компонентой. Они сменяют друг друга по простиранию дуги. Здесь же, в пределах Ангольской котловины (восточный фланг), виден один из тривиальных вариантов **(-a) a**, тождественный варианту **a (-a)**. Тривиальные ситуации видны и по другую сторону Срединно-Атлантического хребта.

Вариант **ab** и сочетающийся с ним вариант **a(-b)** можно видеть на юге Чилийского побережья Южной Америки (рис. 6). Материк в целом постепенно мигрирует к северу, а под него с запада поддвигает-

под сдвиговую границу соседней плиты. Такая редкая ситуация реализована в восточной части Панамской котловины у побережья Эквадора и Колумбии (рис. 7, справа). Переход западной субдукционной границы Южной Америки в сдвиговую сопровождается затуханием глубоководного желоба к северу.

Вариант **c(-b)** — соотношение активного спредингового хребта и надвигающейся на него плиты — виден в Калифорнийском заливе (рис. 7, слева вверху). Ось хребта не параллельна границе плиты, и вектор надвигания сориентирован под углом к границе, что создает правосторонне-сдвиговую ситуацию.

Соотношение **bc** представляет собой асимметричный спрединг, в ходе которого одна из новообразованных океанических плит отходит с левосторонне-сдвиговой составляющей. Такая ситуация видна у юго-западного побережья Мексики при расхождении Тихоокеанской плиты и плиты Кокос (рис. 7, вверху). Изгиб оси Восточно-Тихоокеанского поднятия к востоку приводит к возникновению ситуации **bd** — спрединга, осложненного латеральным

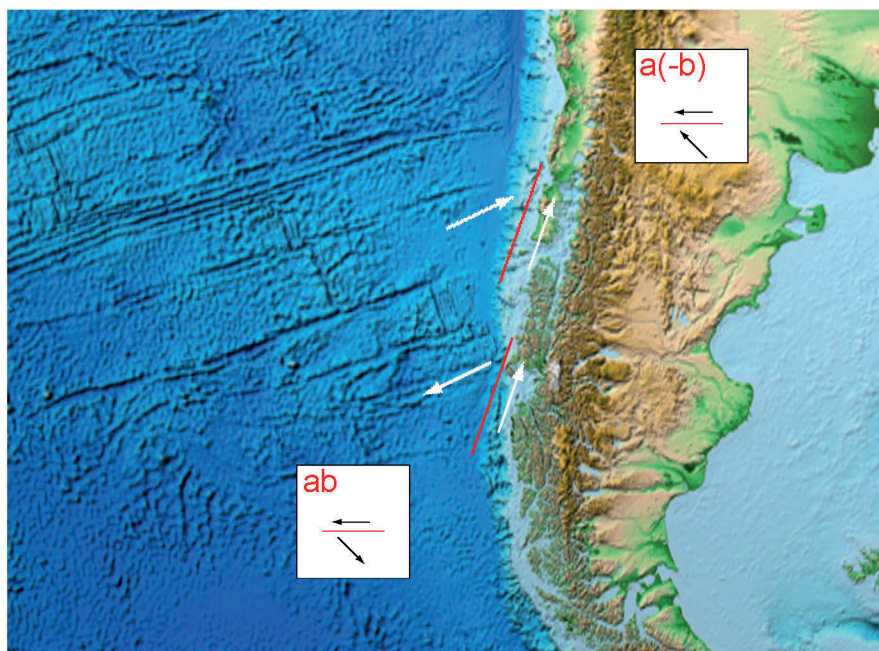


Рис. 6. Сочетание активного спредингового хребта со сдвиговой границей на юге Южной Америки
 Fig. 6. Combination of an active spreading ridge with a shear boundary in the South of South America

