

doi: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.04.005>

В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

ДВИЖЕНИЯ ПЛИТ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Проанализированы распределения скоростей сейсмических волн, температур и очагов землетрясений в верхней мантии и переходной зоне к нижней мантии. Построена схема глубинного процесса в тектоносфере региона предполагаемого погружения плит в соответствии с адвекционно-полиморфной гипотезой. Сформулированы предположения о природе глубинной сейсмичности, согласующиеся с геологическими данными. Показана энергетическая нереальность создания фокальной зоны движением погружающейся плиты.

Ключевые слова: очаг землетрясения, скоростные и тепловые модели мантии, глубинные процессы.

Введение

Перемещения плит — основной элемент гипотезы глобальной тектоники (ГТ). Считается, что они прослеживаются от срединно-океанических хребтов (СОХ) до окраинных желобов по полосовым аномалиям магнитного поля и по гипоцентрам землетрясений — до подошвы области перехода между верхней и нижней мантиями (примерно 670 км). Используемая авторами адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере Земли (АПГ) [6, 7 и др.] позволяет объяснить наряду с другими явлениями сейсмичность океанов и переходных зон. Это делается на количественном уровне с соблюдением закона сохранения энергии. В пределах коры в периоды активизации процессов теплопереноса и появления тепловых аномалий землетрясения вызываются термоупругими напряжениями, движением магм, относительными смещениями блоков пород. Последние обусловлены изменениями плотности в связи с вариациями температуры и полиморфными преобразованиями. Энергетические потребности собственно сейсмичности в такой схеме оказываются незначительными по сравнению с выносом тепла тепловым потоком. В верхней мантии региона с континентальной корой до глубин около 250 км основная часть землетрясений активного периода связана с погружением

© В.В. ГОРДИЕНКО, Л.Я. ГОРДИЕНКО, 2018

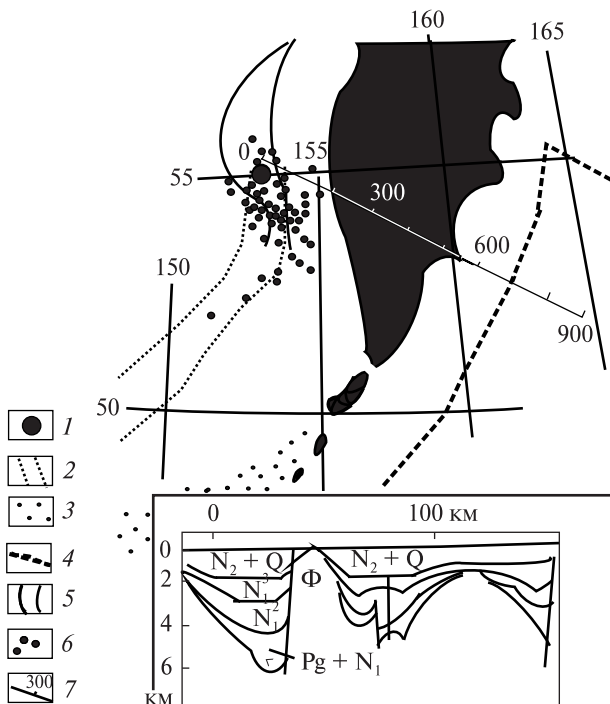


Рис. 1. Полоса глубинной сейсмичности в Охотском море: 1 — землетрясение 24.05.2013 г, 2 — полоса землетрясений с глубинами гипоцентров более 500 км, 3 — Южно-Охотская впадина, 4 — ось глубоководного желоба, 5 — границы впадины ТИНРО и трога Лебеда, 6 — эпицентры близких по времени афтершоков. На врезке — разрез неогеновой части осадочного слоя в районе трога Лебеда [19], 7 — профиль, вдоль которого построен скоростной разрез мантии (рис. 7)

уплотненных эклогитизированных блоков, возникших в коре. В переходной зоне к нижней мантии сейсмичностью сопровождается изменение плотности обоих знаков при изменении температуры (Т) и давления (Р) и обусловленном ими преобразованием минералов мантийных пород. И в этих интервалах глубин расход энергии оказывается незначительным. Совершенно другие оценки получаются для энергии землетрясений, связанных с движением плиты, погружающейся в верхнюю мантию и переходную зону к нижней (т.е. движущейся согласно ГТ). Проверка показывает, что эта гипотеза совершенно непригодна для объяснения сейсмичности рассматриваемых регионов.

Сейсмичность контактов континентов и океанов анализировалась авторами и ранее [5, 6 и др.], но для количественной интерпретации генерации наиболее глубоких землетрясений не хватало экспериментальных данных. Важные сведения такого рода получены при изучении Охотоморского землетрясения 24.05.2013 года [23 и др.] с гипоцентром на глубине около 640 км (рис. 1). Поэтому есть смысл начать с его характеристики.

Некоторые параметры Охотоморского землетрясения 2013 г.

В сейсмологии принято считать, что распределение афтершоков в определенной мере обрисовывает объем, в пределах которого были сняты напряжения при землетрясении [1 и др.]. Однако для событий с упомянутыми глубинами афтершоки не фиксировались. В данном случае они известны. При исключении близких по времени, но территориально удаленных гипоцентров получим область в виде параллелепипеда с вертикальной квадратной стороной примерно

Рис. 2. Сопоставление площади, по которой происходит смещение, с сейсмическим моментом. $\Delta\sigma$ — в данном случае — снятое напряжение

150—200 км и толщиной около 100—150 км, почти полностью проецирующуюся в трог Лебеда. «По облаку афтершоков сделана оценка размеров очага землетрясения 24.05.2013 г.: длина 300 км, ширина 170 км, диапазон глубин от 425 до 720 км» [23, с. 25]. Эти величины представляются несколько завышенными. В область афтершоков включены и сравнительно далекие гипоцентры, не образующие вместе с остальными компактного облака.

