

УДК 550.34

## О ПРИРОДНОМ И АНТРОПОГЕННОМ МЕХАНИЗМАХ СУТОЧНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГИМАЛАЕВ

© 2015 г. В.И. Журавлев, А.Я. Сидорин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

По выборке землетрясений из мирового каталога Международного сейсмологического центра выполнен анализ суточной периодичности сейсмических событий в районе Гималайско-Тибетского горного сооружения. Полученные результаты неплохо согласуются с гипотезой шумовой дискриминации. Однако выявлена тенденция появления сильных землетрясений в противофазе с суточной периодичностью потока слабых событий. В северо-западной части региона обнаружены два больших пика количества сейсмических событий в дневное время, вызванные, по-видимому, проведением там взрывов. Обсуждаются природные и антропогенные механизмы возникновения суточной периодичности землетрясений.

*Ключевые слова:* Гималайско-Тибетский ороген, каталог землетрясений, суточная периодичность, шумовая дискриминация, взрывы, противофазные изменения.

### Введение

С каждым годом все чаще обнаруживается влияние техносферы и антропогенных факторов на природные процессы, в том числе на сейсмичность [Николаев, 1994; Зотов, 2007; Зотов, Гульельми, 2010; Адушкин, 2013; Ellsworth, 2013]. Высказывались соображения, что обнаруживаемая повсеместно суточная периодичность землетрясений является антропогенной: «Давно известная суточная периодичность (увеличение активности ночью) может быть объяснена скорее антропогенными эффектами, чем естественными причинами» [Utsu, 2002. P. 728].

Антропогенная суточная периодичность сейсмических событий может быть обусловлена: 1) эффектами шумовой дискриминации, или наблюдательной селекции, при регистрации сейсмических волн на фоне техногенных шумов, амплитуда которых закономерно меняется в течение суток [Сидорин, 2010], – это кажущаяся периодичность; 2) наличием в каталоге неидентифицированных взрывов, которые обычно приурочены к определенному, чаще дневному времени суток [Годзиковская, 1987; Сидорин, 2007, 2011; Kiszely, 2010; Журавлев, Лукк, 2011]; 3) триггерными эффектами сейсмичности в

результате периодических техногенных воздействий на земную кору [Еременко и др., 2009] – это реальная периодичность. Природная суточная периодичность тоже может быть как кажущейся, так и реальной. Природная кажущаяся периодичность отличается от техногенной лишь источником сейсмических помех – он природный, например меняющийся шум от близко протекающей бурной горной реки [Сидорин, 2015]. О реальной суточной периодичности природного генезиса сведений очень мало, и этот вопрос требует пристального изучения.

В настоящей статье исследуется суточная периодичность землетрясений довольно большого региона – Гималайско-Тибетского орогена и прилегающих территорий, в пределах которого есть как урбанизированные и промышленно развитые районы с высоким уровнем техногенных помех, так и высокогорные незаселенные территории с малым уровнем техногенных помех.

### Район исследований и использованные данные

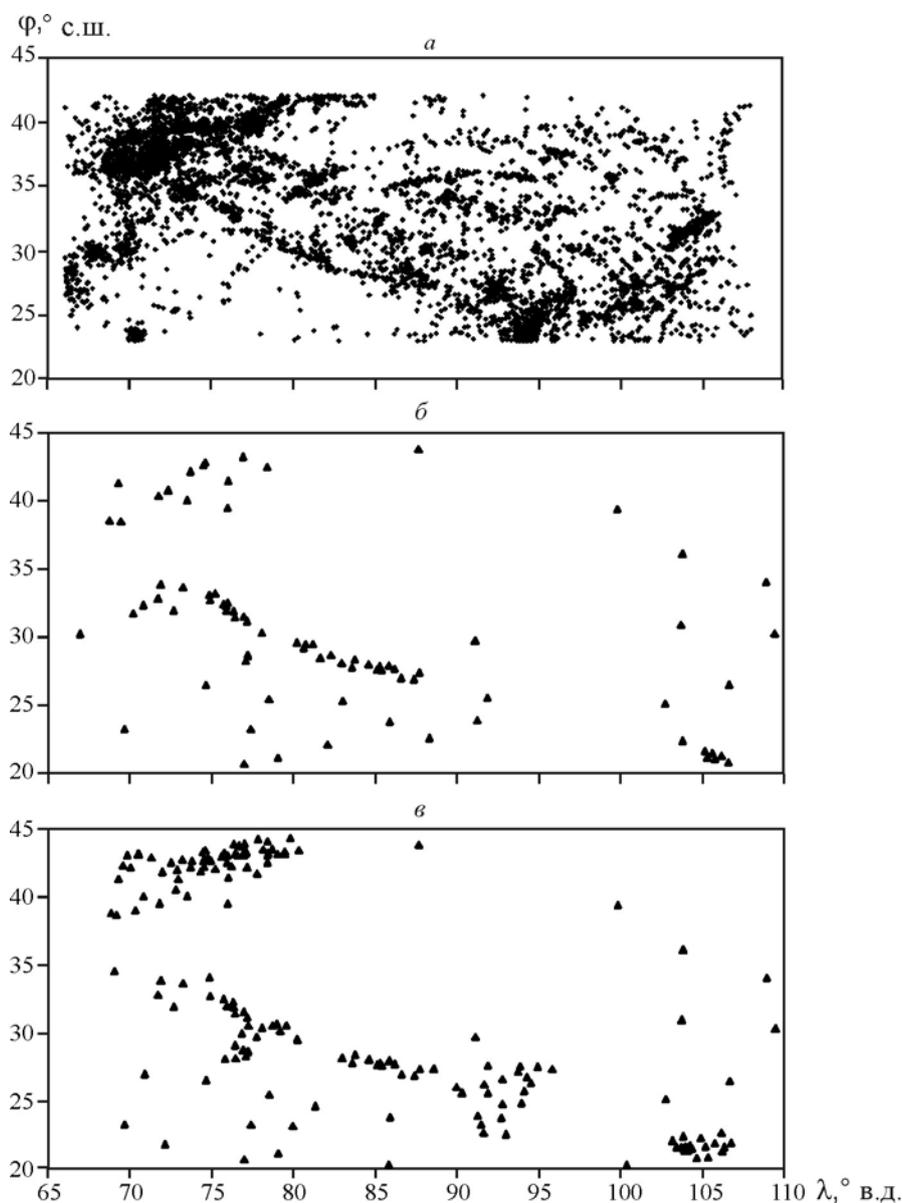
Обзорная карта исследуемого региона приведена на рис. 1. Это один из самых высокогорных и труднодоступных регионов мира, поэтому можно ожидать, что уровень техногенных помех на большей части его территории минимален. Центральную часть рассматриваемого региона занимает огромное Тибетское плато. На юго-западе от плато простираются Гималаи, отделяющие Тибет от Индостана, на севере – хр. Куньлунь, северо-западнее которого расположен Таримский бассейн. В западную часть региона (см. границы рамки на рис. 1) попадают хр. Каракорум, горные системы Памира и частично Гиндукуша и Тянь-Шаня. Этот регион близок к тем, которые называются, например, в работах [Уфимцев, 2004; Современная..., 2005] соответственно Тибет-Гималайским регионом и Высокой Азией. В.С. Буртман [2012] считает Высокую Азию и Тянь-Шань разными горными сооружениями, разделенными Таримской впадиной, Алайской высокогорной долиной и Афгано-Таджикской впадиной.



Рис. 1. Обзорная карта исследуемого региона

Основа – карта с сайта Геологической службы США; рамкой с координатами  $\varphi$ , ° с.ш. и  $\lambda$ , ° в.д. обозначены границы выборки эпицентров землетрясений

Анализировалась выборка землетрясений за 1996–2014 гг. из каталога Международного сейсмологического центра (сайт в Интернете: <http://www.isc.ac.uk/>), эпицентры которых попали в пределы прямоугольной зоны, ограниченной координатами  $23^{\circ}$ – $42^{\circ}$  с.ш. и  $66^{\circ}$ – $108^{\circ}$  в.д. Объем выборки  $N = 83\,009$  событий. На рис. 2, а приведена карта эпицентров землетрясений магнитудой  $M \geq 4.0$ . Четко видны резкие границы эпицентральных зон на севере и юге исследуемой зоны, вызванные заданными координатами рамки. В той или иной мере с такой проблемой приходится сталкиваться при любых исследованиях региональной сейсмичности. Выделяются два скопления эпицентров землетрясений указанного энергетического диапазона: одно – на северо-западе; другое, меньшее по количеству формирующих его землетрясений, – на юго-западе. Они соединяются достаточно широкой зоной эпицентров, простирающейся практически через весь исследуемый регион с северо-запада на юго-восток. При этом в северо-восточной и особенно юго-западной части региона землетрясений намного меньше.



