

УДК 550.34

## О ВОЗМОЖНОЙ ПРИРОДЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ НА ГЛУБИНЕ 70 КМ

© 2007 г. Член-корреспондент РАН Б. В. Левин, М. В. Родкин, Е. В. Сасорова

Поступило 24.10.2006 г.

Классические труды по сейсмологии и физике Земли выделяют на глубине 70 км границу, разделяющую мелкофокусные (неглубокие) и промежуточные землетрясения, занимающие область глубин от 70 до 300 км. Следует отметить, что на неглубокие (<70 км) землетрясения приходится примерно 85% от всего количества регистрируемых событий. Природа этой границы до сих пор остается дискуссионной [1]. Согласно представлениям геологов [1, 2] глубина проникновения разломов в литосфере может достигать 100 км. До таких же глубин прослеживается область блоковой делимости на континентах. Верхняя граница астеносферы (ослабленного и подплавленного слоя пород) отмечается под океанами на глубинах порядка 60 км. Недавние сейсмические исследования на Урале, в Восточной Европе и в Северном море выявили существование в континентальной верхней мантии протяженных сейсмических границ на глубинах 65–80 км [1]. Сейсмотомографические карты, представленные японскими геофизиками, выделяют характерные уровни на глубинах 80–150 км [2].

В настоящей работе предпринята попытка представить обоснование выделенной сейсмической границы раздела землетрясений по глубине, используя новые результаты статистического анализа современных мировых каталогов и физические представления о роли свободной воды в сейсмическом процессе.

Для статистического анализа были использованы данные из мирового каталога ISC [3] (с 1964 по 2004 г.) и каталога NEIC [4] (с 1973 по 2005 г.). Для анализа пространственных и временных регулярностей в распределении землетрясений вся совокупность исследуемых событий была разде-

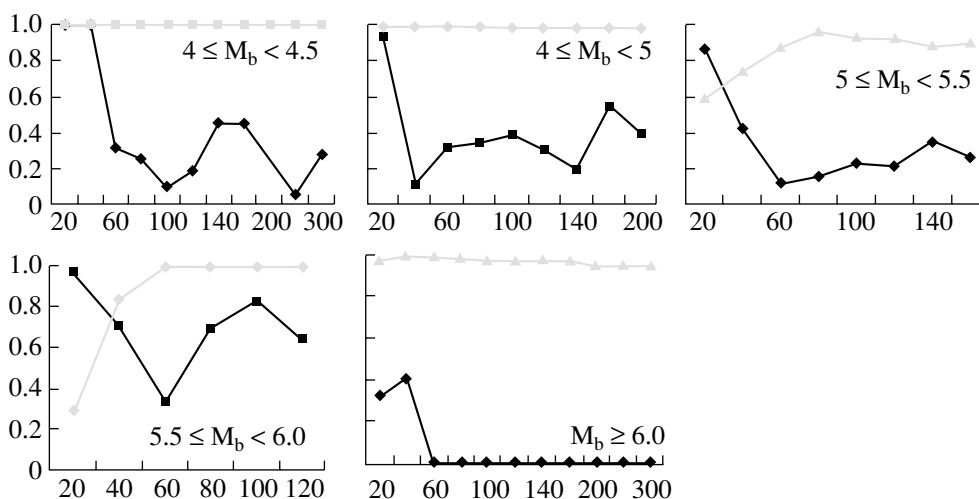
лена на несколько подгрупп по энергетическим уровням (магнитудным диапазонам – МД):  $4 \leq M_b < 4.5$ ,  $4.5 \leq M_b < 5$ ,  $5 \leq M_b < 5.5$ ,  $5.5 \leq M_b < 6.0$ ,  $6 \leq M_b < 6.5$ ,  $6.5 \geq M_b$ ). Афтершоки удалены из списка событий.

