

УДК 550.34

## О СУТОЧНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ГРЕЦИИ: СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ РАЗНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2016 г. А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин

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

В конце 2007 г. начала работать Объединенная сейсмическая сеть Греции, в результате чего к 2011 г. качество наблюдений значительно улучшилось. В частности, заметно снизился уровень представительной магнитуды и повысилось количество ежегодно регистрируемых событий. Создание новой системы наблюдений существенно расширило возможности исследований закономерностей проявления сейсмичности. В связи с этим авторы вернулись к вопросу о существовании суточной периодичности представительных землетрясений Греции, которая была обнаружена ранее в каталоге землетрясений до 2011 г. Для этого по каталогу землетрясений Греции за период 2011 г. – июнь 2016 г. построены 18 выборок землетрясений разной энергии, для каждой из которых сформированы ряды количества землетрясений и рассчитан средний суточный ход количества землетрясений. Для повышения надежности выводов сопоставлялись данные двух регионов. С высокой степенью значимости установлено, что для строго представительных землетрясений суточный ход отсутствует. Это отличается от оценок, сделанных ранее при анализе каталога землетрясений той же территории в эпохи 1995–2004 и 2005–2010 гг., т.е. до создания Объединенной сейсмической сети Греции. Вновь полученные результаты согласуются с гипотезой шумовой дискриминации (наблюдательной селекции), объясняющей возникновение суточной вариации потока землетрясений с различной эффективной чувствительностью сейсмической сети в дневное и ночное время.

*Ключевые слова:* землетрясения, суточная периодичность, представительность каталога землетрясений, представительные землетрясения, Греция.

### Введение

В первом приближении сейсмичность можно рассматривать как стохастический самоподобный процесс, однако имеются и значимые отклонения от случайности. Это, в частности, группирование землетрясений, наиболее ярким примером которого являются афтершоковые последовательности. Подобные эффекты, к которым можно отнести и

различные периодичности землетрясений, в том числе суточную, несут дополнительную информацию о генезисе сейсмичности, и поэтому их изучение крайне важно для понимания физики сейсмического процесса.

Существуют две основные гипотезы о механизмах возникновения суточной периодичности потоков землетрясений. Первая из них рассматривает суточную периодичность как реальное явление, возникающее в результате взаимодействия земной коры с внешними геосферными оболочками, в том числе атмосферой, ионосферой и техносферой [Davison, 1938; Shimshoni, 1971, 1972; Marzocchi et al., 2001; Журавлев и др., 2006; Зотов, 2007; Сидорин, 2010; Беляков и др., 2011; Богомолов и др., 2013]. Альтернативная точка зрения состоит в интерпретации суточной периодичности как явления кажущегося, обусловленного шумовой дискриминацией [Сидорин, 2013] сейсмических волн в процессе их регистрации на фоне помех с периодически меняющимся уровнем [Davies, 1972; Flinn et al., 1972; Knopoff, Gardner, 1972; Сидорин, 2004; Atef et al., 2009]. До настоящего времени нет однозначного ответа на этот вопрос. Хотя большинство данных свидетельствует в пользу гипотезы шумовой дискриминации, некоторые факты ей противоречат. Один из наиболее весомых аргументов, противоречащих гипотезе шумовой дискриминации, – это обнаружение статистически значимой суточной периодичности сильных представительных землетрясений Греции [Децеровский, Сидорин, 2012а].

В указанной работе анализировались данные за период с 1964 по 2010 г. Предпринятые позже попытки перепроверить сделанные выводы на материале наблюдений более позднего периода с привлечением данных за 2011–2012 гг. показали, что в анализируемом каталоге имеются «дефекты неясной природы», первое появление которых было датировано серединой 2008 г. [Децеровский, Сидорин, 2012б]. В частности, была обнаружена «экзотическая перестройка сейсмического процесса», нехарактерная для естественной сейсмичности. Было высказано подозрение, «что в каталоге могут присутствовать не вполне понятные методические артефакты... Одно из возможных предположений состоит в том, что в середине 2008 г. произошло изменение алгоритма оценки магнитуды событий...» [Децеровский, Сидорин, 2012б. С. 16]. Вместе с тем проведенная дополнительная проверка результатов, полученных по данным за 1964–2010 гг., показала, что с формально-статистической точки зрения наличие в каталоге суточной периодичности представительных землетрясений было установлено абсолютно достоверно, т.е. нет ни малейших сомнений в том, что до 2010 г. такая периодичность реально присутствовала в каталоге.

