

О движении литосферных плит в океанах и переходных зонах

В. В. Гордиенко, 2018

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
Киев, Украина

Поступила 23 апреля 2018 г.

Розглянуто утворення, горизонтальне переміщення та занурення літосферних плит, що відповідає гіпотезі тектоніки плит. Показано, що магматизм серединно-океанічних хребтів не відповідає об'єму кори плит і магматизму перехідних зон від континентів до океанів. При переміщенні плит до континентів 70 % плит не занурюються. Ще 7 % довжини перехідних зон мають глибини гіпоцентрів землетрусів 20 ± 20 км (перехідні зони колумбійського типу). Сейсмічність на континентах поблизу "пасивних" східних околиць Північної Америки та Африки, західної та південної околиць Австралії, західного краю Євразії менш інтенсивна, але, в принципі, не відрізняється від "колумбійської". Приблизно 2 % від довжини перехідних зон представлені землетрусами с глибинами вогнищ до 70—100 км. Близько 14 % займають зони з глибинами гіпоцентрів до 250—450 км, 7 % від довжини меж континентів і океанів становлять найбільш глибокі вогнища (450—700 км). Отже повні фокальні зони (і, відповідно, зони субдукції) є не правилом, а винятком. Геолого-геофізичні дані не відповідають схемі, згідно з якою край плити перед жолобом ущільнюється внаслідок остигання. Занурення плити нездійснене через її низьку густину і великий опір мантії під жолобом. Розміщення гіпоцентрів землетрусів під жолобом та острівною дугою не узгоджується з субдукцією. Не вдається пояснити занурення плити ущільненням її корої частини внаслідок поліморфного перетворення піроксенів у гранати. Здійснено аналіз енергетики процесу субдукції за даними щодо параметрів вогнищ землетрусів. Він показав, що для реалізації процесу за схемою тектоніки плит джерело енергії має бути у 1000 разів потужніше за існуючі. Одержані результати дають змогу вважати гіпотезу субдукції літосферних плит нереальною. Наведено альтернативну схему формування фокальних зон.

Ключові слова: рух плит, зони субдукції, джерела енергії, глибинні процеси.

Введение. Понятия спрединга и субдукции являются ключевыми в гипотезе тектоники плит (ГТП), критике которой посвящены многие публикации авторов [Гордиенко, 2012, 2017а; Gordienko, 2017 и др.]. Альтернативный вариант описания глубинных процессов в океане и переходной зоне тихоокеанского типа (т.е. на контакте альпийской геосинклинали и океанской котловины), согласно представлениям адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ), рассмотрен в работах [Гордиенко, 2012, 2017а; Гонтовая и др., 2017; Gordienko, 2017 и др.] и здесь подробно не рассматривается. Ниже будут приведены только сведения, непосредственно относящиеся к теме статьи.

В настоящее время очевидно, в том числе и для части сторонников ГТП, что

сползание плит с поднятый срединно-океанических хребтов (СОХ) не может быть единственной или основной причиной их якобы имеющего место погружения на сотни километров на контакте с континентами. Ключевая роль в ГТП отводится уплотнению пород погружающейся плиты. Считается, что она сильно остывает на пути от СОХ к окраине континента, становится плотнее верхних горизонтов мантии. Этот контраст обеспечивает начало погружения, а далее уплотнение продолжается за счет полиморфных преобразований материала плиты вплоть до подошвы переходной зоны между верхней и нижней мантией — до глубины примерно 700 км. Перемещение плиты вызывает землетрясения, маркирующие ее траекторию. Их гипоцентры образуют фо-

кальные зоны, обрисовывающие контур плиты. Мощность последней по этим данным оказывается порядка 50—100 км. Ее выделяют (но менее определенно) и положительные скоростные аномалии в верхней мантии переходных зон.

Нереальность описанной конструкции очевидна даже без критики утверждений о перемещении плит на значительные расстояния (ошибочной интерпретации полосовых аномалий магнитного поля и т. п.). Рассмотрим ее элементы, перечисленные выше.

Перемещение плит перед субдукцией. "Производительность" магматизма СОХ по известным авторам данным [Менард, 1966; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и др.] совершенно не соответствует объему "образующейся" коры. Последний примерно в 50 раз больше. Не обнаруживается и резких различий в интенсивности магматизма между хребтами, которая обеспечивала бы различия в "скорости спрединга".

Расчетная "производительность" вулканов Тихоокеанского кольца при учете только лав, поступивших на поверхность (т. е. оценка по минимуму), по данным работ [Ритман, 1964; Набоко, 1967; Гущенко, 1979; Апродов, 1982 и др.], примерно в 4 раза больше, чем СОХ. Разница слишком значительна, чтобы ее считать случайной. ГТП не объясняет, как выплавление из коровой части плиты, созданной спредингом, может в несколько раз превосходить ее объем. Подключение плавления в литосферном клине [Авдейко и др., 2006 и др.] под влиянием флюидов из погружающейся плиты (т. е. для плавления материала плиты флюидов недостаточно, а для ультрамафитов литосферного клина хватает и их части) представляется натяжкой. Кроме того, реальные глубины очагов под островными дугами оказываются практически такими же, как и в остальных частях океанов.

Постулированное сползание с СОХ и последующее остывание при движении к континентам на 70 % их контактов не приводит к погружению плит. Никаких

объяснений этого факта сторонники ГТП не приводят. Можно предположить, что погружающиеся плиты остывают в большей мере, чем не испытывающие погружения. На самом деле происходит в основном обратное. Плиты в Тихом океане с невысокими хребтами движутся быстрее, чем в других океанах, но именно первые субдуцируют (рис. 1).

Например, плиты Перуанской и Чилийской котловин перемещаются к западному краю Южной Америки в несколько раз быстрее, чем плиты Бразильской и Аргентинской котловин к восточному. Расстояния от СОХ до берегов сопоставимы, Срединно-Атлантический хребет (САХ) на 1 км выше Восточно-Тихоокеанского поднятия. Тем не менее желоб и фокальная зона со стороны Атлантики отсутствуют, а со стороны Пасифики наблюдаются. Однако южнее 40° ю. ш. тихоокеанские плиты не образуют на контакте с материком желоб и фокальную зону (есть только малоглубинная сейсмичность). А напротив южного фрагмента САХ возникают Южно-Сандвичев (Скоша) желоб и фокальная зона, причем не у края континента, а в океане. Такая же "неожиданность" встречается напротив САХ на Антильской дуге севернее Южной Америки и напротив Южно-Индийского хребта у Яванско-Суматранской островной дуги. Последняя фокальная зона без прерыва переходит в зону внутриконтинентальной геосинклинали Тетис. Интересна особенность восточной части Яванской зоны: она отделена от шельфа северной Австралии только желобом, т. е. в этом районе происходит субдукция континента (причем фокальная зона достигает максимальных глубин 500—700 км). А на небольшом расстоянии севернее погружается еще одна плита под Целебесскую впадину. Как можно увязать с представлениями ГТП то, что СОХ практически упираются в системы "дуга—желоб" Скоша (см. рис. 1), Новой Зеландии и Алеут? Как объяснить "торцовое сочленение" СОХ Калифорнийского залива и Центрально-Американского желоба? Подоб-