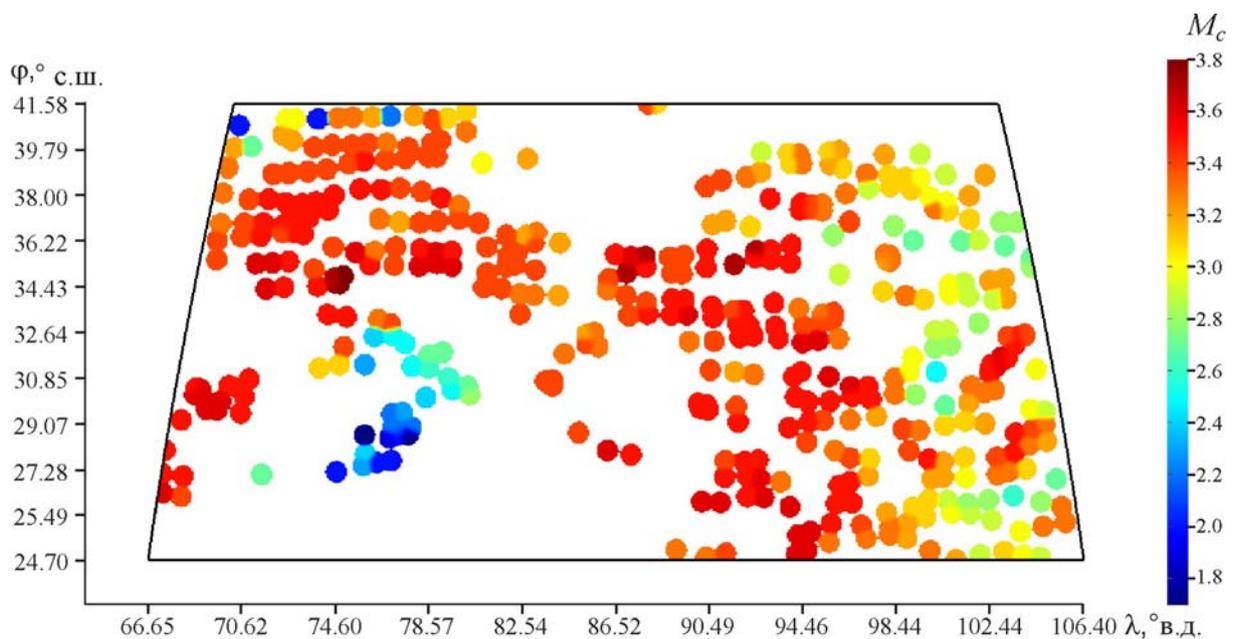
**Рис. 2.** Карты эпицентров сильных ( $M \geq 4.0$ ) землетрясений за 1996–2014 гг. (а) и расположение сейсмических станций в 1999 (б) и 2013 (в) годах в пределах исследуемого региона

Количество землетрясений и их параметры достаточно сильно зависят от конфигурации системы наблюдений и количества входящих в нее сейсмических станций. На рис. 2, б приведено положение сейсмических станций в 1999 г., на рис. 2, в – в 2013 г. Сравнив эти рисунки, легко увидеть, что в 2013 г. в системе наблюдений намного больше станций, чем в 1999 г., однако конфигурация системы не претерпела каких-либо кардинальных изменений. Это означает, что на тех участках исследуемого региона, где количество сейсмических станций выросло, можно ожидать заметного понижения порога представительности каталога землетрясений, характеризуемого значением  $M_c$  (magnitude of completeness) к концу анализируемого срока наблюдений, в то время как в удаленных от сейсмических станций зонах вряд ли можно ожидать сильных изменений значения  $M_c$ .

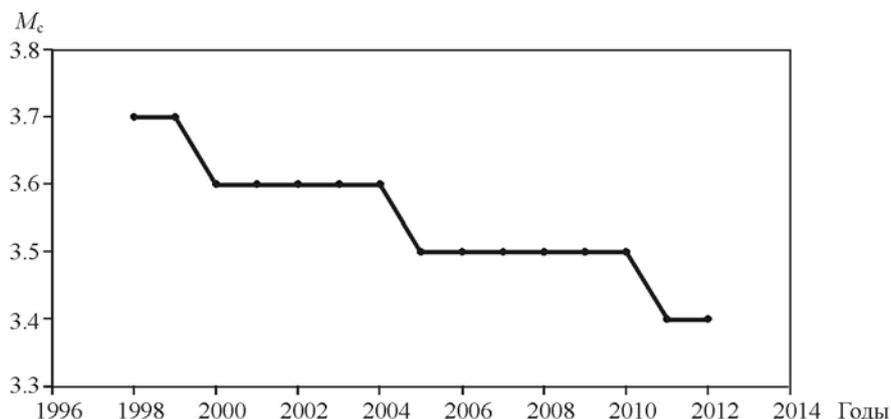
### Представительность каталога землетрясений

На рис. 3 приведена карта значений представительной магнитуды землетрясений в исследованном каталоге (карта значений  $M_c$ ), рассчитанных по всему каталогу в целом по программе CompleteMag В.Б. Смирнова [1997, 2009]. На карте просматривается приуроченность меньших значений  $M_c$  к участкам с наибольшим количеством сейсмических станций. Это, в частности, зоны в юго-западной части и на самом краю северо-западной части рассматриваемого региона, где значения представительности опускаются до уровня  $M_c \approx 2.0$ , и проходящая через весь регион с севера на юг относительно узкая зона примерно на долготе более  $100^\circ$ , где  $M_c \approx 2.5-3.0$ . С северо-запада на юго-восток простирается широкая зона с  $M_c \approx 3.4-3.8$ .

По мере увеличения количества сейсмических станций в рассматриваемом интервале наблюдений происходило постепенное понижение интегрального значения представительной магнитуды, рассчитываемого по всей рассматриваемой территории. Это иллюстрирует рис. 4, на котором показаны изменения значений  $M_c$ , рассчитанных для всей исследуемой территории в 5-летнем скользящем окне с шагом 1 год. Для исключения



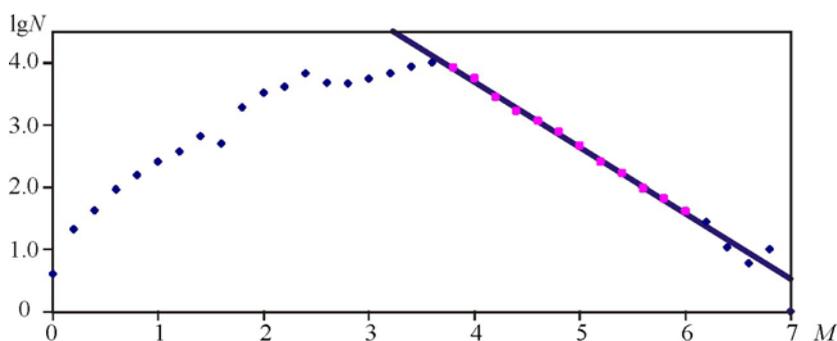
**Рис. 3.** Карта оценок значений  $M_c$  в пределах исследуемого региона в ячейках размером  $5^\circ \times 5^\circ$  с перекрытием 50 %



**Рис. 4.** Изменения значений представительной магнитуды землетрясений  $M_c$ , рассчитанных для всей исследуемой территории в скользящем окне длительностью 5 лет с перекрытием 80 %

потери данных первая точка получена как среднее значение за первые 3 года, отнесенное к началу 3-летнего окна, вторая – как среднее значение за первые 4 года, а далее – как обычно при скользящем 5-летнем окне с отнесением среднего значения к середине скользящего окна. В конце срока наблюдений повторялась аналогичная процедура осреднения с изменением длительности окна осреднения и применением процедуры отнесения получаемых значений к разным точкам этого окна.

На графике рис. 4 видно, что значение  $M_c$  уменьшилось от начала к концу наблюдений с 3.7 до 3.4, причем изменение происходило постепенно. В результате расчета представительной магнитуды для всей территории за весь срок наблюдений получено значение  $M_c = 3.5$ . Оценка  $M_c$  по графику повторяемости землетрясений, представленному на рис. 5, дала значение  $M_c = 3.6$ . В целом полученные разными способами оценки значений  $M_c$  неплохо координируются между собой. Это тем более так, если учесть достаточно сложную форму графика повторяемости. Провал на его вершине превращает график фактически в двухмодальное распределение, что однозначно свидетельствует о большой неоднородности каталога. Это может быть как пространственная, так и временная неоднородность, а скорее всего, и та и другая вместе.