На рубеже 2010–2011 гг. в системе мониторинга сейсмичности произошли кардинальные улучшения, обусловленные развитием Объединенной сейсмической сети Греции, HUSN, в результате чего каталог стал намного полнее и лучше. В частности, существенно снизилось значение представительной магнитуды землетрясений  $M_c$  как по каталогу в целом, так и по отдельным регионам [D'Alessandro A. et al., 2011; Papanastassiou, 2011; Попандонуло и др., 2016]. Это намного увеличило интенсивность потока регистрируемых событий и расширило возможности применения статистического анализа для поиска суточной периодичности землетрясений. Поэтому было решено вернуться к анализу суточной периодичности землетрясений Греции, но уже на основе новых экспериментальных данных.

Основная цель настоящей работы – проверить наличие суточной периодичности землетрясений Греции, в первую очередь представительных, по новым, гораздо более качественным во всех отношениях сейсмическим данным.

### Исходные данные

Анализировался каталог, составленный Институтом геодинамики Греции (National Observatory of Athens, Institute of Geodynamics. URL: <http://www.gein.noa.gr/index-en.htm>) с 2011 г. по июнь 2016 г. Всего в каталоге в эту эпоху насчитывается 125 760 событий. Их распределение по магнитудам приведено в табл. 1. Фоном в таблице выделены выборки представительных землетрясений (с учетом пространственной неоднородности уровня представительности).

**Таблица 1.** Количество событий в выборках разной энергии в полном каталоге землетрясений Греции и по регионам «Центр» (Ц) и «Периферия» (П)

№	Код энергии	Диапазон магнитуд	«Центр»	«Периферия»	Всего
1	00TO14	$M < 1.5$	28 665	6757	35 422
2	15TO21	$1.5 \leq M < 2.2$	33 205	20 950	54 155
3	22TO26	$2.2 \leq M < 2.7$	7546	14 710	22 256
4	27TO30	$2.7 \leq M < 3.1$	2362	6133	8495
5	31TO35	$3.1 \leq M < 3.6$	977	2850	3827
6	36TO99	$3.6 \leq M$	430	1175	1605
Всего			73 185	52 575	125 760

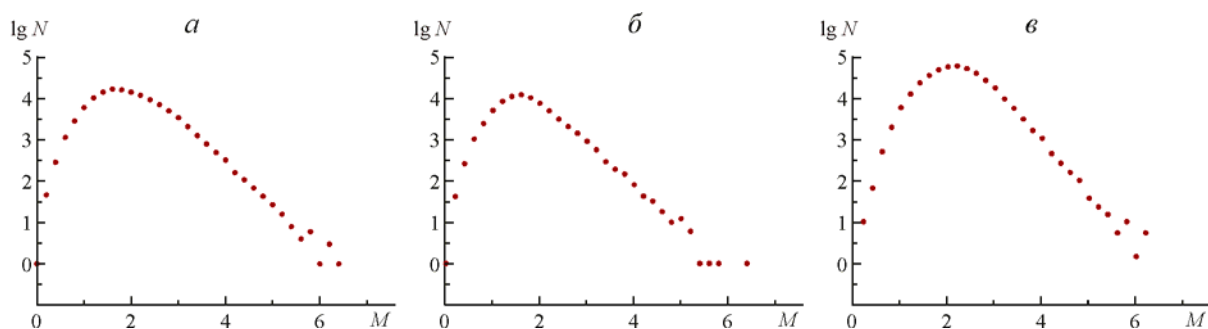
*Примечание.* Графически выделены (закрашены) выборки землетрясений:

- «строго непредставительные» (т.е. непредставительные по всей площади каталога);
- гарантированно представительные по всей площади.