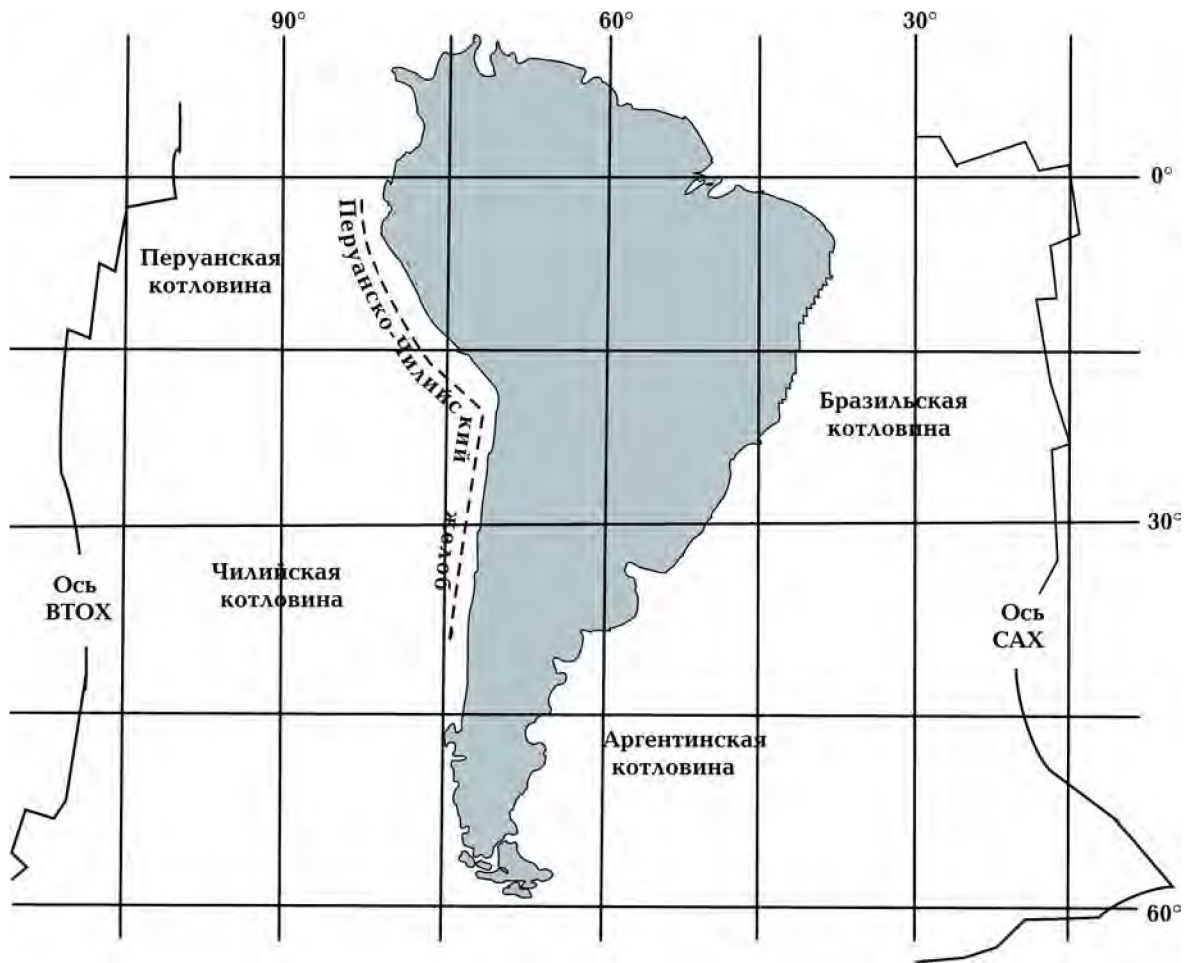


Рис. 1. Размещение СОХ у Южной Америки. Штриховые линии — глубоководные желоба.

ных примеров можно привести множество, они наглядно демонстрируют отсутствие связи "образования и перемещения" плит с субдукцией.

Мнение сторонников ГТП о принадлежности одних краев континентов к атлантическому (пассивному) типу, других к тихоокеанскому (активному) ничего не объясняет. Тем более, что в южной части Тихого океана, согласно этой терминологии, располагается атлантическая окраина Антарктиды. В. В. Белоусов вполне справедливо выделил еще колумбийский тип переходной зоны [Белоусов, 1982] на востоке Тихоокеанского активного кольца. На западном краю Северной Америки от Мексики до Аляски (как и в указанных выше фрагментах западного края Южной Аме-

рики) отсутствуют желоба и фокальные зоны. Глубины гипоцентров землетрясений составляют здесь 20 ± 20 км, не differing от распространенных на прилегающих частях материков. Переходные зоны колумбийского типа составляют около 7% от общей протяженности этих структур. Следует отметить, что сейсмичность на континентах вблизи "пассивных" восточных краев Северной Америки и Африки, западной и южной краев Австралии, западной окраины Евразии местами менее интенсивна, но принципиально не отличается от "колумбийской". Примерно на 2% длины переходных зон распространены землетрясения с глубиной очагов до 70—100 км. Около 14% занимают зоны с глубинами гипоцентров до 250—

450 км, 7% — с наиболее глубокими очагами (450—700 км). В интервале глубин 300—450 км землетрясения происходят реже, чем выше и ниже, в некоторых зонах отсутствуют. Таким образом, полноразвитые фокальные области (и, следовательно, зоны субдукции) оказываются не правилом, а исключением.

Все перечисленные зоны сейсмичности, кроме самой глубокой, распространены в прибрежных альпийских геосинклиналях (рис. 2). Они характерны и для внутриконтинентальных альпид. На контакте океанов с доальпийскими континентальными блоками сейсмичность отсут-

ствует или приурочена к зонам современной активизации преимущественно внутри континентов. Землетрясения максимальной глубинности происходят под задуговыми котловинами, где фиксируется молодая, продолжающаяся до настоящего времени океанизация. Вторым вариантом — современная активизация прибрежных континентальных блоков. В этих случаях процесс в районе распространения эпицентров (Ханкайский массив в Приморье и Альтиплано в Андах) только начался, прогнозировать его развитие сложно. Отличия этого варианта современной активизации от происходящих в других ра-

