

## СЕЙСМОТЕКТОНИКА И ЗЕМНЫЕ ПРИЛИВЫ

*Б.В. Левин<sup>1,2</sup>, Е.В. Сасорова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;  
e-mail: [levinbw@mail.ru](mailto:levinbw@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект 36, г. Москва, 117997

Поступила в редакцию 24 октября 2010 г.

Представлены результаты обработки и анализа глобального распределения землетрясений (более 250000 событий по каталогу ISC) и изучения распределений лунотрясений (около 900 событий по опубликованным материалам). В обоих случаях обнаружена характерная бимодальная форма распределения количества событий и энергии с максимумами в средних широтах, нулевыми значениями в районе полярных шапок и локальным минимумом вблизи экватора. Приведен анализ возможного влияния тектонических процессов на обнаруженный характер распределения сейсмических событий и показана роль воздействия земных приливов на процесс активизации сейсмической деятельности в симметричных зонах по обе стороны экватора.

**Ключевые слова:** землетрясения, лунотрясения, широтные распределения, тектоника, приливы, вращение Земли.

### ВВЕДЕНИЕ

Тектоникой, согласно современным представлениям, принято называть раздел геологии, изучающий строение, движения и деформации земной коры. Эта наука также рассматривает закономерности строения и особенности развития земной коры. Сейсмо тектоника представляет собой раздел геофизики, в котором исследуются тектонические условия возникновения землетрясений. В настоящей работе авторы поставили задачу проанализировать обнаруженные недавно закономерности широтного распределения землетрясений и показать связь этих закономерностей с тектоническими параметрами и глобальными геофизическими процессами.

За последние 160 лет в геологии сменились три парадигмы [1]: учение о геосинклиналях, учение о ведущей роли литосферных плит (плейт-тектоника) и учение о тектонике мантийных плюмов. Главенствующие парадигмы в процессе их развития, как обычно, базировались на тщательном анализе геологических наблюдений, были непререкаемы и безупречны в свое время и постепенно, по мере накопления новых фактов, приходили к неразрешимым противоречиям, требующим пересмотра устоявшейся парадигмы [14, 15].

Создавшаяся ситуация подвигла геофизиков на проведение скрупулезного анализа накопившихся в

мировых сейсмических каталогах данных о параметрах землетрясений и выявление закономерностей их распределения.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ сейсмических событий на Земле выполнялся по данным мирового каталога International Seismological Catalog [18] за период с 1964 по 2008 гг. Выделенные из каталога данные подвергались предварительной обработке, включающей отбраковку неполных записей, стандартизацию магнитуд и удаление афтершоков. В рамках данной работы авторы проанализировали параметры более 250000 землетрясений с магнитудой  $M_b \geq 4.0$ . Для анализа наблюдательного материала такого объема требовалась разработка специализированного пакета программ в рамках системы MATLAB, который использовался в данной работе.

В качестве объекта для изучения был выбран Тихоокеанский регион, в пределах которого происходит свыше 80 % всех мировых землетрясений. Тихоокеанский регион (далее ТО) определялся как акватория океана с островными дугами, крайними морями и участками суши над зонами субдукции. Тихоокеанский пояс содержит не только основные сейсмоактивные провинции, но и включает границы

главных литосферных плит, вдоль которых и возникает большинство сейсмических событий, а динамика плит хорошо изучена методами космической геодезии [14, 21].

Одновременный анализ широтного распределения количества землетрясений и оценка суммарной длины границ литосферных плит в заданном широтном поясе позволили выявить особенности сейсмической активности различных участков тектонических провинций. Рассматривались нормированные широтные распределения количества землетрясений, выделенной энергии, распределения глубин гипоцентров по широтным поясам и двумерные распределения событий (по широтам и глубинам). Поскольку широтные распределения событий разных энергетических уровней могут значительно отличаться, в данной работе распределения рассматривались независимо для шести магнитудных диапазонов (МД):  $4.0 \leq M_b < 4.5$ ,  $4.5 \leq M_b < 5.0$ ,  $5.0 \leq M_b < 5.5$ ,  $5.5 \leq M_b < 6.0$ ,  $6.0 \leq M_b < 6.5$ ,  $M_b \geq 6.5$ .

Весь ТО был разделен на 18 широтных интервалов с размером каждого интервала  $10^\circ$ . На первом этапе исследований рассматривались распределения количества землетрясений по широтным поясам, нормированные на площадь широтного пояса. Такой подход для ТО оказался малоэффективным и физически необоснованным, поскольку эпицентры землетрясений (ЗТ) распределены в основном вдоль границ литосферных плит, очень неравномерно на площади широтного пояса. Такую особенность сейсмических провинций отмечали еще Гутенберг и Рихтер [2].

