

О ПРИРОДЕ СРЕДНЕГЛУБИННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ ТИХООКЕАНСКОГО ТИПА

Рассмотрено распределение землетрясений с глубинами очагов до 200–300 км в переходной зоне Тихоокеанского типа. Установлена их связь с глубинными процессами (в соответствии с адвекционно-полиморфной гипотезой) в пределах регионов современной активизации геосинклиналей альпийского возраста.

Введение. В статьях [6, 7] авторы рассмотрели природу землетрясений в зонах перехода от континентов к Тихому океану на максимальных (более 300 км) и минимальных (от 0 до 40–70 км) глубинах с использованием представлений адвекционно-полиморфной гипотезы глубинных процессов (АПГ) [8 и др.]. Было показано, что землетрясения могут быть связаны с предполагаемыми гипотезой перемещениями вещества земной коры и верхней мантии, которые ведут к изменениям температуры (T) и плотности (σ) пород, в том числе – вследствие полиморфных преобразований. Вне анализа остались землетрясения, происходящие на глубинах от 40–70 до 300 км, распространенные примерно на 80% протяженности Тихоокеанского кольца. Во всех случаях они сопровождаются мелкофокусными и примерно в половине случаев – глубокофокусными. Есть смысл рассмотреть природу землетрясений средней глубинности, считая территориально близкие к ним мелко- и глубокофокусные уже подвергшимися анализу.

Размещение эпи- и гипоцентров. Пространственное распределение эпицентров среднеглубинных землетрясений показано на рис. 1 [5, 12, 23 и др.]. Они практически точно совпадают с альпийскими геосинклинальными зонами островных дуг, активизированными в последние миллионы лет [3, 4, 12–14 и др.]. Следует лишь отметить, что границы геосинклинальных зон далеко не во всех случаях могут быть установлены с достаточной определенностью: они часто располагаются на дне. Исключением из правила приуроченности рассматриваемого вида сейсмичности к альпидам может оказаться центральная часть запада Южной Америки, где молодым геосинклинальным (со складчатостью между эоценом и миоценом – 30 ± 5 млн. лет назад) можно предположительно считать только тип эндогенного режима шельфовых прогибов. На суше образование многочисленных трогов внутри киммерийской геосинклинали Анд в последние 100 млн. лет можно скорее признать рифтогенезом, последняя стадия которого продолжается и в настоящее время. Однако не исключено, что часть прогибов представляет собой геосинклинальные образования, не завершившие складчатости [4, 13 и др.] или претерпевшие ее в олигоцене [3, 14]. Не вызывает сомнений довольно протяженный период активизации региона (включающий магматизм от раннеэоценового до современного). Мощные толщи эффузивов (до 6 км) затрудняют изучение подстилающего их складчатого комплекса.