Согласно [Попандоуло и др., 2016], в эпоху с 2011 по 2014 г. значение  $M_c$  в центральной части полигона заметно ниже, чем по полигону в целом. Для анализа суточной периодичности представительных землетрясений крайне важна точная оценка порога представительности, включая учет возможных территориальных неоднородностей этого порога. Поэтому мы дополнительно выделили для отдельного рассмотрения центральную часть территории (район «Центр» – Ц), ограниченную многоугольником с координатами вершин: (36.5 N; 21.0 E), (39.0 N; 21.0 E), (39.5 N; 20.0 E), (41.5 N; 21.5 E), (41.5 N; 26.0 E), (39.0 N; 25.0 E), (36.5 N; 25.0 E), (36.5 N; 21.0 E). Согласно [Попандоуло и др., 2016], в пределах этой территории порог представительности нигде не хуже 1.8, а на значительной части выделенного региона не хуже 1.6. Вся остальная территория была названа «периферия» – П.

Заметим, что при оценке  $M_c$  по каталогу в целом порог представительности часто получается на 0.5–1 ед. ниже, чем при использовании критерия строгой представительности, учитывающего пространственную неоднородность  $M_c$ . Это связано с тем, что основная часть событий, включенных в каталог, относится к тем частям региона, где сеть лучше и порог представительности ниже. Периферийные регионы с меньшей сейсмической активностью и с худшей представительностью дают менее значимый поток слабых событий и почти не влияют на вид графика повторяемости около его вершины. Однако более сильные события при этом регистрируются по всей территории. В результате получается, что сильные события собраны со всей территории, а слабые – только с той ее части, где сеть наиболее чувствительна. Все вместе это приводит к занижению значений  $M_c$ , если они оцениваются по всему каталогу в целом, а каталог имеет сильную пространственную неоднородность по  $M_c$  [Децеровский и др., 2016г].

Анализ показывает, что максимум графика повторяемости и для каталога в целом (рис. 1, *а*), и для событий центральной части района (рис. 1, *б*) соответствует уровню  $M_c = 1.6$ . При этом сколько-нибудь заметный дефицит событий в случае полного каталога начинает проявляться начиная с  $M = 2.2$  или даже  $M = 2.4$ . Оценки показывают, что дефицит, или количество пропущенных, событий с  $M \approx 1.5$  составляет 0.3 лог. ед., т.е. в каталоге присутствует лишь половина всех реально произошедших землетрясений такой энергии. Для событий с  $M \approx 2.0$  дефицит значительно меньше и вряд ли превышает 10 %. Для центральной части района дефицит событий начинает ощущаться лишь при  $M < 1.6$ . Для событий с  $M \approx 1.0$  дефицит составляет примерно 0.4 лог. ед., а дефицит событий с  $M \approx 1.5$  опять-таки составляет первые проценты (см. рис. 1, *б*).



**Рис. 1.** Графики повторяемости землетрясений за 2011–2016 гг. по данным полного каталога (*а*) и данным для регионов Ц (*б*) и П (*в*)

График повторяемости для периферийной части района (см. рис. 1, *в*) существенно отличается от аналогичных графиков (см. рис. 1, *а*, *б*). Максимум графика в этом случае соответствует  $M = 2.2$ , а дефицит землетрясений заметен начиная с  $M = 2.8$ . Для событий с  $M \approx 2.4$  дефицит событий превышает 40 %.

