

УДК 550.3

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЗЕМЛЕ И НА ЛУНЕ

© 2010 г. Член-корреспондент РАН Б. В. Левин, Е. В. Сасорова

Поступило 11.05.2010 г.

В работе сопоставлены характерные особенности распределения сейсмических событий по широтам и глубинам для Земли и Луны. Показано, что землетрясения и лунотрясения распределены по широтным поясам подобным образом.

Проблема распределения эпицентров землетрясений по широтным поясам Земли ставилась еще в 60-х годах прошлого столетия. Сначала исследовались распределения только сильных землетрясений с магнитудой $M > 7$. В ранних работах [5, 8] отмечалась неравномерность распределения событий по широтам. Существенный прогресс был получен в работе [9]. На материале обработки китайского каталога сильных землетрясений 1897–1980 гг. (1165 событий) было отмечено, что энергия, высвобожденная от сейсмических событий, практически равна нулю для высоких широт, а два основных пика сейсмической активности располагаются в районе средних широт и разделены зоной пониженной активности вблизи экватора.

В работах авторов настоящего сообщения содержатся результаты анализа широтных и глубинных распределений землетрясений [2, 3], однако сопоставительный анализ распределений землетрясений и лунотрясений с учетом зависимости от широты, глубины и энергии событий до сих пор не проводился. Цель настоящей работы — представить результаты такого анализа и прокомментировать возможную связь сейсмического процесса с экзогенными воздействиями на оба небесных тела.

Анализ широкого спектра сейсмических событий был выполнен на материале обработки каталога ISC [6] (свыше 200 000 событий с $M \geq 4$) на основе подходов, развитых в работе [2]. Установлено, что сейсмическая активность планеты практически отсутствует на полюсах и полярных шапках Земли, обнаруживает ярко выраженные максимумы в средних широтах северного и юж-

ного полушарий и устойчивый локальный минимум вблизи экватора. Такие распределения по широтным поясам Земли характерны и для количества сейсмических событий, и для энергии, выделившейся в результате землетрясений. Так как большинство землетрясений приурочено к границам литосферных плит, то в работе использовалось нормирование количества землетрясений и выделенной энергии на длину границ литосферных плит в каждом широтном поясе. Такое нормирование дает нам мощность данного участка границы плиты (среднее число землетрясений, генерируемое на каждые 100 км плитовой границы). Использование этой характеристики, имеющей ясный физический смысл, позволяет сравнивать сейсмическую активность широтных поясов в различных частях земного шара. Вся совокупность исследуемых событий была разделена на несколько подгрупп по значениям магнитудных диапазонов (МД): $4.0 \leq M_b < 4.5$; $4.5 \leq M_b < 5.0$; $5.0 \leq M_b < 5.5$; $5.5 \leq M_b < 6.0$; $6.0 \leq M_b$.

Глобальные закономерности распределения сейсмических событий по глубине для различных широтных поясов Земли и разных энергетических уровней были представлены в работе [3]. Для каждого широтного пояса рассматривались распределения количества событий по глубине и распределения выделенной энергии по глубине для всех МД. Показано, что для высоких широт очаги практически всех землетрясений (до 90%) сосредоточены на глубинах $H \leq 20$ км. По мере продвижения к средним широтам постепенно увеличивается доля событий, для которых $20 < H \leq 60$ км. Для широтных поясов, близких к экватору ($30^\circ\text{S}–30^\circ\text{N}$), существенная доля очагов землетрясений расположена уже на глубинах $100 < H \leq 240$ км и $H \geq 500$ км. Для распределений выделенной энергии по глубине обнаружено, что существует тенденция к разделению событий на три отдельные группы (кластеры) с достаточно четко выраженными границами. Первый кластер К1 объединяет события с глубиной от 0 до 80 км, второй кластер К2 — от 120 до 240 км, а третий К3 выделяется на глубинах от 500 до 700 км. На высоких широтах присутствуют только события из кластера К1.

*Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск
Институт океанологии им. П.П. Шишова
Российской Академии наук, Москва*

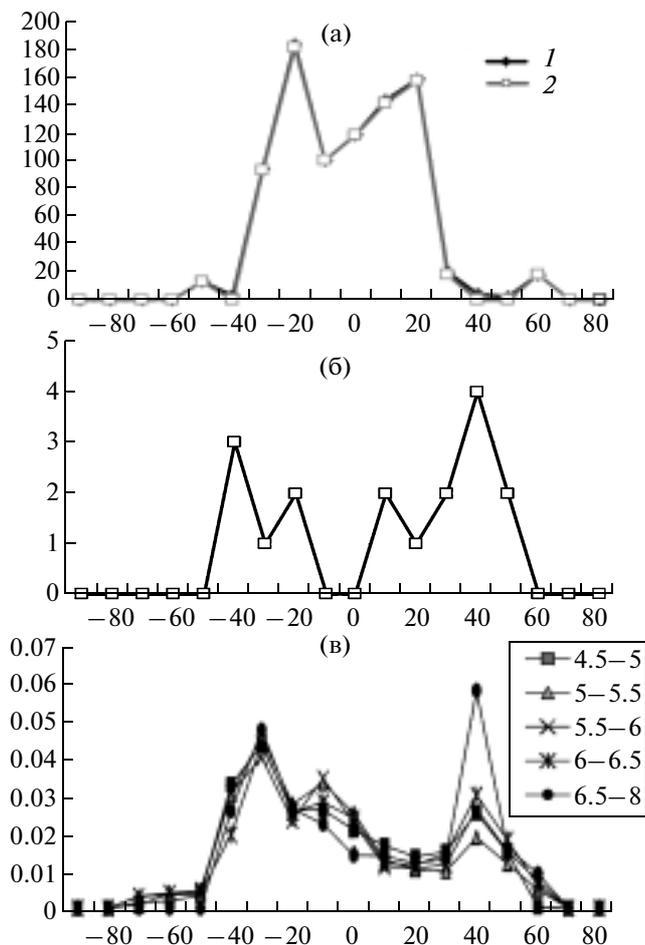


Рис. 1. Широтные распределения сейсмических событий для Луны (а, б) и Земли (в). а: 1 – по всем событиям, 2 – по глубоким событиям; б: для неглубоких событий Луны; в: для пяти различных магнитудных диапазонов событий на Земле. Горизонтальные оси на всех фрагментах – широты (отрицательные широты для южного полушария). Вертикальные оси: для а и б – количество сейсмических событий, для в – дважды нормированное количество сейсмических событий.

Анализ сейсмичности на Луне базировался на наблюдениях, связанных с постановкой сейсмических станций в рамках проекта “Аполлон” (1971–1974 гг.). В работе [7] систематизированы полученные наблюдательные данные, составлена таблица зарегистрированных лунотрясений и проанализированы временные периодичности сейсмических событий для Луны. Сейсмические события на Луне подразделялись на глубокие ($800 \leq H < 1100$ км) и неглубокие события ($100 \leq H < 300$ км).

Нами были обработаны данные по лунотрясениям, взятые из работы [7] и получены широтные распределения лунотрясений (рис. 1а, 1б). Размер широтного пояса для этих распределений был выбран таким же, как и для Земли (10°). Рассматривались широтные распределения для всех луно-

трясений (861 событие, черная кривая) и для глубоких событий (844 события с $800 \leq H < 1100$ км, серая кривая на рис. 1а). Так как количество зарегистрированных неглубоких событий было существенно меньше, чем глубоких, то эти две кривые практически совпадают. На рис. 1б приведено широтное распределение для неглубоких событий (17 событий с $100 \leq H < 300$ км).

