

## **О ПРИРОДЕ МЕЛКОФОКУСНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ КОЛУМБИЙСКОГО ТИПА**

*Рассмотрено распределение землетрясений с глубинами очагов до 30-40 км в переходной зоне Колумбийского типа. Установлена их связь с глубинными процессами (в соответствии с адвекционно-полиморфной гипотезой) в пределах срединноокеанического хребта и в регионах современной активизации геосинклиналей киммерийского возраста.*

**Введение.** Представление о переходной зоне между континентами и океанами Колумбийского типа (от названия канадской провинции Британская Колумбия) введено В.В. Белоусовым [1] для обозначения специфической по глубинным процессам части активного Тихоокеанского кольца. Основанием для этого послужили практическое отсутствие современного глубоководного желоба (часто – при наличии засыпанного осадками старого) и глубокофокусной сейсмичности, менее интенсивная вулканическая активность, чем на соседних участках перехода от Тихого океана к Центральной Америке и северной части Южной Америки. По таким признакам к североамериканскому участку переходной зоны Колумбийского типа от входа в Калифорнийский залив до Аляски (примерно 25-60° с.ш.) можно добавить часть южноамериканской переходной зоны южнее приближения к берегу Чилийского поднятия, т.е. примерно от 47° ю.ш. (рис. 1). Возможно, необходимо рассмотреть с этой точки зрения и ситуацию в районе плато Кэмпбелл на юго-западной окраине океана, но геологическая изученность этого региона пока не позволяет ставить такую задачу. Общая длина рассматриваемых районов пояса сейсмичности составляют 15-20 % протяженности всего активного Тихоокеанского кольца.

Глубины гипоцентров землетрясений в рассматриваемой зоне, как правило, не превышают мощности коры в ее континентальной части, лишь незначительное количество очагов приурочено к интервалу глубин 33–70 км, единичные события в некоторых районах случаются и на глубинах до 100-120 км (под Северной Америкой), но их нельзя считать характерными для региона в целом. В пределах северного фрагмента отсутствие глубоких и среднеглубинных землетрясений можно связать с включением в состав зоны продолжения на север Восточнотихоокеанского поднятия (ВТП), для которого, как и других срединноокеанических хребтов (СОХ), характерна мелкофокусная сейсмичность. Однако исчерпывающим такое объяснение назвать трудно, так как те же глубины очагов распространены и вне предполагаемого продолжения ВТП, а в южном фрагменте зоны СОХ явно отсутствует. Поэтому кроме рассмотрения природы сейсмичности срединноокеанических хребтов хотя бы для части событий зоны необходимо найти другое объяснение ее причин. Поиск рационально вести уже опробован-

ным методом [5]: построить модели глубинных процессов и соответствующие им тепловые по представлениям адвекционно-полиморфной гипотезы, рассмотреть их последствия, которые могут обусловить сейсмичность, и сравнить их с экспериментально установленными данными.

Авторы считают вполне вероятным, что одной из причин мелкофокусной сейсмичности являются вулканические процессы, проанализированные в [14 и др.]. Однако в части зоны вулканизм отсутствует, большое количество землетрясений происходит явно глубже коровых магматических очагов, питающих вулканы, поэтому необходимо остановиться на других сторонах глубинных процессов, способных генерировать необходимые напряжения.

**Распределение по глубине гипоцентров землетрясений в зоне Колумбийского типа.** На рис. 1 представлены разрезы вдоль нескольких продоль-