Таким образом, для каталога в целом выборка землетрясений  $M \geq 2.5$  практически неотличима от представительной, хотя на крайней северо-восточной периферии района, согласно [Попандопуло и др., 2016. Рис. 6], представительность в отдельных точках снижается до 3.0 и хуже. Выборка событий с  $M \geq 2.0$  может считаться условно представительной. Для центральной части района строго представительной является выборка с  $M \geq 2.0$ . Условно представительной можно назвать выборку событий с  $M \geq 1.5$ . Выборка событий с  $M < 1.4$  является строго непредставительной. Напомним, что строго представительными мы называем выборки, построенные таким образом, чтобы заданный порог представительности соблюдался по всей (или почти по всей) территории, а строго непредставительными – такие, для которых верхняя граница энергии событий ни в какой части региона не превышает  $M_c$  [Децеровский, Сидорин, 2012а]. Для периферийной части района представительной является выборка событий с  $M \geq 3.0$ . При этом выборка строго непредставительных событий может быть сформирована только из событий с  $M < 1.6$ , так как в пределах региона П имеются отдельные локальные участки с подобными значениями  $M_c$  [Попандопуло и др., 2016. Рис. 6].

Подчеркнем, что оценки  $M_c$ , не учитывающие территориальную неоднородность каталога, часто вполне приемлемы, поскольку общее количество пропускаемых событий при этом обычно невелико и это не может сколько-нибудь существенно исказить результаты расчетов. Однако при оценке параметров суточной периодичности в настоя-

шей работе используется алгоритм, основанный на наложении эпох и связанный с накоплением и усилением полезного сигнала, что обеспечивает достаточно высокую чувствительность метода к различным слабым эффектам, если они повторяются с достаточной регулярностью. Поэтому в нашем случае очень важно полностью исключить из формируемых выборок представительных землетрясений даже небольшую долю субпредставительных событий, которые исчерпывающе регистрируются *почти* всегда *почти* на всей территории, но все же могут иногда пропускаться в отдельных территориальных ячейках при повышенном уровне шума. Другими словами, в эти выборки надо включать только те землетрясения, для которых эффект наблюдательной селекции гарантированно отсутствует.

Чтобы удовлетворить этому требованию, мы считали представительными только те события, которые заведомо удовлетворяют критерию  $M \geq M_c$  на всей рассматриваемой территории, причем значение  $M_c$  выбиралось с определенным запасом. Одновременно рассматривались выборки более слабых событий, которые являются условно представительными, т.е. *кажутся* представительными, если оценивать  $M_c$  по графику повторяемости для рассматриваемого каталога в целом (без его разбиения на территориальные ячейки). Естественно, рассматривались также и выборки землетрясений еще меньшей энергии, вплоть до строго непредставительных.

Полный список сформированных выборок и количество землетрясений в них приведены в табл. 1. В соответствии с общей схемой анализа суточной периодичности, предложенной нами в [Дещеревский, Сидорин, 2012а] и использованной в дальнейшем в работах [Дещеревский, Сидорин, 2012б, 2014а, б], расчеты должны проводиться по нескольким выборкам событий разной энергии. При этом среди этих выборок должны быть выборки строго представительных и строго непредставительных землетрясений, а также землетрясений с промежуточными энергиями. Учитывая эти требования, а также в целях обеспечения необходимого для расчетов минимального объема выборок сильных событий, мы решили сформировать выборки землетрясений с  $M < 1.5$ ;  $1.5 \leq M < 2.2$ ;  $2.2 \leq M < 2.7$ ;  $2.7 \leq M < 3.1$ ;  $3.1 \leq M < 3.6$ ;  $M \geq 3.6$ . Для краткости они ниже обозначены как выборки 00to14, 15to21, 22to26, 27to30, 31to35, 36to99.

Таким образом, мы внесли определенные изменения в границы диапазонов по сравнению с работой [Дещеревский, Сидорин, 2012а]. Понятно, что эти изменения связаны прежде всего с изменившимся составом каталога – резким увеличением количества слабых событий, включенных в каталог, и существенным снижением значения  $M_c$  по всей территории, прежде всего в центральном регионе.