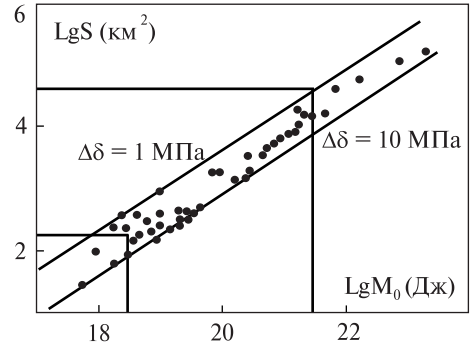
Породы внутри очага можно характеризовать удельной упругой энергоемкостью $w = \tau^2/2G = \tau^2/2\sigma V_s^2$, где τ — прочность на сдвиг (разрушающее касательное напряжение), G — модуль сдвига, σ — плотность, V_s — скорость поперечных сейсмических волн. Параметр w («потенциальная упругая энергия, которая накапливается в единичном объеме среды в результате ее сдвигового деформирования вплоть до момента разрушения» [13, с. 57]) определить сложно, так как для глубинных условий неясен уровень τ . Минимальная τ не зависит от PT условий и составляет около 0,1 ГПа, но она установлена для коровых пород. Приближенная оценка для мантийных — 0,4 ГПа [16]. Получим $w = 6 \cdot 10^5$ Дж/м³. Во всем объеме объекта может быть запасена энергия (при отсутствии релаксации) около $2,3 \cdot 10^{21}$ Дж.

Ее можно сопоставить с сейсмическим моментом (используя формулу Н. Kanamori [29]): $Lg M_0 = 1,5M + 16,1 = 28,5$ для M_0 в эргах, т.е. $10^{21.5}$ при M_0 в Дж, примерно $3,2 \cdot 10^{21}$ Дж. Результаты получены близкие, но погрешность w нельзя оценить, поэтому согласование может быть и случайным. Снимаемое напряжение оказывается минимальным для сильных землетрясений [25 и др.] (рис. 2). Большое количество выделившейся энергии связано с большим объемом, в котором она была запасена.

Величина смещения $D = M_0/G \cdot S$ [25] оказывается около 5—6 м. Естественно, это значение предполагает использованный при расчете механизм очага — смещение по плоскости разрыва сплошности пород с преодолением силы трения. Результат близок к полученному в работе [17], из чего, конечно, не следует совпадение геодинамических механизмов, приведших к накоплению и разгрузке напряжений.

Тектоническая позиция землетрясения

Расположение в изучаемом регионе полосы землетрясений с глубиной гипоцентров более 500 км (см. рис. 1) часто воспринимается как их приуроченность к тектоническим единицам — островной дуге и желобу, к наклонному погружению плиты. Но желоб слишком молод для связи с длительным погружением [15 и др.], максимальные глубины землетрясений резко изменяются на его протяжении, южнее аналогичная полоса, начинаясь за Идзу-Бонинской дугой, пересекает Японскую дугу и Японское море, а ее северный фрагмент оказывается под Ханкайским докембрийским массивом [6 и др.].



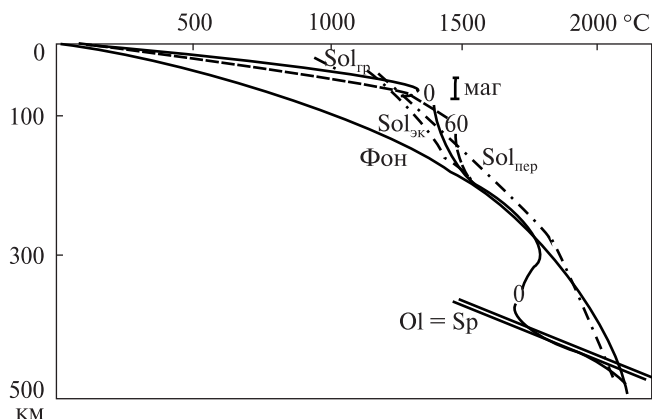


Рис. 3. Изменение температуры в тектоносфере изучаемого региона. Sol — солидус пород: пер — перидотита, эк — эклогита, гр — гранулита. $Ol_{\alpha} \leftrightarrow Ol_{\beta}$ — PT-условия преобразования оливина мантийных пород в верхней части переходной зоны. Цифры у кривых — возраст в млн лет. маг — глубины магматических очагов по данным о составе молодых изверженных пород

Вообще зоны сейсмичности максимальной глубины немногочисленны: кроме указанных это районы Явы, Филиппин, дуги Тонга-Кермадек и срединный массив Анд — Альтиплано. Общая длина этих поясов не превышает 25 % длины зон разноглубинной сейсмичности, окружающих Тихий океан. От общей длины контакта континентов и океанов они составляют около 7 %. Такую избирательность ГТ никак не объясняет.

Можно привести и другие соображения против субдукционной природы землетрясения, но ограничимся констатацией — оно отвечает процессу, очевидно в регионе над полосой — молодой активизации, которая диагностируется по высокому тепловому потоку и другим геолого-геофизическим данным [20 и др.]. Эта активизация довольно широко распространена в Охотском море и вне полосы, хотя говорить о синхронности событий не приходится. По имеющимся геологическим данным, возраст начала процесса изменяется по крайней мере в диапазоне 5 млн лет [3, 20, 22]. В Южно-Охотской впадине процесс явно принял характер океанизации коры.

Упомянутое выше совпадение сейсмического момента с предельно возможным содержанием энергии в объеме источника указывает на очень быстрое формирование напряжений — за период меньше времени релаксации (скорее всего — менее 1 млн лет [6]). Т.е. напряжения возникли геологически недавно, но завершение их формирования может быть связано с особыми условиями, предшествующими активизации.

По данным [12] дуги с простираем, близким Курило-Камчатской, были распространены в регионе в широком возрастном диапазоне, включая практически весь мезозой. Указанная полоса может располагаться в пределах одного из киммерийских элементов Корьякской складчатой области. Последняя развивалась на предположительно герцинском фундаменте [11 и др.]. Возможно, палеозойской геосинклинальной и рифтовой активности предшествовала байкальская. Есть смысл проанализировать геологическую историю старше примерно 50 млн лет и ближе к настоящему времени добавить эффекты последних событий.