Для многих геофизических процессов, происходящих на Земле, плоскость экватора является естественной плоскостью симметрии. Недавно в работе [5] было показано, что в распределении землетрясений во времени между северной и южной частями Тихоокеанского региона присутствует как случайная, так и статистически значимая (согласно непараметрическому критерию серий) неслучайная компонента. Это справедливо для большинства магнитудных диапазонов. Проявление неслучайной компоненты (с периодами от одного до нескольких лет) при распределении землетрясений в таком огромном регионе, которым является Тихоокеанский регион, может быть вызвано внешними периодическими возмущениями, которые действуют на всю литосферу Земли. Наличие неслучайной компоненты подкрепляется в работе вычислительными экспериментами с цифровой моделью составного процесса, состоящего из суперпозиции случайных процессов и периодического.

Показано также, что статистически значимая неслучайная компонента, вызванная периодическими возмущениями, проявляется только для неглубоких землетрясений ( $H \leq H_{por}$ ), а глубокие землетрясения ( $H > H_{por}$ ) распределяются во времени между северной и южной частями Тихоокеанского региона случайно без статистически значимых периодических компонент. Значение  $H_{por}$  расположено в интервале глубин 60–80 км.

Анализ внутригодового распределения землетрясений, выполненный на том же материале [6], показал, что неглубокие события (с глубиной гипоцентра менее  $H_{por}$ ) располагаются на дискретной временной шкале неравномерно в течение года и отмеченная неравномерность статистически значима. В данной работе анализ выполнен для 31 Тихоокеанского субрегиона, по пяти МД для каждого субрегиона, для трех диапазонов глубин (все-го исследовалось около 80000 событий). Оценки вероятности  $P$  принадлежности статистической

Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск  
Геофизический Центр  
Российской Академии наук, Москва  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва



**Рис. 1.** Графики зависимости вероятностей  $P_{Dp}$  и  $P_{Sh}$  от порогового значения глубины для пяти магнитудных диапазонов: черные линии для глубоких событий ( $P_{Dp}$ ) и серые линии – для для неглубоких событий ( $P_{Sh}$ ). По оси абсцисс на всех фрагментах – пороговое значение глубины  $H_{por}$ , по оси ординат – значение вероятности того, что данная последовательность событий не подчиняется равномерному закону распределения. Кривые посчитаны по месячной дискретной шкале для Камчатского субрегиона.

выборки к неравномерному распределению лежали в пределах от 0.95 до 0.999 (причем для 75% выборок  $P \geq 0.99$ ). Для оценки значимости  $P$  использовался критерий Пирсона для хорошо заполненных выборок (не менее 10 событий в каждом дискретном интервале) и метод Монте-Карло для слабозаполненных выборок.

В результате установлено, что очаги неглубоких землетрясений реагируют на дополнительное периодическое воздействие, в то время как глубокие землетрясения внутри года распределены равномерно и внешние периодические воздействия не оказывают влияния на эти события. Распределения глубоких землетрясений рассматривали только для регионов с представительными выборками.