**Рис. 5.** График повторяемости землетрясений исследуемого каталога землетрясений

### Формирование выборок по магнитуде

По аналогии с работой [Сидорин, 2013б] поиск и исследования суточной периодичности проводились в выборках землетрясений, различающихся по магнитуде. При формировании выборок мы стремились к тому, чтобы по возможности обеспечить небольшие различия выборок по объему и при этом сформировать по несколько выборок

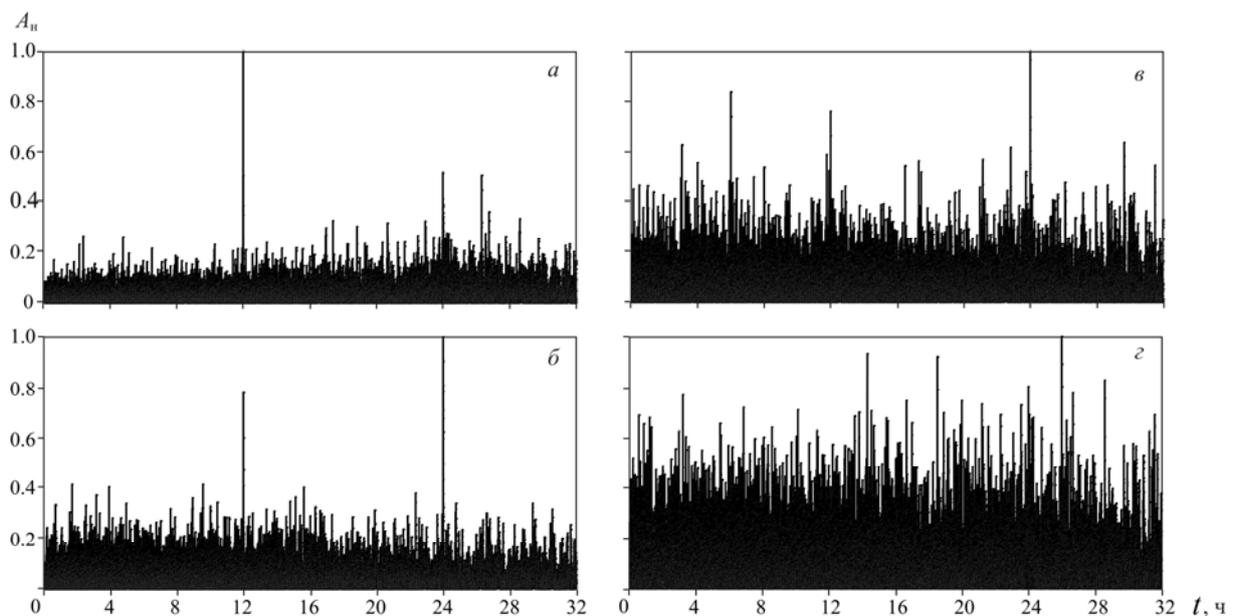
магнитудой как меньше, так и больше представительного значения  $M_c$ , а также выборок в переходном интервале. Согласно приведенным выше оценкам, значения  $M_c$  при разных способах оценки находятся в интервале 3.5–3.6. Поэтому в качестве выборки переходного интервала была сформирована выборка с  $3.4 < M \leq 3.6$ , в которой оказалось 9980 событий.

Далее, учитывая приведенные выше соображения, а также требование, чтобы землетрясения с одинаковыми значениями  $M$  обязательно входили лишь в одну выборку, были сформированы еще 9 выборок. Диапазон магнитуд и количество событий выборок следующие:  $M \leq 1.7$  (7195);  $1.8 < M \leq 2.0$  (5260);  $2.0 < M \leq 2.5$  (11 200);  $2.5 < M \leq 2.9$  (9565);  $2.9 < M \leq 3.2$  (9710);  $3.2 < M \leq 3.4$  (8589);  $3.4 < M \leq 3.6$  (9980);  $3.6 < M \leq 3.9$  (11 551);  $3.9 < M \leq 4.2$  (5236);  $M > 4.2$  (4723). Формирование двух выборок в диапазоне магнитуд  $M > 3.9$  продиктовано желанием более детально исследовать именно сильные землетрясения, хотя это повлекло за собой уменьшение объема выборок таких землетрясений.

### Анализ частотного состава потока землетрясений разной энергии

На рис. 6 приведены примеры нормированных периодограмм Ломба–Скаргла для нескольких выборок землетрясений. В спектре землетрясений всего каталога (см. рис. 6, *а*) явно доминирует пик с периодом 12 ч, в то время как пик суточного периода примерно вдвое меньше. Хотя суточный пик сравним по амплитуде с пиком периодом около 26 ч, он все-таки достаточно отчетливо выделяется над фоном. В низкочастотной части видны пики с периодами 4.8 и 2.4 ч. По-видимому, это следствие несинусоидальной формы периодического сигнала (эффект Гиббса).

В потоке слабых землетрясений (см. рис. 6, *б*) доминирующим стал пик с периодом 24 ч, хотя полусуточный пик сравним с ним по амплитуде. При переходе к более сильным землетрясениям магнитудой  $2.9 < M \leq 3.2$  (см. рис. 6, *в*) соотношение между суточным и полусуточным пиками остается практически неизменным, но сильно увеличивается шумовой компонент. Например, появляется пик на периоде 6 ч, который больше 12-часового пика.



**Рис. 6.** Нормированные периодограммы Ломба–Скаргла в диапазоне периодов до 32 ч, рассчитанные для землетрясений магнитудой

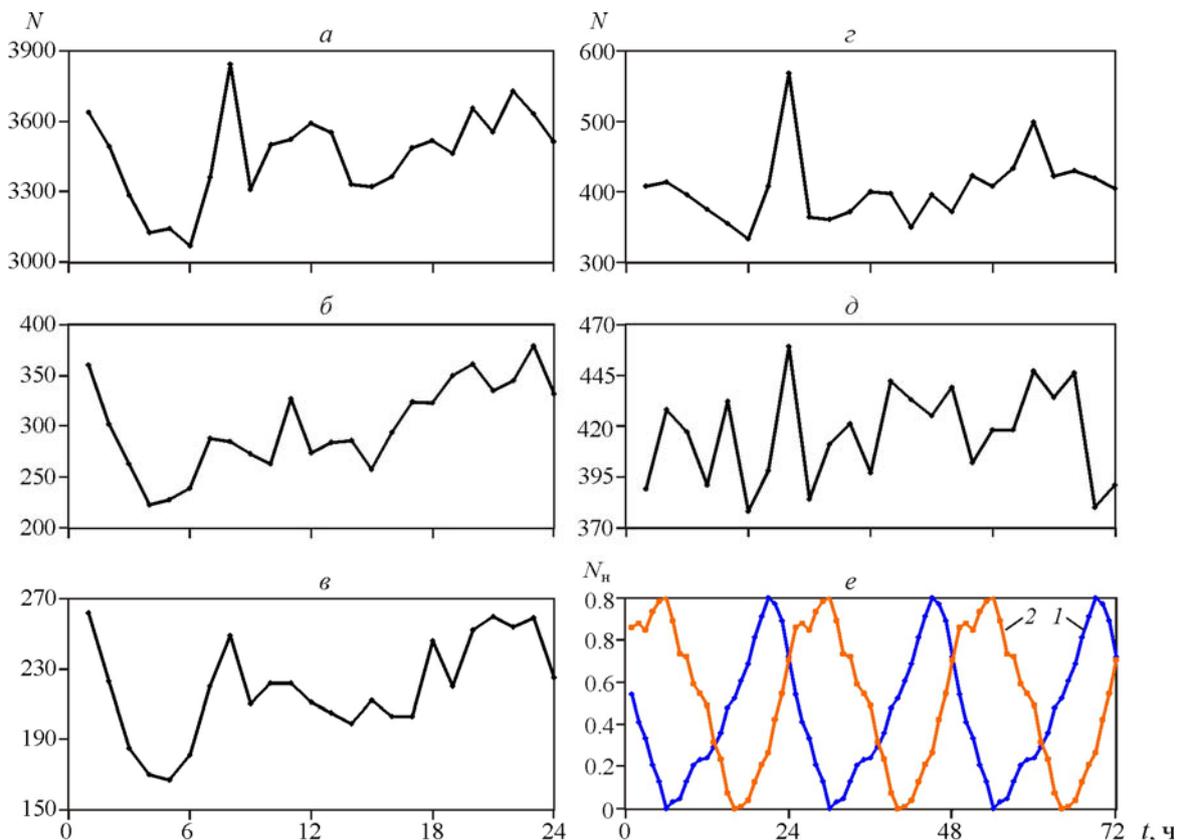
*а* – весь каталог; *б* –  $1.7 < M \leq 2.0$ ; *в* –  $2.9 < M \leq 3.2$ ; *г* –  $3.2 < M \leq 3.4$

На периодограмме потока землетрясений магнитудой  $3.2 < M \leq 3.4$  (см. рис. 6, *з*) шум настолько велик, что на его фоне полусуточный пик вообще не виден, а суточный пик, хотя его и можно разглядеть, оказался меньше нескольких пиков других периодов.