Достоверных данных мало, можно опереться только на сведения о магматизме в регионе [3, 22 и др.]. Датировки магматических пород оказываются довольно отчетливо сгруппированы в 4 основных периода, напоминающие аналогичный перечень для активизированной в киммерийское время более изученной эпигер-

цинской Скифской плиты (на которой герцинидам также предшествовали поздние байкалиды) [2, 11, 18].

На Охотоморской плите породы всех этапов включают коровые по составу магмы (кислых сравнительно мало, в основном — средние). Т. е. необходимо моделировать глубинный процесс, который обеспечивал бы образование подкорового очага плавления (и возможность вторжений из него в кору с образованием вторичного расплава). Подобное развитие событий применяемой гипотезой предусматривалось для океанических регионов [6], в районах с континентальной корой оно не опробовано. Поэтому были рассмотрены несколько схем, показано, что они мало различаются с точки зрения влияния на изучаемое явление — природу глубинных землетрясений.

Эволюция температуры тектоносферы

Предусмотренные АПГ перемещения вещества дают возможность вычислить изменения температуры недр. Порядок необходимых расчетов неоднократно описан [6 и др.], здесь не будем на нем останавливаться.

Результаты вычислений приведены на рис. 3. Стартовая тепловая модель построена для условий геосинклинальной мантийной радиогенной теплогенерации [6 и др.]. Предполагался геосинклинальный герцинский процесс в тектоносфере, включающий три акта теплопереноса. В период 200—60 млн лет назад для обеспечения генерации указанных выше магм понадобилось два этапа теплопереноса возрастом 200 и 100 млн лет. К моменту 20—30 млн лет назад подкоровая астеносфера релаксировала, в нижних горизонтах верхней мантии восстановился небольшой слой частичного плавления, пригодный для одноактной активизации.

Построенная тепловая модель согласуется с независимо установленными глубинами магматических очагов региона.

Перемещение блоков с изменившейся плотностью

Для оценки влияния температурных аномалий на формирование плотностных, способных привести в движение блоки пород коры или мантии, необходимы данные о связи этих параметров (рис. 4). Кроме приведенных на рисунках сведений можно упомянуть, что в верхней части мантийного разреза в зависимости от температуры могут изменяться глубины границ распространения плагиоклазового, шпинелевого и гранатового лерцолита. Но в нашем случае эти преобразования минералогии, хотя и ведут к некоторым вариациям плотности пород, не играют заметной роли в создании источников землетрясений. Изменение плотности под влиянием температуры экспоненциально сокращается с глубиной. На 20 км это 0,02, на 100 км — 0,013, на 250 — 0,0105, на 400 км — 0,0095 г/см³/100°С.

На глубинах более примерно 700—800 км землетрясения маловероятны. Здесь начинается глобальная астеносфера мощностью около 300 км. Ее формирование рассмотрено в работе [28 и др.] и здесь не описывается. В интервале глубин около 300—400 км для рассматриваемого варианта глубинных процессов в тектоносфере региона температуры в течение 100—150 млн лет изменялись мало, полиморфные преобразования нетипичны. Объекты аномальной плотности, перемещение кото-

рых сопровождается землетрясениями, не формируются. Эта ситуация встречается довольно часто, в «несеismicную» толщу может включаться и/или интервал глубин 250—300 км.

В интервале глубин около 170—270 км температурная аномалия через 20 млн лет после начала последней активизации составляет в среднем примерно 200 °С. Плотность пород выросла на 0,02 г/см³. Формируемое давление на подошву слоя — $2 \cdot 10^7$ Па — в настоящее время не превышает прочности пород на сдвиг, смещения и землетрясения маловероятны. Их не может быть и под воздействием термоупругих напряжений: темп изменений T к настоящему времени слишком мал. Если имеет место дополнительная активизация, начавшаяся несколько млн лет назад, то изменения температуры не затронут рассматриваемый интервал глубин. Т.е. землетрясения возможны только за счет внешних по отношению к нему факторов. К ним можно отнести воздействия сверху.

Положительная температурная аномалия в мантии на глубинах 40—140 км составляет в среднем 400—450 °С, среднее разуплотнение — около 0,06 г/см³, подъемная сила не превышает прочности пород. Однако здесь очевидно дополнительное разуплотнение, связанное с плавлением пород (хотя значительная часть расплава сегрегирована и вынесена в кору еще в начале процесса). Еще одним источником понижения плотности может быть переход пород подкоровой части верхней мантии от гранатовых к шпинелевым лерцолитам. И прочность пород в астеносфере резко понижена. Не имея количественных характеристик этих параметров, можно все же допустить возможность движения вещества. Кроме понятного всплывания (возможно, отдельных блоков небольшого размера) можно предположить растекание от центра под влиянием давления растущего осадочного слоя трюга (рис. 1). В движение вовлекается и подплавленный низ коры. Тут температуры могут превышать солидус основных гранулитов (рис. 3). Однако мощность коры в изучаемом районе в настоящее время составляет 25—30 км [19], на больших глубинах следует ориентироваться на солидус мантийных пород, а он не превышен.