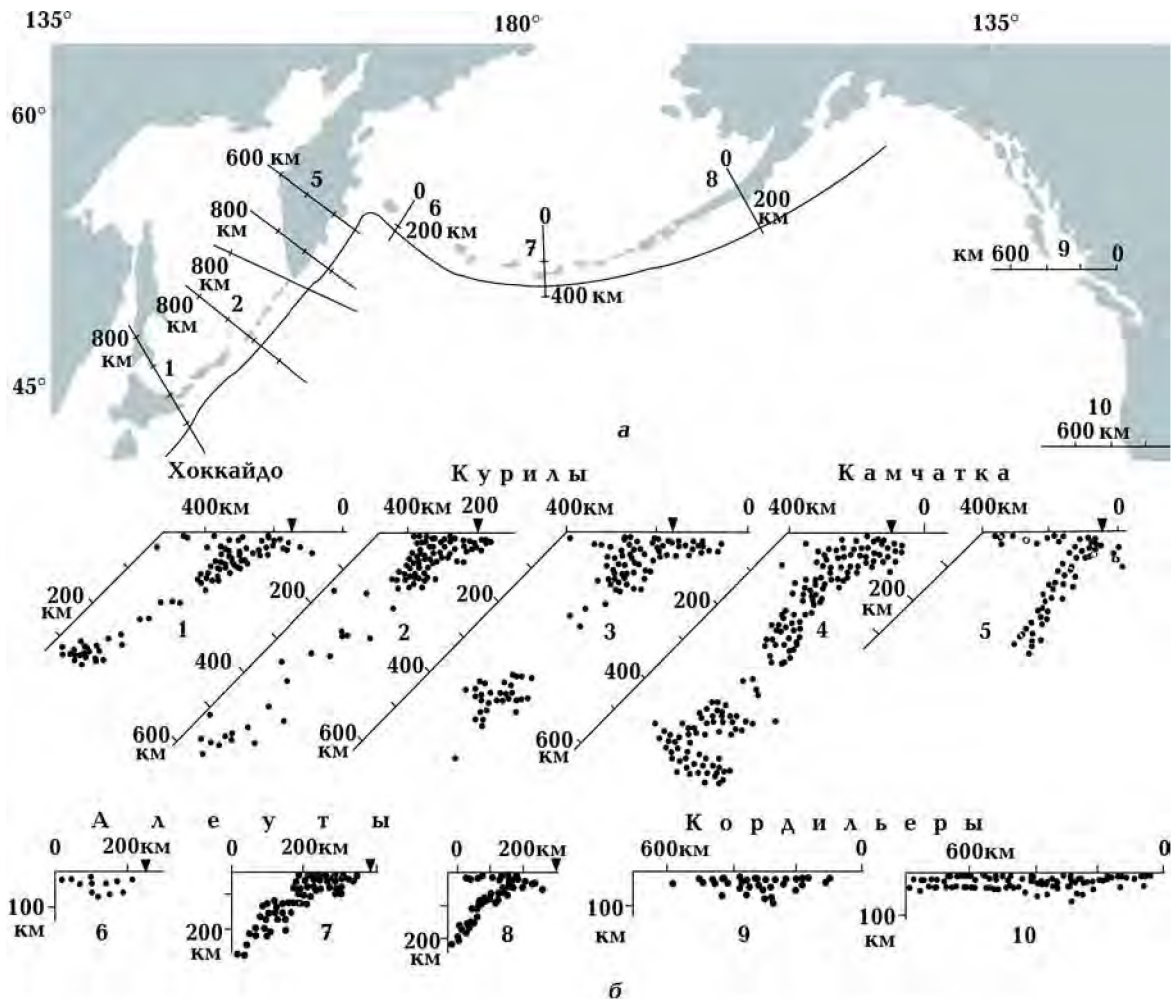


Рис. 2. Глубины гипоцентров в разных регионах севера Тихоокеанского кольца: а — расположение профилей (штриховая линия — ось глубоководного желоба); б — расположение гипоцентров в разрезах тектоносферы [Тектоносфера ..., 1992; Гонтовая, Гордиенко, 2006; Гонтовая и др., 2009, 2017; Jiang et al., 2009]. Черные треугольники — оси желобов.

йонах вполне можно представить в рамках АПГ [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017], построив соответствующие модели тепломассопереноса. Но пока слишком мало примеров таких событий и геолого-геофизических данных об их ходе.

Глубины гипоцентров переходных зон колумбийского типа, сосредоточенных на первых десятках километров, согласуются с наблюдаемыми под современными рифтами, в частности под СОХ. Геологическая информация также указывает на преобладание в настоящее время рифтогенеза (а не одноактной активизации) и в геосинклинальном поясе Кордильер и в прилегающих частях океана и Северо-Американской платформы.

Внешние края океанических котловин.

Прогноз состояния внешнего (ближайшего к континенту) края котловины, согласно АПГ, совершенно определенный [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и др.]. Это часть недавно (граница мезозоя и кайнозоя) океанизированного региона, имевшего ранее континентальную кору (вероятно, более основную, чем типичная материковая). Тепловые аномалии в верхних горизонтах мантии здесь еще не полностью релаксировали, сохранилась неглубокая астеносфера, запас тепловой энергии которой может использоваться при активизации в виде адвективного тепломассопереноса, вторжений выплавок в кору.

Представление ГТП о плите, остывшей при приближении к континенту, — умозрительное, игнорирующее реальные геолого-геофизические данные. В котловинах, включая их окраины, встречается множество абиссальных холмов. Этот термин не должен вводить в заблуждение: средняя высота поднятий превышает 500 м. По Г. Менарду [Менард, 1966] их количество (в Тихом океане более 10 тысяч) позволяет считать холмы наиболее распространенной формой рельефа на Земле. Изучение происхождения и возраста таких образований (например, в Северо-Западной котловине Тихого океана [Менард, 1966; Ломтев, 2016]) показало, что многие

из них отражают результаты неоген-четвертичного вулканизма, некоторые — позднемезозойского. Последние относятся к периоду океанизации территории Пасифики, неоген-четвертичные — к молодой активизации, продолжающейся до настоящего времени. По составу неоген-четвертичных магматитов можно судить об их происхождении из очагов расплава преимущественно на глубине 40 ± 15 км (часть явно коровая). Весьма вероятно, что такая зона частичного плавления существует и сейчас. Активизация на некоторых перифериях котловин (окраинных валах) сопровождается землетрясениями с неглубокими гипоцентрами, встречающимися также и на значительных расстояниях от переходной зоны.

Геофизические данные для окраины плиты удобно рассмотреть на примере хорошо исследованной Камчатской части переходной зоны.

Изученность теплового потока Земли на окраине Северо-Западной котловины Тихого океана незначительна, но все же можно констатировать наличие здесь интенсивных положительных аномалий, верхняя часть тектоносферы явно прогрета в степени, допускающей существование неглубокой астеносферы. Расчет тепловой модели подтверждает это [Гонтовая, Гордиенко, 2006; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и др.].

Скоростная модель мантии до глубины около 200 км обнаруживает под краем котловины отрицательную скоростную аномалию, указывающую на небольшую степень частичного плавления (рис. 3) [Гонтовая, Гордиенко, 2006; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017]. Скоростной разрез в западной части профиля [Жао и др., 2010] построен с большей погрешностью и меньшей детальностью, но показывает примерно ту же картину распределения аномалий. Гравитационное поле региона объясняется только при учете соответствующего разуплотнения мантии [Гонтовая и др., 2009; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017]. На сопоставимых глубинах располагается и зона повышенной электропро-

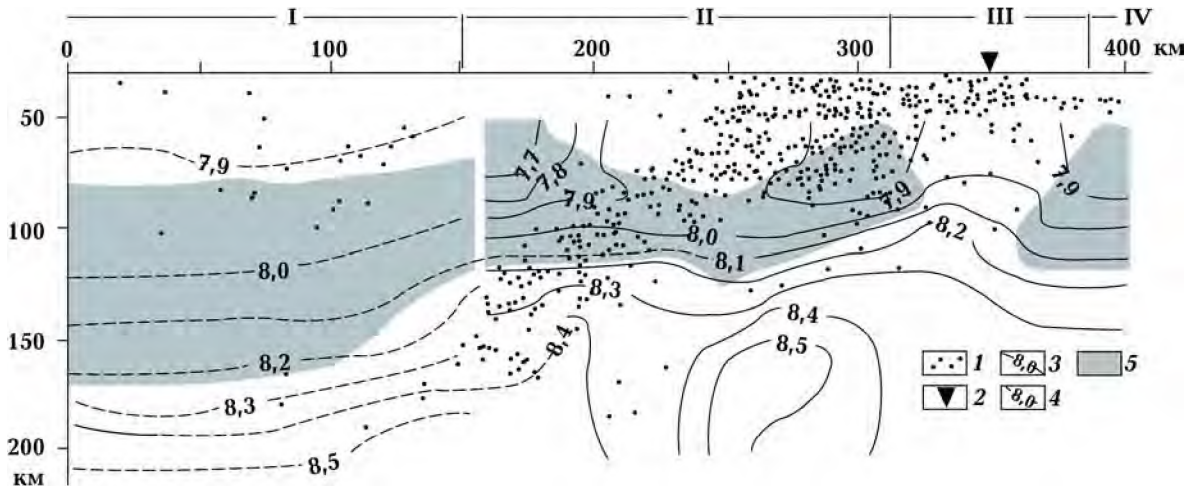


Рис. 3. Скоростная модель верхней мантии вдоль профиля примерно на 50 км южнее профиля 5 на рис. 2: 1 — гипоцентры землетрясений; 2 — ось желоба; 3, 4 — изолинии скорости продольных сейсмических волн (V_p , км/с) (3 — по [Гонтовая, Гордиенко, 2006], 4 — по [Жао и др., 2010]); 5 — астеносфера. I — активизированная альпийская геосинклиналь Восточной Камчатки, II — активизированная альпийская геосинклиналь Восточной Камчатки, III — желоб, IV — окраина Северо-Западной котловины Тихого океана.