### Внутрисуточные распределения землетрясений разной энергии

Анализ внутрисуточных распределений землетрясений разной энергии проведем с помощью полигонов частот почасового количества землетрясений, представленных на рис. 7. Прежде всего отметим, что, как и в других районах мира, на полигонах частот, рассчитанных по всему каталогу и выборкам слабых землетрясений с  $M \leq 3.2$  (см. рис. 7, *а-з*), довольно отчетливо проявляется уменьшение количества землетрясений в утренние часы и увеличение в вечернее время. Это согласуется с гипотезой шумовой дискриминации [Сидорин, 2013а, б]. Но в окрестности значений представительной магнитуды (это выборка землетрясений с  $3.4 < M \leq 3.6$ ) присутствующие в выборках слабых землетрясений закономерные плавные изменения исчезают, превращаясь в шумообразные хаотические колебания. Иными словами, в окрестности представительной магнитуды суточная периодичность исчезла, что и предсказывается гипотезой шумовой дискриминации.

Однако в выборках наиболее сильных землетрясений суточный ход снова появляется. Он имеет меньшую амплитуду и поэтому не проявляется доминирующим пиком на периодограммах. Амплитуда суточного хода, рассчитанная по нормированным на среднее значение количества землетрясений в сутки размаху и среднеквадратическому отклонению, быстро уменьшается с ростом магнитуды, но при переходе к выборкам



**Рис. 7.** Полигоны частот внутрисуточных распределений почасовых значений количества землетрясений (суточный ход) разной энергии

*а* – весь каталог; *б* –  $M \leq 1.7$ ; *в* –  $1.7 < M \leq 2.0$ ; *г* –  $2.9 < M \leq 3.2$ ; *д* –  $3.4 < M \leq 3.6$ . Показаны также два периода сглаженного циклическим скользящим окном длительностью 9 ч суточного хода количества землетрясений (*е*) с  $M \leq 1.7$  (*1*) и  $M > 4.2$  (*2*). Время – по Гринвичу

сильных землетрясений с  $M > 4.2$  вновь начинает расти. Значение коэффициента корреляции  $R$  суточного хода выборки самых слабых землетрясений с суточным ходом землетрясений из другой выборки быстро уменьшается по мере движения к выборкам землетрясений большей энергии значения, приближаясь к нулю в диапазоне магнитуд, близком к значению порога представительности каталога. Но при дальнейшем увеличении магнитуды  $R$  меняет знак и далее продолжает расти по абсолютной величине. При нулевом сдвиге  $R = -0.33$ . Наибольший по модулю отрицательный коэффициент корреляции достигается при запаздывании суточного хода сильных землетрясений относительно слабых на 4 ч – в этом случае корреляция вдвое выше:  $R = -0.68$ . Тенденцию к противофазным изменениям суточного хода сильных и слабых землетрясений иллюстрирует рис. 7, е.

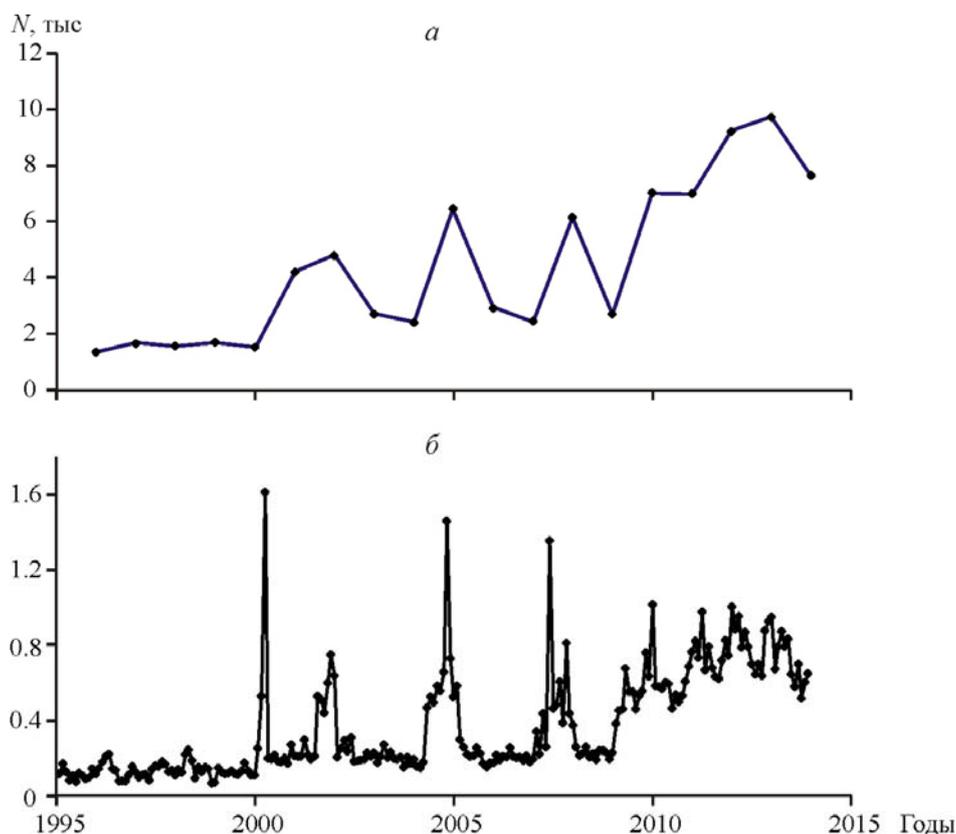
Оценки значимости суточной периодичности в выборке сильных ( $M > 4.2$ ) землетрясений методом Рэлея–Шустера [Сидорин, 2009а] дают следующие значения:  $p = 3 \cdot 10^{-4}$ ; отношение длины результирующего вектора к корню из количества событий выборки  $L = 2.85$  (аналог количества среднеквадратических отклонений  $\sigma$ ). Однако используемый алгоритм значимости предполагает отсутствие в выборках группированных событий, каковыми являются афтершоки. Более робастный алгоритм оценки на основе использования среднесуточных значений [Сидорин, 2013а, б; Децеровский, Сидорин, 2015а, б] дал следующие результаты:  $p_r = 7 \cdot 10^{-2}$ ,  $L_r = 1.63$ , что согласуется с результатами анализа частотного состава потока сильных землетрясений об отсутствии суточной периодичности в выборке самых сильных землетрясений.

### Изменения характера суточного хода землетрясений во времени

Вернемся к рис. 7 и отметим еще одну особенность – наличие большого и острого пика во временном интервале 7–8 ч по Гринвичу, особенно сильно проявляющегося в выборке землетрясений с  $2.9 < M \leq 3.2$ . В переводе на поясное время этот интервал соответствует примерно полудню. Эта картина не очень похожа на наблюдающийся практически повсеместно полуденный эффект [Сидорин, 2005]: во-первых, пик очень острый, а во-вторых, он осложнен дополнительным, намного более продолжительным возмущением в окрестности 12 ч по Гринвичу. Это особенно хорошо видно на данных полного каталога (см. рис. 7, а).

Для поиска возможных причин появления этого пика изучим вопрос о том, насколько он стабилен во времени. Для этого сначала обратимся к рис. 8, а, на котором показаны изменения количества ежегодно регистрируемых землетрясений. На нем виден почти 10-кратный рост количества землетрясений в 2013–2014 гг. в сравнении с началом анализируемого интервала наблюдений (1996–2000 гг.). Возможно, что это связано с увеличением количества сейсмических станций (см. рис. 2) и уменьшением порога представительности данных от начала к концу анализируемого интервала (см. рис. 4). Отдельные всплески могут быть связаны с афтершоковыми последовательностями наиболее сильных землетрясений, что более отчетливо проявляется на графике изменений помесечного количества землетрясений (рис. 8, б).

С учетом данных рис. 8 были сформированы выборки землетрясений для разных временных интервалов. Рассчитанные для них полигоны частот внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений представлены на рис. 9; бросается в глаза наличие двух больших остроконечных пиков в дневное время. Анализ графиков, приведенных на рис. 9, показывает, что эти пики формировались в основном в период с 2010 по 2014 г., причем этот эффект довольно стабильно проявляется в разные годы