Поэтому в дальнейшем мы использовали нормирование количества событий и выделенной энергии на суммарную длину границ литосферных плит в данном широтном поясе. В результате для каждого широтного пояса получалась характеристики плотности сейсмических событий и плотности выделенной энергии (количество событий и энергия на 100 км длины границ литосферных плит), отражающие активность (или мощность) тектонических процессов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ широтных распределений плотности событий позволил авторам обнаружить неожиданную закономерность [6]: сейсмическая активность практически отсутствует на полюсах и приполярных широтах планеты, стремительно возрастает в средних широтах, достигая максимумов в районе  $40\text{--}50^\circ\text{N}$  и  $20\text{--}30^\circ\text{S}$ , и образует устойчивый локальный минимум вблизи экватора (рис. 1а). Широтное распределение выделенной сейсмической энергии демонстрирует аналогичную картину (рис. 1б). Проверка на устойчивость обнаруженных особен-

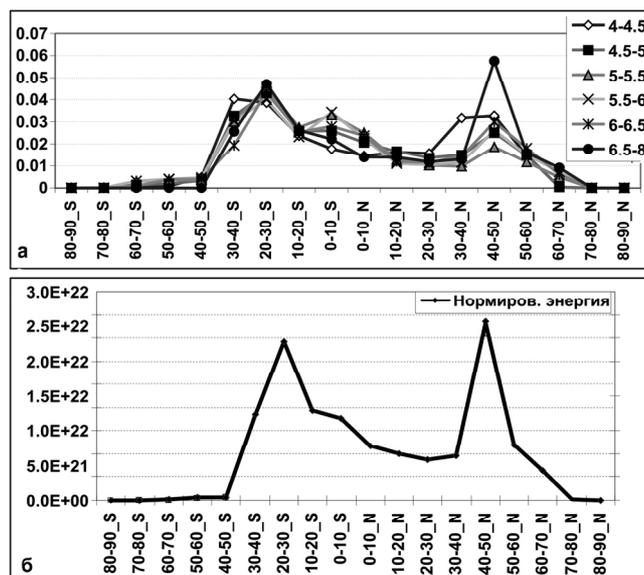


Рис. 1. Широтное распределение (а) относительной плотности сейсмических событий (по оси ординат); распределение плотности энергии (по оси ординат) по широтным поясам (б).

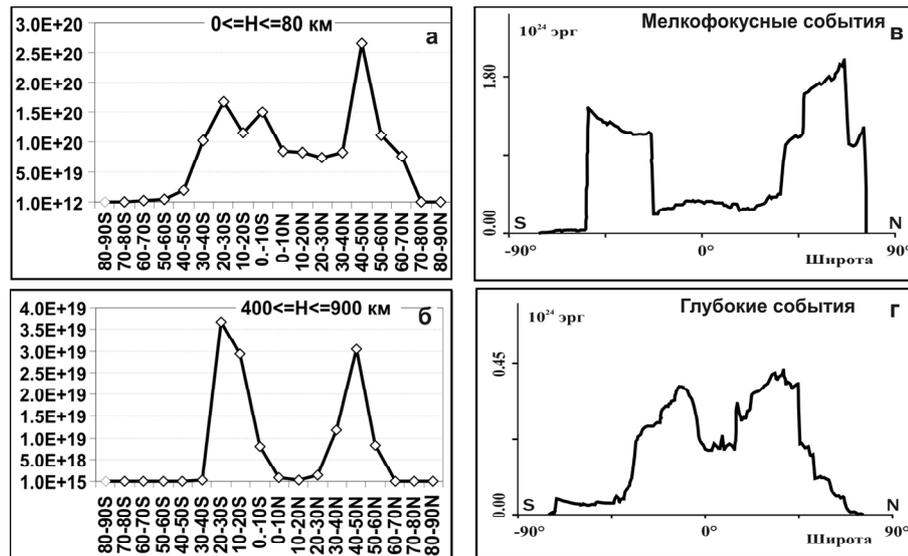
По оси абсцисс обозначен интервал широт. На вставке показаны диапазоны магнитуд.

ностей широтных распределений событий показала, что в каждом из 10-летних временных интервалов форма бимодального распределения сохраняется, сохраняется она и при изменении размера широтных поясов (до  $5^\circ$  и  $2^\circ$ ). Внимательный анализ широтных распределений событий показал, что пики сейсмической активности для мелкофокусных ЗТ ( $H \leq 80$  км) удалены от плоскости экватора (рис. 2а) несколько дальше ( $\pm 35\text{--}40^\circ$ ), чем пики активности ( $\pm 25\text{--}30^\circ$ ), характерные для глубокофокусных событий (рис. 2б).