Таблица. Время (лет), необходимое для выравнивания химической неоднородности гранатов при погружении и эксгумации породы [10]

Т, °С	Р, ГПа	Размер зерна, мм		
		0,05	0,5	5
<i>Погружение</i>				
500—600	0,56—0,67	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{11}$
500—700	0,56—0,78	$1,3 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^{10}$
500—800	0,56—0,89	10^5	10^7	10^9
500—900	0,56—1,00	10^4	10^6	10^8
500—1000	0,56—1,11	$1,3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^7$
<i>Эксгумация</i>				
1000—900	1,11—1,00	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^6$
1000—800	1,11—0,89	10^4	$1,4 \cdot 10^6$	10^8
1000—700	1,11—0,78	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^9$
1000—600	1,11—0,67	$1,8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$
1000—500	1,11—0,56	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{13}$

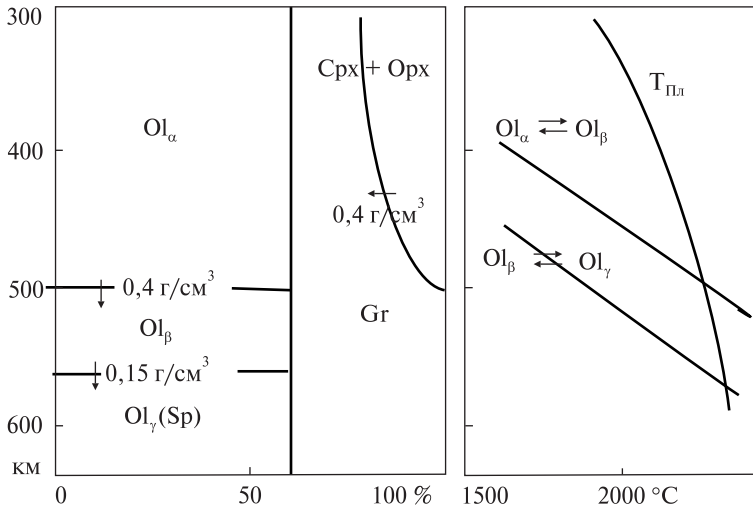


Рис. 4. Преобразования минералогии пород верхней мантии. Ol — оливин, Срх и Орх — клино- и ортопироксены, Gr — гранат, Sp — шпинель. Стрелками показано направление роста плотности. $T_{пл}$ — распределение температуры перед началом рассмотренного глубинного процесса (около 200 млн лет назад)

Самые существенные причины возникновения плотностных аномалий предполагаются выше, в сохранившейся части средней коры. Здесь сформированы условия быстрой эклогитизации основных образований. Эклогиты, возникшие около 20 млн лет назад и достигшие концентраций, позволяющих опуститься в мантию, уже удалены из коры. Сейчас речь может идти о новых их порциях, связанных с последней вспышкой активности. Современные данные о темпах эклогитизации [10] приведены в таблице. Выяснено, что необходимых для решения нашей задачи темпов процесс достигает только под влиянием флюидов. Последние явно образуются в зоне корового плавления, это фиксируется многими геолого-геофизическими данными. Таким образом, вероятно формирование блоков пород, плотность которых на первые десятки доли $г/см^3$ превышает плотность перегретой подкоровой мантии и, тем более, окружающих пород коры. Сокращение мощности коры за счет ее нижней части ведет к существенному ограничению объема образующихся эклогитов.

Уплотнение служит причиной погружения коро-мантийного блока, образования трога Лебеда (рис. 1). Скорость движения эклогитизированных блоков (по Стоксу $V = 1,5\Delta\sigma g r^2/\eta$, где $\Delta\sigma$ — в данном случае — аномальная плотность, g — ускорение силы тяжести, r — полуразмер блока) оказывается весьма значительной. Часть блоков, скорее всего, не продвинется глубже астеносферы, разуплотнится под действием обратного полиморфного преобразования. Но оставшиеся (крупнее и быстрее перемещающиеся) даже на глубинах, где вязкость возрастает до 10^{20-21} Па · с, а плотностной контраст падает до $0,05-0,10$ $г/см^3$, за реальное время могут продвинуться до исчезновения плотностного контраста — на глубины около 250 км. Таким образом, наиболее перспективным в смысле сейсмичности в средней части мантии оказывается интервал 150—250 км. Учитывая расположение слоев частичного плавления в коре и мантии, наиболее подходящими для

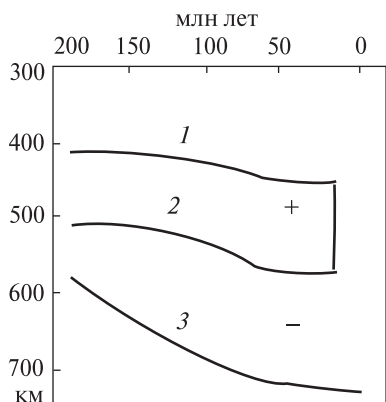


Рис. 5. Зоны изменения объемов пород под влиянием полиморфных переходов в рассматриваемом регионе. 1 — глубина начала перехода $OI_{\alpha} \leftrightarrow OI_{\beta}$, 2 — граница смены знака изменения температуры во времени, 3 — граница нулевых изменений температуры или поверхности глобальной астеносферы. + и — — зоны расширения и сжатия пород

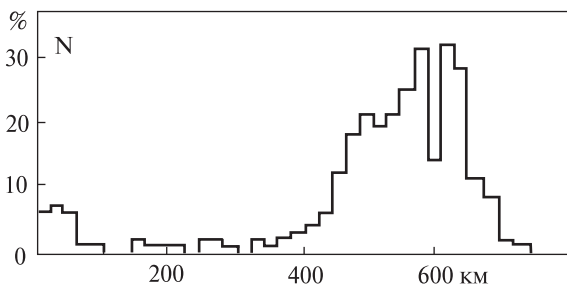


Рис. 6. Гистограмма распределения глубин гипоцентров землетрясений

размещения очагов следует признать интервалы глубин: менее 20 км, 25—55 км и 150—250 км.

Перерыв сейсмичности на глубинах 250—400 км не абсолютен. Есть основания считать, что эффекты смещений выше и ниже этого слоя создают небольшие вариации давлений, которые в каких-то его фрагментах могут оказаться критическими, сработать как спусковые механизмы. Нельзя исключать и влияния несколько повышенной теплогенерации мантийных пород геосинклинали по сравнению с ТГ докембрийской платформы на фоновую температуру и рост с глубиной концентрации гранатов. Оба фактора ведут к незначительному разуплотнению и, соответственно, большей глубине погружения эклогитов.