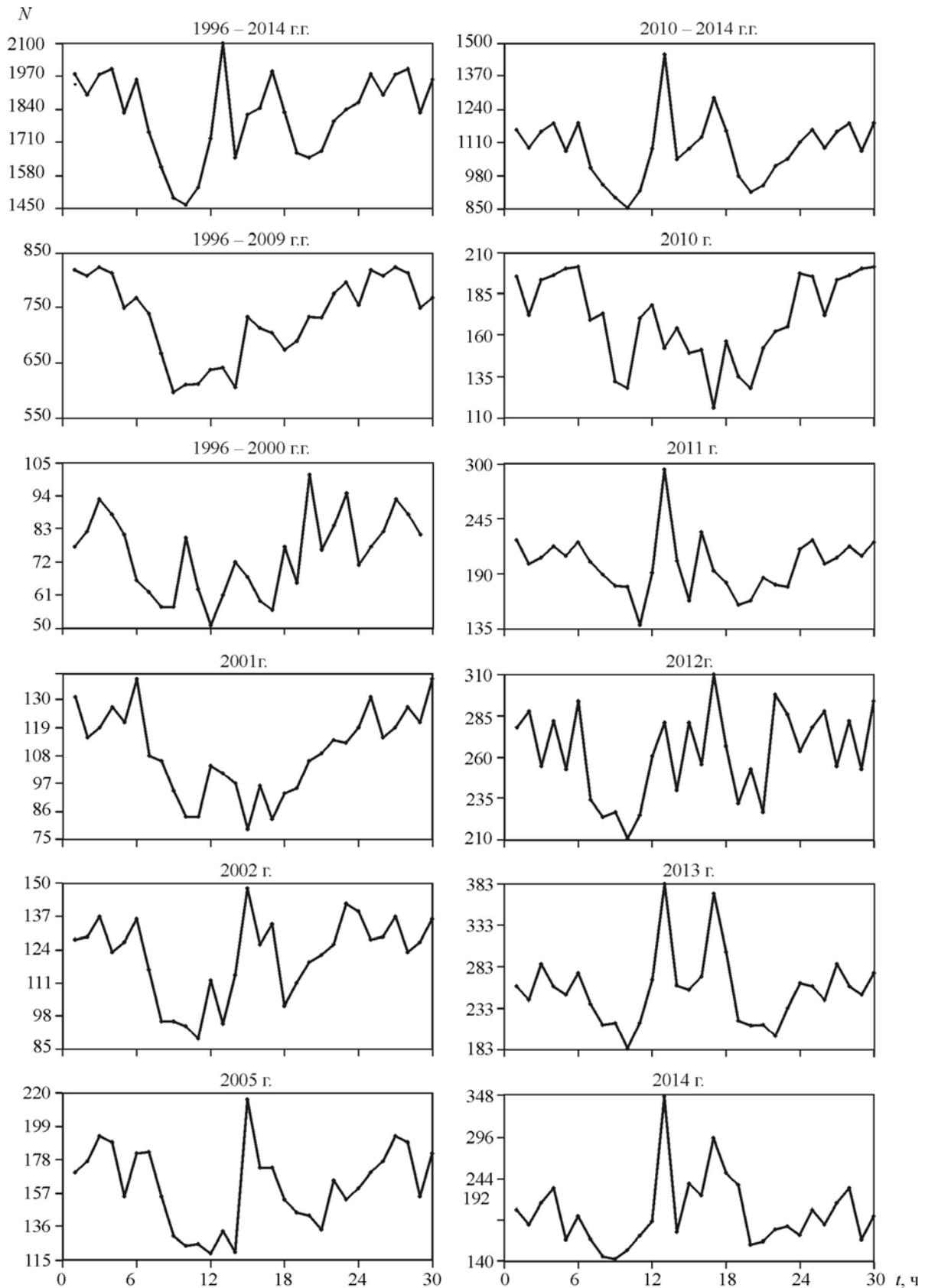


**Рис. 8.** Изменения ежегодного (а) и ежемесячного (б) количества землетрясений в исследуемом каталоге

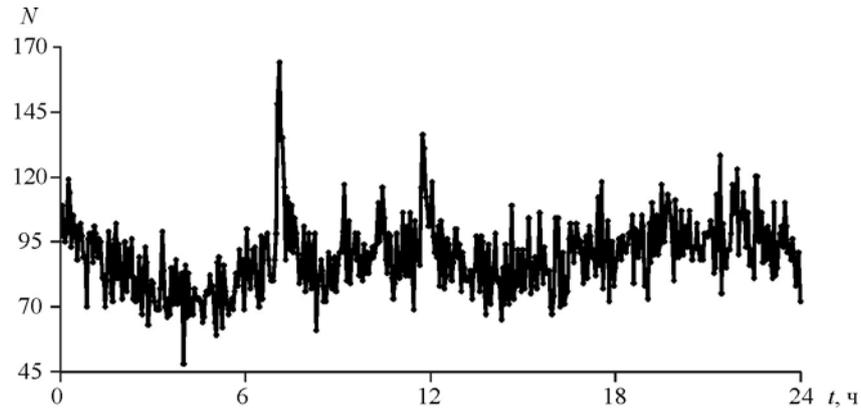
всего этого периода. Вместе с тем надо отметить, что большие дневные пики, хотя и с существенно менее выраженной двухмодальностью, есть и на графиках суточного хода в период с 1996 по 2009 г., особенно большие в 2002 и 2005 годах.

Для более детального исследования характера внутрисуточных изменений потока землетрясений на рис. 10 представлен полигон частот распределения внутри суток количества слабых землетрясений с  $M \leq 3.2$  в 3-минутных интервалах. Участок графика примерно с 5 до 13 ч по Гринвичу имеет сложную форму с постепенным ростом в его начале и наличием двух локальных широких максимумов, на вершинах которых возвышаются очень большие пики. Отчетливо видно, что эти пики формируются в очень узких временных интервалах длительностью менее 10 мин. Два наибольших пика соответствуют 7 ч 06 мин и 11 ч 45 мин по Гринвичу, а между ними располагаются два пика меньшей амплитуды в 9 ч 12 мин и 10 ч 27 мин.

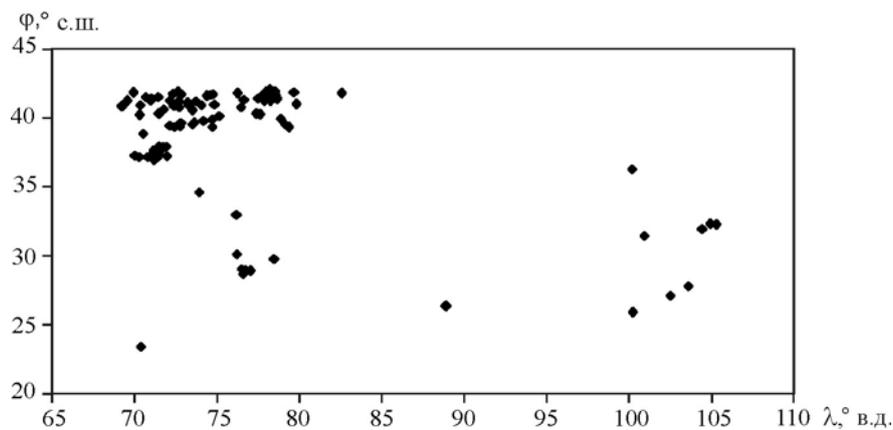
На рис. 11 изображена карта эпицентров событий, происшедших в максимуме с 7 ч 03 мин до 7 ч 06 мин. Основное количество событий группируется на северо-западе рассматриваемого района севернее  $35^\circ$  с.ш. Крайне узкая локализация этих событий во времени и пространстве дает основания рассматривать их в качестве взрывов или каких-то других техногенных событий. Поэтому исключим из каталога события, эпицентры которых расположены севернее широты  $\varphi = 35^\circ$  с.ш., и выполним анализ оставшихся землетрясений с  $\varphi \leq 35^\circ$  с.ш. В полученной выборке, которую можно рассматривать в значительной мере соответствующей собственно району Гималаев, их оказалось меньше 30 % всего каталога – 24 627 событий.



**Рис. 9.** Полигоны частот внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений  
 Время соответствует часовому поясу V



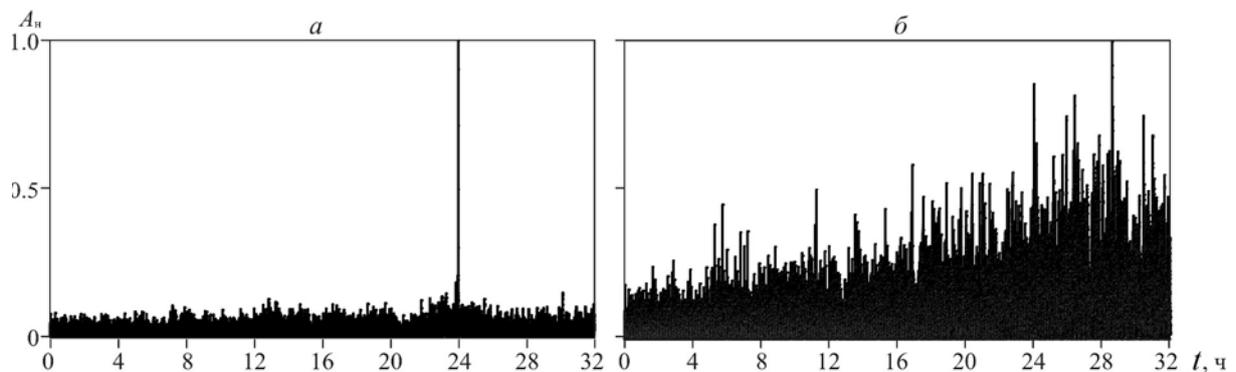
**Рис. 10.** Полигон частот внутрисуточного количества землетрясений с  $M \leq 3.2$  в 3-минутных интервалах. Время по Гринвичу



**Рис. 11.** Карта эпицентров событий, происшедших в исследуемом регионе за рассматриваемый период с 7 ч 03 мин до 7 ч 06 мин

### Суточная периодичность землетрясений в южной части исследуемого региона

Ниже везде рассматриваются только выборки землетрясений, координаты эпицентров которых удовлетворяют условию  $\varphi \leq 35^\circ$  с.ш. На рис. 12 представлены нормированные периодограммы Ломба–Скаргла выборок землетрясений разной энергии. В выборке слабых землетрясений с  $M \leq 3.2$  (см. рис. 12, а) суточная периодичность



**Рис. 12.** Нормированные периодограммы Ломба–Скаргла выборок землетрясений с  $M \leq 3.2$  (а) и  $M > 3.2$  (б)

выражена очень ярко. В выборке сильных землетрясений с  $M > 3.2$  (см. рис. 12, б) суточный пик тоже заметен на фоне шумов, но есть еще два-три пика сравнимой и один пик даже большей амплитуды. Это означает, что, как и во всем каталоге большого региона, в районе собственно Гималаев суточная периодичность характерна главным образом для слабых землетрясений.