водности [Тектоносфера ..., 1992; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и др.]. Другими словами, весь комплекс геолого-геофизических данных опровергает представление ГТП об остывшей плотной плите, способной погрузиться в мантию. Скоростные разрезы для многих котловин разных океанов практически совпадают, средняя модель сопоставлена со средней для глубоководных желобов, под которые якобы внедряется плита котловины (рис. 4). Очевидно, что скорости под желобами выше в значительном интервале глубин (см. рис. 3).

По принятому ГТП мезозойскому "возрасту" окраины плиты зона субдукции с желобом действует более 100 млн лет. По геологическим данным возраст желоба 0,5—1,0 млн лет [Ломтев и др., 1997], т.е. он фиксирует последний этап постгеосинклинального развития островной дуги, часто присутствующий в истории внутриматериковых геосинклиналей.

Выявленное различие скоростей между блоком желоба и примыкающими к нему блоками океанической плиты и островной дуги соответствует плотностному контрасту в 0,05—0,06 г/см³. Для интервала

глубин порядка 250 км это значительная величина. Блок желоба может "простоять" на несколько километров, одна-

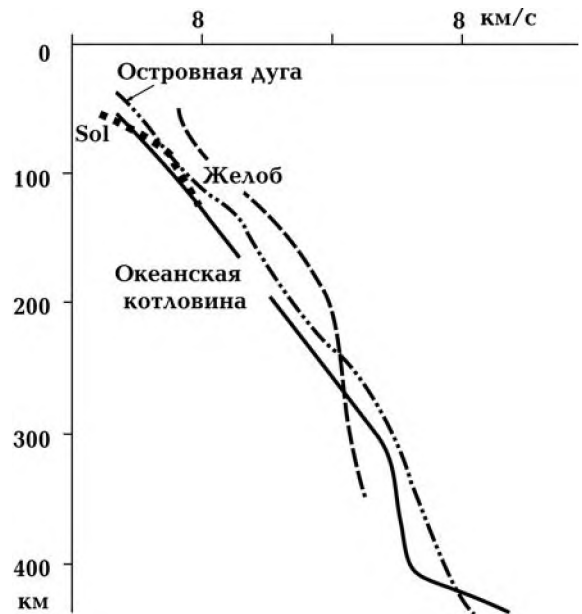


Рис. 4. Скоростные модели желоба, океанской котловины и островной дуги [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017]. Пунктир (Sol) — скорости пород мантии при начале плавления.

ко тепловая аномалия лишь отчасти возникла в последний миллион лет, основная ее величина связана с более древними процессами. Но все же не исключено, что недавнее изменение температуры (T) недр по обе стороны от блока желоба привело к его проседанию, достаточному для образования впадины необходимой глубины или ее части.

Отметим еще один аспект ситуации: если движение плиты, сползающей с СОХ к континенту, реально и происходит в виде скольжения по частично расплавленному слою, то преодолеваемая сила трения подошвы об астеносферу незначительна. Погружение плиты с самого начала (до появления в ней утяжеляющих элементов) требует преодоления сопротивления на порядки большего.

Такой вывод можно подкрепить несложными расчетами, предполагающими, естественно, правильность общей схемы процесса по ГТП (против нее можно привести множество возражений). Сравним силы, необходимые для горизонтального перемещения плиты по вязкой жидкости, и создаваемые наклонной плитой на склоне СОХ. В первом случае можно воспользоваться формулой Ньютона, дополнив ее длиной плиты между концом склона и желобом (L_1): $F_1 = \eta \cdot v \cdot L_1 / H_1$, где η — динамическая вязкость, v — скорость плиты, H_1 — толщина верхнего слоя жидкости, в котором ее скорость сокращается вниз от v до 0. Во втором случае $F_2 = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sigma \times H_2 \cdot L_2$, где α — угол склона СОХ, L_2 — его длина, σ — плотность, H_2 — средняя толщина плиты. L_1 и L_2 могут различаться в несколько раз, но не исключено, что ошибки в оценках η и H_1 более значительны, величина v с точки зрения автора просто умозрительна. Поэтому нет смысла рассматривать варианты соотношений длин и скоростей. Просто необходимо констатировать, что на имеющемся уровне знаний об используемых параметрах результат подобных расчетов скорее качественный.

Используя данные рис. 3, 4 и сведения о вязкости из работы [Гордиенко, 2017б],

получим для рассматриваемых сил сопоставимые величины, т. е. с этой стороны схема возможна. Но при переходе к желобу динамическая вязкость среды, в которой предстоит перемещаться плите, увеличивается на 3 порядка, ни о каком использовании для ее движения сползания с СОХ не может быть и речи. Соответственно, ставится вопрос и о движении плиты в районе котловины, не говоря о других несоответствиях геолого-геофизическим данным (см. выше).

Распределение мелкофокусных землетрясений. Не обнаружив источника погружения плит вне фокальной зоны, попытаемся выявить его в ее пределах. Утверждения сторонников ГТП по этому поводу крайне противоречивы.

Пожалуй, одним из немногих общепринятых постулатов является начало погружения плиты на внешнем краю желоба. Анализ, проведенный в работе [Теркот, Шуберт, 1985], показал, что наклон дна на внешнем склоне не может быть достигнут за счет упругого изгиба плиты. В этой ее части должны все время возникать трещины, создавая мелкофокусную сейсмичность. Частота таких событий максимальна по сравнению с другими (неизгибающимися) частями плиты. На самом деле максимума малоглубинной сейсмичности в этом районе нет (см. рис. 2, 3), на некоторых пересечениях фокальной зоны сейсмичность в верхней части разреза внешнего склона вообще отсутствует. Максимум она достигает, как правило, в 100—150 км ближе к континенту, и только после этого места начинается углубление гипоцентров. Никакого объяснения ГТП такого поведения гипотетической плиты авторам не приходилось встречать в литературе.

Мелкофокусная сейсмичность распространена в фокальных зонах не только в районе, где по ГТП начинается погружение плиты. Она отмечается над всеми очагами в средней (см. рис. 3) и нижней частях верхней мантии и переходной зоне к нижней. Согласно АПГ, это естественно [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и

др.]: процессы современной активизации альпийской геосинклинали и океанизации коры задуговой впадины включают перемещение вещества на разных глубинах, в том числе небольших. Для ГТП мелкофокусные землетрясения над глубоко погружившейся плитой "лишние".

Землетрясения средней глубинности.