Глубже 400 км при молодой активизации возник мощный слой (420—460 км) пород, уплотненных за последние 20 млн лет примерно на $0,2 \text{ г/см}^3$. Нет определенных данных о времени, необходимом для преобразований оливина в нужном диапазоне PT условий (рис. 3 и 4, таблица). Но можно предположить, что указанный период достаточен при реальных размерах кристаллов лерцолита. Глубже плотностные аномалии много меньше, они связаны только с понижением температуры, но на глубинах более 500 км подключается второй этаж полиморфных преобразований. Блок толщиной порядка 100 км в какой-то момент после 20 млн лет назад может создать давление больше прочности пород и опускается со скоростью, зависящей от вязкости. При значении этого параметра $10^{22-23} \text{ Па} \cdot \text{с}$ подошва такого астенолита к настоящему времени могла бы достичь кровли глобальной астеносферы. Его движение вполне могло привести к землетрясениям на глубинах 500—700 км. Однако, фронт полиморфных преобразований в данном случае движется со скоростью, обусловленной кондуктивной теплопроводностью, процесс экзотермичен, флюиды, вызывающие ускорение реакций, отсутствуют. Скорее всего, изменение плотности и релаксация обусловленных ею напряжений достигают соизмеримых размеров.

Можно констатировать, что соответствие реальному распределению гипоцентров по глубине наблюдается.

Сами по себе изменения температуры в зоне полиморфных переходов в настоящее время незначительны и неспособны создать разрушающие термоупругие напряжения или уплотненные блоки, способные к перемещению. Последние могут быть связаны только с быстрым сокращением объема при полиморфном переходе. Не исключено, что приблизившиеся к этому процессу локальные фрагменты нижней толщи на рис. 5 быстро достигают необходимых параметров и становятся источниками своеобразных землетрясений [14, 26, 30 и др.] в момент перераспределения напряжений при смещении описанного выше уплотненного блока. Среда на глубинах 550—700 км как бы подготовлена длительным накоплением незначительных полиморфных уплотнений. Они дополнятся ростом давления со стороны аналогично разуплотняющегося вышележащего слоя. Т.е. значительных смещений блоков аномальной плотности не происходит. В момент сейсмического события имеет место «схлопывание» объема преобразуемых минералов. При обратной температурной волне аномалия объема сменит знак.

Сравним прогнозируемые глубины размещения очагов землетрясений с экспериментальными данными за 1962—2015 гг. (информация собрана в пределах прямоугольника, ограниченного $52 \div 56^\circ$ с.ш. и $152 \div 156^\circ$ в.д.) (рис. 6).

Конечно, для определенного заключения приведенных соображений недостаточно. Но они могут быть использованы при выборе направления дальнейших исследований. Возможно, удастся доказать, что появление афтершоков обусловлено именно предысторией последней активизации, а механизм землетрясений отличается от обычно принимаемого относительного смещения блоков.

Скоростная структура мантии и сейсмичность

Представляет интерес сравнение скоростной модели верхней мантии (и переходной зоны между верхней и нижней мантиями) с распределением гипоцентров. При этом важно выбрать модель, которая обеспечивала бы достоверное выделение скоростных аномалий. Это можно сделать путем сравнения друг с другом нескольких скоростных разрезов верхней мантии или ее части, построенных разными авторами в регионе. В работе [4] проведено сравнение разрезов, полученных как часть трехмерной томографической модели и построенных по схеме глубинного процесса в соответствии с АПГ. Среднее расхождение составило 0,12 км/с, что при равенстве ошибок каждого из методов указывает на погрешность около 0,08 км/с. При сравнении первого из указанных выше разрезов с приведенным в работе [9] среднее расхождение составляет 0,17 км/с. Соответственно ошибка разреза [9] — 0,15 км/с. Данные по региону использовались авторами при построении одномерных скоростных моделей для океанических котловин, окраинных желобов, островных дуг и задуговых бассейнов [26]. Результаты сопоставлены с расчетными по АПГ, погрешность оценена в 0,06 км/с. Вероятно, отчасти небольшая величина связана со сглаженным видом получаемых моделей, но и их аномальность при таком подходе сокращается (рис. 7). Поэтому для планируемого сопоставления с сейсмичностью отобран монтаж из разрезов для перечисленных структур. Их ширина соответствует району пересечения Камчатки профилем на рис. 1.

Интенсивность аномалий достигает 3 величин погрешности, сделанный выбор можно считать правильным, так как другие модели не обеспечивают досто-