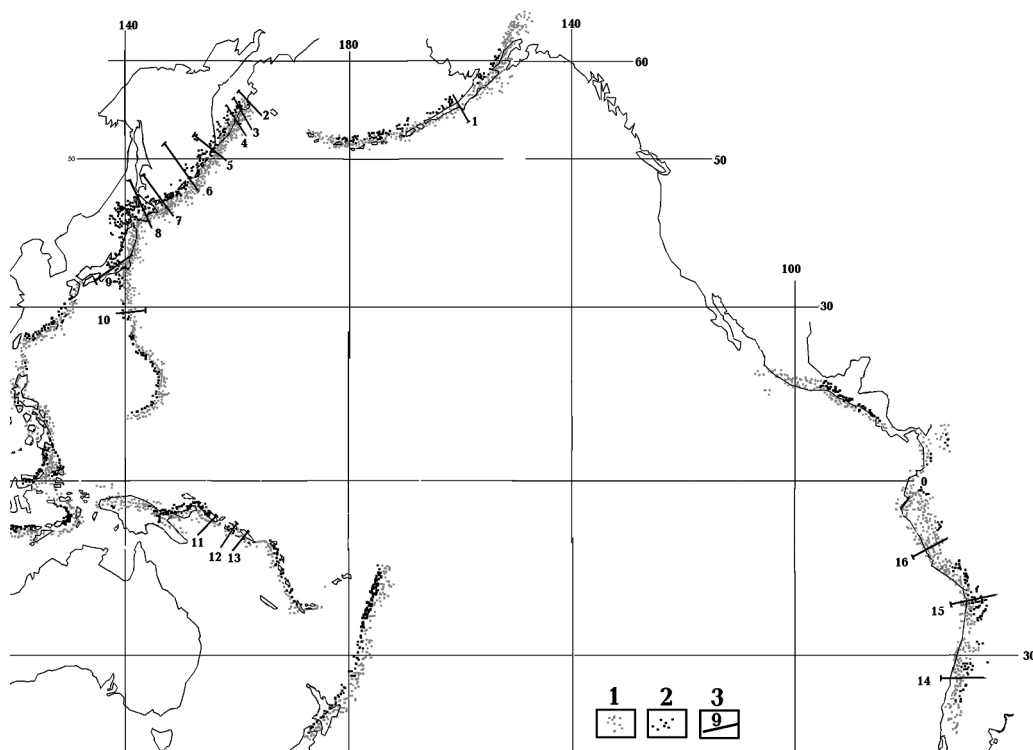


Рис. 1. Распределение землетрясений на глубинах от 40-70 до 300 км в Тихоокеанском кольце.

1, 2 – эпицентры (1 – на глубинах 70-150 км, 2 – 150-300 км), 3 – профили, вдоль которых показано распределение гипоцентров землетрясений на рис. 2

Распределения гипоцентров по глубине в разных регионах (рис. 2) представлены для различных периодов наблюдений, выборки включают землетрясения с различной минимальной энергией и могут служить только для качественной характеристики процесса. Очевидно, что в большинстве случаев землетрясения происходят до глубин около 200–250 км, реже распространены до 300 км. Если на больших глубинах они дополняются глубокофокусными, то после заметного перерыва.

Вдоль большинства профилей гипоцентры землетрясений рассматриваемой глубинности распределены в виде наклонных слоев различной мощности (30–100 км), на 20–30 процентах профилей эта закономерность не наблюдается или проявлена слабо.

Перемещение вещества в конце геосинклинального цикла и сейсмичность. Согласно представлениям АПГ [8 и др.] завершающий акт эволюции тектоносферы геосинклинали представляет собой вынос частично расплавленного вещества из мощной астеносферы (с глубиной кровли около 100 км) под кору (на глубины примерно 50–100 км). Через небольшой промежуток времени из новой неглубокой астеносферы в кору (в интервал глубин 20–40 км) поступают основные выплавки в количестве, эквивалентном слою мощностью 7–8 км. На их место опускаются эклогитизированные основные породы коры. В альпидях рассматриваемый процесс начался не менее 20–30 млн. лет назад [5, 8, 12 и др.]. Вполне