В работе [Сидорин, 2009б] была установлена зависимость фазы суточной периодичности землетрясений от долготы и предложена процедура коррекции времени землетрясения на долготу. Ниже представлены результаты анализа выборок землетрясений, время в очаге которых было скорректировано в соответствии с указанными работами.

Выборки землетрясений разной энергии были сформированы по тем же принципам, что и ранее. Границы интервалов выборок по магнитуде и количество вошедших в них событий приведены в таблице. Для каждой из этих выборок были рассчитаны распределения почасового количества землетрясений, а по этим данным определены коэффициенты корреляции  $R$  суточного хода выборки землетрясений магнитудой  $2.6 < M \leq 3.2$  с суточным ходом землетрясений в разных выборках. Главная особенность характера зависимости значений  $R$  от магнитуды событий в выборке – изменения знака  $R$  с положительного на отрицательный при переходе к выборке самых сильных землетрясений.

Параметры суточного хода землетрясений разной энергии

№ п/п	Магнитуда	$N$	$R$	$A_n, \%$	$S_n$	$p/p_r$	$L/L_r$	$\theta/\theta_r$
1	$M \leq 2.6$	4230	0.68	29.4	10.2	3.5E-13/5.3E-08	5.4/4.1	-67/-91
2	$2.6 < M \leq 3.2$	4808	1	34.8	11.9	4.3E-23/5.8E-12	7.2/5.1	-82/-84
3	$3.2 < M \leq 3.6$	6015	0.60	23.9	9.2	7.4E-18/2.0E-11	6.3/5.0	-116/-115
4	$3.6 < M \leq 3.9$	4526	0.36	8.8	2.6	0.31/0.26	1.1/1.2	-85/-51
5	$M > 3.9$	5048	-0.48	14.8	4.5	9.9E-05/0.09	3.0/1.6	+95/+47

*Примечания.*  $N$  – объем выборки;  $R$  – коэффициент корреляции суточного хода выборки землетрясений магнитудой  $2.6 < M \leq 3.2$  с суточным ходом землетрясений в разных выборках;  $A_n, S_n$  – амплитуда сглаженных циклическим скользящим окном 9 ч внутрисуточных вариаций в виде отношения к среднему за сутки количеству землетрясений размаха вариаций  $A_n$  и среднеквадратического отклонения  $S_n$ ;  $p, p_r$  – значимость суточной периодичности по обычному ( $p$ ) и робастному ( $p_r$ ) критерию Рэля–Шустера;  $L, L_r$  – отношение длины результирующего вектора к  $N^{0.5}$  для обычного ( $L$ ) и робастного ( $L_r$ ) алгоритмов;  $\theta, \theta_r$  – аргумент результирующего вектора Рэля–Шустера в градусах по обычному ( $\theta$ ) и робастному ( $\theta_r$ ) алгоритмам.

Качественный анализ значений  $p$  и  $\theta$  показывает, что суточная периодичность большой амплитуды, характерная для слабых событий, исчезает (становится незначимой даже при оценке классическим методом) в выборке землетрясений с  $3.6 < M \leq 3.9$ . Однако она вновь становится значимой (условно, с учетом сделанных выше оговорок) в выборке самых сильных событий, причем в этой выборке  $\theta = 95^\circ$ , в то время как во всех других выборках этот угол отрицательный со средним значением около  $-88^\circ$ , т.е.  $\Delta\theta = 183^\circ$ . Таким образом, получено еще одно подтверждение того, что внутрисуточные изменения количества землетрясений в потоках слабых и сильных землетрясений региона происходят противофазно ( $\Delta\theta \approx 180^\circ$ ).

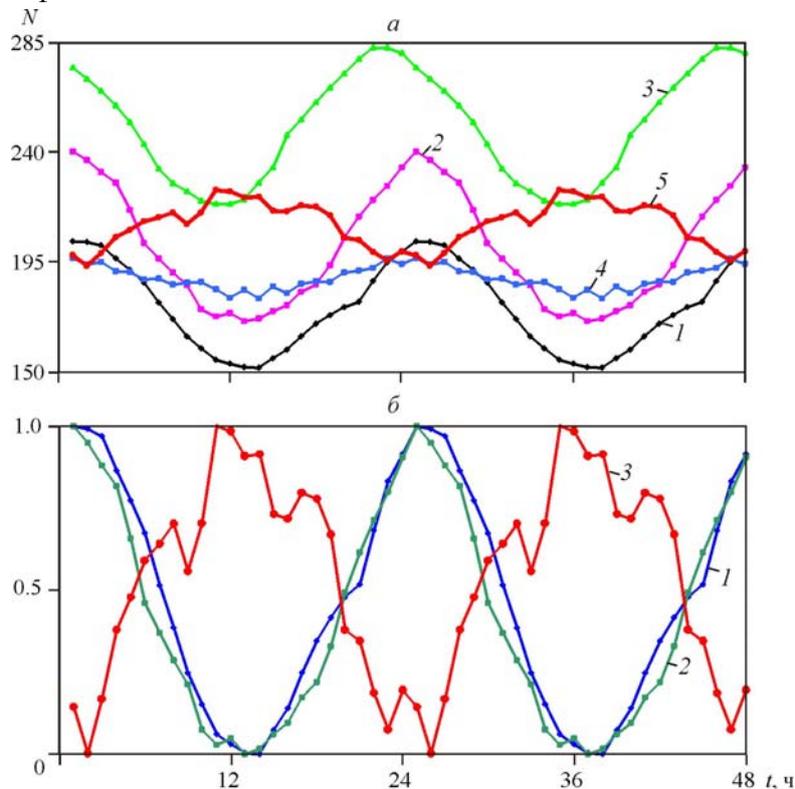
Необходимо еще раз подчеркнуть, что значимость  $p$  рассчитана по годографу Рэля–Шустера классическим методом, без предварительного осреднения по суткам. Поэтому на полученную оценку могло повлиять наличие в выборках группированных сейсмических событий, в частности афтершоков. Аналогичные соображения могут быть выска-

заны по поводу аргумента результирующего вектора Рэлея–Шустера  $\theta$ . Вернемся к этому вопросу ниже.

Амплитуды суточного хода  $A_n$  и  $S_n$  рассчитывались по внутрисуточным распределениям почасовых значений количества землетрясений, сглаженным скользящим циклическим средним с окном длительностью 9 ч. Приведенные в таблице данные свидетельствуют об уменьшении амплитуды внутрисуточных изменений, оцененных разными способами, по мере перехода от слабых землетрясений к более сильным. Однако в выборке самых сильных землетрясений амплитуда суточного хода вновь возрастает.