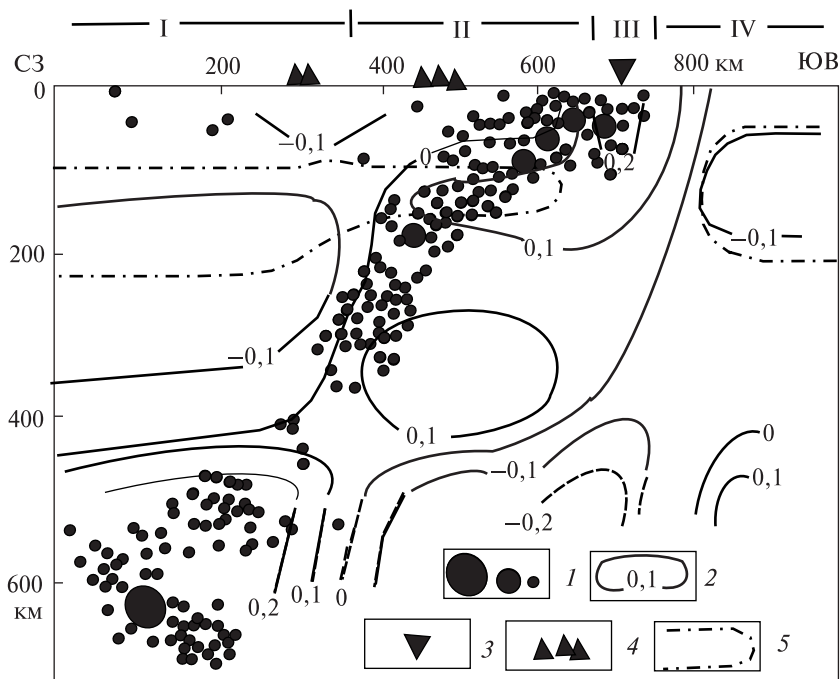


Рис. 7. Распределение аномальных скоростей (отклонений на каждой глубине от среднего значения) в верхней мантии переходной зоны под южной Камчаткой и прилегающими акваториями (см. рис. 1) по [27 и др.] и гипоцентров землетрясений. 1 — землетрясения различных энергетических классов, 2 — аномалии скорости продольных сейсмических волн в км/с, 3 — ось глубоководного желоба, 4 — вулканы Камчатки, 5 — область частичного плавления пород мантии. I — активизированная эпикиммерийская плита Охотского моря и Западной Камчатки, II — островная дуга (активизированная альпийская геосинклиналь) Восточной Камчатки, III — глубоководный желоб, IV — Северо-Западная плита Тихого океана. В нижней части скоростного разреза (штриховые изолинии) приведены расчетные по АПГ аномалии скорости, так как имеющиеся данные не позволяли продолжить построение разреза по использованной методике до глубин более 450–500 км

верного выделения скоростных возмущений. Выявленная наклонная положительная аномалия внешне соответствует представлениям ГТ. Но при детальном рассмотрении впечатление меняется.

1. Погружение океанической литосферной плиты должно начинаться по ГТ на внешнем краю желоба. Причиной считается охлаждение плиты на пути от СОХ к желобу. На самом деле плита активизирована, на ней распространен неоген-четвертичный вулканизм, глубина кровли астеносферы — около 50 км [4]. По расчетам [21] угол наклона внешнего края желоба превышает возможности упругого изгиба плиты, в точке начала погружения должны непрерывно обновляться разломы, сопровождаемые сейсмичностью. Однако землетрясения здесь отсутствуют. На других пересечениях фокальной зоны они есть, но в небольшом количестве. Они связаны с активизацией (в том числе — магматической) Северо-Западной плиты Тихого океана, прежде всего — краевого вала Зенкевича (Хоккайдо).

2. По ГТ землетрясения маркируют плиту. Но в таком случае она не погружается под желоб, а движется горизонтально под ним и внешней частью остров-

ной дуги на расстояние более 100 км. Только отсюда глубины гипоцентров начинают расти.

3. На рассматриваемом разрезе «пробел» сейсмичности при глубине фокальной зоны 250—400 км выражен менее ярко, чем в других пересечениях, но он все же заметен. При движении сплошной плиты его не должно быть.

4. Облако гипоцентров вокруг отвечающего интенсивному землетрясению 2013 г располагается перпендикулярно облаку вышележащих. При движении единой погружающейся плиты это невозможно.

5. Для скорости движения плиты 5—10 см/год на приведенное выше смещение необходимо примерно 36—72 года. Соответственно расход энергии под единицей поверхности 30—60 Вт/м², т.е. на 3 порядка больше теплового потока. Для типичного среднеглубинного землетрясения ($K = 13$) смещение — 2,1 м за 14—28 лет. Мощность источника энергии — около 15—30 Вт/м². Очевидно, что поиски такого объекта лишены смысла, ни один из реальных естественных процессов не создает источников энергии подобной мощности. Нагрев трением 1 млн лет составит 4—5 тыс. градусов (в зависимости от глубины, т.е. нормальной фоновой T).

Вывод очевиден: предлагаемая ГТ субдукция неосуществима.

Тепловой эффект в зоне уплотнения, по АПГ генерирующей глубинные землетрясения, не очень велик. Его можно приближенно оценить как эквивалентный увеличению теплового потока в течение 5 млн лет на 30 мВт/м².

Локализация глубоких землетрясений

Сравнительно полную информацию о приуроченности глубоких землетрясений к определенным этапам процесса океанизации можно собрать в Охотском море. Наиболее наглядна в этом смысле ситуация в Южно-Охотской впадине.

Мощность осадочного слоя кайнозойского возраста начинает быстро расти вблизи границы олигоцена и миоцена. Большую часть олигоцена он образуется только в локальных приразломных трогах. После второго магматического эпизода процесс идет с довольно стабильной скоростью около 20 млн. лет. Примерно 5 млн. лет назад (т.е. в самом начале плиоцена) он резко ускоряется и к настоящему времени глубина фундамента удваивается (рис. 8).

Проанализируем последствия эволюции тепловой модели впадины по АПГ. После поднятия первого астенолита от подошвы верхней мантии в интервал глубин 50—100 км под корой формируется слой частичного плавления. Происходят вторжения мантийных выплавов в кору, плавление пород амфиболитовой фации метаморфизма. Следует подъем магм среднего состава (возможности образования кислых существенно ограничены начальным составом коры — преимущественно базитовым) в среднюю и верхнюю часть коры. Идет эклогитизация основных пород нижней коры, погружение блоков, плотность которых превысила мантийную, под кору. В средней части коры происходит базификация, верхняя («гранитная») часть местами полностью уничтожается эрозией.

Рассмотрим последовательность событий (проявление результатов тепломассопереноса в наблюдаемых геологических явлениях).

1. Прежде всего возникает сводовое поднятие, вызванное перегревом верхних горизонтов мантии. При вычислении эффекта учитывается и адекватное охлажде-