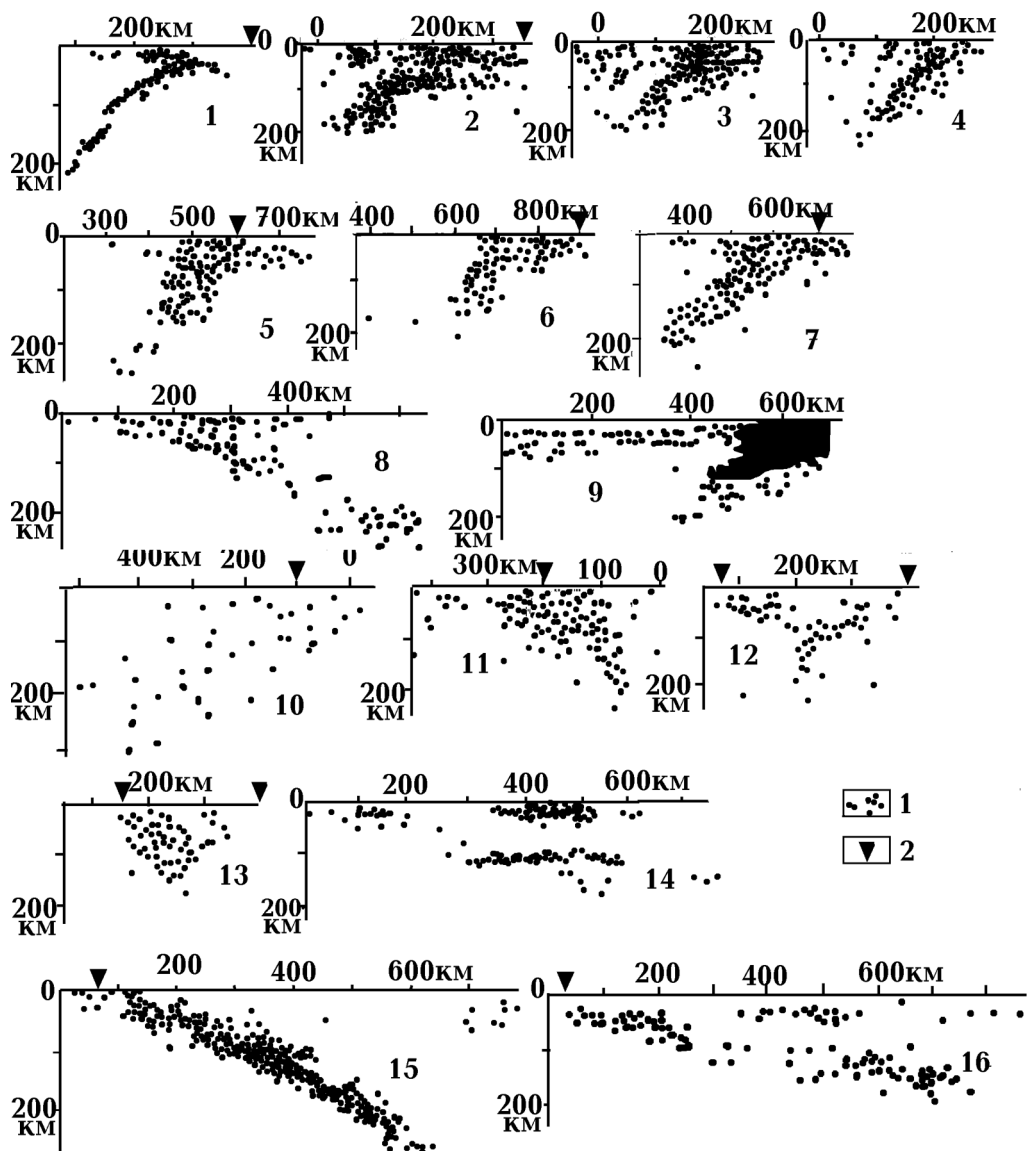


Рис. 2. Распределение гипоцентров землетрясений на глубинах 0-300 км вдоль профилей (см. рис. 1): 1 – гипоцентры, 2 – положение глубоководных желобов

вероятно, что возраст последнего этапа активности сокращался с приближением к передовому прогибу (желобу), как показано Ж. Обуэном для ряда геосинклиналей [10]. Близкие по характеру события происходили и в течение современной активизации, часто наложенной на альпиды в последние несколько млн. лет. Какой из двух процессов мог внести основной вклад в сейсмичность, можно определить по соответствию современного положения погружающихся эклогитизированных блоков порода наблюдаемой сейсмичности.

Оценим скорость погружения эклогитизированных блоков по формуле Стокса: $V=1,5\Delta\sigma gr^2/\eta$, где $\Delta\sigma$ – аномальная плотность, g – ускорение силы тяжести, r – полуразмер блока, η – вязкость среды. Изменения плотности (и скорости

сейсмических волн) при эклогитизации можно оценить по данным [15–18]. При неполном преобразовании пород (когда плотность все же превышает имеющуюся в верхних горизонтах мантии) плотностная аномалия составит примерно $0,1 \text{ г/см}^3$, полуразмер блока может достигать 5–10 км. При этих условиях скорость погружения составит для $\eta = 10^{22}\text{--}10^{19} \text{ Па}\cdot\text{с}$ от 0,01–0,055 до 10–50 см/год соответственно.

Давление, создаваемое эклогитизированным блоком пород коры, способным к перемещению, должно быть меньше мгновенной прочности пород на сдвиг и больше напряжений, снимаемых при «массовых» (наиболее распространенных в регионе) землетрясениях. Первый параметр для условий низов коры – верхов мантии оценивается как $n \cdot 10^8 \text{ Па}$ [9], второй – 10^6 Па [1 и др.]. Давление блока описанных выше параметров составит $1\text{--}2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, т.е. по порядку соответствует сформулированным требованиям.