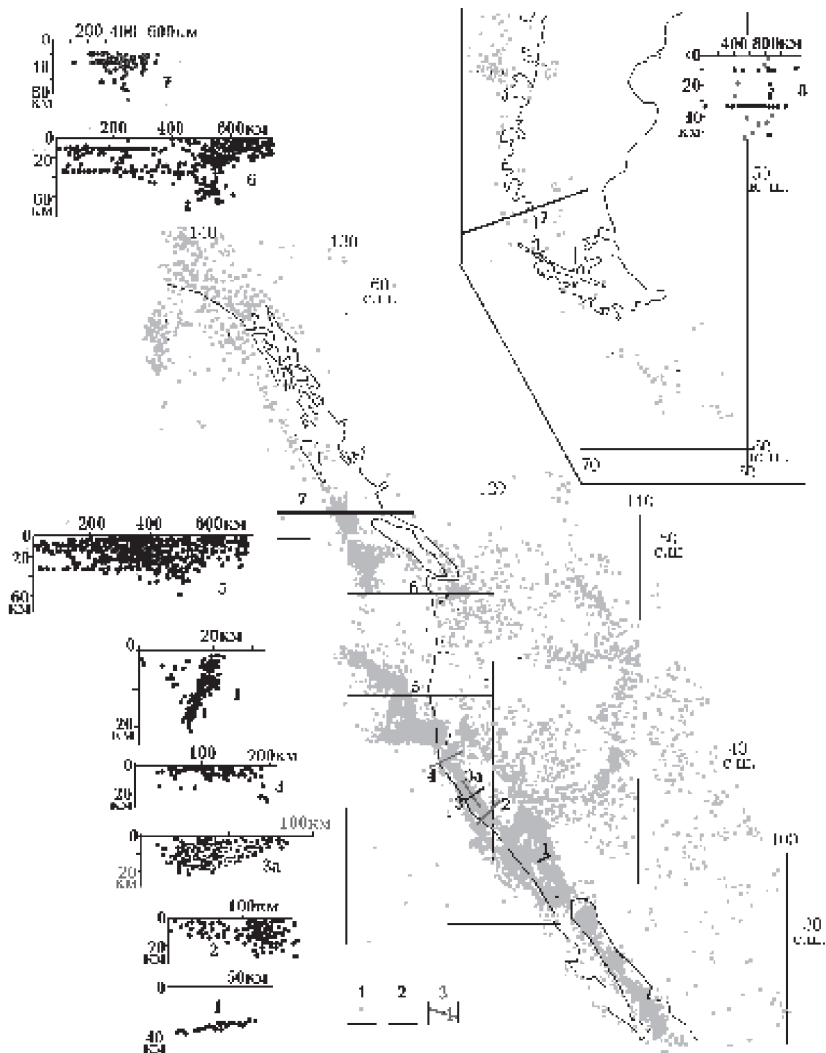


Рис. 1. Сейсмичность переходной зоны Колумбийского типа [7, 15, 16 и др.]. На врезке – южный фрагмент зоны. 1, 2 – эпицентры землетрясений с глубиной очагов: 1 – 0-33 км, 2 – 33-70 км, 3 – профили, вдоль которых построены разрезы сейсмогенных зон

ных и поперечных профилей через рассматриваемую зону, на которые вынесены гипоцентры землетрясений. Во всех случаях нулевые пикеты - на западных и южных концах профилей. На профилях 5-8 показаны гипоцентры, собранные на пространстве от 47<sup>0</sup> ю.ш. до южной оконечности материка (8), 40-45<sup>0</sup>с.ш. (5), 45-50<sup>0</sup> с.ш. (6) и 50-52<sup>0</sup> с.ш. (7). Концентрация гипоцентров здесь на глубинах 10, 15 и 33 км связана с неточностью определения глубин, речь идет просто о приуроченности очагов к земной коре (в том числе и сравнительно тонкой на море). На других профилях (где собраны данные о разных по энергетическому классу событиях за разные периоды) нельзя выделить каких-либо единых для всей зоны или закономерно изменяющихся в ее пределах глубин расположения гипоцентров. Предпринимаемые в этой ситуации попытки многих авторов разделить землетрясения (например, в районе профиля 6 [15]) на связанные с погружающейся океанической плитой и относительно неподвижной материковой выглядят неубедительными. Следует просто констатировать, что гипоцентры приурочены к коре, часто ее средней и нижней частям. Несколько более глубокие гипоцентры на профилях 5 и 6 относятся к узкой зоне поздних альпид, занимающих незначительную часть территории северного фрагмента зоны (если отличия глубин вообще зафиксированы достоверно).