Примерно треть в интервале глубин от 0 до 200—250 км под островной дугой занимает астеносферная линза. По ГТП она возникает от нагрева пород "литосферного клина" теплом трения поверхности плиты об окружающие породы. Нельзя понять, почему этот источник тепла односторонний: ведь на противоположной границе плиты астинолинзы нет. А смещения по плоскостям разрывов, где преодолевается сила трения и выделяется тепло, происходят по всей мощности плиты. Именно на это должно указывать распределение гипоцентров.

Предположение о пониженной температуре плавления субдуцирующей коровой части плиты не может быть проверено количественно без параметров процесса: энергии источника, движущего плиту, распределения сил и коэффициента трения. Базиты коры на этой глубине уже должны превратиться в эклогиты. Их количество может создать уплотнение плиты по сравнению с мантией не более чем на $0,005 \text{ г/см}^3$, которого недостаточно для преодоления прочности пород и смещения. Температура плавления эклогита на глубине астинолинзы существенно не отличается от солидуса перидотита [Бутвина, 2006]. Разница составляет около 100°C .

Часто для объяснения повышенного уплотнения плиты привлекаются результаты расчета ее температуры. Пониженные по сравнению с вмещающей мантией значения должны формировать плотностную аномалию и способствовать преобразованию пироксенов мантийной части плиты в гранаты, что также увеличивает плотность. При создании этой нелепой конструкции (в которой отсутствует источник энергии, ее расход и другие параметры) куда-то пропадает нагрев плиты трением,

доводящий ее до плавления, т. е. до температуры выше окружающей мантии. В таком "неполном" виде схема может указывать на возникновение довольно значительных плотностных аномалий (до $0,05—0,07 \text{ г/см}^3$). Но она может способствовать движению плиты вертикально вниз, а не перемещению ее под углом около 45° . Причин для образования заметной горизонтальной составляющей, как показано выше, не обнаружено.

До глубин около 200—250 км преобразование базитов в эклогиты — единственный реальный источник заметного уплотнения плиты при погружении. Он явно не способен быть причиной погружения столь крупного объекта. Но по АПГ происходит погружение не массивной плиты, а сравнительно небольших блоков, в значительной степени состоящих из коровых эклогитов. Естественно, это возможно только под толстой корой геосинклинали (островной дуги) с мощным базальтовым слоем. Именно здесь и должны быть сосредоточены гипоцентры средней глубины. Предельная глубина землетрясений этого происхождения — до уравнивания плотностей эклогитов и окружающих перидотитов. В перидотитах плотность растет с глубиной по мере увеличения концентрации гранатов, заменяющих собою пироксены. Совпадение плотностей достигается в основном на глубинах 200—250 км. Последовательное изменение глубины обеспечивается миграцией активности поперек геосинклинали ("волна Обуэна"). Она распространяется от внутренних районов к внешним, на этом пути преобразования коры и старты погружающихся астинолитов случаются все позже и успевают достичь все меньших глубин.

Можно описать этот процесс на приближенном количественном уровне. Используем формулу Стокса для скорости погружающегося объекта повышенной плотности в вязкой среде: $V = 2r^2 \cdot \Delta\sigma \cdot g / 9$, где r — полуразмер блока, $\Delta\sigma$ — аномальная плотность, g — ускорение силы тяжести. Согласно АПГ, при одном эпизо-

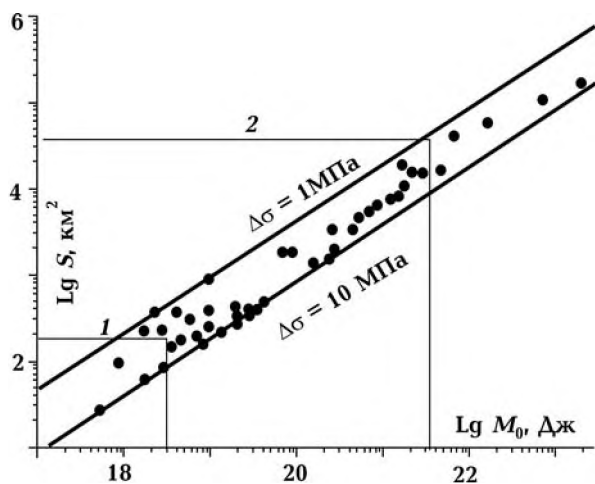


Рис. 5. Сопоставление площади, по которой происходит смещение (S), с сейсмическим моментом (M_0). $\Delta\sigma$ — снятое напряжение. Параметры землетрясений: 1 — среднеглубинное, 2 — максимальное по глубине.

де активизации в коре мантийными вторжениями заменяется слой базитов мощностью около 8 км [Гордиенко, 2012, 2017а; Gordienko, 2017]. Вероятно, размер блоков, погружающихся в мантию, должен быть сопоставим с этой величиной, для значительно большего в основной части коры вне зоны частичного плавления не хватит места. Оценить r можно по величине сейсмического момента (M_0) типичных землетрясений в рассматриваемом интервале глубин как $0,5 \cdot S^{0,5}$ (рис. 5).

Значение $\lg M_0$ определим по энергетическому классу событий (K) в фокальной зоне Камчатки как $K + 5,3$ (\lg сейсмической энергии в джоулях).

Многочисленные слабые землетрясения соответствуют мелким объектам, явно не способным переместиться на заметные расстояния. Дело не только в низкой скорости. Попадая в астеносферу (см. рис. 3), мелкие объекты разуплотняются как от нагрева, так и от обратного полиморфного перехода из эклогита в базальт.

Типичное значение K среди значительных землетрясений — 13. Соответственно S составит около 160 км². Для хорошо изученного землетрясения этого региона [Гонтовая и др., 2017] параметры согла-

суются при минимальном снимаемом напряжении. Но оно произошло на много большей глубине и, скорее всего, с другим механизмом. Поэтому при выборе S использована средняя часть полосы $r = 6,3$ км (см. рис. 5). Среднее уплотнение погружающегося блока на всем пути около 0,07 г/см³, динамическая вязкость в среднем около 10¹⁹ Па · с, $V = 195$ км/млн лет. Точность расчета оценить трудно. Но можно предположить, что при продолжительности импульса активности в первые миллионы лет складывается такая ситуация: стартовавшие первыми блоки достигают глубин 200—250 км, а последние (у желоба) только отрываются от подошвы коры. Данные об активизации геосинклинали Камчатки свидетельствуют о примерно такой длительности активных импульсов. Более детально изученные вертикальные движения различных зон геосинклинали Карпат прямо согласуются с прогнозом (рис. 6).

В постгеосинклинальной активизации альпид теплопереноса в нижней тектоносфере не происходит, поэтому землетрясения на максимальных глубинах здесь отсутствуют. В процессе молодой

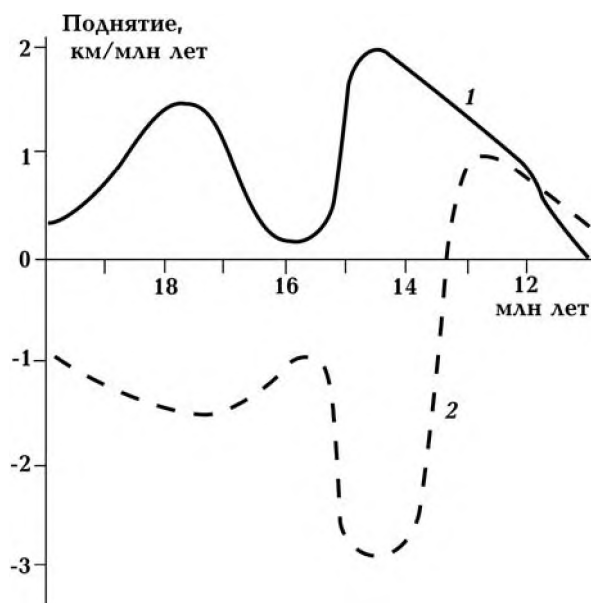


Рис. 6. Скорости вертикальных движений поверхностей Складчатых Карпат (1) и Предкарпатского прогиба (2) [Дослідження ..., 2005].