Интересно отметить, что в работе Вэнке Сан [23] при анализе каталога сильных ЗТ (1165 событий) было обнаружено похожее бимодальное распределение энергии событий с близкими параметрами. Различие между положением пиков активности для мелкофокусных и глубоких событий носит аналогичный характер (рис. 2в и 2г).

Далее был проведен анализ распределения глубин гипоцентров с изменением широты. Для каждого широтного пояса строились распределения относительного количества ЗТ по глубинам, что позволило определить, какая часть событий в данном широтном поясе приходится на заданный интервал глубин. Анализ был проведен отдельно для Западной и Восточной частей ТО (рис. 3, 4).

Полученные результаты показывают, что в высоких широтах очаги практически всех ЗТ (до 90 %)



**Рис. 2.** Распределение плотности энергии по широтным поясам для мелкофокусных (а) и глубоких (б) землетрясений с  $M \geq 4$ , по данным авторов. Распределение энергии, выделенной от мелкофокусных (в) и глубоких (г) событий с  $M \geq 7$  по широтам, согласно работе [23]. По оси абсцисс обозначены широты, а по оси ординат – плотность энергии (в эрг/км).

сосредоточены на глубинах  $H \leq 20$  км. По мере продвижения к средним широтам постепенно увеличивается доля событий, гипоцентры которых расположены на глубинах  $20 < H \leq 60$  км. В широтных поясах, близких к экватору ( $30^\circ\text{S}–30^\circ\text{N}$ ), существенная доля очагов ЗТ расположена уже на глубинах:  $100 < H \leq 240$  км, а для некоторых широт этого диапазона гипоцентры опускаются до глубин  $H \geq 500$  км. Максимальное количество событий с  $H \geq 500$  км как в западной, так и в восточной частях ТО приходится на широтный пояс  $30^\circ–20^\circ\text{S}$ .

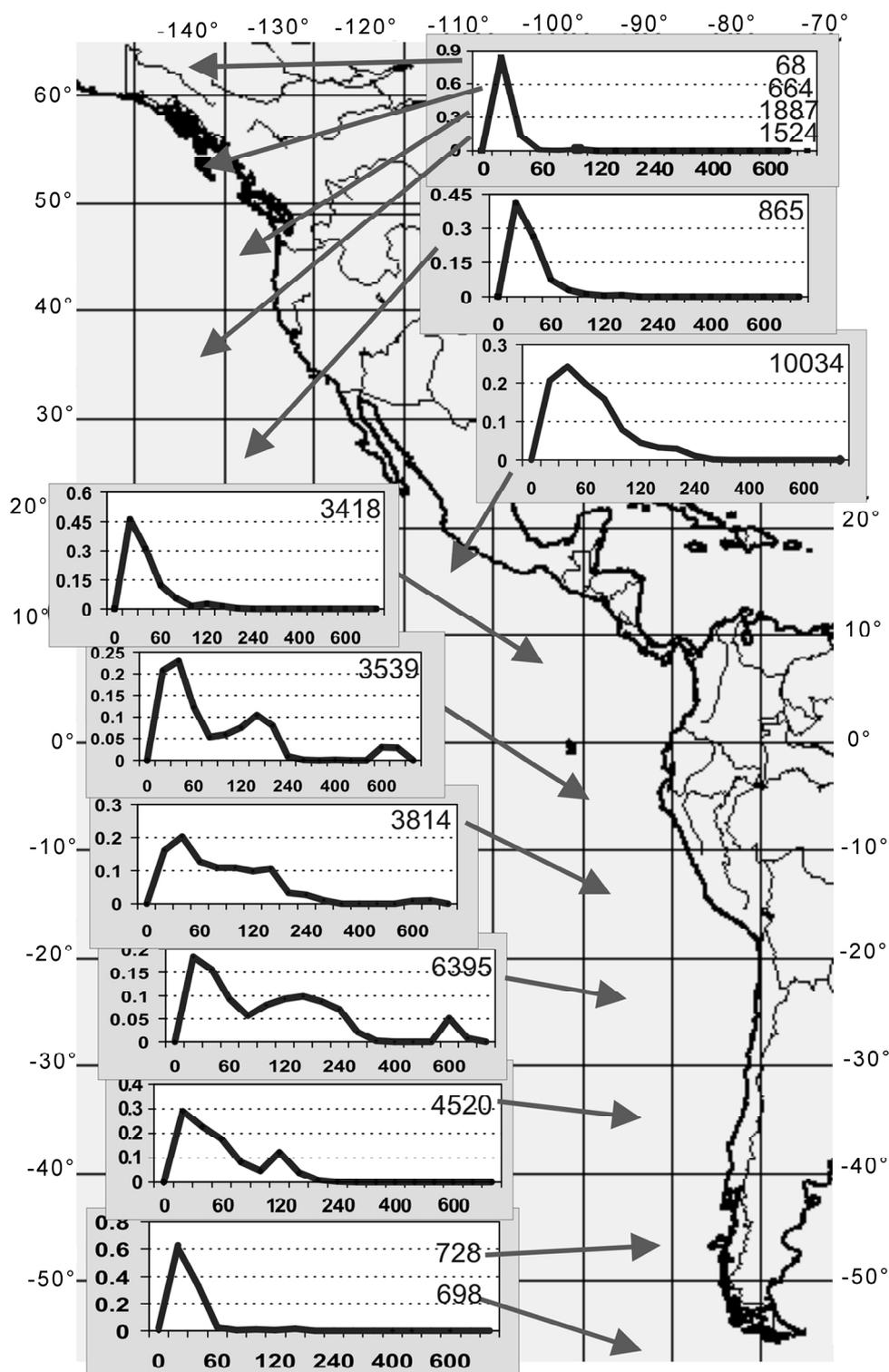
Для распределений выделенной энергии по глубине обнаружено, что существует тенденция к разделению событий на три отдельные группы (кластеры) с достаточно четко выраженными границами. Первый кластер (К1) объединяет неглубокие события с глубиной от 0 до 70 км, второй кластер (К2) содержит промежуточные события на глубине от 120 до 240 км, а третий (К3, глубокий) выделяется на глубинах от 500 до 700 км. На высоких широтах присутствуют только события из кластера К1.