На рис. 2 видно, что не обнаруживается значительных различий между распределением глубин очагов под СОХ и под континентальной частью зоны. Последняя информация относится почти исключительно к Северной Америке: привлеченное количество землетрясений для южного фрагмента зоны слишком невелико (см. рис. 1)

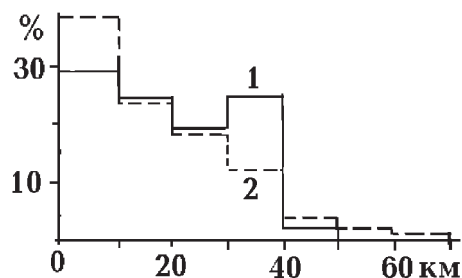


Рис. 2. Гистограммы распределений глубин землетрясений в пределах СОХ (1) и активизированных преимущественно киммерийских геосинклиналей Северной Америки (2)

**Глубинный процесс образования СОХ и сейсмичность.** Геологическая история срединно-океанических хребтов изучена слабо, здесь обнаружены над фундаментом в основном осадки плиоцена-среднего миоцена, реже - олигоцена-эоцена и вскрыты бурением молодые базальты (с абсолютным возрастом порядка  $15 \pm 10$  млн. лет) [8]. В базальтах нет следов контаминации магмы коровым материалом (исключение - район у Калифорнийского залива), т.е. хребты формируются на океанической коре в самое последнее (геологически) время. Такой вывод подтверждается анализом скоростной структуры и мощности коры Восточнотихоокеанского поднятия и прилегающих котловин. Поднятие "...образовалось в большей своей части на коре океанического типа... Возможна частичная переработка существовавшей здесь ранее земной коры, о чем могут, в частности, свидетельствовать утонение и более высокие скорости третьего слоя..." [10, с. 92].

Вероятно, регион с океанической корой существовал достаточно долго, температура ( $T$ ) вблизи фронта полиморфного преобразования у подошвы верхней мантии повысилась (релаксировала предварительно возникшая отрицательная аномалия  $T$ , возникшая при океанизации [5]), это привело к некоторому поднятию поверхности. Могла возникнуть и зона частичного плавления выше фронта, из нее возможен вынос вещества под кору и соответствующее поднятие. В Атлантическом океане можно предположить [8], что на месте современного СОХ прошел наиболее древний из изученных процессов океанизации, завершившийся примерно на границе палеозоя и мезозоя. Последовавшее затем сглаживание температурных аномалий в тектоносфере рассмотрено на фоне повышенной теплогенерации (по сравнению с нормальной континентальной мантией) пород. Это обусловлено погружением в мантию корового материала при океанизации.

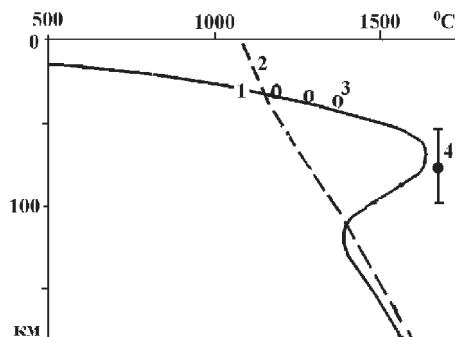
Расчет тепловой модели в соответствии с адвекционно-полиморфной гипотезой подтвердил высказанное предположение о возникновении к настоящему времени условий для активного процесса [5]: на глубинах более 200 км  $T$  достигает солидуса или отличается от него лишь на первые десятки градусов. Предполагалось, что частично расплавленное вещество из интервала глубин примерно 200-350 км может быть вынесено под тонкую кору на глубины примерно 50-100 км со средней аномальной температурой около  $680^{\circ}\text{C}$ . Смещение поверхности под действием изменения  $T$  в верхнем и нижнем этажах тепловых аномалий разных знаков составят 3,6 км и 1,8 км соответственно. Погружение фронта полиморфного преобразования после предшествующей активизации ведет к поднятию поверхности примерно на 1,5 км. Последнее возникло значительно раньше образования СОХ современного вида, существовало на его месте уже в течение многих десятков млн. лет. Полное поднятие СОХ составит около 3 км. В течение последних 15 млн. лет (после начала магматизма) остывание верхней астеносферы привело к расчетному опусканию СОХ примерно на 1 км, что примерно соответствует геологическим фактам (в частности, для северной половины Атлантического океана [8, 9], где это явление изучено наиболее достоверно). Если исходная глубина дна на СОХ (после завершения океанизации) достигала 5,5 км, то современная должна составлять 3,5-2,5 км, что соответствует данным батиметрии на плитах Хуан-де-Фука и Каскадия.