активизации котловины по АПГ описанные события исключаются. В океанической коре нет слоя базитов достаточной мощности, пригодного для образования уплотненных эколгитовых блоков.

Приуроченность землетрясений средней глубинности именно к постгеосинклинальной активизации подтверждается данными по материковым альпийским геосинклиналям Тетиса. По известным авторам данным (<http://zempl.info.online>; <http://www.isc.ac.uk> (для периода 2000—2018 гг.) и др.) землетрясения в интервале глубин 70—250 км происходят под Бетидами (до 150 км), Пиренеями (до 160 км), Апенниннами (до 300 км), Эллинидами (до 180 км), Карпатами (до 200 км), Понтом (до 160 км), Тавром (до 170 км), Кавказом (до 170 км), Загросом (до 170 км), Копет-Дагом (до 110 км), частью Памира (до 190 км), Гиндукушем (до 300 км), Гималаями (до 260 км), Западно-Индокитайской зоной складчатости (до 260 км). В обширной Индонезийской геосинклинали трудно отделить элементы Тетиса от элементов Пасифид. Поэтому к приведенному списку уверенно можно добавить только альпийскую геосинклиналь Суматры, непосредственно продолжающую структуры Тетиса на явно континентальной коре. В перечисленных регионах отсутствуют землетрясения нижнего этажа (450—700 км). Одно из исключений — Тирренское море с субокеанической корой (и прилегающие окраины Сицилии и южной Италии), где глубины гипоцентров превышают 500 км. Близкая ситуация в районе Гибралтара (за дугой Бетид-Атласа) — до 630 км. Можно предположить, что здесь (как и в некоторых других молодых впадинах внутренних районов обширных геосинклиналей) начался процесс океанизации. Согласно ГТП, глубокая фокальная зона в месте коллизии Африканской и Евразийской плит лишена смысла.

Глубокие землетрясения. Следующий по глубине (глубже примерно 450 км) источник сейсмичности появляется под регионом с другим типом эндогенного режима, в основном под зонами океанизации

(задуговыми впадинами). Когда они дополняют островные дуги, в фокальной зоне возникает просвет с ослабленной или отсутствующей сейсмичностью. Если впадины отсутствуют, землетрясений максимальной глубинности нет. Такая ситуация довольно широко распространена, хотя и не повсеместна (см. рис. 2). Примерно то же можно сказать о глубинной сейсмичности у подошвы верхней мантии под недавно активизированными фрагментами древних платформ.

Согласно АПГ, причина таких землетрясений — понижение температуры в обширном блоке (450—650 км) после опускания на его кровлю сравнительно холодного вещества, которое приводит к полиморфному преобразованию минералов перидотита [Гонтовая и др., 2017; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017]. Завершается переход пироксенов в гранаты и преобразование оливина- α сначала в оливин- β , затем в оливин- γ (собственно минерал со структурой шпинели). Формируемые этими процессами положительные аномалии плотности достигают 0,15—0,20 г/см³, поэтому при перемещении теплового фронта примерно на 10 км превышает прочность пород (принятая ее величина в 0,1—1 ГПа, конечно, не обязательно верна) и происходит смещение. Имеющаяся информация по Охотскому морю позволила подробно рассмотреть поверхностные проявления этого процесса и показать их соответствие в плане зоны глубинной сейсмичности (рис. 7).

В работах [Гонтовая и др., 2017; Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017] было показано, что изменение температуры в зоне полиморфных преобразований у границы верхней и нижней мантии привело к очень быстрому некомпенсированному опусканию дна впадины. Мощность верхнего слоя (включая воду) достигла 6 км. В районе Охотского моря к северо-западу от Южно-Охотской впадины этот этап только начался (мощность верхнего слоя 3—4 км). На северо-востоке моря он завершился (мощность верхнего слоя 6 км); здесь не только произошло быстрое опус-

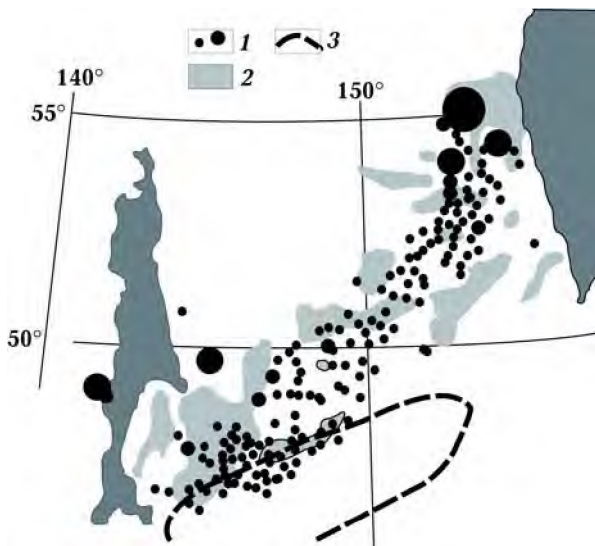


Рис. 7. Погружение докайнозойского фундамента части Охотского моря и зона глубинной сейсмичности: 1 — эпицентры землетрясений разных энергетических классов на глубинах 400—700 км, 2 — районы с мощностью молодых осадков 3 ± 1 км и глубиной дна $1 \pm 0,3$ км, 3 — контур Южно-Охотской впадины.

кание, но и образовавшаяся впадина успела заполниться осадками.

Эти данные позволяют сделать вывод: в недрах Южно-Охотской впадины и северо-восточной части моря источник глубинных землетрясений уже "отработал". В полосе северо-западнее Южно-Охотской впадины он действует в настоящее время. Именно здесь и сконцентрированы глубокие землетрясения (см. рис. 7).

Судя по их расположению в других задуговых бассейнах, процесс океанизации не обязательно перемещается от островной дуги в сторону, противоположную океану. В случаях Целебесской, Марианской и Фиджийской впадин землетрясения максимальной глубинности встречаются между впадинами и островными дугами. Другими словами, "горизонтальная составляющая движения субдуцирующей плиты" практически отсутствует.

Тепловая модель процесса по АПГ, построенная в работе [Гонтовая и др., 2017], позволяет на количественном уровне объяснить геологические явления и физичес-

кие поля. Ошибки расчета значительны, хотя учтены не все вероятные источники погрешностей. В частности, полиморфные преобразования с уплотнением вещества экзотермичны, поэтому движение тепловой волны вниз по переходной зоне замедляется. Для полного варианта модели пока недостаточно данных.