Возможны ли прогнозируемые перемещения по геологическим данным? Анализ минералогии метаморфических пород показывает, что во многих случаях можно говорить о погружении эклогитизированных образований коры в мантию на глубины, превышающие глубину границы графит–алмаз (в платформенной мантии – около 120 км, в прогретой мантии активного региона – больше) [11 и др.]. В некоторых случаях удается проследить поэтапно процесс погружения эклогитизированного корового гранулита от глубины около 30 км до примерно 100 км [21]. Темп таких вертикальных перемещений (по данным датировок последовательно изменяющейся минералогии, отвечающей разным глубинам) оценивается по-разному в коре и верхней мантии. Для пород коры с высокой вязкостью (около $10^{22} \text{ Па}\cdot\text{с}$) известны величины порядка 0,01–0,1 см/год [19 и др.]. В мантии они достигают 1–20 см/год [20 и др.]. Таким образом, сделанные выше оценки представляются вполне реальными.

Фокальная зона Камчатки. Рассмотрим предлагаемую гипотезу природы землетрясений на хорошо изученном примере Восточной Камчатки. Для землетрясений Курило-Камчатского региона было показано различие механизмов на глубинах от поверхности до примерно 50–100 км и на больших [2]. Глубже 50–100 км западнее осей вулканических дуг механизмы землетрясений соответствуют субвертикальному движению вещества с преобладанием на больших глубинах погружения.

Скоростная модель верхней мантии Восточной Камчатки (двумерное распределение V_p) в работах [5, 8] рассмотрена в осредненном варианте, так как имелось в виду проанализировать ее соответствие тепловой модели альпийской геосинклинали, не содержавшей элементов, отражающих индивидуальные особенности истории развития частей региона. Для решения задачи, поставленной в данном исследовании, необходима другая информация – распределение аномальных значений V_p , по которому можно обнаружить на каждом из пересечений геосинклинали (профили 2–4 на рис. 1) погружающиеся эклогитизированные блоки. Возможность их выявления продемонстрирована на обширном материале сейсмических исследований мантии Северной Евразии [8 и др.]. Им отвечают аномалии V_p 0,2–0,4 км/с.

На Камчатке аномалии (ΔV_p) определены по отношению к среднему распределению скорости продольных сейсмических волн в регионе по вертикали и в виде отличий скоростного разреза на каждом из профилей от вычисленного по тепловой модели [5, 8]. Различия ΔV_p меньше погрешности определения этих

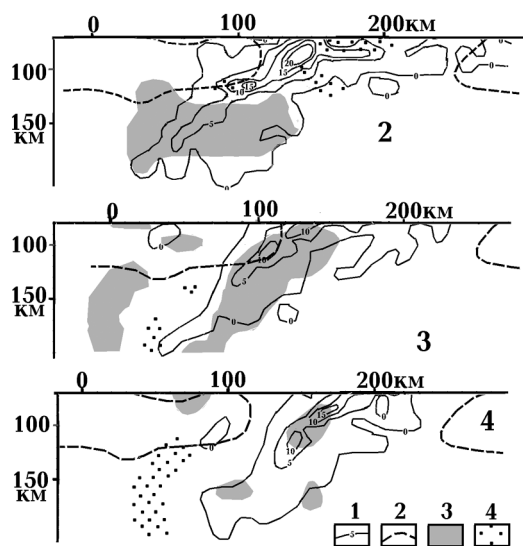


Рис. 3. Сопоставление плотности гипоцентров землетрясений со скоростными аномалиями на профилях 2–4 (рис. 1):

1 – изолинии плотности гипоцентров (количества событий за последние 33 года на площадках 10x10 км в плоскости разреза), 2 – контур астеносферы по тепловой модели [5, 8], 3, 4 – контуры скоростных аномалий интенсивностью $\geq 0,2$ км/с (3 – положительных, 4 – отрицательных)

величин, т.е. оба метода вычислений дают одинаковый результат. Он представлен на рис. 3, профили 2–4 (отвечающие профилям 10, 8 и 7 из [5, 8]) проведены вкрест простирания структуры геосинклинали. Представлены контуры скоростных аномалий, совпадающие для обоих методов расчета. С ними сопоставлены концентрации гипоцентров землетрясений, собранные в полосах ± 10 км у профилей и представленные в виде изолиний количеств событий на площадках в пределах разрезов размером 10x10 км.