В центральной части хребта, где во многих случаях магматизм продолжается до настоящего времени, модель включает сравнительно узкую зону (по сейсмическим данным – шириной не более 200 км), в пределах которой частично расплавленное вещество астеносферы вынесено в тонкую кору. Именно в ее пределах может наблюдаться максимальная и разнонаправленная (возможно, с преобладанием в настоящий момент опускания) подвижность блоков коры и верхних горизонтов мантии, предельно велики и изменчивы термоупругие напряжения. Здесь следует ожидать сейсмичности в пределах слоя, ограниченного снизу кровлей астеносферы. По расчетным данным [5 и др.] подошва слоя – примерно на 30 км. В рассматриваемом случае предельно узкого СОХ (первые сотни километров) без пологих склонов к рассматриваемому фрагменту хребта может принадлежать

вся полоса от западного края хр. Хуан-де-Фука до континентального подножия.

Основанный на таких представлениях результат теплового моделирования подтвержден данными геоэлектрики [3]. Согласно им суммарная продольная электропроводность астеносферы под Хуан-де-Фука составляет 4500 См, по тепловой модели 4000 См (среднее содержание расплава – около 5%). На рис. 3 показано, что тепловая модель СОХ согласуется и с данными геотермометров.

Рис. 3. Тепловая модель узкого СОХ (гавайского типа). (1) по [5]. 2 – солидус мантийных пород, 3, 4 – данные геологических термометров [11]: 3 – по вынесенным лавами ксенолитам, 4 – по составу гавайитов



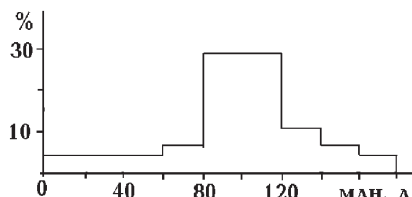
Таким образом, ограниченная по глубине сейсмичность фрагментов СОХ, представленных в переходной зоне Колумбийского типа, может быть объяснена глубинным процессом их формирования в соответствии с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы.

**Современная активизация киммерийских геосинклиналей Америки и сейсмичность.** Геологические данные об истории развития сухопутной части переходной зоны [1, 2, 4, 12, 13 и др.] указывают на развитие в ее пределах киммерийских (южный фрагмент) и киммерийских и альпийских (северный фрагмент) геосинклиналей. Сведений о возрастах складчатостей и этапах развития каждой из них недостаточно для полноценного моделирования глубинных процессов. Некоторое представление о диапазоне времен завершения развития геосинклиналей может дать приводимая на рис. 4 гистограмма, характеризующая распределение возрастов гранитных батолитов в прибрежной области северного фрагмента зоны (примерно между 30 и 50<sup>0</sup> с.ш.) [13].

Близкие к невадийским и ларамийским возрасты батолитов отмечены также в антарктическом продолжении Анд (“Атнаркандах”) [12].

Складчатость происходит обычно через первые десятки млн. лет после внедрения гранитоидов. В узкой прибрежной и островной зоне альпид (занимающей 5-10% территории северного фрагмента зоны) она идет до сих пор [12]. Полоса батолитов характеризует лишь относительно небольшую часть складчатого пояса Кордильер Северной Америки, приведенные данные не позволяют судить об относительной распространенности геосинклиналей разного возраста, но и по ним очевиден широкий диапазон возможных возрастов. В соответствии с имеющимися сведениями были рассмотрены глубинные процес-

Рис. 4. Гистограмма распределения возрастов гранитных батолитов Кордильер Северной Америки



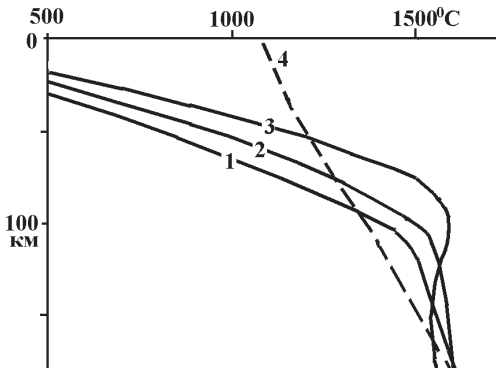


Рис. 5. Тепловые модели верхней тектоносферы невадид (1), ларамид (2), поздних альпид (3). 4 – солидус пород мантии

сы в тектоносферах невадид, ларамид и поздних альпид. Результаты расчета тепловых моделей приведены на рис. 5.

