

УДК 551. 24

© В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, 2008

Институт геофизики НАН Украины, Киев

О ПРИРОДЕ ГЛУБОКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ ОТ КОНТИНЕНТОВ К ОКЕАНАМ

Рассмотрено распределение землетрясений с глубинами очагов более 300 км в переходных зонах Тихого океана. Установлена их связь с глубинными процессами (согласно адвекционно-полиморфной гипотезе) в регионах молодой океанизации и современной активизации некоторых участков платформ.

Введение. Проверка представлений различных тектогенических гипотез о характере глубинных процессов в тектоносфере переходных зон и океанов затруднена скудностью геолого-геофизических данных по этим регионам по сравнению с континентальными. Поэтому большой интерес представляет анализ сейсмичности, указывающей на современную активность в больших интервалах глубин переходных зон тихоокеанского типа. Проблема в том, что напряжения, обуславливающие землетрясения, очень быстро релаксируют и для сопоставления с ними нужно рассматривать самые молодые события тепломассопереноса в тектоносфере [4], оперировать “негеологическими” временными интервалами, в пределах которых поведение вещества может существенно отличаться от характерного для больших периодов. Предположение о связи глубоких (происходящих на глубинах более 300 км) землетрясений с изменениями минералогии пород мантии под влиянием изменения температуры (T) [4-7, 11 и др.] позволяет допустить обусловленность этой группы сейсмических событий сравнительно протяженными во времени полиморфными преобразованиями. Но неопределенность наших знаний о скорости этих процессов и перемещений объемов пород, изменивших в связи с ними плотность (σ), делает невозможным сколько-нибудь точный прогноз проявления сейсмичности рассматриваемой природы в каждом регионе с подходящим типом эндогенного режима в настоящее время. Выход можно попытаться найти в привлечении к анализу всех имеющихся данных в надежде на проявление в таком массиве типичных черт явления.

Порядок анализа. Приведенные соображения не отменяют основных положений методики контроля гипотезы глубинных процессов геолого-геофизическими данными, используемой авторами [4 и др.]. Согласно ей по представлениям адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ) для региона с геологически документированным типом эндогенного режима строится модель перемещения вещества тектоносферы на активной стадии. Учитываются конкретные параметры региона: его размеры, возраст основных событий активизации, предшествующая геологическая история, влияние

процессов в недрах соседних регионов. Результаты представляются в виде тепловых моделей тектоносферы для разных стадий активного процесса и современной модели. По ним рассчитываются распределения физических свойств пород, которые сопоставляются с независимо созданными скоростными и геоэлектрическими моделями и используются для расчета гравитационного и магнитного полей и распределения теплового потока в регионе. Результаты последних расчетов сравниваются с экспериментально изученными полями. Во всех случаях проверка гипотезы считается успешной, если различия моделей и полей не превышают обусловленных погрешностями эксперимента и расчета. Кроме того, рассчитываются тектонические и магматические последствия модельного процесса: вертикальные движения поверхности, осадконакопление, глубина магматических очагов на разных этапах развития региона, температуры на разных глубинах, которые можно сопоставить с данными геотермометров и т.д.

В меру наличия необходимой информации перечисленные контрольные операции были успешно проведены в регионах тихоокеанских переходных зон, но их результаты в основном относились только к верхней половине верхней мантии. Для глубокой сейсмичности были лишь высказаны предположения об ее связи с полиморфными преобразованиями вещества у подошвы верхней мантии [4].

Поэтому представляется интересной задача построения тепловых моделей этих регионов для настоящего времени и геологически недавнего прошлого, которые позволили бы установить эволюцию температур в интервалах глубин, где возможны наиболее существенные изменения плотности в связи с полиморфными преобразованиями, оценить их последствия как источников сейсмогенерирующих напряжений и таким образом сформировать прогноз глубокой сейсмичности, отвечающий АПГ. Затем — сравнить его с наблюдаемыми данными.

Выбор типов эндогенных режимов. В переходных зонах Тихого океана широко представлены геосинклинали различного возраста и отдельные фрагменты докембрийских платформ, на те и другие наложены области молодой активизации и океанизации. Рассмотрение современных тепловых моделей для перечисленных типов эндогенных режимов показывает, что недавние значительные изменения температур на нужных глубинах могут быть только в недрах наиболее молодых альпид, зон современной активизации и океанизации.