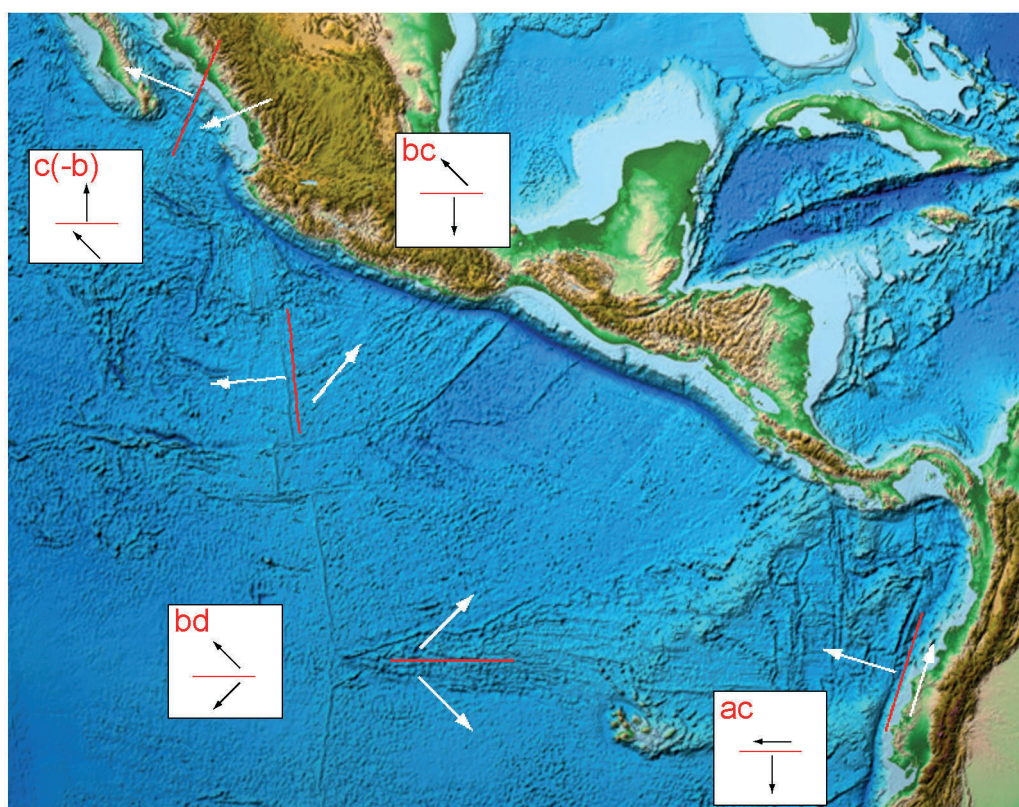


Рис. 7. Асимметричные и расходящиеся спрединговые ситуации
 Fig. 7. Asymmetrical and divergent situations of the spreading

расхождением новообразованных плит по одну из сторон оси спрединга. Плита Кокос, как уже упоминалось, отходит от Восточно-Тихоокеанского поднятия с левосторонне-сдвиговой составляющей, а

расположенная южнее плита Наска — прямо (рис. 7, внизу слева). Это приводит к расхождению краев океанических плит и заполнению зияния спрединговой Панамской котловиной.

Более сложные и разнообразные сочетания движений плит устанавливаются в северной части Тихого океана (рис. 8). Там Тихоокеанская океаническая плита и малая плита Хуан де Фука наращиваются в разные стороны от оси спрединга, взаимодействуют с надвигающейся континентальной частью Северо-Американской плиты на севере и востоке и осложняются на южном фланге трансформным разломом Мендосино.

шая плита Хуан де Фука, которая наращивается в оси спрединга, отодвигаясь на юго-восток. На своих окраинах она встречает надвигающуюся (ситуация $(-d)(-c)$, правая часть рисунка) Северо-Американскую плиту, а на юге ограничивается трансформным разломом Мендосино с образованием соотношения $(-b)(-a)$. Поскольку разлом Мендосино пересекает и активную ось спрединга, постольку западнее возникает соотношение $b(-a)$,