На рис. 5 приведены двумерные распределения плотности сейсмических событий по широтам и глубинам для трех магнитудных диапазонов. Шкала уровня интенсивности серого цвета задает плотность сейсмических событий в ТО, усредненную на 10-летний период. Такое представление данных подтверждает явно выраженную кластеризацию сейсмических событий как по широтам, так и по глубинам. Выделяются три кластера событий по глубинам, причем неглу-

бокие события в большинстве случаев распадаются на два отдельных кластера ( $H \leq 30$  км и  $30 < H \leq 70$  км).

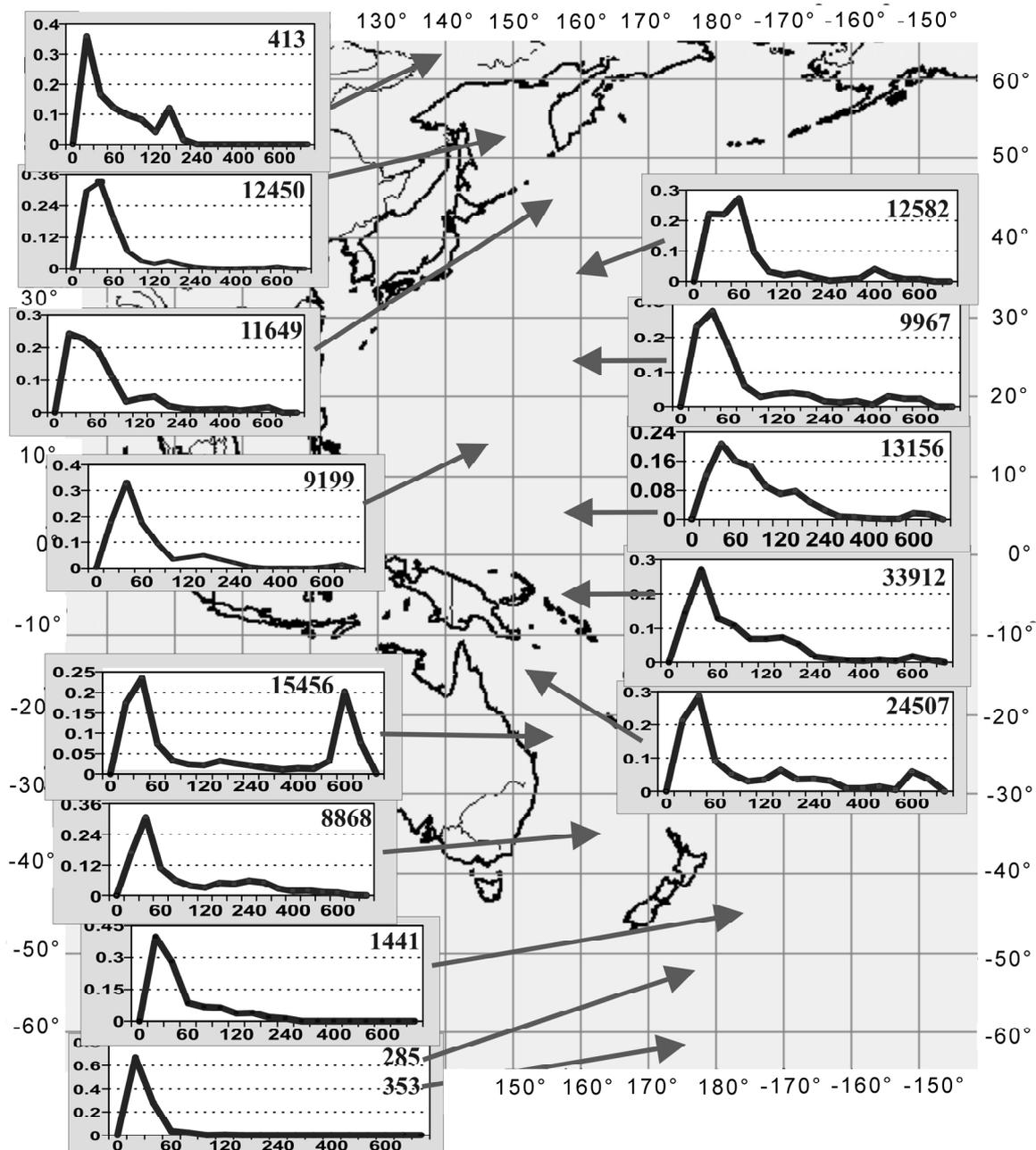
Предпринятое авторами сопоставление параметров земной и лунной сейсмичности по материалам работ [3, 17] показало, что бимодальная форма широтного распределения количества сейсмических событий сохраняется в обоих случаях (рис. 6). Полярные области Луны оказались практически асейсмичны, как и полярные шапки Земли, а в средних широтах на Луне фиксируется повышенная сейсмическая активность [8]. Расположение пиковых значений количества лунотрясений для глубоких (рис. 6а) и неглубоких событий (рис. 6б) оказалось подобным отмеченному выше расположению для ЗТ. Максимумы лунной сейсмичности для глубоких событий отмечаются в широтных зонах ( $\pm 20^\circ$ ), в то время как мелкофокусные события группируются вблизи областей ( $\pm 40^\circ$ ).