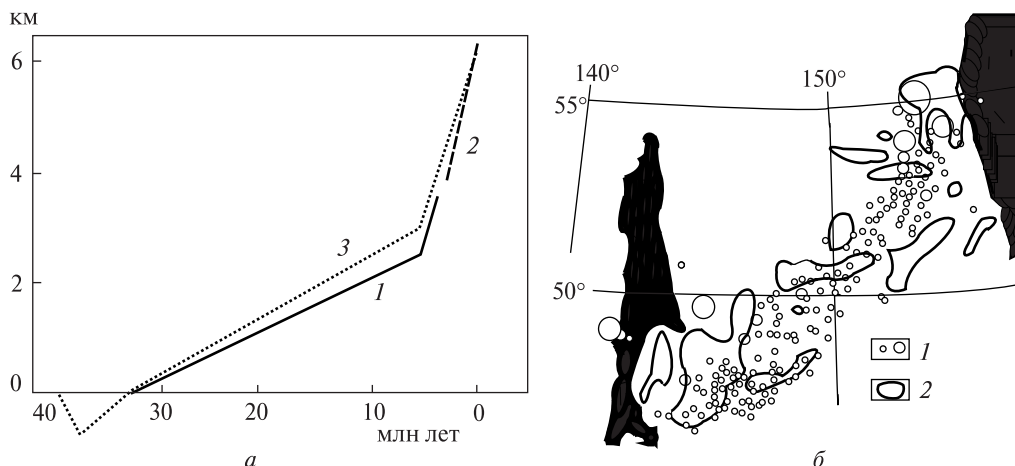


Рис. 8. Погружение докайнозойского фундамента Южно-Охотской впадины (А) и зона глубинной сейсмичности в Охотском море (Б). А: 1 — изменение мощности осадков по геологическим данным, 2 — некомпенсированное погружение дна впадины в плиоцен-четвертичное время, 3 — расчетное погружение дна. Б: 1 — эпицентры землетрясений на глубинах 400–700 км, 2 — районы с мощностью молодых осадков 3 ± 1 км и глубиной дна $1 \pm 0,3$ км

ние нижней ее части. Но коэффициенты теплового расширения в соответствующих интервалах глубин различаются примерно на $0,01 \text{ г/см}^3/100^\circ\text{C}$, поэтому происходит именно поднятие. Его амплитуда достигает $0,9$ км. Фактически она заметно меньше, так как поднятие распространяется на территорию, превышающую по площади активизированный район. Температура под корой изменяется быстрее, чем у подошвы верхней мантии, поднятие сокращается. Дополнительное действие эрозии приводит к пенеплюну за геологически короткое время.

2. К концу этапа уже начинает заметно сказываться процесс океанизации: базификации и эколгитизации коры. Точные значения темпов преобразований неизвестны, некоторое приближение можно получить из данных таблицы [10]. Можно допустить, что процесс осуществится за время в первые млн лет.

3. Ориентировочная начальная мощность коры впадины — 32 км, после утонения осталось 13 км (наблюдаемая мощность коры — 19 км минус кайнозойские осадки с прослоями вулканитов и вода). Начальная плотность преобразованных блоков коры, опустившихся в мантию, составляла $2,9\text{--}3,0 \text{ г/см}^3$ и увеличилась на $0,4\text{--}0,5 \text{ г/см}^3$. Соответствующее погружение — $2,8\text{--}2,9$ км. В оставшейся коре по крайней мере 9 км (судя по скоростному разрезу на профиле ГСЗ) изменили плотность примерно на $0,1 \text{ г/см}^3$ (базификация). Соответствующее погружение — $0,3$ км. Нельзя определить происходил ли перенос вещества нижней коры на периферию впадины: неизвестна начальная мощность коры ее окрестностей до перестройки. На разрезах ГСЗ отдельные утолщения намечены [19, 20 и др.], Но природа их может быть различной. Во всяком случае, утолщения под островными дугами скорее всего — результат предшествующего геосинклинального процесса.

4. Условия для полиморфного преобразования у подошвы верхней мантии достигнуты в слое мощностью около 40 км вскоре после первого акта тепломассопереноса (не менее 10 млн. лет назад, к этому времени закончился период сравнительно быстрого изменения возникшей здесь ранее интенсивной отрицательной

аномалии Т). Уплотнение породы составляет около 8 %. Соответствующее опускание поверхности — 3,2 км. Это позволяет завершить расчет погружения поверхности коры, отнеся рассматриваемый эффект к интервалу времени 5—0 млн лет назад. Результат полностью совпадает с известным по независимым данным (см. рис. 8). Темп преобразования мантийного оливина в минерал со структурой шпинели в условиях подошвы верхней мантии неизвестен. Существует мнение, что «Экспериментальные данные по диффузии и модельные расчеты свидетельствуют, что частичная гомогенизация, элементная и изотопная, будет достигнута (при Т более 1500—1600 °С — авт.) в течение первых десятков тысяч лет» [24, с. 34].

Рассмотренный процесс океанизации на большом удалении от источников осадков приведет к образованию типичной плиты западной части Тихого океана: глубина около 5,5 км, осадочно-вулканогенный слой — 0,5 км, глубина раздела М — 13 км.

Соответствие расчетного и экспериментального погружения фундамента под Южно-Охотской впадиной полное (см. рис. 8). Полиморфное преобразование пород завершено, источник сейсмичности отсутствует. Его уже нет и севернее 55° с.ш. под прогибами ТИНРО и Шелиховский: здесь мощность молодых осадков составляет около 6—7 км, т.е. некомпенсированная в Южно-Охотской впадине часть прогиба уже засыпана. Отсутствует источник и в районах моря, где мощность молодых осадков значительно меньше 3 км. Здесь еще не завершился этап, предшествующий быстрому некомпенсированному опусканию. Наиболее подходящим для глубинной сейсмичности представляется полоса, где (пусть не повсеместно) уже сформирован осадочный слой мощностью около 3 км, а некомпенсированное опускание только началось, глубина моря — около 1 км [19] — см. рис. 8.

Отметим, что в концепции ГТ происхождение задуговых впадин связывается вообще не с движением плиты, а неким явлением «рассеянного спрединга», происходящего, вероятно, над плитой. О количественном объяснении величины и скорости погружения нет и речи.

Заключение

Проведенный анализ глубинных процессов в тектоносфере полосы глубоких землетрясений и соседних акваторий Охотского моря позволил установить их приуроченность к типу эндогенного режима (океанизации), аномалиям скорости распространения сейсмических волн в верхней мантии, на количественном уровне объяснить скорость и конечную амплитуду опускания фундамента, глубину магматических очагов. Ранее было показано, что предложенный вид глубинного процесса дает возможность с достаточной точностью без подбора параметров моделей объяснить величину теплового потока, мантийной гравитационной аномалии, суммарной продольной проводимости в регионе [6 и др.].