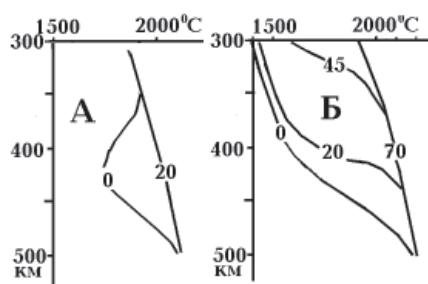
Поздние альпиды у берегов Тихого океана представлены ограниченно (Сахалин, часть Японии и т.д. [7, 10 др.]), последние перемещения вещества тектоносферы, связанные именно с геосинклинальным режимом, произошли в них примерно 20-30 млн. лет назад. Как будет показано ниже, этот отрезок времени несколько превышает оптимальный для генерации напряжений, хотя нельзя полностью исключать возможность их появления. Активизация киммерийских и альпийских геосинклиналей по АПГ представляет собой вынос перегретого вещества из реликтовой сравнительно неглубокой астеносферы, т.е. в ходе этого процесса полиморфные преобразования глубже 300 км не происходят. В этом смысле вся восточная

периферия Тихого океана бесперспективна, здесь не должно быть глубоких землетрясений (исключение — см. ниже). Современная активизация возрастом 3-7 млн. лет широко представлена на Украинском щите, в Донбассе и др. Землетрясения глубже 300 км здесь не известны. Вероятно, время, прошедшее после начала процесса, еще недостаточно для преобразования пород и изменения их плотности. На эпигерцинских плитах Европы распространены зоны активизации возрастом около 30 млн. лет. В основном это рифтогены, но для части случаев (Чешский массив, Ставропольское поднятие и др.) можно предположить режим одноактной активизации. И здесь глубокие землетрясения отсутствуют. Не исключено, что соответствующие преобразования уже завершены.

Наиболее подходящим кажется возраст последнего перемещения вещества, затрагивающего нужные глубины, в 10-20 млн. лет. Оно характерно для завершающего этапа океанизации в окраинных морях запада Тихого океана и одноактной активизации фрагментов Сино-Корейской и Южно-Американской платформ [4, 7-10]. Следует подчеркнуть, что глубокая сейсмичность вероятна в пределах выбранных регионов, но совсем не обязательно должна быть представлена в каждом из них. Даже небольшое изменение возраста процесса может привести к отсутствию современных землетрясений.

При построении тепловых моделей для океанизируемых регионов было учтено, что здесь последний этап активности, сопровождаемый магматизмом, территориально смещен от центра на периферию, вплотную к соседним островным дугам [8].

Тепловые модели нижней тектоносферы и изменения минералогии пород. Модели построены по правилам, изложенным в [4 и др.], и показаны на рис. 1.



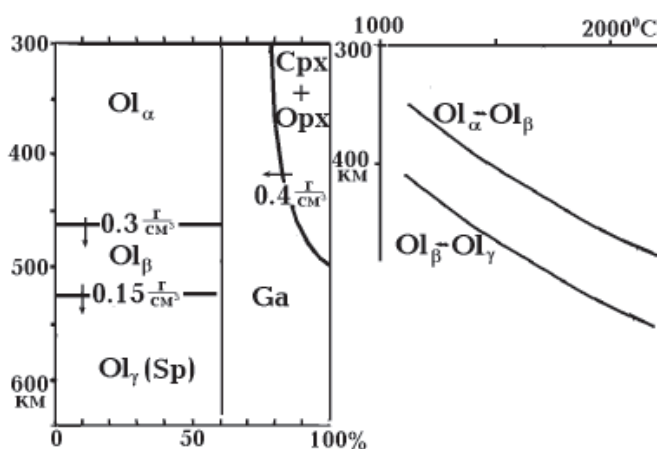
Небольшие отличия моделей от представленных в [4] обусловлены учетом конкретных размеров и расположения активных зон. Они выразились в некотором

Рис. 1. Тепловые модели нижней тектоносферы зон современной активизации докембрийской платформы (А) и молодой океанизации (Б). Цифры у геотерм — время в млн. лет назад

сдвиге по глубине источников тепла, создаваемых переместившимися массами мантийных пород.