Кроме того, из-за резкого увеличения количества регистрируемых событий и снижения порога представительности появилась возможность выделения регионов Ц и П, причем в каждом из них число событий достаточно для формирования полного спектра выборок с разными характеристиками, начиная от строго представительных и кончая строго непредставительными. Каждый из этих регионов значительно однороднее территориально (в смысле  $M_c$ ), чем весь регион в целом. Это позволяет обеспечить более точную локализацию энергетических уровней и сузить диапазон энергий землетрясений, определяемых как строго представительные, субпредставительные и т.д. Тем самым обеспечивается более точная привязка характеристик суточной вариации к событиям, относящимся к определенному типу (определенной группе) из вышеназванных.

Всего рассматривались 6 энергетических диапазонов. Выборки строились для двух регионов и одной календарной эпохи. Регионы в названии выборок закодированы символами «IN» (центр) и «OUT» (периферия).

Карта исследуемого района с обозначением границ региона Ц приведена на рис. 2.

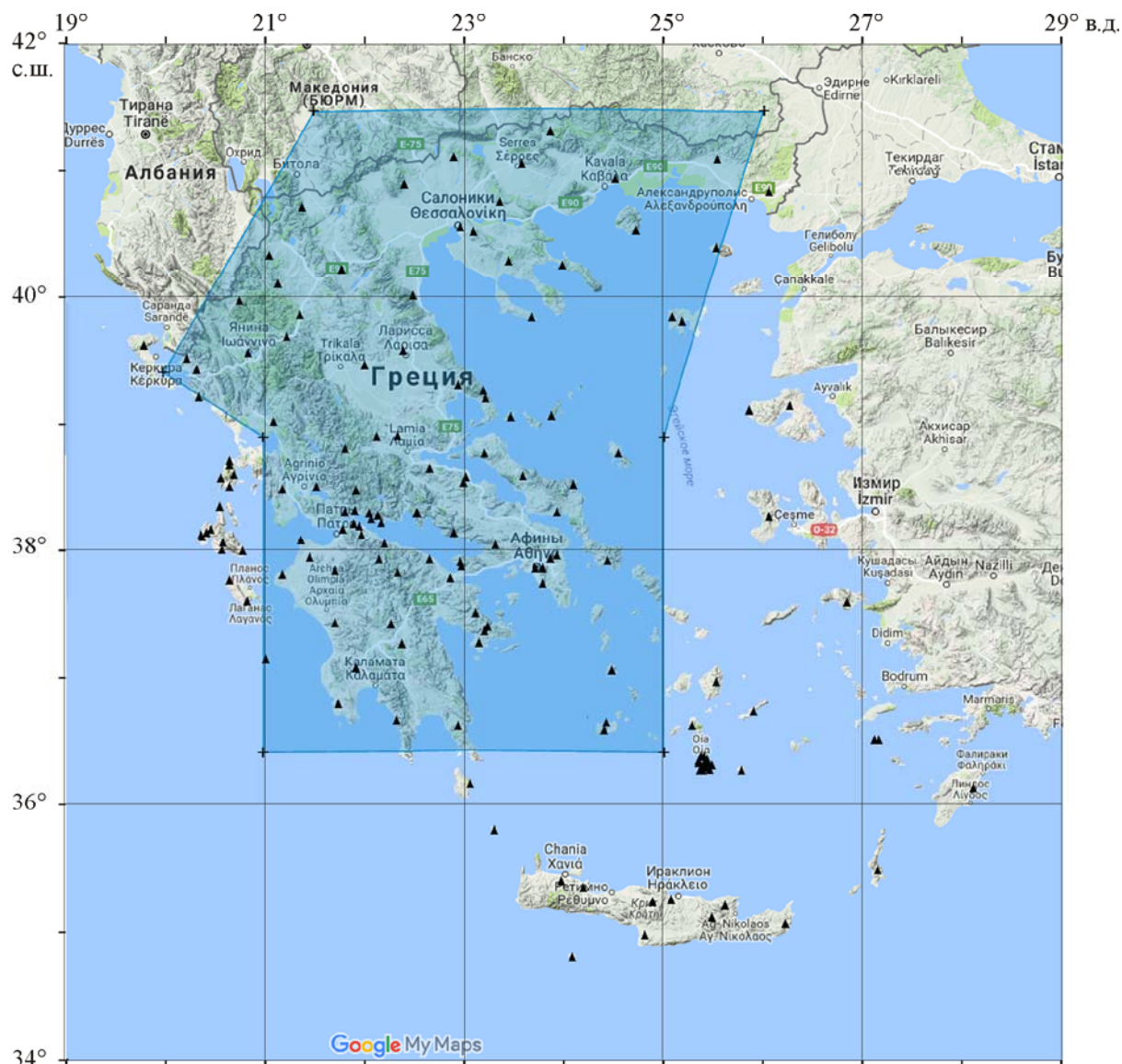


Рис. 2. Карта исследуемого района с обозначением границ региона Ц; остальная территория относится к региону П

Треугольники – сейсмические станции

### Формирование рядов числа землетрясений

Ряды числа землетрясений (РЧЗ) формировались по схеме, аналогичной [Децеровский, Сидорин, 2012а]. Для расчетов использовался модуль анализа сейсмической информации программы WinABD [Децеровский и др., 2016а–в]. По сейсмическим данным формировались временные ряды, показывающие количество сейсмических событий определенной энергии, произошедших за каждый час в пределах рассматриваемого региона.