Для Луны также наблюдается кластеризация сейсмических событий по глубине, причем лунные кластеры обособлены и не пересекаются в пространстве. Тектонические (неглубокие) лунотрясения группируются в области глубин от 150 до 400 км, а так называемые приливные, или глубокие лунотрясения не выходят за пределы интервала глубин от 700 км до 1200 км. Отметим, что глубокие лунотрясения и промежуточные ЗТ происходят в зонах, где породы на Луне и на Земле испытывают примерно одинаковое давление (около 4 ГПа). Таким образом, несмотря на некоторые различия, глобальный характер широтных распределений по



**Рис. 3.** Распределение относительного количества землетрясений по глубинам в восточной части ТО в широтном диапазоне от 70°N до 60°S.

Черная линия – контуры материков. На девяти панелях, расположенных вертикально друг за другом, представлены распределения землетрясений по глубине для каждого широтного пояса: по оси абсцисс – глубины очагов землетрясений (в км), а по оси ординат – относительное количество землетрясений (нормирование – на общее количество землетрясений в данном широтном поясе). В правом верхнем углу каждой панели – общее количество землетрясений в данном широтном поясе.



**Рис. 4.** Распределение относительного количества землетрясений по глубинам в западной части ТО в широтном диапазоне от 70°N до 70°S.

Черной линией показаны контуры материков и островных дуг. Панели, на которых представлены распределения землетрясений, оформлены так же, как на рис. 3.

глубинам также подобен для обоих небесных тел (различие в количестве кластеров по глубине).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Роль приливных процессов и их возможное влияние на возникновение ЗТ неоднократно обсуждалась в научной литературе от времен И. Канта

(1755 г.) до наших дней. В последнее время в ряде работ [12, 16, 19] уделялось большое внимание рассмотрению энергетических и временных аспектов воздействия приливных сил на породы земной коры и приводились оценки, свидетельствующие о возможности воздействия приливов как “триггера”, инициирующего срабатывание ЗТ. Аналогичной точ-