На рис. 2 показана минералогия мантийных пород по [13 и др.] с изменениями, отражающими принятое в работе [4] нормальное распределение T , и условия преобразования оливина. Эта информация наряду с данными об изменении плотности мантийных пород под влиянием изменения температуры (для рассматриваемых глубин — около $0,007-0,008 \text{ г/см}^3$ на 100°C [4]) дает возможность оценить плотностной эффект процесса (при условии завершения минералогических преобразований, т.е. по максимуму).

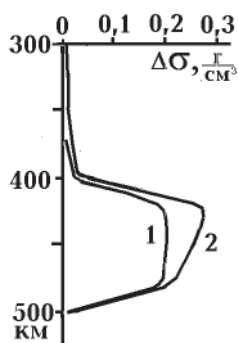
Рис. 2. Минералогия пород мантии при нормальном распределении T и pT -условия преобразования оливина (при железистости примерно 13%) в минерал со структурой шпинели. Показаны изменения плотности минералов, стрелки — направление перехода с ростом плотности



Результативные изменения σ для обоих эндогенных режимов за последние 20 млн. лет представлены на рис. 3. Величины

$\Delta\sigma$ резко различаются в области преобразования оливина (при условии завершения преобразований) и выше, но и аномалий в первые сотые доли g/cm^3 достаточно (без учета релаксации — см. [4]) для создания напряжений, сопоставимых с прочностью пород при длительных нагрузках (которая по крайней мере на порядок меньше “мгновенной” прочности — $n \cdot 10^8 Pa$). Расчет проведен для реальных размеров уплотненного объекта в зоне океанизации выше кровли слоя преобразованного оливина — около 100 км.

Время, необходимое для завершения преобразований минералогии при реальных размерах кристаллов, можно по имеющимся данным оценить [1, 3, 12 и др.] в первые десятки млн. лет, т.е. в рассматриваемом случае процесс значительно продвинулся, аномальные плотности близки к максимальным.



Погружение уплотненных объектов будет происходить в основном в слое пород с β -и γ -оливином, что обусловит существенное удаление от температуры солидуса и увеличение вязкости (η) примерно до $10^{22-23} Pa \cdot s$. Скорость (V) движения можно оценить по формуле Стокса $V = 1,5 \cdot \Delta\sigma \cdot g \cdot r^2 / \eta$, где r — радиус минимального

Рис. 3. Распределение аномальных уплотнений пород в тектоносферах зоны современной активизации докембрийской платформы (1) и зоны океанизации (2)

движущегося объекта, отождествляемого с “квантом тектонического действия” [4 и др.], — 25-30 км. Для минимальных плотностных аномалий V составит около 1 см/год, для максимальных — на порядок больше. Таким образом, уплотненные массы могут за рассматриваемое время достичь подошвы зоны полиморфных переходов — 650-700 км. Значительное погружение в нижнюю мантию (с переходом к магнезиовюстититу и перовскиту) представляется нереальным. Все рассматриваемые переходы на глубинах 300-550 км экзотермичны, суммарное нагревание породы составит многие

десятки градусов, но принципиальных изменений хода процесса это не должно вызвать. Преобразование вещества на подошве переходной зоны ведет к существенно большему нагреву, тепловая аномалия им нивелируется.

Прогноз распределения гипоцентров землетрясений. Приведенные соображения позволяют довольно полно описать прогнозируемые использованной гипотезой свойства зон глубокой сейсмичности, характерной для периферии Тихого океана. Прогноз по указанным выше причинам имеет вероятностный характер.

1. Гипоцентры землетрясений на глубинах более 300 км приурочены к зонам недавно завершившейся (возможно, еще не полностью) океанизации западной периферии океана. На восточной периферии землетрясений такой природы не должно быть. Кроме того, глубинная сейсмичность может присутствовать в областях современной активизации древних платформ, начавшейся 10-20 млн. лет назад. Одна из таких областей может располагаться на западной окраине Южно-Американской платформы, вторая — в прибрежной части Сино-Корейской.

2. Возможно, что гипоцентры под областями океанизации распространены в большем интервале глубин (начинаются с меньших глубин), чем под активизированными платформами. Общий диапазон прогнозируемых глубин гипоцентров землетрясений рассматриваемой природы — от 300–350 до 650–700 км.