Тепловые модели геосинклиналей построены без учета современной активизации и индивидуальных особенностей (прежде всего – ширины и

влияния процессов в соседних регионах), т.е. не могут считаться характеризующими конкретный район зоны. Для решения поставленной задачи достаточно констатации того, что в недрах зоны возможно существование остаточной астеносферы мощностью не менее первых десятков километров с глубиной кровли  $70 \pm 20$  км.

Достоверность тепловой модели можно проверить ее сопоставлением с геоэлектрической вдоль траверса Линкольн [3]. В его сухопутной (геосинклинальной, в значительной мере – альпийской) части проводник располагается на глубинах 50-100 км, его суммарная продольная проводимость – 2000 См, по тепловой модели района (учитывающей современную активизацию) глубины кровли и подошвы зоны частичного плавления составляют 70-110 км, суммарная продольная проводимость – 1500-2000 См (среднее содержание расплава – около 2%).

При активизации из астеносферы в кору поступают мантийные выплавки, в ее средней части формируется область частичного плавления пород амфиболитовой фации метаморфизма, в нижней – может короткое время существовать зона частичного плавления пород гранулитовой фации. Верхняя зона может обусловить магматизм относительно кислого состава, для обоих возможен подъем флюидов над зонами. Это – обычные последствия рассматриваемого типа эндогенного режима. Однако, встречаются и своеобразные варианты современной активизации, связанные с нестандартной минералогией основных пород коры [5]. Речь идет об их значительной эклогитизации на предыдущих этапах развития геосинклиналей. Прогрев и пропитка флюидами при активизации ведет к деэклогитизации и быстрому орогенезу. Одним из примеров такого процесса можно считать развитие Горного Крыма за последние 5 млн. лет. Здесь в коре фиксируется значительный по мощности высокоскоростной слой (возможно, содержащий эклогиты), поднятие достигает 1100 м, сейсмичность представлена событиями с глубинами гипоцентров до 40-60 км (рис. 6). Расчет показывает, что все эти явления могут быть связаны с деэклогитизацией.

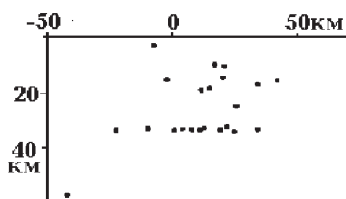


Рис. 6. Распределение гипоцентров землетрясений в тектоносфере Горного Крыма. Пикет "0" – в районе максимального поднятия

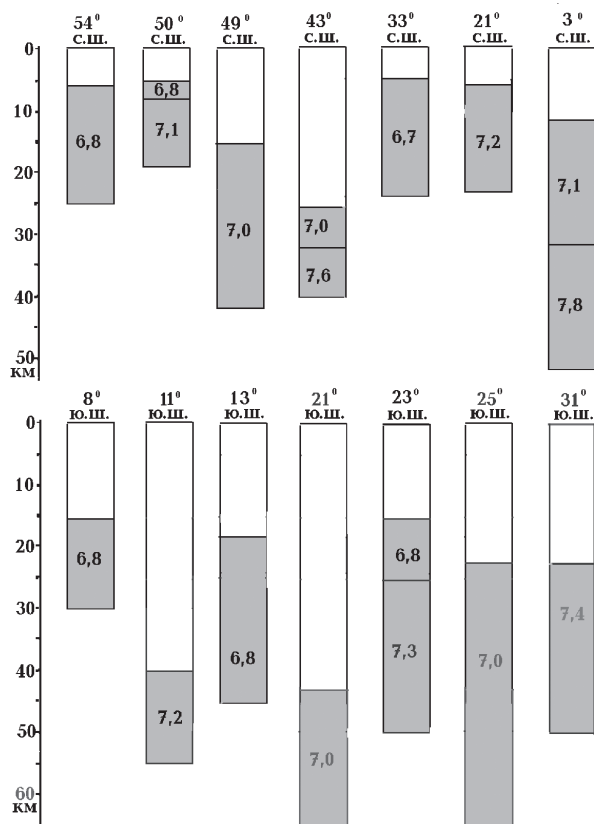


За период наблюдений возникают напряжения (преимущественно связанные с подъемом блока при уменьшении плотности при деэклогитизации и в меньшей мере – с изменениями температуры), достаточные для объяснения произошедших землетрясений.