Перечисленные результаты, подтверждающие достоверность принятой схемы процесса, указывают на источник изучаемых землетрясений — полиморфное преобразование вещества мантии в переходной зоне от ее верхней части к нижней и определить район вероятного распространения этих явлений. Можно предположить, что в большей части указанных выше районов распространения глубинной сейсмичности вызывающий ее процесс сходен с описанным, исключения — Ханкайский массив и Альтиплано [8]. Это утверждение следует рассматривать как

предварительное вплоть до получения результатов детального анализа конкретной информации в этих районах.

Показана непригодность представлений глобальной тектоники для объяснения сейсмичности в районе фокальной области переходной зоны между континентом и океаном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К. Механизм землетрясений. Верхняя мантия. М.: Мир, 1975. С. 199—213.
2. Газизова С.А. К сравнительному анализу прогибов, обрамляющих Восточно-Европейскую платформу. Предобруджский краевой прогиб. *Геол. сб. ИГ Уфимского научного центра РАН*. 2009. № 8. С. 88—93.
3. Говоров Г.И. Фанерозойские магматические пояса и формирование структуры Охотоморского геоблока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 203 с.
4. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2006. № 2. С. 107—121.
5. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. О природе среднеглубинной сейсмичности в переходных зонах Тихоокеанского типа. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2009. № 1. С. 38—45.
6. Гордиенко В.В. Тепловые процессы, геодинамика, месторождения. 2017. 284 с. URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-teplovye-processy.pdf>.
7. Гордиенко В.В. Глубинные процессы и сейсмичность. *Геофиз. журнал*. 2014. № 1. С. 19—42.
8. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. О природе глубокой сейсмичности в переходных зонах от континентов к океанам. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2008. № 3. С. 56—64.
9. Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами. *Геология и геофизика*. 2010. № 9. С. 1188—1203.
10. Королюк В.Н., Лепегин Г.Г., Корсаков А.В. Оценка термической истории метаморфических пород по обменно-диффузной зональности в минералах. *Геология и геофизика*. 2004. № 4. С. 501—512.
11. Короновский В.Н. Краткий курс региональной геологии СССР. Москва: Изд-во МГУ, 1976. 398 с.
12. Красный М.Л. Геофизические поля и глубинное строение Охото-Курильского региона. Владивосток: Из-во ДВО РАН, 1990. 162 с.
13. Крылов С.В., Дучков А.Д. Глубинное деформационно-прочностное районирование земной коры. *Геология и геофизика*. 1996. № 9. С. 56—65.
14. Кусков О.Л. Топология фазовых диаграмм минеральных систем и глубокофокусные землетрясения. *Геохимия*. 1987. №8. С. 1093—1107.
15. Ломтев В.Л. Строение северного фланга Курило-Камчатского желоба. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2018. № 2. С. 15—29.
16. Петрофизика. Ред. Н.Б. Дортман. Москва: Недра, 1992. Т. 1. 392 с.
17. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции. *Тихоокеанская геология*. 2017. № 1. С. 24—28.
18. Тектоника Украины. Ред. Круглов С.С., Цыпко А.К. Москва: Недра, 1988. 254 с.
19. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. Ред. К.Ф. Сергеев. Москва: Наука, 2006. 131 с.
20. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. Ред. К.Ф. Сергеев, В.В. Гордиенко, М.Л. Красный. Владивосток, 1992. 238 с.
21. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Москва: Мир, 1985. 730 с.
22. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. Москва: Недра, 1989. 260 с.
23. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В. Глубокое охотоморское землетрясе-

- ние 24.95.2013 г. с магнитудой 8,3 — сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2013. Вып. 21. № 1. С. 17—25.
24. Шулятин О.Г., Андреев А.И., Беляцкий Б.В. Возраст и этапность формирования магматических пород Срединно-Атлантического хребта по геологическим и радиологическим данным. *Региональная геология и металлогения*. 2012. 50. С. 28—36.
 25. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии. Санкт-Петербург: ВВМ, 2006. 288 с.
 26. Burnley P. «Anticraks» in mantle create deep earthquakes. *New Sciens*. 1989. 1689. P. 33.
 27. Gordienko L., Gordienko V. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NSGT Journal*. 2016. № 3. P. 389—405.
 28. Gordienko V.V., Logvinov I.M. On global asthenosphere. *Physics of the Earth*. 2011. № 2. P. 35—42.
 29. Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 1977. 82. P. 2876—2881.
 30. Schubnel A., Brunet F., Hilairet N., Gas J., Wang Y., Green H. Deep-Focus Earthquake Analogs Recorded at High Pressure and Temperature in the Laboratory. *Science*. 2013. V. 341. P. 1377—1380.

Статья поступила 12.11.2018.

В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко

РУХ ПЛИТ ТА ЗЕМЛЕТРУСИ

Проаналізовано розподіл швидкості сейсмічних хвиль, температур та осередків землетрусів у верхній мантії та перехідній зоні до нижньої мантії. Побудована схема глибинного процесу в тектоносфері регіону, де передбачено занурення плит, у відповідності з адвекційно-поліморфною гіпотезою. Сформульовані припущення про природу глибинної сейсмічності, які узгоджуються з геологічними даними. Показана енергетична нереальність створення фокальної зони рухом плит, що занурюються.

Ключові слова: осередок землетрусу, швидкісні та теплові моделі мантії, глибинні процеси.

V.V. Gordienko, L.Ja. Gordienko

PLATES MOVEMENTS AND EARTHQUAKES

The distribution of seismic velocities, temperature and earthquake foci in the upper mantle and transition zone to the lower mantle analyzed. A scheme of the deep-seated process in the tectonosphere of the region of the proposed immersion of the plates in accordance with the advection-polymorphic hypothesis is constructed. Formulates assumptions about the nature of deep seismicity, consistent with geological data. The energy unreality of the creation of the focal zone by the motion of a subducted plate is shown.

Keywords: earthquake source, velocity and thermal model of the mantle, deep processes.