3. При рассмотрении процессов на меньших глубинах (от 300 км до коровых) можно уверенно утверждать, что в привлеченных к анализу регионах и здесь [4] должны происходить землетрясения (хотя и другой природы).

Сравнение с фактическими данными о землетрясениях. Территориальное распределение гипоцентров землетрясений с глубинами 300-500 и более 500 км показано на рис. 4 [14]. В него не включены гипоцентры вблизи Индонезийской системы дуга-желоб, относящейся скорее к Индийскому океану. Данные о них принципиально не отличаются от рассматриваемых ниже.

Глубокие землетрясения присутствуют менее чем на 40% общей длины систем дуга-желоб вокруг Тихого океана, что не согласуется с представлениями гипотезы тектоники плит, по одному из вариантов которой плиты погружаются за счет уплотнения их фронтальных частей, изменяющих минералогию на подошве верхней мантии.

На рис. 5 представлено распределение гипоцентров землетрясений с глубиной очагов от 300 км до коровых в тех районах, где наблюдаются глубокие. Практически во всех случаях непосредственно над глубокими землетрясениями или на небольшом расстоянии по горизонтали фиксируются события меньшей глубинности, т.е. оправдывается один из пунктов прогноза. С точки зрения гипотезы тектоники плит такое распределение гипоцентров необъяснимо: активность в районах максимального погружения плиты связана только с ее перемещением относительно окружающей мантии.

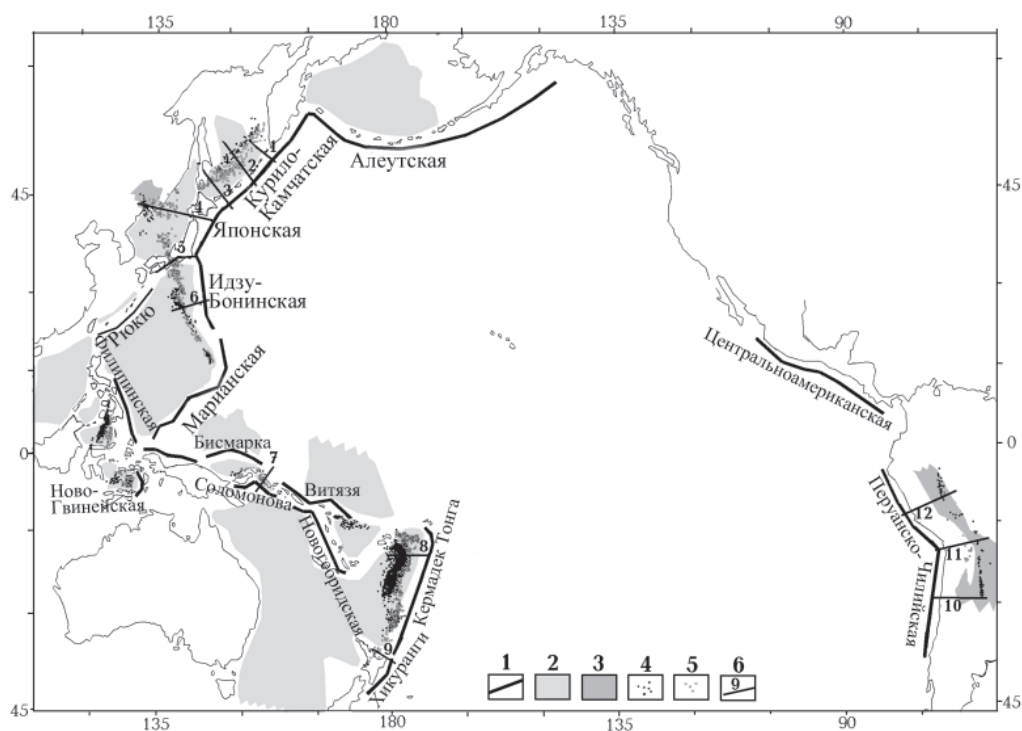


Рис. 4. Распределение гипоцентров глубоких землетрясений на периферии Тихого океана. 1 – глубоководные желоба, 2 – области молодой океанизации, 3 – области активизации древних платформ, начавшейся 10-20 млн. лет назад, 4,5 – гипоцентры с глубинами: 4 – более 500, 5 – 300-500 км, 6 – профили, вдоль которых построены разрезы нижних частей сейсмогенных зон (рис. 6)