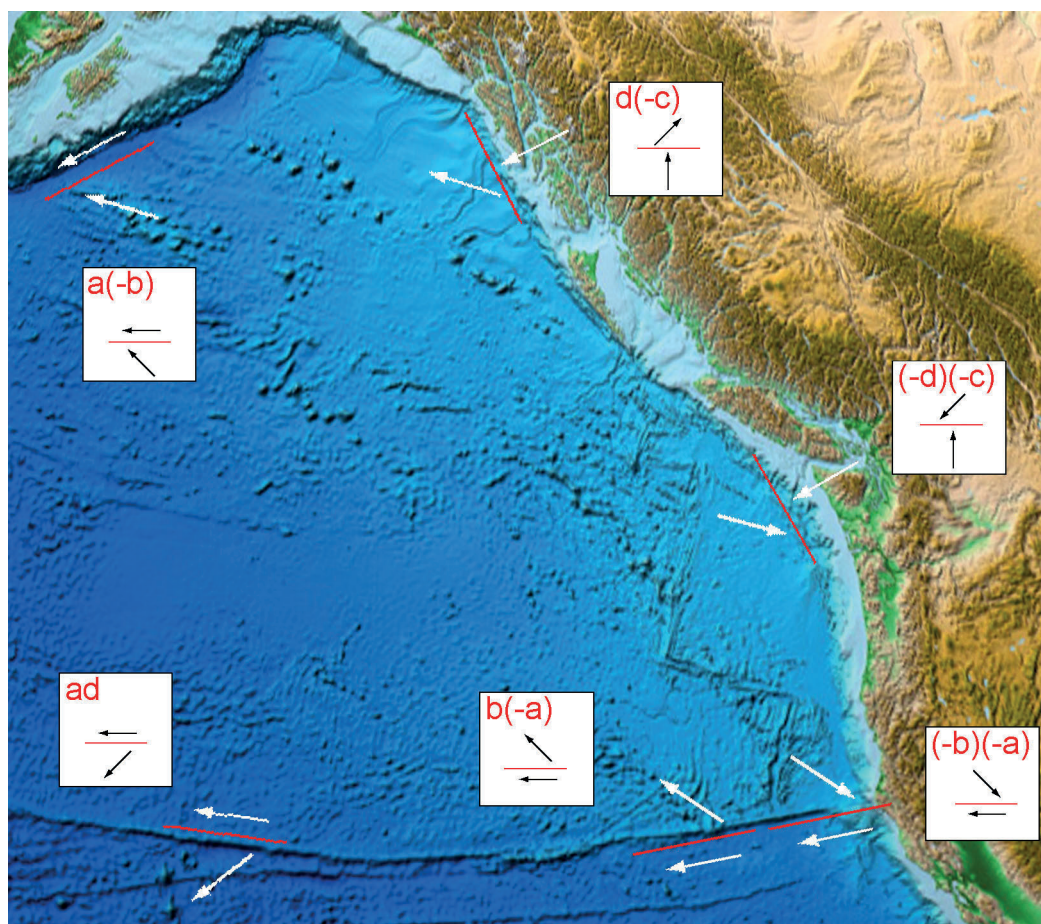


Рис. 8. Различные сочетания отходов, подходов и сдвигов в северной части Тихого океана

Fig. 8. Different combinations of wastes, approaches and shifts in the North Pacific ocean

Тихоокеанская плита, наращиваясь на северо-запад от оси спрединга, субдуцируется под окраину Аляски, формируя уже встречавшееся нам соотношение $a(-b)$ (см. рис. 6). Вследствие изгиба берега на Канадском побережье наблюдается уже соотношение $d(-c)$, т. е. правосторонне-сдвиговый отход океанической плиты от прямо надвигающейся континентальной. С этим связано и отсутствие глубоководного желоба на окраине континента, и аномальное омоложение возраста океанической плиты с приближением к континентальной окраине [9].

Далее на юго-восток вдоль Канадского побережья ситуация меняется вследствие того, что континентальная плита надвигается на действующую ось спрединга и при переходе через нее с Северо-Американской плитой контактирует уже неболь-

дополнительное к предыдущему. Оно относится снова к Тихоокеанской плите.

Расхождение частей Тихоокеанской плиты вдоль разлома Мендосино нарастает к западу, где в связи с его разворотом формируется соотношение ad — правосторонне-сдвиговый отход под малым углом от левостороннего сдвига (рис. 8, юго-западный фланг).

Многообразные сочетания разнонаправленных движений плит можно наблюдать и в Карибском бассейне (рис. 9). Карибская океаническая плита, движущаяся в северо-восточном направлении, надвигается на океаническую часть Южно-Американской плиты, движущуюся в западном направлении. Это приводит к формированию Малой Антильской островной дуги. Вследствие ее крутого