Ранее мы использовали выборки с частичным перекрытием по энергии, что позволяло увеличить мощность выборок за счет отказа от их взаимной независимости [Децеровский, Сидорин, 2012а]. После 2011 г. характеристики каталога настолько улучшились, что какая-либо необходимость в этом отпала. Благодаря резкому снижению значения  $M_c$  после 2011 г. нам удалось сформировать не одну, а две представительные вы-



борки для региона П и четыре для региона Ц. Вне всяких сомнений, это принципиально улучшает возможности анализа характеристик суточной периодичности представительных землетрясений по сравнению с ранее выполненной работой [Децереvский, Сидорин, 2012а].

### Оценка среднего суточного хода

Суточный ход оценивался по методике [Децереvский, Сидорин, 1999]. Кривые суточного хода (ССХ) сглаживались окном 7 ч. Ширина окна была выбрана из компромиссных соображений. Расчеты показывают, что для выборок объемом от 10 тыс. событий и более сглаживание 7-часовым окном является оптимальным, а в некоторых случаях (при большом объеме выборки) даже избыточным. Для малых выборок (1000 событий и менее) оптимально более сильное сглаживание. Но мы сглаживали все кривые одинаково, чтобы обеспечить возможность более корректного сравнения амплитуд сглаженных среднесуточных функций. Стоит заметить, что практически все выборки малого объема сформированы по сильным событиям, для которых суточный ход плохо выражен. Вне зависимости от степени сглаживания ССХ суточный ход для этих выборок оказывается незначимым. Таким образом, для графиков количества сильных землетрясений точный выбор значения параметра сглаживания не так уж и важен.