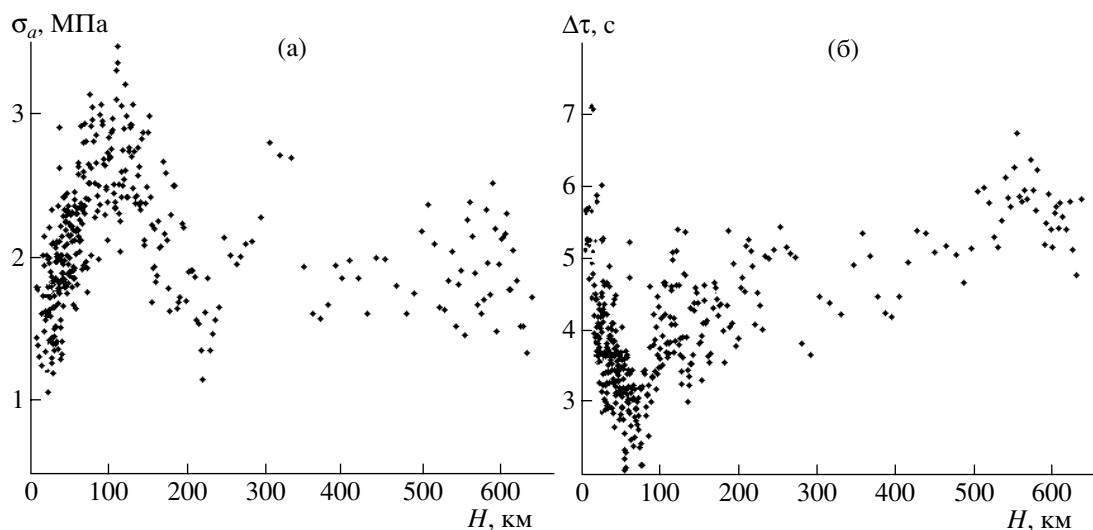
Далее для определения значения  $H_{por}$  по методике, разработанной в работе [6], была выполнена процедура последовательного перебора значений порога по глубине. Использовался список значений:  $H_{por} = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200, 250, 300$  км. Была повторена процедура тестирования выборок для каждого значения порога с целью определения границы, на которой происходит разделение событий на два подмножества: события, зависящие от внешних периодических факторов, и события, которые от этих факторов не зависят и распределены равномерно в течение года. Эта граница будет проходить там, где величина  $P_{Sh}$  (вероятность того, что события в данной выборке распределены неравномерно для неглубоких событий) принимает максимальные значения, а величина  $P_{Dp}$  (соответствующая вероятность для глубоких событий) – минимальное. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты такого

тестирования для Камчатки. Анализ вычислений, сделанных для всех субрегионов, показывает, что такая граница существует и она расположена в интервале 60–100 км (для большинства регионов – на глубине 70 км).

В этом же интервале глубин наблюдается резкое изменение характера поведения с глубиной таких параметров очагового процесса, как средняя величина кажущихся напряжений  $\sigma_a$ , продолжительность очагового процесса  $\Delta t$  и полу-протяженность очаговой области по высоте  $\Delta H$ . Зависимости  $\Delta t$  и  $\Delta H$  от глубины определялись по средней разнице момента и глубины землетрясения по данным о первых вступлениях и по решению сейсмического момента [7]. В качестве примеров на рис 2 представлены зависимости средних значений параметров  $\Delta t$  и  $\Delta H$  от глубины. На обоих графиках наиболее резкие изменения наблюдаются в интервале глубин 70–100 км.

В последние годы все большее распространение получают представления о важной (возможно даже определяющей) роли водного флюида в процессе сейсмичности [1, 7, 8 и др.]. В рамках таких представлений попытаемся связать отмеченную выше границу в характере сейсмического режима с изменениями флюидного режима недр. Для этого рассмотрим физический механизм перехода воды из связанного состояния в свободное [9].

Как известно, химические связи оксидов в большинстве элементов вызывают изменения их объемов по отношению к исходному объему атомов в пределах от 10 до 50%. Отсюда степень относительного сжатия воды, находящейся в связанном состоянии внутри минералов, составляет



**Рис. 2.** Зависимость средних значений очаговых параметров землетрясений от глубины (точки): а – величины кажущихся напряжений  $\sigma_a$ ; б – значения полу-продолжительности очагового процесса  $\Delta\tau$ . Данные отсортированы в порядке увеличения глубины землетрясения, приведены средние значения для последовательных групп землетрясений, состоящих из 51 события, по [7].

порядка  $\sigma = \frac{\rho}{\rho_0} = 1.1-1.5$  (в среднем около 1.2–1.3).