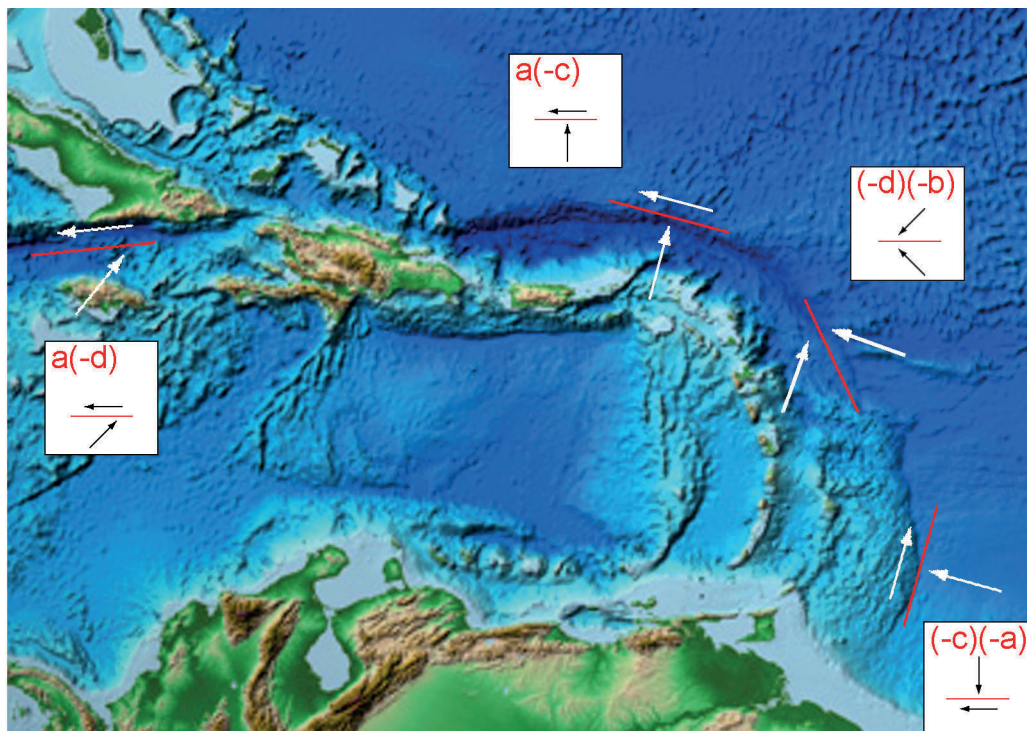


Рис. 9. Соотношения субдукционных и сдвиговых ситуаций в Карибском бассейне

Fig. 9. Relationships of subduction and shift situations in the Caribbean basin

изгиба наблюдающееся на южном фланге сочетание правостороннего сдвига с прямой субдукцией ($-c$) ($-a$) сменяется к северу сначала “сходящимся” соотношением $(-d)(-b)$, затем прямым надвижением на Атлантику Карибской плиты с ее левосторонним смещением (вариант $a(-c)$). Далее к западу, на южной окраине Кубы, ввиду дальнейшего разворо-

та границ плит и изменения полярности зоны субдукции соотношения плит представлены вариантом $a(-d)$ — встречной субдукцией под левосторонний сдвиг (рис. 9, левая часть).

Аналогичную изменчивость кинематики на изгибающихся границах плит можно видеть в Индонезии (рис. 10). Океаническая часть Австралийской