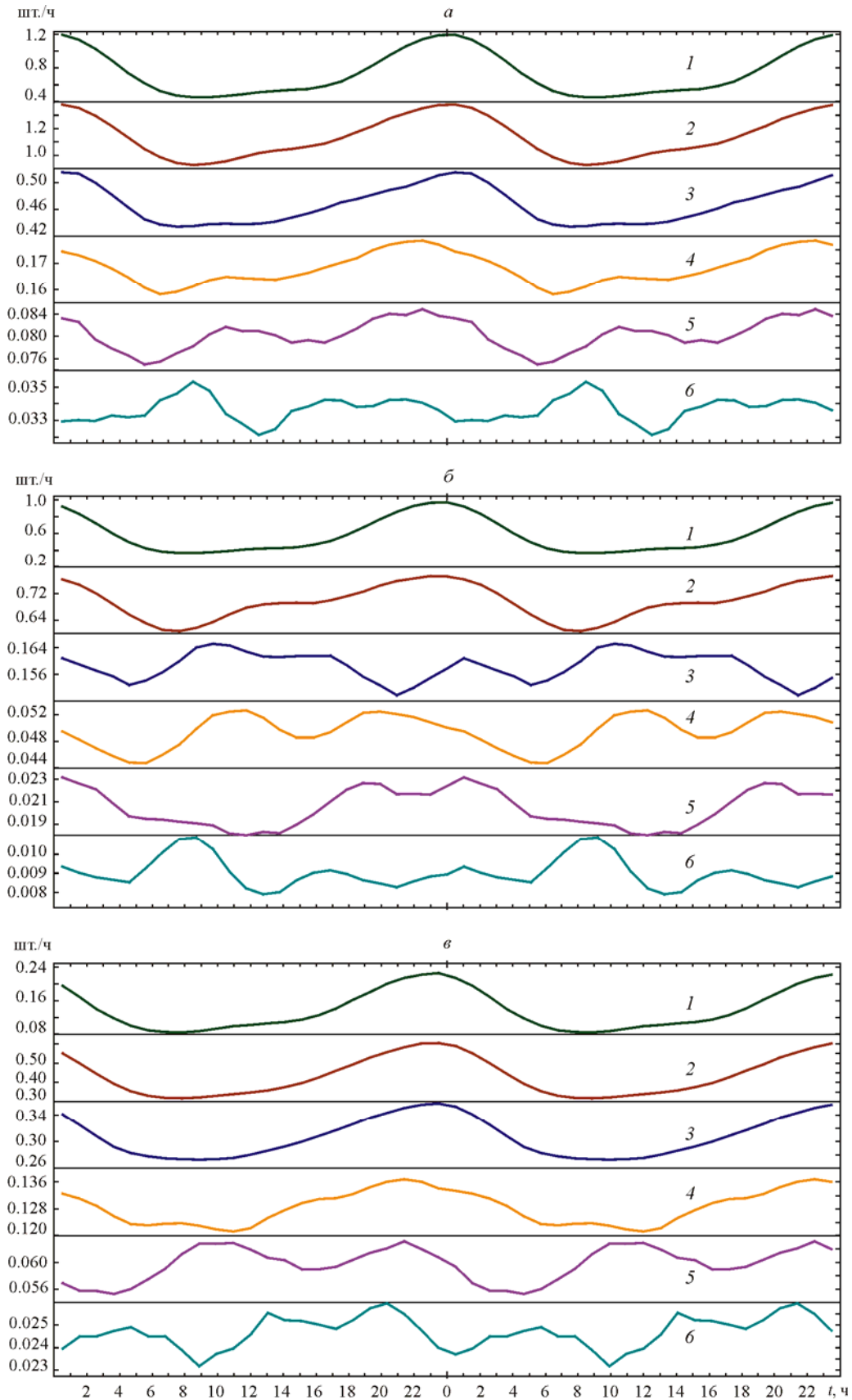
Построенные кривые ССХ для каталога в целом приведены на рис. 3, а, а для регионов Ц и П – на рис. 3, б, в. Видно, что суточный ход потоков событий для всех энергий синфазен, а его амплитуда максимальна для слабых событий.

Интересно, что когерентный суточный ход заметен и для наиболее сильных событий с энергией  $3.1 \leq M < 3.6$  и  $3.6 \leq M$  (см. рис. 3, а), хотя его амплитуда в этом случае невелика и не превосходит погрешность, а кривая суточного хода не очень четкая. Рассмотрим более детально графики суточного хода для выборки 27to30. Как видно на рис. 3, а, в целом по каталогу для событий с этой энергией имеется четкий суточный ход. Однако сравнение рис. 3, б и 3, в ясно показывает, что этот суточный ход обусловлен исключительно суточным ходом числа периферийных событий. Еще более четко этот эффект виден по выборке 19to26.

Вернемся к графикам повторяемости (см. рис. 1). Согласно этим графикам, выборка событий 27to30 для каталога в целом очень близка к представительной. Однако если рассмотреть отдельно регионы Ц и П, то можно увидеть, что картина оказывается более сложной, а именно: в регионе П выборка 27to30 не представительна, а в регионе Ц – представительна. При этом в регионе Ц значимый суточный ход количества событий отсутствует. Однако в объединенном регионе он все-таки виден за счет вклада событий из региона П.