Очевидны такие результаты сопоставления:

1. Отсутствует корреляция отрицательных аномалий с астеносферой. Можно считать, что источник возмущений не связан с температурой и частичным плавлением. Отрицательные аномалии скорости вообще невелики – практически не превышают 0,2 км/с – и могут быть обусловлены погрешностями определения скорости разными методами.

2. Часть положительных аномалий также представлена возмущениями небольшой интенсивности, но остальные (приуроченные к зонам максимальной сейсмичности) достигают среднего уровня 0,3 км/с и могут быть признаны вполне достоверными.

3. Сравнивая величину положительных аномалий с различиями V_p между породами нормальной мантии и эклогитом [8, 16], можно оценить содержание эклогита в погружающемся блоке на уровне 0,75 и плотностную аномалию – примерно как 0,1 г/см³.

4. Скоростные аномалии на профилях не прослеживаются глубже 200 км. Не обязательно этот факт отражает отсутствие причин возникновения землетрясений на соответствующих глубинах, он может быть связан с ограниченной глубиной скоростной модели.

Однако близкий результат получается и при анализе скоростных разрезов верхней мантии Северной Евразии для платформенных и активных регионов [22 и др.]. На рис. 4 представлены данные для регионов современной активизации на пространстве от Балтийского щита до восточной окраины Сибирской платформы (Вилуйской впадины). Экспериментальные данные сопоставлены с расчетными для соответствующей тепловой модели [8]. Отрицательные аномалии и часть положительных объясняются погрешностями определений скоростей сейсмических волн. Для части интенсивных положительных аномалий показана их связь с эк-

Рис. 4. Распределение V_p в мантии зон активизации Северной Евразии [8]: 1 – расчетное распределение, 2 – экспериментальные данные [22 и др.]

логитами в мантии. Глубже 200–250 км значащие аномалии отсутствуют. К этой глубине в породах мантии уже в значительной мере завершается преобразование части пироксенов в гранаты, т.е. пропадает основное отличие их от эклогитов. Логично считать, что активное погружение плотных блоков первично-коровых пород на этих глубинах завершается.

Рассмотрим возможности погружения эклогитизированных блоков коры Восточной Камчатки за последние 20–30 млн. лет.

На рис. 5 представлено распределение вязкости пород мантии по профилю вкрест геосинклинали по [8] с некоторыми изменениями (принято несколько большее расстояние от западной границы геосинклинали до желоба в месте прохождения интерпретационного профиля).

Опускание эклогитизированных блоков коровых пород, начавшееся 20–30 млн. лет назад, происходило на пикетах примерно от 0 до 120–150 [5, 8]. В течение первых 10 млн. лет блоки двигались в коре при вязкости, несколько пониженной ее прогревом при вторжении в нее мантийных выделок, их подошвы оказались на глубине около 45 км. За последующие 10–20 млн. лет подошвы блоков восточнее астеносферы при вязкости пород мантии 10^{21} Па·с достигнут 60–75 км. На пк 0–120 путь примерно в 40–60 км (мощность астеносферы) блоки пройдут за исчезающе малое время: вязкость в этом интервале глубин на порядки ниже вязкости твердой мантии при субсолидусных температурах [8]. В среде с вязкостью около $5 \cdot 10^{20}$ за 10–20 млн. лет блоки успеют пройти 30–60 км, т.е. глубины их подошв достигнут 110–170 км. Это определит формирование к настоящему времени наклонной на запад сейсмогенной зоны, практически совпадающей с экспериментально установленной. Вместе с тем находят объяснение и наиболее интенсивные положительные скоростные аномалии, показанные на рис. 3.