С другой стороны, анализ уравнения состояния воды [10] позволяет определить характерный уровень глубин, на которых относительное изменение сжатия молекул воды возрастает до 1.2–1.3. Воспользуемся уравнением состояния воды в форме уравнения Тэта, которое представим в виде

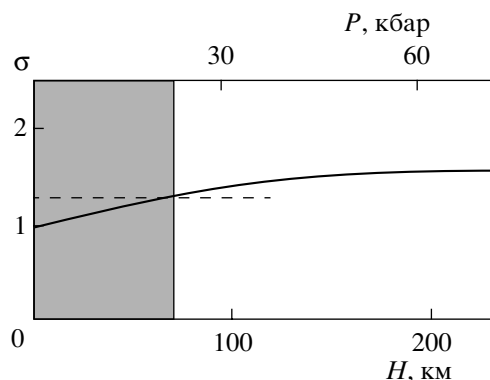
$$P = V \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]; \quad (1)$$

здесь  $V$  является функцией энтропии,  $\rho$  и  $\rho_0$  – текущая и стандартная плотность воды. Согласно экспериментальным данным Бриджмена при температурах до 1000°C и давлениях до 50 кбар можно принять  $V = 3 \cdot 10^8$  Па и  $n \approx 7.15$ .

Тогда зависимость степени относительного сжатия воды от глубины можно представить графиком (рис. 3). Согласно (1) получаем, что примерно на глубине 70 км степень относительного сжатия воды увеличивается до 1.3 и оказывается равной средней величине ее сжатия в составе кристаллической решетки. Глубина такой границы, естественно, будет зависеть от температуры и минералогического и химического состава горной породы и отдельных ее компонентов. Выше этой “границы 70 км” будет наблюдаться тенденция существования воды в свободной фазе, ниже вода будет преимущественно внедряться в состав кристаллитов горной породы.

Реакция породы, содержащей свободную воду, на периодические, даже весьма слабые приливные воздействия, должна кардинально отличаться от

реакции породы, в которой вода отсутствует. Водонасыщенные породы земной коры являются средой с нелинейным откликом на периодические воздействия. Изменения давления и соответствующие изменения плотности среды приводят к образованию системы трещин, заполняемых свободной водой, к развитию поврежденностей, накоплению дефектов и подготовке магистрального разрушения в пределах очага готовящегося землетрясения. В породах, где свободная вода отсутствует, слабые эффекты приливных воздействий не накапливаются и нелинейный механизм аккумуляции деформаций не реализуется.



**Рис. 3.** График изменения степени относительного сжатия воды  $\sigma = \frac{\rho}{\rho_0}$  с глубиной  $H$ . На верхней оси показано изменение давления с глубиной. Заштрихована область существования свободной воды ( $H < 70$  км).

Таким образом, сейсмическая граница на глубинах 60–80 км, разграничивающая разные типы землетрясений, одновременно является границей раздела событий, способных реагировать на внешние воздействия и не способных на такую реакцию. При этом выделенную границу, по-видимому, следует также рассматривать как возможного кандидата на пограничную поверхность, представляющую собой нижнюю границу гидросферы. Дальнейшие исследования, главным образом, в области физического и геохимического эксперимента смогут уточнить представленные соображения.

Авторы выражают признательность В.В. Адушкину, Ю.М. Пуцаровскому, Д.Ю. Пуцаровскому, Ю.И. Зецеру за полезные обсуждения и ценные советы.

Работа выполнялась при частичной поддержке грантами РФФИ 04-05-64274, 06-05-96026 и 06-05-64334 и Программы поддержки ведущих научных школ России НШ-8043.2006.5 и НШ-5009.2006.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Науч. мир, 2004. 610 с.
2. Пуцаровский Ю.М. В сб.: Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научн. мир, 2001. С. 1–15.
3. <ftp://seismo.gvon.co.uk/pub/ffb/bulletin>
4. <http://neic.usgs.gov/neis/epic/>
5. Sasorova E.V., Levin B.W., Emelyanova O.N. Earthquake Prediction. Brill. Leiden-Boston. 2006. P. 1–8.
6. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А. // ДАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 534–540.
7. Родкин М.В. // Физика Земли. 2004. № 10. С. 42–53.
8. Role of Water in Earthquake Generation // Bull. Earth. Res. Inst. Spec. Iss. 2001. V. 76. № 3–4.
9. Адушкин В.В., Родионов В.Н. // Физика Земли. 2005. № 2. С. 88–91.
10. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 824 с.