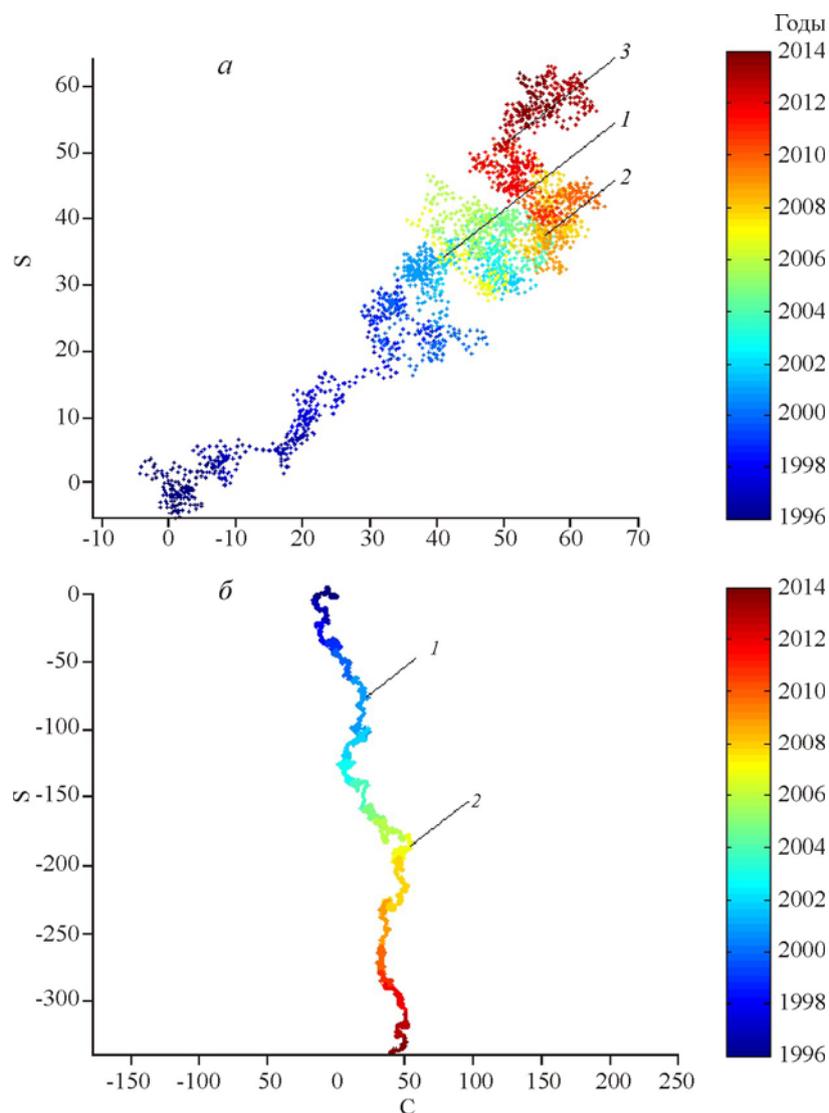
Графики суточного хода в рассматриваемых выборках землетрясений изображены на рис. 13. На рис. 13, *a* сопоставлены данные для всех пяти выборок, параметры которых приведены в таблице. Видно, что даже в выборке землетрясений с  $3.6 < M \leq 3.9$ , в которой суточный ход статистически незначим, его форма и фазы совпадают с аналогичными характеристиками других выборок более слабых землетрясений. Отличие заключается в существенно меньшей амплитуде, что, по-видимому, и делает эти изменения статистически незначимыми. Изменения в выборке самых сильных землетрясений с  $M > 3.9$  имеют заметно большую амплитуду, но происходят в противофазе с изменениями всех выборок более слабых землетрясений.

Для более детального сопоставления формы суточного хода количества землетрясений на рис. 13, *б* представлены изменения суточного хода двух выборок самых слабых землетрясений и одной выборки самых сильных землетрясений, нормированные на размах внутрисуточных вариаций соответствующей выборки. Графики выборок слабых землетрясений практически неотличимы друг от друга, а график сильных землетрясений, хотя и имеет почти такую же форму, немного осложненную шумами, но находится с ними в противофазе.



**Рис. 13.** Сглаженные циклическим скользящим окном длительностью 9 ч внутрисуточные вариации количества землетрясений (*a*) с  $M \leq 2.6$  (1);  $2.6 < M \leq 3.2$  (2);  $3.2 < M \leq 3.6$  (3);  $3.6 < M \leq 3.9$  (4);  $M > 3.9$  (5) и те же вариации, нормированные на размах, для выборок  $M \leq 2.6$  (1);  $2.6 < M \leq 3.2$  (2) и  $M > 3.9$  (5) (*б*). Для большей наглядности показаны два периода

Выше отмечалось, что противофазный характер внутрисуточных изменений потоков сильных и слабых землетрясений обусловлен главным образом группированными событиями. Для исследования вклада таких событий в суточную периодичность землетрясений южной части региона были построены робастные годографы Рэлея–Шустера для выборок слабых и сильных землетрясений (рис. 14). Робастность обеспечивалась использованием единичных среднесуточных векторов [Сидорин, 2013а, б]. Видно, что в данном случае практически точной противофазности, характерной для оценок, полученных по полным выборкам, нет. Тем не менее фазовый сдвиг значителен, что иллюстрирует рис. 14. Для годографа слабых землетрясений угол  $\theta$  практически не изменился:  $-84^\circ$  вместо  $-82^\circ$  по обычному алгоритму (см. таблицу). Изменения практически отсутствуют в выборках с высоким уровнем значимости суточной периодичности, в то



**Рис. 14.** Годографы суточного периода землетрясений с  $M > 4.2$  (а) и  $2.6 < M \leq 3.2$  (б), построенные по результирующим векторам отдельных суток всего интервала наблюдений

$S$ ,  $C$  – сумма синусов и косинусов этих векторов соответственно алгоритму [Сидорин, 2009, 2013а, б]. Цифрами отмечены точки на годографах, соответствующие следующим датам: а: 1 – 02.03.2002 г.; 2 – 10.06.2004 г.; 3 – 17.07.2011 г.; б: 1 – 06.05.2001 г.; 2 – 02.03.2007 г.

время как при невысокой ее значимости наблюдается нестабильность оценок. Так, в выборке землетрясений с  $M > 3.9$  угол уменьшился на  $48^\circ$ . При среднем значении аргумента по всем выборкам слабых землетрясений  $\theta = 85^\circ$  разность с аргументом вектора сильных землетрясений составила  $\Delta\theta = 133^\circ$ . И главное, оценка значимости суточной периодичности в этой выборке сильно ухудшилась, т.е. при использовании робастного алгоритма периодичность стала незначимой. Это, как и в случае анализа данных по всему региону, отражает тот факт, что суточная периодичность сильных землетрясений в исследуемом регионе обусловлена главным образом группированными событиями.

Эта особенность региона представляет самостоятельный интерес. Кроме того, отметим, что совокупность данных, по крайней мере, свидетельствует о достаточно выраженной тенденции к противофазному характеру потоков сильных и слабых землетрясений. Схожие тенденции отмечены ранее в нескольких других регионах.

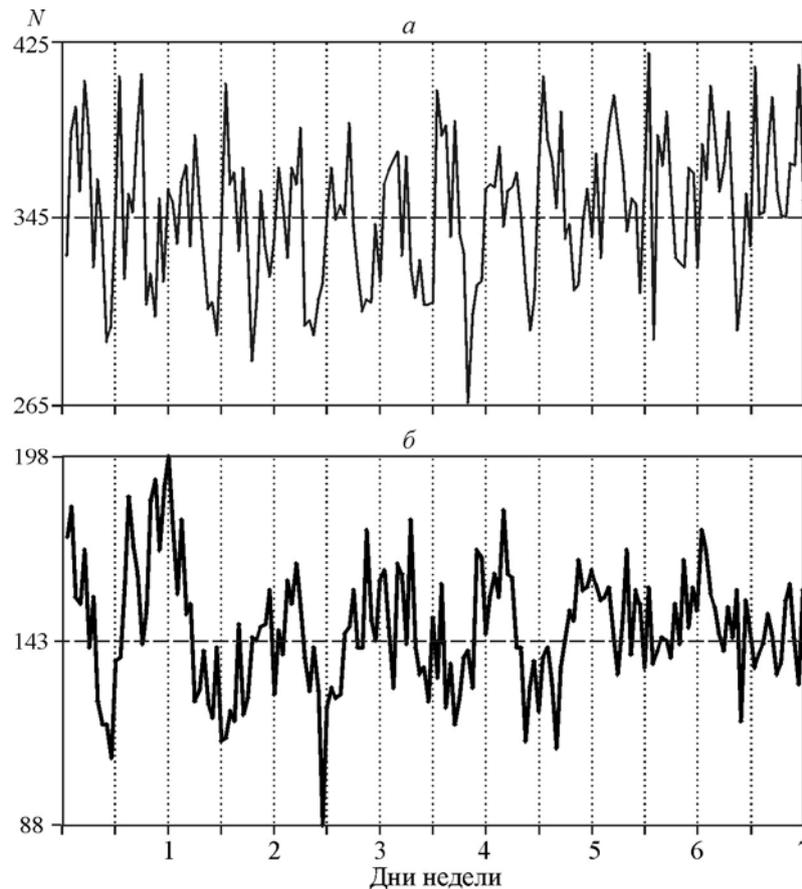
### Внутринедельные распределения почасового количества землетрясений

Один из критериев техногенных проявлений в каталоге землетрясений – наличие в нем эффекта выходного дня [Зотов, 2007; Сидорин, 2014]. В случае кажущейся суточной периодичности, обусловленной шумовой дискриминацией сигналов на фоне техногенных помех, этот эффект проявляется, в частности, повышенным количеством землетрясений в дневное время выходных дней и уменьшением в выходные дни среднеквадратического отклонения почасовых значений количества землетрясений [Сидорин, 2010, 2014]. Для поиска эффекта выходного дня в исследуемом каталоге землетрясений были построены внутринедельные распределения почасового количества землетрясений отдельно для двух выборок землетрясений – северной ( $\varphi > 35^\circ$  с.ш.) и южной ( $\varphi \leq 35^\circ$  с.ш.).