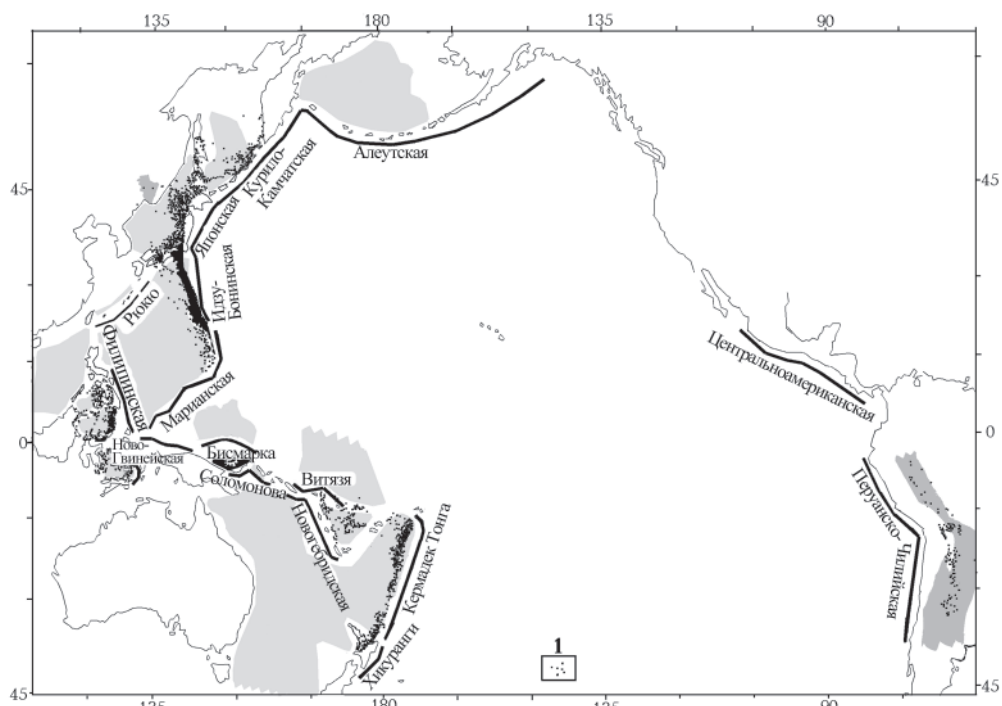


Рис. 5. Распределение гипоцентров землетрясений с глубинами менее 300 км (1) на периферии Тихого океана. Остальные условные обозначения – на рис. 4

При выделении регионов молодой океанизации и современной активизации платформ использовались критерии из работ [4, 8, 9 и др.].

Тектоническая приуроченность большинства гипоцентров соответствует прогнозной (см. рис. 4). Исключением можно считать фрагменты поясов гипоцентров, которые располагаются большей своей частью в зонах океанизации, но, кроме того, пересекают островные дуги (рис. 4). В местах пересечения дуг (Японской, Соломоновой, Новозеландской) установлен характер процессов последних 10-20 млн. лет, отличающий эти районы от других частей регионов. На о. Хонсю это окрестности Фосса Магны (Боль-