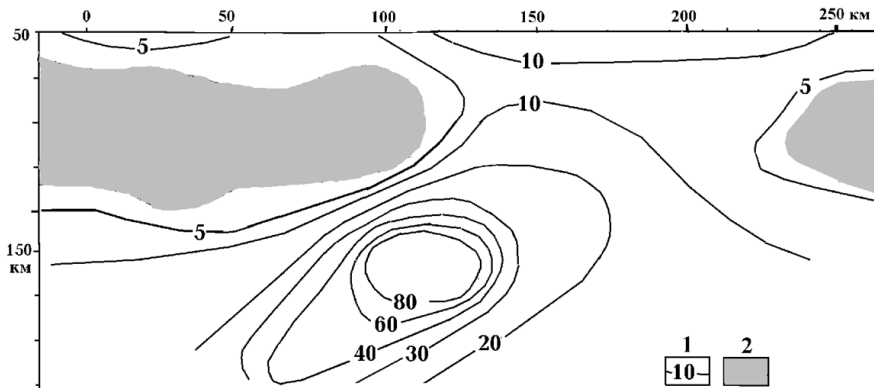
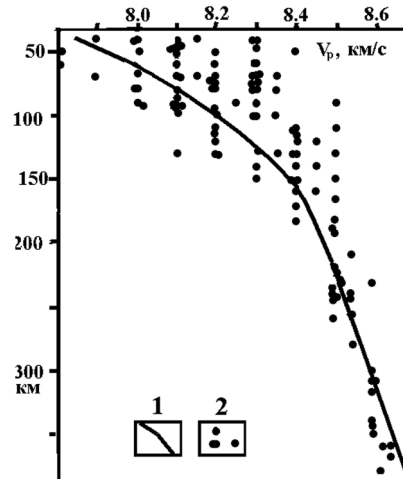


Рис. 5. Распределение вязкости в мантии восточной Камчатки и прилегающей части Тихого океана [8]: 1 – изолинии вязкости в 10^{20} Па·с, 2 – астеносфера

На территории Западной Камчатки, где последний этап геосинклиналичного теплопереноса происходил на 30–40 млн. лет раньше, чем восточнее, и, тем более, в пределах киммерийских геосинклиналей между Сибирской платформой и океаном опускавшиеся эклогитизированные блоки давно остановились, сейсмичность на соответствующих глубинах отсутствует. Здесь в последние миллионы лет происходят события, связанные с перемещениями вещества при современной активизации, т.е. эклогитизированные погружающиеся блоки еще не вышли за пределы коры. Землетрясения с коровыми глубинами гипоцентров довольно широко представлены в этом регионе [20 и др.].

Конечно, на Камчатке и в киммеридях северо-востока Евразии не исключены землетрясения, связанные с противоположным направлением метаморфического процесса – деэклогитизацией пород коры [7]. Для определения преобладающего варианта необходимы дополнительные исследования, включающие, прежде всего, изучение скоростных разрезов коры [7]. Можно предположить, что на Камчатке (и на части Курильской и Японской дуг) с высокоскоростной корой, где вероятно распространение слоя коро-мантийной смеси с эклогитами [12 и др.], роль деэклогитизации заметна, но с удалением от океана она, скорее всего, сокращается. Скоростные разрезы коры [12, 22 и др.] обнаруживают на территории северо-востока Евразии (за исключением части Сихотэ-Алиня) в низах коры преимущественно значения V_p , отвечающие «базальтовому» слою.

Энергия землетрясений в районах профилей 2–4 (рис. 1) на глубинах более 50 км за 33 года составляет около $3\text{--}4 \cdot 10^{14}$ Дж (примерно столько же выделяется в приповерхностном слое). Энергию погружающихся эклогитизированных блоков можно оценить по их объему (примерно $60 \times 150 \times 10$ км³), аномальной плотности ($0,1$ г/см³) и средней длине пути (около 80 км). За 20–30 млн. лет она составит около $7 \cdot 10^{21}$ Дж, за 33 года – около 10^{16} Дж. Представление о релаксации напряжений (и, соответственно, переходе энергии в тепло без посредства затухания волн землетрясений) трудно применить к рассматриваемому типу процесса. Скорее всего, смещения происходят по непрерывно подновляемым зонам нарушения сплошности среды.