Источник энергии субдукции. По АПГ на всех глубинах верхней мантии и переходной зоны к нижней при накоплении достаточного количества радиогенного тепла и возникновении адвективного тепло-массопереноса очень быстро формируются тепловые аномалии. Потери энергии связаны с адиабатическими изменениями температуры и относительно невелики. Релаксация аномалий ведет к избыточному тепловому потоку по сравнению с кондуктивным теплопереносом. Некоторая часть нагрева идет на формирование упругих напряжений, примерно 1 МПа на каждый градус аномального изменения температуры. Эта незначительная аномалия достаточна для создания запаса энергии в 10^6 Дж/м³, необходимого для землетрясения. Энергетический класс и сейсмический момент определяются объемом аномального вещества. Превышение прочности пород литосферы достигается подъемной силой перегретого очага частичного плавления в верхних горизонтах мантии и внедрениями вылавок в кору, создающих вторичные очаги. Схема включает и упомянутое выше образование и погружение эклогитов. Их перемещение генерирует среднеглубинную сейсмичность. В результате последнего процесса перед очередной активизацией треть эклогитов в верхней мантии на глубинах от Мохо до 200—250 км коровые, природа примерно такого же количества неясна [Уханов и др., 1988]. По данным [Jacob, 2004], все находящиеся в мантии эклогиты имеют первично-коровое происхождение.

Данные о параметрах землетрясений позволяют рассчитать мощность источника энергии, который необходим для перемещения плиты как единого целого в соответствии с представлениями ГТП. Ис-

пользуем для этого принимаемую гипотезой скорость движения плит (10 см/год) в Тихом океане, где формируются в основном фокальные зоны. Собственно, изменение этой величины даже в несколько раз не изменяет оценки результата расчета (см. ниже). Вычисления удобно провести, кроме упомянутого выше землетрясения, на средней глубине для одного из наиболее изученных событий последнего времени в фокальной зоне Охотского моря — землетрясения 24.05.2013 г. магнитудой 8,3 с гипоцентром на глубине около 640 км. Оно зафиксировано на необычно больших расстояниях. Можно предположить, что распределение афтершоков (вообще-то нехарактерных для землетрясений такой глубинности) в определенной мере обрисовывает объем, в пределах которого были сняты напряжения. Это параллелепипед с длиной и шириной по разным оценкам 210 ± 20 км и толщиной около 100—150 км [Гонтовая и др., 2017]. Оценка удельной упругой энергоемкости среды [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017] составляет $6 \cdot 10^5$ Дж/м³. Во всем объеме объекта может быть запасена энергия (при отсутствии релаксации) около $3,3 \cdot 10^{21}$ Дж. Сейсмический момент незначительно отличается от этой величины — около $3 \cdot 10^{21}$ Дж. Снимаемое напряжение оказывается минимальным для сильных землетрясений (см. рис. 5). Большое количество выделившейся энергии связано с большим объемом очага.

Близость сейсмического момента к предельно возможному содержанию энергии в объеме источника указывает на очень быстрое формирование напряжений — в течение периода много меньше времени релаксации. Скорее всего, менее 1 млн лет, т. е. напряжения возникли геологически недавно, но их формирование в этом месте может быть связано с условиями, предшествующими активизации.

Значения сейсмического момента, площади и модуля сдвига позволяют рассчитать смещение ($D = M_0 / G \cdot S$) при землетрясении. Оно оказывается по данным разных авторов 5—6 м [Гонтовая и др., 2017].

Для принятой скорости движения плиты такое смещение осуществляется примерно за 36 лет. Соответственно, расход энергии под единицей поверхности на перемещение составляет примерно 59 Вт/м², что на 3 порядка превышает тепловой поток Земли. Для типичного среднеглубинного землетрясения (см. выше) смещение 2,1 м, на что плите необходимо 14 лет. Мощность источника энергии около 30 Вт/м². Эти колоссальные величины, конечно, установлены неточно. В частности, при другом подходе к расчету G их можно сократить в несколько раз [Яновская, 2006 и др.]. Тем не менее очевидно, что поиски такого объекта лишены смысла, ни один из реальных естественных процессов не создает источников энергии такой мощности. Энергию в таком объеме невозможно накапливать. Более того, результат нагрева от преодолеваемой силы трения за 1 млн лет составит 4—5 тыс. градусов (в зависимости от глубины, т. е. нормальной фоновой температуры). Если формально принять среду вокруг плиты вязкой, то использование формулы Ньютона (см. выше) приводит к оценке величины силы, необходимой для перемещения объекта, на 3,0—3,5 порядка выше, чем у поверхности. Вывод из обоих расчетов очевиден: предлагаемая ГТП субдукция неосуществима.

Можно упомянуть, что по оценкам в рамках АПГ расход энергии при активном глубинном процессе представляет собой, прежде всего, прямой вынос тепла к поверхности. На собственно геологические явления (в том числе перемещения блоков) уходят первые проценты общих потерь тепла, т. е. мощность источника должна быть еще на 1—1,5 порядка больше.

Выводы. Проведенное рассмотрение геолого-геофизических аспектов предполагаемого ГТП перемещения этих объектов от места образования (СОХ) до места погружения в зоне субдукции позволило установить (в дополнение к уже приводившимся ранее аргументам [Гордиенко, 2017а; Gordienko, 2017 и др.]) следующее.

1. Мнение об образовании земной коры океанических плит за счет магматизма в СОХ не подтверждается "производительностью" этого процесса.
2. Представление о подходе к глубоководному желобу остывшей и уплотнившейся плиты, способной погрузиться в мантию под желоб, не соответствует геолого-геофизическим данным.
3. Размещение гипоцентров землетрясений не согласуется с последствиями движения единой плиты от океанической котловины до погружения фокальной зоны.
4. Мощность источника энергии, необходимого для продвижения плиты в зоне субдукции, превосходит на порядки реально существующие в Земле. Его действие привело бы к тотальному расплавлению всей тектоносферы.
5. Геолого-геофизические параметры зоны перехода от континента к океану могут быть рассчитаны в рамках модели глубинного процесса по АПГ независимо от экспериментальных данных. Их сопоставление с последними обнаруживает удовлетворительное согласование. Для более точных расчетов во многих случаях недостаточно информации.

Список литературы

- Авгейко Г. П., Палуева А. А., Хлеборогова О. А. Геодинамические условия вулканизма и магнообразования Курило-Камчатской островодужной системы. *Петрология*. 2006. № 3. С. 248—265.
- Апрогов В. А. Вулканы. Москва: Мысль, 1982. 348 с.
- Белоусов В. В. Переходные зоны между континентами и океанами. Москва: Недра, 1982. 152 с.
- Бутвина В. Г. Экспериментальные исследования фазовых равновесий и алмазообразования в эколгит-карбонат-сульфидных системах: Дис. ... кан. геол.-мин. наук. Москва, 2006. 144 с.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В. Глубинные процессы и геофизическая модель мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2006. № 2. С. 107—121.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Плотностная модель тектоносферы переходной зоны Тихоокеанского типа в районе Камчатки. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2009. № 3. С. 58—69.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В., Назарова З. А. О возможной природе глубокофокусного охотоморского землетрясения 24 мая 2013 года. Вестник КРАУНЦ. *Наука о Земле*. 2017. Вып. 33. № 1. С. 46—57.
- Гордиенко В. В. Процессы в тектоносфере Земли (Адвекционно-полиморфная гипотеза). Saarbrücken: LAP, 2012. 256 с.
- Гордиенко В. В. Тепловые процессы, геодинамика, месторождения. 2017 а. https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf.
- Гордиенко В. В. О вязкости вещества тектоносферы континентов и океанов. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2017 б. № 1. С. 45—57.
- Гущенко И. И. Извержения вулканов мира (каталог). Москва: Наука, 1979. 475 с.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. Ред. В. І. Старостенко. Київ: Наук. думка, 2005. 256 с.
- Жао Д., Пирайно Ф., Луу А. Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1188—1203.
- Ломтев В. Л. Абиссальные холмы СЗ плиты Пацифики: особенности строения и отно-