В северной выборке (рис. 15, а) обсуждаемый эффект проявляется очень отчетливо тем, что в послеполуденное воскресное время ни в один час количество землетрясений не опускается ниже уровня 345 событий в час. Это разительно отличается от картины, наблюдавшейся в другие дни недели. Суммарное количество землетрясений в воскресенье за эти часы примерно на 8 % больше, чем в среднем за аналогичные часы в рабочие дни. К выходным дням происходит закономерный рост общего за сутки количества землетрясений: от 335–340 по вторникам, средам и четвергам до 356 – в субботу и 362 – в воскресенье. Вместе с тем заметных отличий значений среднеквадратических отклонений в субботу и воскресенье от соответствующих значений в рабочие дни не обнаружено.

Недельный ход количества землетрясений в южной выборке (рис. 15, б) намного сложнее, но и здесь видны некоторые особенности суточного хода в субботу и воскресенье. Они проявляются, в частности, в существенно меньших значениях среднеквадратических отклонений в эти дни: в субботу и воскресенье они равны соответственно 10.3 и 12.8, во вторник, среду и четверг – находятся в пределах от 17.1 до 18.0, а в понедельник и вторник составляют 25.3 и 18.6.

Таким образом, в обеих анализируемых выборках обнаружены некоторые признаки проявления эффекта выходного дня. Однако для каждой из выборок подтвердился лишь какой-то один из двух использовавшихся критериев. Это не позволяет сделать уверенный вывод о реальности в данном случае обсуждаемого эффекта.



**Рис. 15.** Внутрисуточные распределения почасового количества землетрясений в разные дни недели (недельный ход)

Дни недели: 1–7 – соответственно понедельник–воскресенье

### Заключение

Выполнен анализ суточной периодичности землетрясений обширного региона, который можно в первом приближении обозначить как Гималайско-Тибетский регион с прилегающими территориями. На графиках суточного хода количества землетрясений северной части этой территории обнаружены два больших по амплитуде всплеска в дневное время, обусловленных, по-видимому, наличием в каталоге взрывов.

Поэтому далее исследования были сосредоточены главным образом на выборке землетрясений, относящейся к южной части региона, где основным структурным элементом являются горные сооружения Гималаев. В этом регионе суточный ход количества землетрясений имеет обычную форму, свойственную большинству других регионов, с большим количеством землетрясений ночью, чем днем. Амплитуда суточной периодичности быстро уменьшается по мере увеличения магнитуды землетрясений, но в выборке сильных землетрясений она снова возрастает, причем суточный ход становится противофазным относительно такового в выборках слабых землетрясений. Однако применение робастного алгоритма оценки методом Рэля–Шустера, заметно ослабляющего вклад группированных событий, уменьшает сдвиг фаз от  $183^\circ$  до  $133^\circ$ , а значимость суточной периодичности сильных землетрясений ухудшается при этом от  $p \approx 10^{-4}$  до  $p_r \approx 9 \cdot 10^{-2}$ , т.е. суточная периодичность становится незначимой. Это показы-

вает большой вклад группированных событий в генезис суточной периодичности сильных землетрясений. Оценки параметров суточной периодичности слабых землетрясений обоими методами дают практически совпадающие результаты.

Результаты исследования внутринедельных распределений почасового количества землетрясений дают основания предполагать наличие эффекта выходного дня даже для территорий с заведомо низким уровнем техногенных помех. Это еще одно свидетельство в пользу кажущейся природы суточной периодичности, обусловленной эффектами шумовой дискриминации сейсмических волн при их регистрации на сейсмических станциях. Эффект возникает не в эпицентре землетрясения, а на сейсмической станции. Станции региональных сейсмических сетей, а тем более мировой сейсмической сети, могут находиться в очень разных условиях по уровню природных и техногенных помех и его изменениям в течение суток. И этот шум может очень сильно отличаться от того, который характерен для эпицентральной зоны того или иного землетрясения.

### Литература

- Адушкин В.В.* Сильные природно-техногенные землетрясения как особый вид триггерной сейсмичности // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2013. С. 10–33.
- Буртман В.С.* Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозое. М.: ГЕОС, 2012. 188 с. (Тр. Геол. ин-та. Вып. 603).
- Годзиковская А.А.* Задача распознавания карьерных взрывов и местных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. С. 232–236.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я.* Повышение робастности и устойчивости оценок параметров годографов Рэлея–Шустера с помощью различных способов нормировки векторов // Сейсмические приборы. 2015а. Т. 51, № 2. С. 56–80.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я.* Тестирование метода годографов Рэлея–Шустера на модельных временных рядах и потоках землетрясений // Сейсмические приборы. 2015б. Т. 51, № 3. С. 59–84.
- Еременко В.А., Еременко А.А., Рашева С.В., Турунтаев С.Б.* Влияние взрывов на техногенную сейсмичность в районе Таштагольского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 5. С. 66–74.
- Журавлев В.И., Лукк А.А.* Полуденная активизация сейсмичности в Турции и ряде других регионов мира // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 4. С. 31–57.
- Зотов О.Д.* Эффект выходных дней в сейсмической активности // Физика Земли. 2007. № 12. С. 27–34.
- Зотов О.Д., Гульельми А.В.* Проблемы синхронизма электромагнитных и сейсмических событий в динамической системе магнитосфера–техносфера–литосфера // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 19–25.
- Николаев А.В.* Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 5–15.
- Сидорин А.Я.* Полуденный эффект во временных рядах землетрясений и сейсмического шума // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 6. С. 822–827.
- Сидорин А.Я.* Суточная периодичность землетрясений Средней Азии. Ч. 5. Каталог Киргизской цифровой широкополосной сейсмической сети KNET // Сейсмические приборы. 2007. Вып. 43. С. 61–78.

- Сидорин А.Я.* О применении метода Рэля–Шустера в исследованиях периодичности землетрясений // Сейсмические приборы. 2009а. Т. 45, № 3. С. 29–40.
- Сидорин А.Я.* Суточная периодичность землетрясений и ее сезонные изменения // Сейсмические приборы. 2009б. Т. 45, № 4. С. 69–84.
- Сидорин А.Я.* Сопоставление свойств суточной периодичности сейсмического шума, землетрясений и нагрузки промышленной электрической сети // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37, № 4. С. 66–88.
- Сидорин А.Я.* Причина необычной суточной периодичности сейсмических событий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 2. С. 55–70.
- Сидорин А.Я.* Различия внутрисуточных фазовых диаграмм потоков землетрясений разной энергии // Сейсмические приборы. 2013а. Т. 49, № 2. С. 71–84.
- Сидорин А.Я.* Особенности суточной периодичности землетрясений Японии // Сейсмические приборы. 2013б. Т. 49, № 3. С. 55–84.
- Сидорин А.Я.* Эффект выходного дня в сейсмичности Японии // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 2. С. 64–82.
- Сидорин А.Я.* Поиск техногенных эффектов в каталоге землетрясений Гармского полигона // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 1. С. 80–94.
- Смирнов В.Б.* Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. 1. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С. 7–22.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования / Ред. В.И. Макаров. М.: Науч. мир, 2005. 400 с.
- Уфимцев Г.Ф.* Тектонический рельеф Тибет–Гималаев // Литосфера. 2004. № 2. С. 3–15.
- Ellsworth W.L.* Injection-induced earthquakes // Science. 2013. V. 341, N 6142. P. 142–143. doi: 10.1126/science.1225942.
- Kiszely M.M.* Discriminating of small earthquakes from quarry-blasts in the Vértes Hills, Hungary using complex analysis // Acta Geodetica et Geophysica Hungarica. 2009. V. 44, N 2. P. 227–244.
- Utsu T.* Statistical features of seismicity // International handbook of earthquake and engineering seismology / Eds W.H.K. Lee, H. Kanamory, P. Jennings, C. Kisslinger. Pt. A. Acad. Press, 2002. P. 719–732.

#### *Сведения об авторах*

**ЖУРАВЛЕВ Владимир Ильич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-90-35. E-mail: vladimirzhuravlevtver53@yandex.ru

**СИДОРИН Александр Яковлевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-42-68. E-mail: sidorin@ifz.ru

## ON NATURAL AND ANTHROPOGENIC ORIGIN OF THE DIURNAL EARTHQUAKE PERIODICITY USING THE HIMALAYA AS AN EXAMPLE

V.I. Zhuravlev, A.Ya. Sidorin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** An analysis of the diurnal periodicity of earthquakes in the Himalayan-Tibetan orogen is performed using a sample of earthquakes from the world catalog compiled by the International Seismological Centre. The results obtained appear to be in agreement with the hypothesis of noise discrimination. However, we suggested a tendency of the strong earthquakes to occur in the opposite phase with the diurnal periodicity of the weak earthquake flow. Two large peaks of the seismic events in the daytime caused probably by blasts are revealed in the north-west part of the region. Natural and anthropogenic mechanisms of the diurnal periodicity of earthquake are discussed.

*Keywords:* Himalayan-Tibetan orogen; earthquake catalog, diurnal periodicity; noise discrimination, blasts, opposite phase changes.