Поднятия Кордильер и Анд в последние миллионы лет нельзя объяснить возникновением температурных аномалий разного знака при современной активизации территорий киммерийских геосинклиналей. Адвекционный обмен веществом между корой и астеносферой не создаст заметного теплового увеличения мощности слоя. Близость плотности базальтовой магмы на глубине кровли астеносферы к плотности основных пород коры не позволяет рассчитывать на подъем поверхности в связи с “безвозвратным” выносом мантийного материала в кору. Этот процесс может только заметно увеличить мощность коры в районах активного молодого вулканизма.

В то же время по [12] амплитуда поднятий в южном фрагменте зоны (“Сур-Гранде”) достигла 2-3 км в антропогене, поднятия в северном фрагменте вполне сопоставимы.

Рассмотрим возможности деэклогитизации в коре изучаемой зоны. Из-за довольно ограниченного количества данных ГСЗ [2, 5, 6, 12, 13 и др.] к анализу привлечены сведения о скоростных моделях по всем изученным участкам Кордильер и Анд. В южном фрагменте изучаемой зоны информация отсутствует. Видно (рис. 7), что в коре зоны содержится довольно мощный “базальтовый” слой пород со скоростями продольных сейсмических волн от 6,8 до 7,6 км/с.



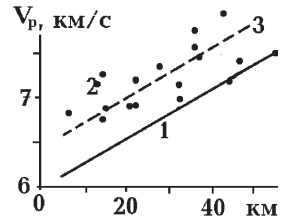
что в коре зоны содержится довольно мощный “базальтовый” слой пород со скоростями продольных сейсмических волн от 6,8 до 7,6 км/с.

Резкие изменения мощности земной коры в переходной зоне (сокращение ее толщины с приближением к океану) приводят к большим видимым различиям в положении и толщине “базальтового” слоя в зависимости от места ГСЗ. Приведенные на рис. 7 значения скоростей несколько занижены по сравнению с величинами  $V_p$  для тех же пород при фоновой температуре, характерной для недр докем-

Рис. 7. Значения скорости продольных сейсмических волн в “базальтовом” слое прибрежных Кордильер и Анд

брийских платформ [5], в интервалах глубин 25-30 км и более примерно 55 км скорости понижены и из-за частичного плавления пород. Если учесть эти факты и сравнить скорости в переходной зоне с типичными для платформенной коры на соответствующих глубинах, получим положительную аномалию, составляющую в среднем  $0,5 \pm 0,2$  км/с (рис. 8). Эту значительную величину невозможно объяснить только избыточной базификацией коры, характерной для многих районов переходных зон всех типов [5], особенно – на глубинах более 30 км, т.е. в местах со сравнительно толстой корой, к которым и приурочены основные поднятия.

Рис. 8. Сравнение распределения скорости продольных сейсмических волн в коре нормального состава при платформенных температурах (1) с данными по Кордильерам и Андам. 2, 3 – экспериментальные значения, исправленные с учетом высоких  $T$  и частичного плавления: 2 – в отдельных пунктах, 3 – усредненная зависимость от глубины.



Необходимо предположить, что часть основных пород все еще находится в эклогитовой фации метаморфизма. Изначально в “базальтовом” слое коры могло содержаться до 70% эклогитов. Это, вероятно, предельное количество, позволяющее блоку пород сохраниться в составе коры, не погрузиться в мантию. Мощность слоя составляет  $21 \pm 6$  км (в усреднение включены и данные по “базальтовому” слою в сравнительно тонкой коре прибрежных зон, для которых не характерно поднятие, в поднимающихся блоках мощность слоя несколько больше). Превращение такого количества пород с плотностью  $3,4$  г/см<sup>3</sup> в породы с плотностью  $2,9$  г/см<sup>3</sup> может обеспечить поднятие в среднем на 2,5 км. Неравномерность предварительной эклогитизации и современной деэклогитизации блоков коры с “базальтовым” слоем разной мощности обеспечит значительную изменчивость амплитуд поднятий и, соответственно, условия для возникновения относительных вертикальных и горизонтальных перемещений блоков – и землетрясений. Землетрясения связаны с довольно крутыми сбросовыми поверхностями [13], а не с пологими надвигами, как предполагается в соответствии с представлениями тектоники плит [15 и др.].