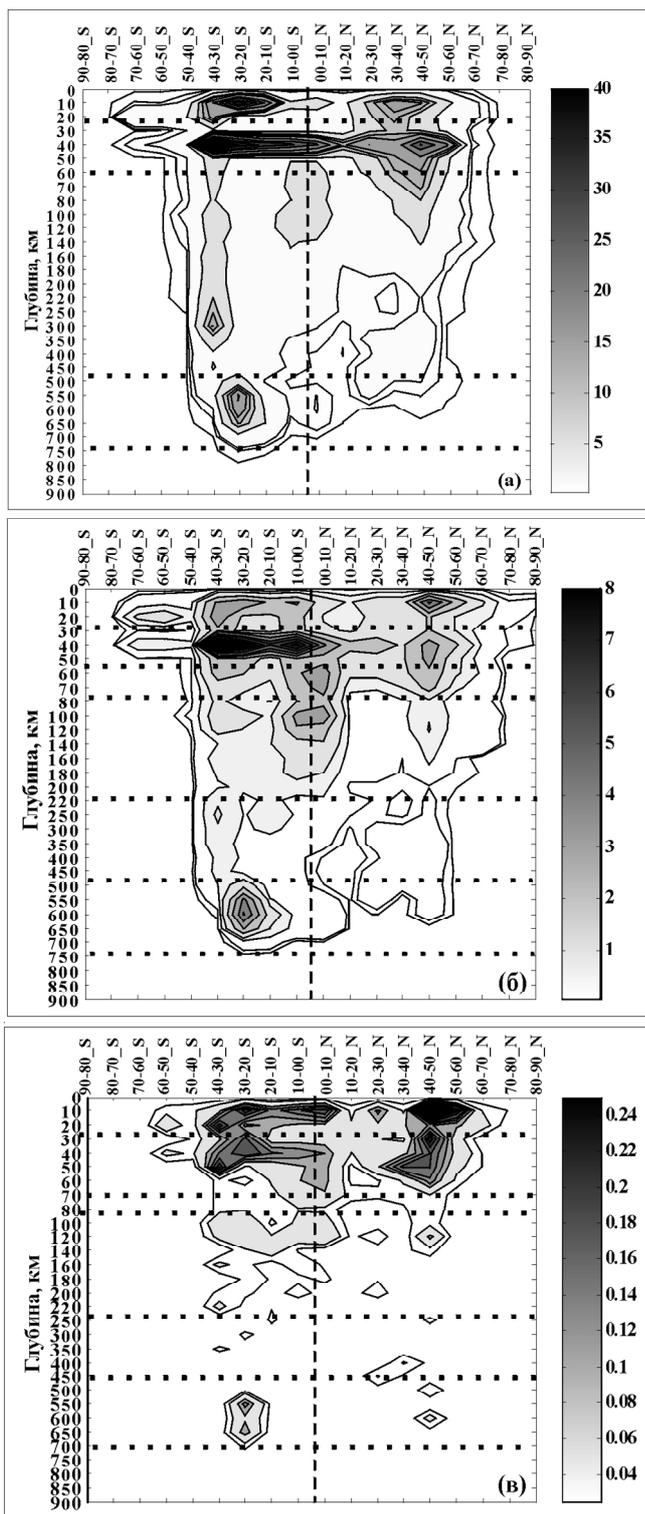


Рис. 5. Двумерные распределения плотности сейсмических событий для землетрясений магнитудного диапазона:

а –  $4.0 \leq M < 5.0$ ; б –  $5.0 \leq M < 6.0$ ; в –  $M \leq 6.0$ . Вертикальные оси – глубина в км, горизонтальные оси – широтные пояса. Полутонная шкала плотности сейсмических событий – справа от каждого фрагмента.

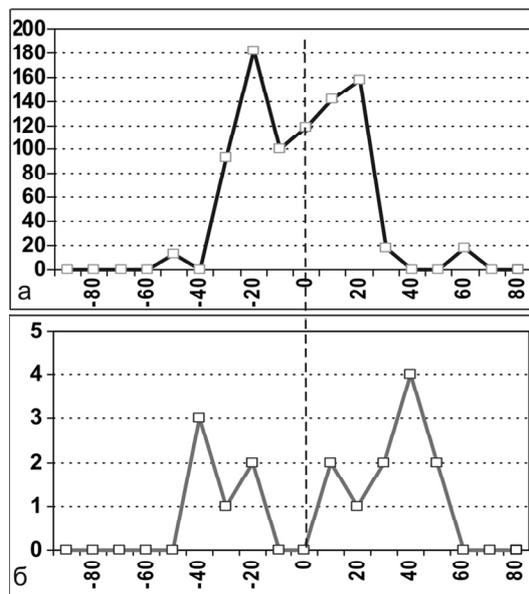


Рис. 6. Широтные распределения сейсмических событий на Луне.

а – для глубоких; б – для неглубоких лунотрясений. Горизонтальные оси – широты (отрицательные широты для Южного полушария). Вертикальные оси – количество сейсмических событий.