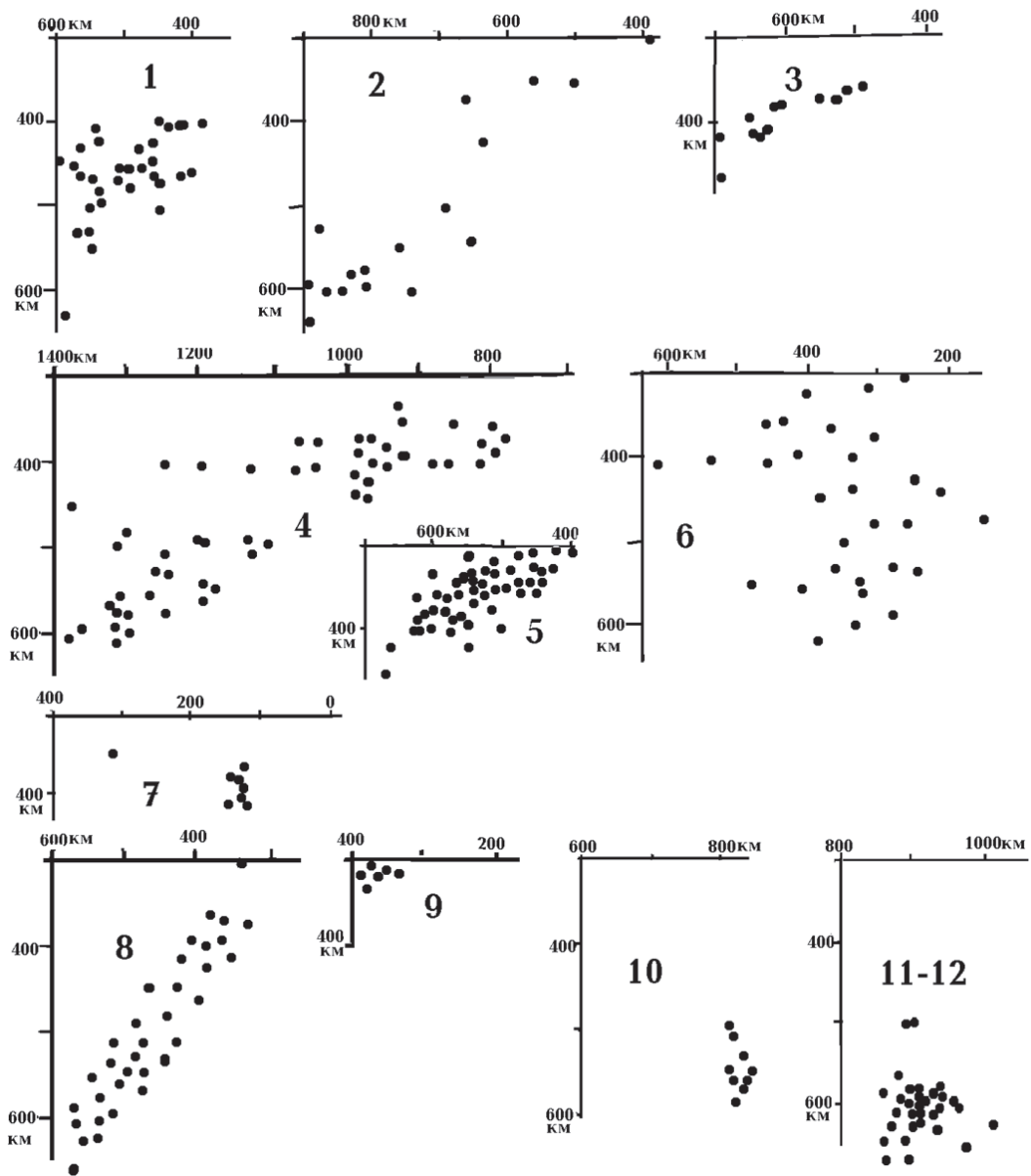
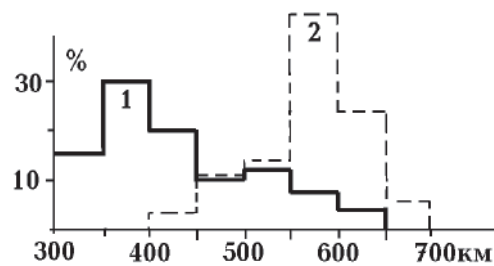


Рис. 6. Глубины гипоцентров глубоких землетрясений вдоль профилей, показанных на рис. 4. Расстояния на горизонтальных осях – от центров глубоководных желобов

Рис. 7. Гистограммы распределений глубин гипоцентров землетрясений под зонами океанизации (1) и активизации платформ (2)



шого Рва), считающегося местом наметившегося соединения Япономорской и Филиппинноморской областей

океанизации и отличающегося утоненной земной корой, интенсивным магматизмом, опусканием и накоплением молодых осадков. На Соломоновой дуге фокальная зона частично совпадает с молодым глубоким трогом о. Гуадалканал, накопившим в постмиоценовое время до 4,5 км осадков и вулканитов, на о. Северном (Новая Зеландия) — с трогом Таранаки (мощность осадочно-вулканоогенного комплекса возрастом не более 20 млн. лет — до 5 км) [10]. Такие опускания поверхности вполне сопоставимы с произошедшими синхронно в областях океанизации.