Таким образом, сейсмическая активность на Луне, практически отсутствует на высоких широтах, обнаруживает ярко выраженные максимумы в средних широтах обоих полушарий и устойчивый локальный минимум вблизи лунного экватора. Такая форма распределения характерна как для глубоких, так и для неглубоких событий. Различие состоит в том, что для неглубоких событий наиболее выраженные максимумы распределений формируются на широтах 30° – 40° в обоих полушариях, тогда как для глубоких событий они расположены в широтных поясах 10° – 30° .

На рисунке 1в приведены широтные распределения дважды нормированного количества сейсмических событий на Земле (на суммарное количество событий рассматриваемого магнитудного диапазона и на длину границ литосферных плит в данном широтном поясе). Приведено пять распределений для пяти МД без дифференциации событий по глубине. Широтные распределения событий для Земли ассиметричны и локальный минимум в районе экватора сдвинут в сторону северного полушария.

Несмотря на некоторые различия глобальный характер широтных распределений остается идентичным для обоих небесных тел. Был проведен анализ на устойчивость полученных распределений для Земли во времени и в пространстве. Для этого все вычисления для событий во всех МД были продублированы для широтных поясов величиной 5° и 2° и для четырех 10-летних интервалов. Все отмеченные характерные особенности распределений при этом сохранялись.

Для анализа двумерных распределений землетрясений (по широтам и глубинам) рассматривалось дважды нормированное количество событий (по длине границ литосферных плит в каждом широтном поясе и по временному интервалу 10 лет). Для построения распределений использовались: неравномерная шкала глубин (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900) и размер широтного пояса – 10° .

На рисунке 2 приведены двумерные распределения для трех МД: $4 \leq M < 5$, $5 \leq M < 6$ и $M \leq 6$. На всех трех фрагментах рисунка просматривается ярко выраженная пространственная кластеризация событий (как по широтам, так и по глубинам). Выделяются очаги сгущения событий на широтах 30° – 40° S и 40° – 50° N и на глубинах: 0–60, 100–250 и 500–700 км. Отмечается резкое

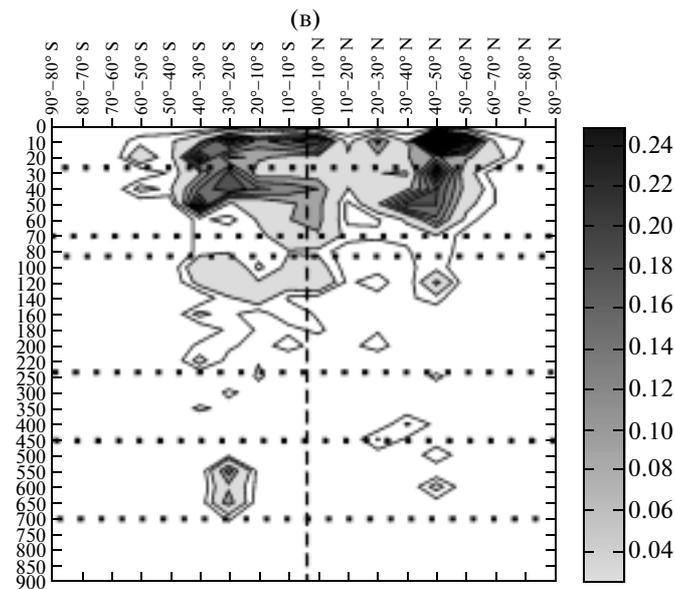
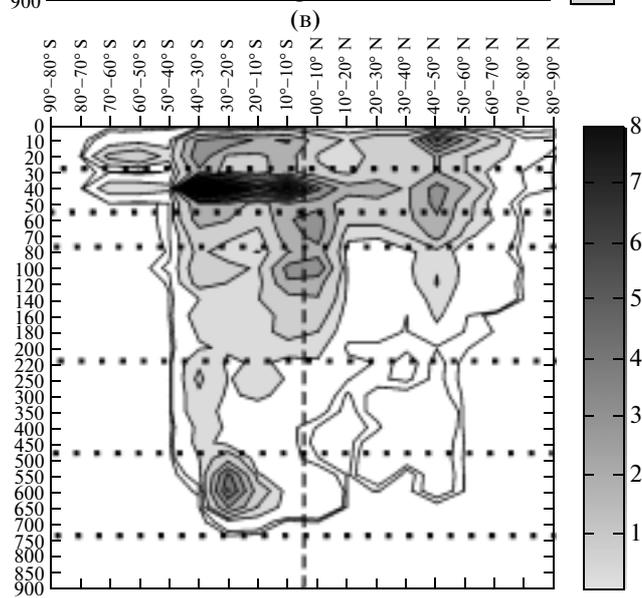
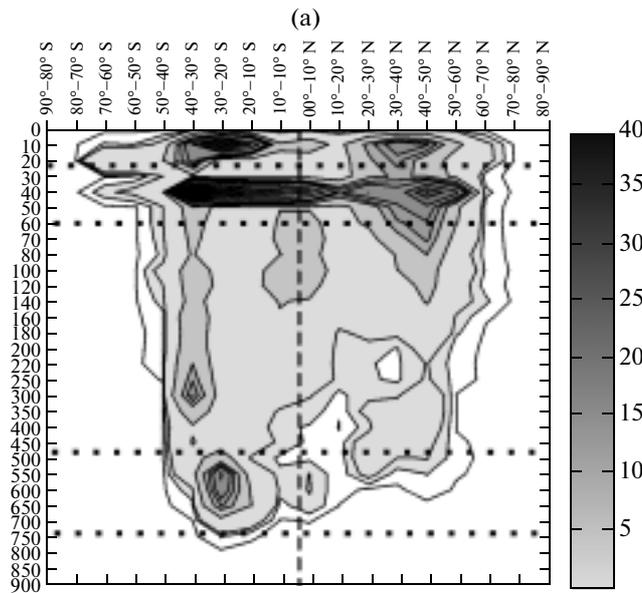