Таким образом, рассмотренные механизмы формирования сейсмичности, связанные преимущественно с деэклогитизацией пород коры, удается согласовать с известными геолого-геофизическими данными по геосинклинальной части переходной зоны Колумбийского типа.

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют высказать аргументированные предположения о природе сейсмичности переходной зоны Колумбийского типа, основные из которых сводятся к следующему.

1. В частях зоны, относящихся к СОХ и молодым активизированным геосинклиналям глубины гипоцентров землетрясений распределены не идентично, но располагаются в одном ограниченном диапазоне глубин – преимущественно в земной коре и самых верхних горизонтах мантии, что связано с небольшой глубиной кровли слоя частичного плавления (асте-



носферы), установленной по тепловым моделям, и отсутствием в ближайшем прошлом активного теплопереноса на больших глубинах.

2. Землетрясения (за исключением связанных с движениями магмы в вулканически активных районах зоны) обусловлены напряжениями, возникающими при неравномерном изменении температуры в недрах СОХ, и при перемещениях коровых блоков, породы которых охвачены дезглогитизацией в молодых (преимущественно – киммерийских) геосинклиналях.

3. Последний механизм возникновения землетрясений может быть характерен для части событий в коре других фрагментов сейсмического кольца Тихого океана, где диапазон глубин размещения всех гипоцентров гораздо больше.

4. Приведенные соображения позволяют наметить направление исследований природы землетрясений специфической переходной зоны; сделанные заключения нельзя считать окончательными, для этого использованных данных слишком мало.

1. Белоусов В.В. Переходные зоны между континентами и океанами. – М.: Недра, 1982. – 152с.
2. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. – М.: Недра, 1981. – 432с.
3. Варенцов И.М., Голубев Н.Г., Гордиенко В.В. и др.. Исследование глубинной геоэлектрической структуры вдоль линии Линкольн (эксперимент ЭМСЛАБ) // Физика Земли. – 1996. – 4. – С.124-144.
4. Геология континентальных окраин / Ред К. Берк и Ч. Дрейк, Т. 2.– М.: Мир, 1978. – 374с.
5. Гордиенко В.В. Адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере. – Киев: Корвін пресс, 2007. – 172с.
6. Материалы мирового центра данных Б. Глубинное сейсмическое зондирование. Данные по Тихому океану. – М.: МЦД, 1987. – 104с.
7. Мировой центр данных по физике твердой Земли. <http://zeus.wdcb.ru>
8. Рудич Е.М. Движущиеся материи и эволюция океанического ложа. – М.: Недра, 1983. – 272с.
9. Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. – М.: Недра, 1984. – 252с.
10. Семенова Г.И. Структура земной коры Тихого океана // Сравнительная тектоника континентов и океанов. – М.: МГК АН СССР. – 1987. – С.85-94.
11. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. – М.: Недра, 1989. – 262с.
12. Хаун В.Е. Региональная геотектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка. М.: Недра, 1971. – 546с.
13. Энциклопедия региональной геологии мира. Западное полушарие. Ред. Р. Фейрбрідж. – Л.: Недра, 1980. – 512с.
14. Fialko Y., Simons M., Khazan Y. Finite source modeling of magmatic unrest in Socorro, New Mexico, and Long Valley, California // Geophys. J. Int. – 2001. – 146. – P. 191–200.
15. Hyndman R., Rogers G., Dragert H et al., Geodynamics, Giant earthquakes beneath Canada's West coast // Geol. Surv. of Canada. [http://gsc.nrcan.gc.ca/geodyn/mega\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/geodyn/mega_e.php).
16. U.S. Geological Survey. National Earthquake information Center. [http // www.neic.cr.usgs.gov](http://www.neic.cr.usgs.gov).

Розглянуто розподіл землетрусів з глибинами вогнищ переважно до 30-40 км у перехідній зоні Колумбійського типу Тихого океану. Встановлено їх зв'язок з глибинними процесами (згідно з адвекційно-поліморфною гіпотезою) у межах серединноокеанічного пасма та в регіонах сучасної активізації геосинкліналей кіммерійського віку.

An allocation of earthquakes with focus depths up to 30-40 km in transition zones of Columbian type is considered. Its connection with deep processes (in accordance with the advection-polymorphous hypothesis) in regions of mid-ocean ridge and recent activization of kymmerian geosynclines is determined.