ки зрения придерживается и В. Сан в работе [23]. Он отмечает, что энергия длиннопериодных приливов достигает максимума в районе средних широт ( $\pm 45^\circ$ ), т.е. примерно там, где наблюдаются максимумы сейсмической активности. Авторы работы [4] показали, что величина вариации плотности свободной энергии, сообщаемой приливами земной коре и верхней мантии, максимальна в районе средних широт и обеспечивает мощность, которая на три порядка превышает мощность, выделяемую при ЗТ. Периодичность действия приливов и возникающие под их влиянием знакопеременные нагрузки в породах коры могут приводить к накоплению повреждений в структурных неоднородностях пород и развитию микротрещиноватости, приводящей в итоге к формированию магистрального разрыва ЗТ. В этой же работе показано, что приливные силы могут не только служить триггером для генерации землетрясения, но могут быть и источником основной энергии, обеспечивающей возникновение ЗТ.

Недавно вопрос о влиянии приливных сил на подготовку ЗТ получил совершенно новое развитие. Действие сил притяжения на твердую матрицу земных пород сопровождается воздействием этих сил на жидкий флюид, заполняющий системы трещин в породах земной коры. Роль воды и водного флюида, явление флюидизации пород отмечались ранее при

оценке факторов, влияющих на подготовку землетрясения [5, 20]. В последнее время большое внимание уделяется изучению роли эффекта Ребиндера (адсорбционного понижения прочности твердых тел) при подготовке землетрясения [7, 11]. Присутствие в породах коры адсорбционно-активного водного флюида, наличие трещин, межзеренных границ, дислокаций, повышенной температуры, сложного поля разномасштабных напряжений, создаваемых приливными силами, обеспечивают благоприятные условия для развития эффекта Ребиндера. В результате действия этого эффекта, проявляющегося в повышении хрупкости твердого тела, снижении его долговечности, ослаблении межатомных связей, прочность породы может скачкообразно уменьшиться на порядок в области подготовки очага землетрясения, что приведет к быстрому формированию магистрального разрыва. Следует отметить, что увеличение вариации плотности свободной энергии приливов в средних широтах должно приводить к росту степени флюидизации пород именно в этих широтах, а, следовательно, и к соответствующему росту активизации сейсмического процесса (что подтверждается наблюдениями).

Приливные воздействия на Землю со стороны Луны и Солнца приводят к изменениям угловой скорости вращения Земли [10]. Вариации скорости вращения планеты в свою очередь вызывают изменения в форме фигуры Земли. Возрастание угловой скорости ведет к увеличению сплюснутости планеты, а уменьшение скорости – к уменьшению сплюснутости. Простые оценки показывают, что вариации кинетической энергии вращения планеты за счет изменения ее скорости вращения могут составлять порядка  $10^{21}$  Дж в течение года. Эта величина на 2–3 порядка превышает суммарную энергию, выделяемую ежегодно при землетрясениях. Изменения сплюснутости планеты в результате вариаций скорости вращения должны проявляться в зонах пространственных резонансов или в зонах критических широт (вблизи  $\pm 35^\circ$ ). В этих зонах сжимающие напряжения, характерные для полярных шапок планеты, сменяются на растягивающие напряжения, свойственные приэкваториальной области.

Известный феномен дифференциального вращения Солнца (экваториальная область совершает полный оборот вокруг оси за 25 земных суток, а полярные области – за 29 суток) дает следующую зависимость угловой скорости ( $\omega$ ) от широты ( $\theta$ ) [9]

$$\omega(\theta) = (2.78 + 0.35 \cos^2 \theta + 0.44 \cos^4 \theta) 10^{-6} \text{ s}^{-1}.$$

Выполненный авторами статьи анализ этой эмпирической зависимости показал, что широтный гра-

диент угловой скорости вращения Солнца демонстрирует существование двух максимумов на широте около  $\pm 35^\circ$  (рис. 7). Широтное распределение количества горячих точек на Земле [22] также обнаруживает бимодальную форму с характерными максимумами в районе средних широт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сходство форм широтных распределений землетрясений, горячих точек на Земле, лунотрясений и зон дифференциального вращения поверхности Солнца с выделением средних широт как областей пространственных резонансов приводит к мысли о существовании общего физического механизма, оказывающего воздействие на вращающееся небесное тело. Такой механизм может проявляться на фоне общего действия тектонических процессов, дополнительно выделяя характерные области широтной ориентации, в которых отмечается повышенная активность геодинамических процессов. Такие области известны в геологической литературе как линеаменты в широтах  $\pm 40^\circ$  и уже давно привлекают внимание геофизиков.