Рис. 2. Двумерные распределения нормированного количества сейсмических событий на Земле; вертикальные оси – глубина в км, горизонтальные – широтные пояса. Магнитудные диапазоны: $4.0 \leq M < 5.0$ (а); $5.0 \leq M < 6.0$ (б); $M \leq 6.0$ (в). Полутоновая шкала для нормированного количества событий – справа от каждого фрагмента

уменьшение количества событий около экватора (10° – 20° N) и практически полное отсутствие на высоких широтах. Наиболее ярко выраженные сгущения сохраняются на всех фрагментах рис. 2. Кластеры с максимальным количеством событий для глубоких землетрясений ($500 \leq H < 750$ км) расположены ближе к экватору, чем кластеры с коровыми землетрясениями. Аналогичная картина наблюдается и для лунной сейсмичности.

В работе [4] была отмечена ярко выраженная кластеризация лунотрясений по двум глубинным уровням 100–300 и 800–1200 км. Было показано также, что значения давления на глубинах $800 \leq H < 1200$ км для Луны соответствуют значениям давления во внутренних слоях Земли на глубинах 120–240 км (кластер K2 по классификации в работе [3]).

Глубинные кластеры сейсмических событий на Луне обособлены и не пересекаются в пространстве. Примерно подобную картину мы можем наблюдать для кластеризации землетрясений, но на Земле выделяются три группы кластеров. Глубокие события на Луне соответствуют промежуточным землетрясениям, а глубокие землетрясения не имеют аналогов в лунной сейсмичности. Таким образом, несмотря на некоторые различия глобальный характер широтных распределений по глубинам также подобен для обоих небесных тел (различие в количестве кластеров по глубине).

Анализ результатов широтных распределений количества сейсмических событий на Земле и на Луне показал практически полную идентичность формы обоих распределений. Такое сходство распределений сейсмической активности для очень разных небесных тел может свидетельствовать только о фундаментальной связи сейсмического процесса с некоторыми физическими явлениями, которые проявляются одинаковым образом и для Земли, и для Луны. Как известно (см., например, [1]), Земля и Луна обращаются вокруг общего центра масс (барицентра), который движется вокруг Солнца в плоскости эклиптики. При незначительных вариациях угла наклона плоскости орбиты Земля–Луна ($\pm 5^\circ$) оба небесных тела испытывают притяжение Солнца практически в плоскости эклиптики.