- сительный возраст. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2016. № 2. С. 57—75.
- Ломтев В. А., Патрикеев В. А., Демченко Г. С. Сейсмостратиграфия кайнозойского осадочного чехла Северо-Западной плиты Тихого океана. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. В кн.: *Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана*. Т. IV. Южно-Сахалинск: ИМГТ ДВО РАН, 1997. С. 21—41.
- Менарг Г. У. Геология дна Тихого океана. Москва: Мир, 1966. 274 с.
- Набоко С. И. Советская вулканология. *Вопросы географии Камчатки*. 1967. Вып. 5. С. 12—17.
- Ритман А. Вулканы и их деятельность. Москва: Мир, 1964. 438 с.
- Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. Ред. В. В. Гордиенко. Владивосток: Изд-во ДВО РАН, 1992. 238 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Москва: Мир, 1985. 730 с.
- Уханов А. В., Рябчиков И. Д., Харьков А. Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. Москва: Наука, 1988. 288 с.
- Яновская Т. В. Основы сейсмологии. Санкт-Петербург: ВВМ, 2006. 288 с.
- Gordienko V. V., 2017. Thermal processes, geodynamics, deposits. https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_5253fb9147934b31ae9f03a5780da5fb.pdf?index=true.
- Jacob D., 2004. Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites. *Lithos*, 77 (1), 295—316. doi: 10.1016/j.lithos.2004.03.038.
- Jiang G., Zhao D., Zhang G., 2009. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka. *Tectonophysics*, 465 (1), 190—203. doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.019.

On the motion of lithospheric plates in the oceans and transition zones

V. V. Gordienko, 2018

The formation, horizontal displacement and immersion of lithospheric plates, corresponding to the plate tectonics hypothesis, are considered. It is shown that the magmatism of the mid-oceanic ridges does not correspond to the volume of the crust of plates and the magmatism of the transition zones from the continents to the oceans. When plates move to the continents 70 % do not submerge. Another 7 % of the length of the transition zones is the depth of hypocenters of earthquakes of 20 ± 20 km (transitional zones of the Colombian type). Seismicity on the continents near the "passive" eastern margins of North America and Africa, the western and southern margins of Australia, the western edge of Eurasia is less intense, but in principle not different from the "colombian". Approximately 2 % of the length of the transition zones are earthquakes with depths of foci up to 70—100 km. About 14 % occupy zones with depths of hypocenters to 250—450 km, 7 % of the length of the boundaries of the continents and oceans are represented by the deepest foci (450—700 km). Thus, the total focal regions (and, consequently, the subduction zones) are not the rule, but the exception. The geological and geophysical data do not correspond to the scheme by which the edge of the slab is compacted before the trench due to cooling. Plate dipping is unrealistic due to its low density and large mantle resistance under the trough. The location of earthquakes' hypocenters under a trough and an island arc does not agree with subduction. It is impossible to explain the immersion of a plate by compacting its crustal part during the polymorphic transformation of pyroxenes into garnets. The analysis of the energy of subduction process was carried out using the data on the parameters of the earthquake foci. It is showed that for a process according to the plate tectonics scheme, a power source is 1000 times more powerful than the actual ones. The obtained results allow us to consider the hypothesis of subduction of lithospheric plates unrealistic. An alternative scheme for the formation of focal zones is given.

Key words: plates movements, subduction zones, energy sources, deep processes.

References

- Avdeyko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A., 2006. Geodynamic conditions of volcanism and magma formation of the Kurile-Kamchatka island arc system. *Petrologiya*, (3), 248—265 (in Russian).
- Aprodov V.A., 1982. Volcanoes. Moscow: Mysl, 348 p. (in Russian).
- Belousov V.V., 1982. Transitional zones between continents and oceans. Moscow: Nedra, 152 p. (in Russian).
- Butvina V.G., 2006. Experimental studies of phase equilibria and diamond formation in eclogite-carbonate-sulphide systems. Dis. Can. geol.-min. sciences. Moscow: MSU, 144 p. (in Russian).
- Gontovaya L.I., Gordienko V.V., 2006. Deep processes and geophysical model of the mantle of East Kamchatka and Kronotsky Bay. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (2), 107—121.
- Gontovaya L.I., Gordienko V.V., Gordienko L.Ya., 2009. Density model of the tectonosphere of transition zone Pacific type in Kamchatka region. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (3), 58—69 (in Russian).
- Gontovaya L.I., Gordienko V.V., Nazarova Z.A., 2017. On the possible nature of the deep-focus Okhotsk earthquake on May 24, 2013. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, (1), 46—57 (in Russian).
- Gordienko V.V., 2012. Processes in the Earth's tectonosphere (Advection-polymorphic hypothesis). Saarbrücken: LAP, 256 p. (in Russian).
- Gordienko V.V., 2017a. Thermal processes, geodynamics, deposits. https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf. (in Russian).
- Gordienko V.V., 2017b. On viscosity of material of continents and oceans tectonosphere. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (1), 45—57 (in Russian).
- Guschenko I.I., 1979. Eruption of the volcanoes of the world (catalog). Moscow: Nauka, 475 p. (in Russian).
- Study of recent geodynamics Ukrainian Carpathians, 2005. Ed. V.I. Starostenko. Kiev: Naukova Dumka, 256 p. (in Ukrainian).
- Zhao D., Piraino F., Liu L., 2010. Structure and Dynamics of the Mantle under Eastern Russia and Adjacent Regions. *Geologiya i geofizika*, 51 (9), 1188—1203 (in Russian).
- Lomtev V.L., 2016. Abyssal hills NW plates Pacific: features of the structure and relative age. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (2), 57—75 (in Russian).
- Lomtev V.L., Patrikeyev V.L., Demchenko G.S., 1997. Seismic stratigraphy of the Cenozoic sedimentary cover of the North-Western Plate Pacific. Geodynamics of the tectonosphere of the zone of articulation of the Pacific Ocean with Eurasia. In: *Structure and material composition of the sedimentary cover of the North-west Pacific*. Vol. IV. Yuzhno-Sakhalinsk: Publ. IMG F FEB RAS, P. 21—41 (in Russian).
- Menard G.U., 1966. Geology of the bottom of the Pacific Ocean. Moscow: Mir, 274 p. (in Russian).
- Naboko S.I., 1967. Soviet volcanology. *Voprosy geografii Kamchatki*, (5), 12—17 (in Russian).
- Ritman A., 1964. Volcanoes and their activities. Moscow: Mir, 438 p. (in Russian).
- Tectonosphere of the Pacific margin of Asia, 1992. Ed. V.V. Gordienko. Vladivostok: Publ. FEB RAS, 238 p. (in Russian).
- Turcotte D., Schubert J., 1985. Geodynamics. Moscow: Mir, 730 p. (in Russian).

- Ukhanov A. V., Ryabchikov I. D., Kharkiv A. D.*, 1988. Lithospheric mantle of the Yakut kimberlite province. Moscow: Nauka, 288p. (in Russian). [ugd/6d9890_5253fb9147934b31ae9f03a5780da5fb.pdf?index=true](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2018.03.038).
- Yanovskaya T. B.*, 2006. Fundamentals of Seismology. St. Petersburg: VVM, 288 p. (in Russian).
- Gordienko V. V.*, 2017. Thermal processes, geodynamics, deposits. <https://docs.wixstatic.com/>
- Jacob D.*, 2004. Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites. *Lithos*, 77 (1), 295—316. doi: 10.1016/j.lithos.2004.03.038.
- Jiang G., Zhao D., Zhang G.*, 2009. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka. *Tectonophysics*, 465 (1), 190—203. doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.019.