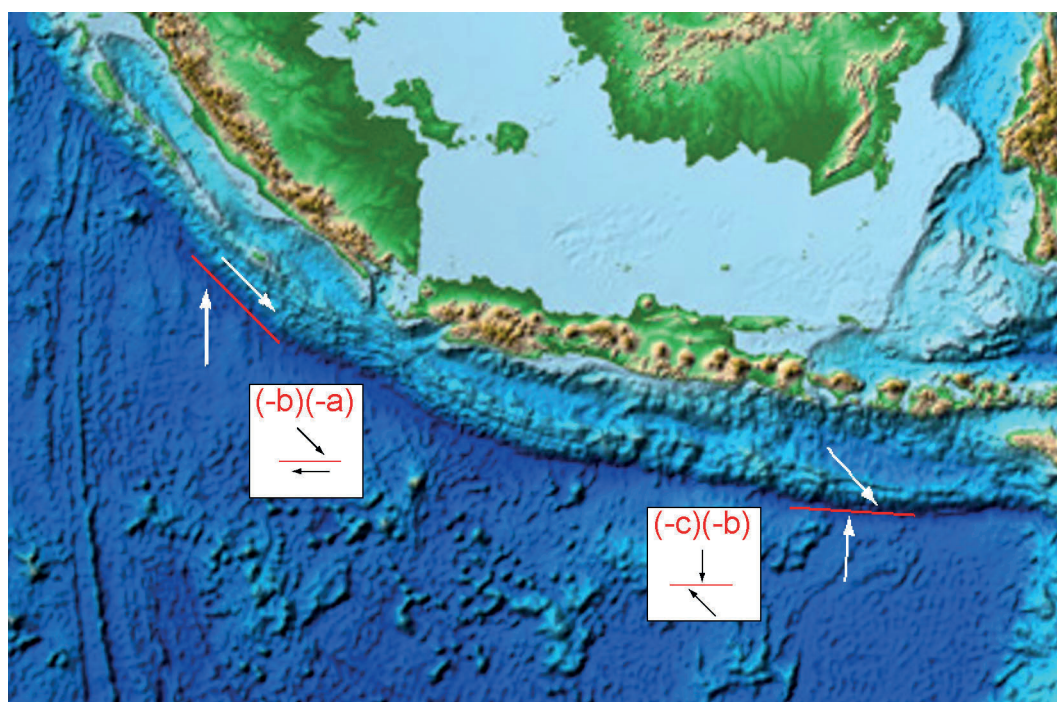


Рис. 10. Субдукционно-сдвиговые сочетания в Индонезии

Fig. 10. Subduction-shear combinations in Indonesia

плиты с юга поддвигается под острова Суматра и Ява в северном направлении, что хорошо трассируется гребнями долин трансформных разломов (левая часть рисунка). Юго-Восточная Азия, в свою очередь, смещается в юго-восточном направлении. На южной оконечности о-ва Суматра такое сочетание движений плит и их границ порождает соотношение $(-b)(-a)$. Изгиб границ плит приводит восточнее к появлению ситуации типа $(-c)(-b)$ к югу от о-ва Ява — правосторонне-сдвиговое надвигание при прямом поддвиге.

Южнее о-ва Суматра реализовано сочетание правостороннего сдвига с *правосторонне*-сдвиговой субдукцией, а на примере островной дуги Тонга-Кермадек можно видеть сочетание аналогичного правостороннего сдвига с *левосторонне*-сдвиговой субдукцией (вариант $(-d)(-a)$, рис. 11). Направление движения Тихоокеанской плиты на северо-запад маркируется “огненной трассой” подводного хребта Луисвилль (в правой части рисунка), а Австралийская плита с Северным островом Новой Зеландии и Кермадекской островной дугой движутся на северо-восток.

Сочетание правосторонне-сдвигового отхода с правосторонним сдвигом — сочетание $d(-a)$ — можно показать на примере Черноморского региона (рис. 12). Современное раскрытие бассейна с одновременным движением полуострова Малой Азии происходит в юго-западном направлении. В то же время современные движения Крыма, Карпат и Европы в целом происходят в северо-восточном направлении [7, 10]. В Крыму реализована современная правосторонне-сдвиговая ситуация.

Проведенный анализ современных геодинамических обстановок поверхности Земли позволил выявить 18 из 24 нетривиальных сочетаний движений плит относительно их границ. В общей таблице (см. рис. 4) шесть найденных вариантов

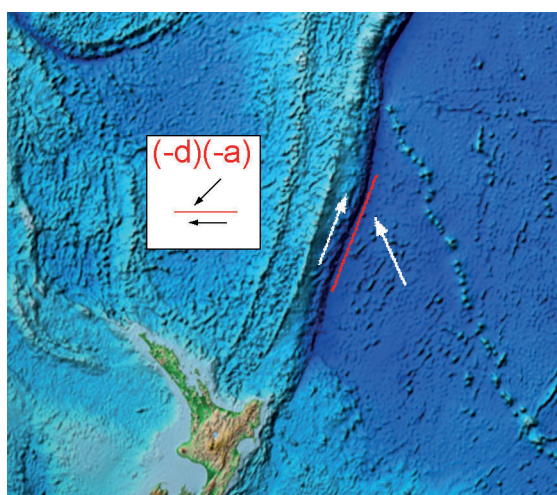


Рис. 11. “Косое” поддвигание Тихоокеанской плиты в сдвиговый желоб Тонга-Кермадек