Таким образом, длиннопериодные приливные воздействия со стороны Солнца оказывают влияние и на Землю, и на Луну. А согласно современным воззрениям, именно такие компоненты приливных сил эффективно влияют на сейсмические процессы [1, 9].

В настоящее время ясно, что механизм влияния приливных сил на литосферу Земли достаточно сложен, что не существует прямой реакции приливных воздействий на процесс генерации сейсмических событий. Но долговременное многократное суммарное воздействие приливных сил с различными периодами может давать очень существенные нелинейные эффекты. Длиннопериодные приливы вызывают медленные знакопеременные деформации в породах, способствуют перемещению флюидов из глубины к поверхности, содействуют развитию микротрещин в породах под влиянием эффекта Ребиндера и приводят к накоплению поврежденностей и созданию условий для генерации сейсмического разрыва.

Локализация очагов сейсмической активности на определенных глубинах также может свидетельствовать о сходстве механизмов подготовки сейсмических событий. Упругие свойства и уравнения состояния пород, определенные P – T -условия в зонах кластеризации событий, а также рост вариаций плотности свободной энергии от приливных сил с ростом глубины могут создавать сходные условия для реализации сейсмического процесса.

Распространенное представление о преобладающем влиянии энергии геотермического потока и конвективного движения масс в недрах Земли на генерацию сейсмического процесса становится уязвимым в свете представленных натуральных наблюдений. Например, максимальная разница в скорости движения плит в зонах субдукции для Тихоокеанского побережья Южной Америки (от 5° N до 45° S) не превышает 7–8%, но количество событий для тех же самых широтных поясов различается в 20–30 раз, а разница в выделенной энергии вырастает более чем в 100 раз.

Объяснить приведенные особенности глобальных распределений событий Земли только с позиции теории тектоники плит не представляется возможным. Тем более трудно обосновать выявленное сходство глобальных распределений сейсмических событий для двух разных небесных тел только воздействием внутренних сил Земли и Луны. Очевидно, что существуют внешние силы, которые воздействуют и на земную, и на лунную среду и оказывают сходное влияние на сейсмические процессы обоих небесных тел.

Выявленные общие закономерности базируются на достаточно бедной статистике лунотрясений и потребуют дополнительного критического анализа. Однако приведенные результаты склоняют нас к необходимости постановки вопроса о первопричинах сейсмического процесса. Существующее общее мнение, что главной причиной

луотрясений являются приливные силы, а землетрясения обязаны своим происхождением в основном тектоническим процессам, видимо, потребует пересмотра в ближайшем будущем.

Авторы благодарят Ю.Н. Авсюка, О.Л. Кускова и В.П. Павлова за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ 07–05–00142-а и 10–05–00116-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авсюк Ю.Н.* Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
2. *Левин Б.В., Сасорова Е.В.* // ДАН. 2009. Т. 424. № 4. С. 538–542.
3. *Левин Б.В., Сасорова Е.В.* // ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 537–542.
4. *Frohlich C., Nakamura Y.* // Phys. Earth Planet. Inter. 2009. V. 173. P. 365–374.
5. *Gutenberg B., Richter C.F.* // Bull. Seism. Soc. Amer. 1942. V. 32. № 3. P. 163–170.
6. *International Seismological Catalog (ISC)* <http://www.isc.ac.uk>.
7. *Lammlein D.R.* // Phys. Earth and Planet. Inter. 1977. V. 14. P. 224–273.
8. *Mogi K.* Earthquake Prediction. Tokyo: Acad. Press, 1985.
9. *Sun W.* // Phys. Earth and Planet. Inter. 1992. V. 71. P. 205–216.