Изучение явлений гидродинамических неустойчивостей в небесных телах и структурах, активно развиваемое в последнее время [13], указывает на возможность формирования неустойчивостей и критических широтных зон внутри вращающихся небесных тел. Как показывают результаты наблюдений и теоретические оценки, области развития неустойчивостей и зоны резкого изменения параметров вращения проявляются обычно в средних широтах планет. Эти фундаментальные физические явления могут оказаться одной из причин возникновения аномальных широтных зон высокой сейсмической активности, обнаруженных в настоящей работе. Дальнейшее изучение выявленных закономерностей будет способствовать пониманию физического механизма, действующего в выделенных по обе стороны от экватора широтных поясах. Такие симметричные облас-

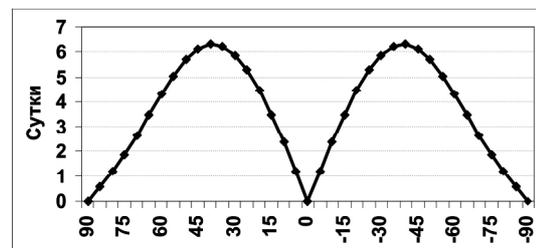


Рис. 7. Распределение по гелиоцентрическим широтам величины широтного градиента периода вращения поверхности Солнца.

ти могут сыграть роль пространственных резонансов в геофизике или генераторов зон гидродинамической неустойчивости.

Авторы выражают искреннюю признательность Ю.Н. Авсюку, Г.С. Голицыну, А.В. Доманскому, В.П. Павлову и А.И. Ханчуку за полезные дискуссии и ценные критические замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №10-05-00116, №09-05-00939).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: Связь во времени и в пространстве. М.: Наука, 2010. 606 с.
2. Гутенберг Б., Рихтер Ч.Ф. Сейсмичность Земли. М., Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 160 с.
3. Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 576 с.
4. Левин Б.В., Павлов В.П. Влияние астрономических факторов на вариации плотности энергии в твердой оболочке Земли // Изв. РАН. Физика Земли. 2003. № 3. С. 71–76.
5. Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. О возможной природе сейсмической границы на глубине 70 км // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 1. С. 101–104.
6. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Бимодальный характер широтных распределений землетрясений в Тихоокеанском регионе как проявление глобальной сейсмичности // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 4. С. 538–542.
7. Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. Особенности сейсмического режима литосферы – проявления воздействия глубинного водного флюида // Физика Земли. 2010. № 5. С. 88–96.
8. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Общие закономерности в распределении сейсмических событий на Земле и на Луне // Докл. РАН. 2010. Т. 434, № 2. С. 252–256.
9. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Изд-во Мир, 1980. 339 с.
10. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука. Физматлит, 2002. 384 с.
11. Траскин В.Ю. Эффект Ребиндера в тектонофизике // Физика Земли. 2009. № 11. С. 22–33.
12. Фридман А.М., Клименко А.В. О связи сейсмической активности Земли с широтой в зависимости от глубины гипоцентров // Физика Земли. 2002. № 12. С. 50–55.
13. Фридман А.М. Предсказание и открытие сильнейших гидродинамических неустойчивостей, вызванных скачком скорости: теория и эксперименты // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 3. С. 225–242.
14. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во Кн. дом “Университет”, 2005. 560 с.
15. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т. 378, № 5. С. 672–674.
16. Cochran E.S., Vidale J.E., Tanaka S. Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes // Science. 2004. V. 306. P. 1164–1166.
17. Frohlich C., Nakamura Y. The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: How similar and how different? // Physics of the Earth and Planet. Inter. 2009. V. 173. P. 365–374.
18. International Seismological Catalog, <http://www.isc.ac.uk>
19. Riguzzi F., Panza G., Varga P., Doglioni C. Can Earth’s rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // Tectonophysics. 2010. V. 484. P. 60–73.
20. The Role of Water in Earthquake Generation / Eds: Kasahara J., Toriumi M., Kawamura K. Tokyo: University of Tokyo Press, 2003. 392 p. (in Japanese).
21. Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.W. et al. Spatially linked asperities of the 2006 – 2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS // Geoph. Res. Lett. 2008. V. 35. L22306, doi: 10.1029/2008GL035572.
22. Stothers R.B. Hotspots and Sunspots: surface traces of deep mantle convection in the Earth and Sun // Earth and Planet Sci. 1993. V. 6. P. 1–8.
23. Sun W. Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress // Physics of the Earth and Planet. Inter. 1992. V. 71. P. 205–216.

*Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым*

*Levin B.W, Sasorova E.V.*

#### Seismotectonics and the Earth’s tides

The results of the earthquake global distribution processing (more than 250000 events from ISC Catalog) and the moonquake distribution analysis (about 900 events from published sources) were presented. In both cases, the specific bimodal form of the distributions of the event number and released energy was revealed: typical maximum at the mid-latitudes, zero value in the polar cap areas, and a local minimum near equator. The analysis of possible influences of the tectonic processes on specific features of seismic event distribution was carried out. The role of the tides on the process of seismic activation in two symmetric zones located on both sides of the equator was shown.

**Key words:** earthquakes, moonquakes, latitudinal distributions, tectonics, tides, the Earth’s rotation.