Rice. 11. “Oblique” subduction the Pacific plate in shear trench, Tonga-Kermadec

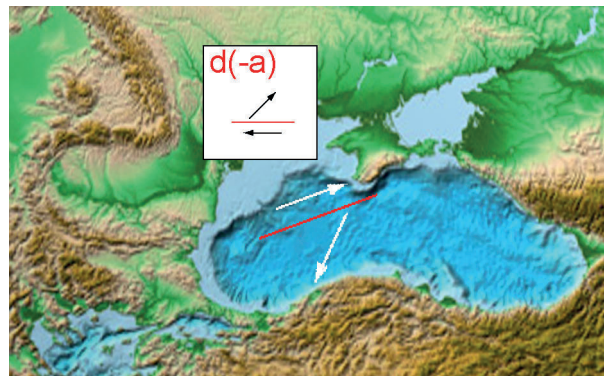


Рис. 12. Сдвигово-спредингвая ситуация в Черноморском регионе

Fig. 12. Shift-spreading situation in the Black Sea region

помечены клеточками розового цвета. Возможно, они не реализованы в современных геодинамических обстановках. Это не исключает их появления в будущем или существования в прошлом.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Сочетания движений литосферных плит относительно их границ намного разнообразнее вариантов их движений друг относительно друга.

2. Многообразие этих сочетаний выявляется на основе изменения точки отсчета — рассмотрены не движения *плиты относительно плиты*, а движения *каждой из плит относительно их границы*.

3. Полученное многообразие включает известные варианты относительных движений плит в качестве частных случаев.

4. Появление новых сочетаний движений плит потребовало введения дополнительных терминов.

5. Новая терминология поддается формализации.

6. На основании формализации построена матрица сочетаний относительных движений плит, включающая в себя 36 различных вариантов.

7. Восемь из них отражают известные в современной геодинамике соотношения. Дополнительно устанавливаются 4 тривиальных соотношения миграции границы плит без относительного смещения самих плит (“отмершие границы”, “палеограницы” и пр.). Для этих 12 вариантов показаны примеры их современной реализации.

8. Предложенный вариант формализации подсказывает существование еще 24 новых вариантов соотношений движений литосферных плит относительно их общей границы.

9. Для 18 из них найдены соответствия в современных геодинамических обстановках мира.

10. Для остальных шести вариантов соотношений движений плит относительно их границы соответствий найти пока не удалось. Возможно, это связано с особенностями современной геодинамики, и такие обстановки могли иметь реализацию в прошлом или будут иметь в будущем. Теоретически они предусматриваются.

11. Возможно значительное расширение приведенного множества моделей кинематических взаимодействий литосферных плит: а) рассмотрение вариантов неравенства векторов движений плит по абсолютной величине; б) включение в рассмотрение вариантов вергентностей плит относительно границы под углами, не кратными 45°; в) рассмотрение вариантов подходов (схождений) плит с разной полярностью зон субдукции/обдукции.

12. Приведенная формализация позволяет перейти к рассмотрению кинематического взаимодействия разнонаправленных мантийных потоков, вызывающих движения литосферных плит.

13. Следует учитывать, что рассмотренные варианты — это лишь *поверхностные* отражения объемных, трехмерных, движений мантийных потоков. Их описание потребует перехода к исследованию более сложных, трехмерных, сочетаний векторов движений мантийного материала.

Список библиографических ссылок

1. Горяйнов С.В. Трехмерное моделирование форм мантийных потоков. *Геоинформатика*. 2012. № 3. С. 1—7.

2. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. Москва. Недра, 1979. 312 с.
3. Ковалев А.А. Мобилизм и поисковые геологические критерии. 2-е изд., перераб. и доп. Москва. Недра, 1985. 223 с.
4. Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. Москва. Мир, 1989. 427 с.
5. Кушнарев И.П. Методы изучения разрывных нарушений. Москва: Недра, 1977. 248 с.
6. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. Москва: Научный мир, 2004. 612 с.
7. Третьяк К.Р., Сервант О.В. Результат визначення сучасних горизонтальних деформацій на території Центральної Європи. *Вісник геодезії та картографії*. 2002. № 2. С. 13—19.
8. Bird P. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geoinformatika*. 2003. V. 4, N 314. 52 p. DOI:10.1029/2001GC000252.
9. Muller R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest. Age, spreading rate, spreading symmetry of the world's oceanic crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008. V. 9, Q04006. DOI:10.1029/2007GC001743.
10. Turkey earthquakes [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/turkey].