Выводы. Проведенный анализ параметров сейсмичности в переходных зонах от континентов к Тихому океану на глубинах от 40–70 до 200–300 км показал, что для объяснения этих событий, как и для рассмотренных ранее землетрясений на больших и меньших глубинах [6, 7], могут быть использованы представления адвекционно-полиморфной гипотезы глубинных процессов в тектоносфере Земли. Наиболее существенной причиной сейсмичности оказывается изменение минералогии пород коры и мантии, происходящее в связи с изменениями температуры и давления при теплопереносе.

1. Аки К. Механизм землетрясений // Верхняя мантия. – М.: Мир. – 1975. – С.199-213.
2. Балакина Л.М. Субдукция и механизмы землетрясений // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. – М.: ИФЗ РАН. – 2002. – С.120-141.
3. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. – М.: Недра. – 1981. – 432с.
4. Геология континентальных окраин / Ред К. Берк и Ч. Дрейк, Т. 2.– М.: Мир. – 1978. – 374с.
5. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Глубинная модель верхней мантии Камчатки // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. – 2007. – №1, вып. 9. – С. 78-92.

6. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. О природе глубокой сейсмичности в переходных зонах от континентов к океанам // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2008. – №3 – С. 56-64.
7. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. О природе мелкофокусной сейсмичности в переходных зонах Колумбийского типа // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2008. – №4 – С. 83-92
8. Гордиенко В.В. Адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере. – Киев: Корвін пресс. – 2007. – 172с.
9. Крылов С.В., Дучков А.Д. Глубинное деформационно-прочностное районирование земной коры // Геология и геофизика. – 1996. – т.37, 9. – С.36-65.
10. Обузн Ж. Геосинклинали. – М.: Мир. – 1967. – 302с.
11. Соболев В.С., Соболев В.Н. Новые доказательства погружения на большие глубины эклогитизированных пород земной коры // Докл. АН СССР. – 1980. – т.250, 3. – С.683-685.
12. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / Гордиенко В.В., Андреев А.А., Биккенина С.К. и др. – Владивосток: ДВО РАН. – 1992. – 239с.
13. Хаин В.Е. Региональная тектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка. – М.: Недра. – 1971. – 548с.
14. Энциклопедия региональной геологии мира. Западное полушарие / Ред. Р. Фейрбрідж. – Л.: Недра. – 1980. – 512с.
15. Boyd F., McCallister R. Densities fertile and sterile garnet peridotites // Geop. Res. Letters. – 1976. – v.3, 9. – P.509-512.
16. Carlson R., Pearson D., James D. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle // Rev. Geophys. – 2005. – 43. - RG1001. – doi:10.1029/2004RG000156.
17. Djomani Y., O'Reily S., Griffin W., Morgan P. The density structure of subcontinental lithosphere through time // Earth and Plan. Sci. Let. – 2001. – v.184, 3-4. – P.605-621.
18. 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.
19. Lappin M., Dawson J. Two Roberts Victor cumulate eclogites and their re-equilibration // Phys. and Chem. Earth. – 1975. – v.9. – P.351-365.
20. Oliver G., Chen F., Buchwaldt R., Henger E. Fast tectonometamorphism and exhumation in the type area of the Barrovian and Buchan zones // Geology. – 2000. – v.28, 5. – P.459-462.
21. Ota T., Gladkochub D., Sklyarov E., Mazukabzov A., Watanabe T. P–T history of garnet-websterites in the Sharyzhalgai complex, southwestern margin of Siberian craton: evidence for Paleoproterozoic high-pressure metamorphism // Precambrian Research. – 2004. – v.132, 4. – P.327-348.
22. Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure of Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. – 2006. – 416. – P. 33-52.
23. 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 200–300 км у перехідній зоні Тихоокеанського типу. Встановлено їх зв'язок з глибинними процесами (згідно з адвекційно-поліморфною гіпотезою) у межах регіонів сучасної активізації геосинкліналей альпійського віку.

An allocation of earthquakes having focus depths up to 200–300 km in transition zones of Pacific type is considered. Their connection with deep processes (in accordance with the advection-polymorphous hypothesis) in regions of recent activization of alpine geosynclines is determined.