Если эти районы также отнести к охваченным незавершившимися процессами океанизации, то прогнозным регионам отвечает около 90% гипоцентров. Приуроченность остальных неясна. Возможно, при наличии более детальной геологической информации их также удастся отнести к океанизируемым регионам, в которых глубинный процесс еще не нашел достаточно полного проявления в событиях в приповерхностной зоне, доступных для изучения [4 и др.].

Характерные глубины гипоцентров глубоких землетрясений в рассматриваемых регионах представлены на разрезах на рис. 6 [2, 7, 14 и др.].

Очевидны различия между западной (сухопутной) частью профиля 4, профилями 10-12, проходящими по активизированной платформе, и всеми остальными, характеризующими зоны океанизации. Оно наглядно проявляется при построении гистограмм распределений гипоцентров по глубине (рис. 7). Если под активизированными платформами Восточной Азии и Южной Америки землетрясения сосредоточены на глубинах более 450-500 км, то в зонах океанизации они распределены в более широком диапазоне глубин.

Полученный результат согласуется со сделанным выше прогнозом.

Выводы. Проведенное рассмотрение территориального размещения и распределения максимальных глубин очагов землетрясений, характерных для периферии Тихого океана, показало, что они довольно уверенно, на количественном уровне, могут быть увязаны с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы процессов в тектоносфере. Вместе с тем очевидна необходимость продолжения исследований этого уникального геологического явления. Отсутствие вне западной окраины Тихого океана зон океанизации соответствующего возраста объясняет отсутствие глубоких землетрясений в других частях Земли. Но зоны современной активизации докембрийских платформ, начавшейся 10-20 млн. лет назад, могут быть, вероятно, встречены и вне территорий, примыкающих к Тихому океану.

1. Белевцев Р.Я., Дудко В.С., Белевцев А.Р. Диффузионный массоперенос при метаморфизме в докембрии. — К.: Наук. думка. — 2001. — 204с.
2. Геология континентальных окраин. Т.1 /Ред. К. Берк, Ч. Дрейк. — М.: Мир. — 1978. — 358с.
3. Глико А.О., Соболев С.В. Фазовые превращения вещества и вертикальные движения при конвективном утонении континентальной литосферы // Докл. АН СССР. — 1986. — 289, 2 — С.318-322.
4. Гордиенко В.В. Адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере. — К.: Корвін пресс. — 2007. — 170с.
5. Калинин В.А., Томашевская И.С., Морозов В.Н. и др. Возможная роль полиморфных переходов как инициатора землетрясений // Современное состояние сейсмологических исследований в Европе. — М.: Наука. — 1988. — С.247-251.
6. Кусков О.Л. Топология фазовых диаграмм минеральных систем и глубокофокусные землетрясения // Геохимия. — 1987. — 8. — С.1093-1107.
7. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / Гордиенко В.В., Андреев А.А., Биккенина С.К. и др. — Владивосток: ДВО РАН. — 1992. — 239с.
8. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. — М.: Недра. — 1989. — 262с.
9. Хаин В.Е. Региональная тектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка. — М.: Недра. — 1971. — 548с.
10. Энциклопедия региональной геологии мира. Западное полушарие / Ред. Р. Фейрбридж. — Л.: Недра. — 1980. — 512с.
11. Burnley P. "Anticraks" in mantle create deep earthquakes // New Science. — 1989. — 1689. — P.33
12. Carlson R., Pearson D., James D. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle // Rev. Geophys.. — 2005. — 43. — RG1001. — doi:10.1029/2004RG000156.
13. Irifune T. An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the constitution of the mantle // Phys. Earth and Pl. Inter. — 1987. — 45. — P.324-336.
14. 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 понад 300 км у перехідних зонах Тихого океану. Встановлено їх зв'язок з глибинними процесами (згідно з адвекційно-поліморфною гіпотезою) у регіонах молодого океанізації та сучасної активізації деяких ділянок платформ.

An allocation of earthquakes with focus depths more than 300 km in transition zones of Pacific ocean is considered. Its connection with deep processes (in accordance with advection-polymorphous hypothesis) in regions of young oceanization and recent activization of some parts of platforms is determined.