Поступила в редакцию 17.03.2018 г.р

ДО ПИТАННЯ ПРО ПРИГРАНИЧНУ КІНЕМАТИКУ СУМІЖНИХ ЛІТОСФЕРНИХ ПЛИТ

С.В. Горяйнов

Український науково-дослідний інститут природних газів (УкрНДІГаз)
Гімназійна наб., 20. Харків 61010, Україна (gorjajnov@mail.ru)

При розгляді кінематики відносних рухів літосферних плит використано новий методичний підхід. Він полягає у тому, що проаналізовано не рух однієї плити відносно іншої, а рухи обох плит відносно їхньої межі. Цей підхід потребував доповнень у структурно-геологічну термінологію, а також дав змогу формалізувати орієнтацію рухів плит і в подальшому оперувати з ними у символічній формі. В результаті теоретично обчислено 36 варіантів комбінацій напрямків рухів плит, з яких 8 — добре відомі, 4 — відображають варіанти зсувів прадавніх (неактивних) меж, а 24 є новими для геодинамічної теорії. Для 18 нових варіантів показано ділянки їхньої сучасної реалізації в різних регіонах світу; ще 6 варіантів поки не виявлено, їх відкриття — справа майбутнього. З урахуванням отриманого результату згодом можна перейти до аналізу взаємодій різноспрямованих мантийних потоків.

Ключові слова: літосферні плити, тектонічні рухи, просторові особливості.

TO THE ISSUE OF THE BORDER KINEMATICS OF THE ADJACENT PLATES

S.V. Goryajnov

Ukrainian scientific-research Institute of natural gases (UkrNIIGas)

Purpose The relative motions of lithospheric plates are traditionally regarded as spreading, subducting and transforming, with one or other shear components. This inevitably leads to notions of parallelism and opposites of vectors of their relative displacements. The analysis of the data shows a much greater variety of such combinations. Thus the purpose of the work is to identify a complete set of possible relative movements of plates, including both the relationships known so far and new ones.

Design/methodology/approach In considering the kinematics of relative movements of lithospheric plates, we used a new methodological approach, which consists in analyzing not the movement of one plate relative to the other but the movement of both plates relative to their border. This approach required to expand the structural-geological terminology. The updated terminology made it possible to formalize the orientation of the plate movements, further operating with them in symbolic form.

Findings Eight variants for the movement of the plate relative to its boundary were selected. In combination with eight of the same variants of the opposite plate motion, 64 combinations have been obtained. After rejecting the variants symmetrical with respect to the change of the observation point (on one plate or on another), there remain 36 unique variants of combinations of the direction of plates movement relative to their overall border. The analysis has shown that 8 of them are well-known, 4 reflect the variants of displacement of ancient (inactive) boundaries without the relative displacement of plates, and 24 are new to geodynamic theory.

Verification of the received result was carried out by defining the combinations of plates movement in the district, taking into account the data on their movements. For 18 theoretically calculated new variants, we have shown the areas of their modern implementation in different regions of the world; other 6 variants have not been found yet, their discovery being a matter of time.

Practical value/implications The results obtained allow us to move over to the analysis of interaction of multidirectional mantle flows.

Keywords: lithospheric plates, tectonic movements, spatial features.

References:

1. Goryajnov S.V. Three-Dimensional modeling of mantle flow forms. *Geoinformatics*. 2012. no. 3, pp. 1—7 [in Russian].
2. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Introduction to geodynamics. Moscow: Nedra, 1979. 312 p. [in Russian].
3. Kovalev A.A. Mobilism and geological search criteria. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Nedra, 1985. 223 p. [in Russian].
4. Cox A., Hart R. Plate Tectonics. Moscow: Mir, 1989. 427 p. [in Russian].
5. Kushnarev I. P. Methods of study of tectonic faults. Moscow: Nedra, 1977. 248 p. [in Russian].
6. Lobkovsky L.I., Nikishin, A.M., Khain V.E. Modern problems of geotectonics and geodynamics. Moscow: Nauchny mir, 2004. 612 p. [in Russian].
7. Tretyak K.G., Servant A.V. Definition of modern horizontal deformations in the territory of Central Europe. *Visnyk geodezii ta kartografii* (Bulletin of surveying and mapping). 2002. no 2, pp. 13-19 [in Ukrainian].
8. Bird P. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2003. Vol. 4, no 314. 52 p. Doi:10.1029/2001GC000252.
9. Muller R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest. Age, spreading rate, spreading symmetry of the world's oceanic crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. Vol. 9, Q04006. DOI:10.1029/2007GC001743.
10. Turkey earthquakes [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/turkey/>].

Received 17/03/2018