В этой связи стоит заметить, что во многих работах, где используется «мягкий» критерий отбора представительных землетрясений, выборку 27to30 не без оснований посчитали бы неотличимой от представительной. Однако, как показывает сравнение рис. 3, а и 3, б, в, даже сравнительно небольшой вклад не представительных событий может существенно влиять на интегральные характеристики выборки. Этот результат показывает, насколько важно при изучении динамики сейсмического режима учитывать возможную пространственную неоднородность  $M_c$ .

Чтобы подчеркнуть возможное наличие в выборке не представительных событий, попадающих туда из-за несовпадения значений  $M_c$  на различных территориях, мы предлагаем называть подобные выборки субпредставительными, если для некоторых территориальных ячеек порог  $M_c$  оказывается более низким, чем критерий  $M_{min}$



**Рис. 3.** Графики ССХ землетрясений разной энергии по данным полного каталога (*a*) и данным для регионов Ц (*б*) и П (*в*)

1–6 – диапазоны магнитуд согласно табл. 1



формируемой выборки. При небольшом общем вкладе таких ячеек анализ графика повторяемости для региона в целом может оказаться недостаточно чувствительным и не выявить значимых отклонений графика повторяемости от линейной функции, особенно если рассматривается ограниченный диапазон магнитуд. Тем не менее вклад этих ячеек может оказаться вполне заметным при анализе более тонких эффектов динамики сейсмического потока – таких, например, как суточная вариация потока землетрясений.

### Абсолютная и относительная амплитуды среднего суточного хода

Амплитуда суточной вариации  $\sigma_{24}$  оценивалась как стандартное отклонение среднесуточной функции [Децеровский и др., 2016б]. Кроме того, амплитуду суточной вариации можно оценивать через ее размах  $R$ , равный разности максимального и минимального значений потока землетрясений за сутки  $R = N_{\max} - N_{\min}$ . В тех случаях, когда суточный ход хорошо выражен и сглаженная среднесуточная функция представляет собой гладкую кривую, близкую к синусоиде, две эти статистики связаны функциональной зависимостью:  $R \approx 3 \cdot \sigma_{24}$ , т.е. размах  $R$  примерно втрое превышает стандартное отклонение  $\sigma_{24}$ . Однако мы предпочли использовать именно статистику  $\sigma_{24}$ , а не  $R$ , так как она оценивается более устойчиво и в меньшей степени зависит от случайных особенностей формы среднесуточной функции.

Само по себе значение амплитуды суточной вариации малоинформативно, так как количество событий в разных выборках может отличаться многократно и прямое сравнение амплитуд суточной вариации для выборок с интенсивным и слабым потоком событий невозможно. Поэтому все сравнения проводились по нормированным амплитудам. Как и в работах [Децеровский, Сидорин, 2012а, 2014а, б], мы использовали два способа нормировки.

Во-первых, рассчитывалось отношение амплитуды суточных вариаций потока землетрясений  $\sigma_{24}$  к среднему потоку землетрясений  $E_{24}$ :  $\sigma_{24}/E_{24}$ . Это отношение показывает, насколько сильные вариации испытывает поток землетрясений в абсолютном выражении. Например, если величина отношения  $\sigma_{24}/E_{24}$  близка к 0.3, это означает, что разница между максимальным и минимальным за сутки потоком землетрясений имеет один порядок со средним потоком землетрясений. Именно такая ситуация наблюдается для выборок строго непредставительных землетрясений (см. рис. 3, а).

Во-вторых, оценивалось отношение амплитуды суточной вариации  $\sigma_{24}$  к погрешности ее оценки  $\Delta$ :  $\sigma_{24}/\Delta$ . Это отношение показывает, насколько значима суточная вариация. По смыслу это отношение аналогично стандартному отклонению. Обозначим стандартное отклонение среднесуточной функции, построенной для случайного потока землетрясений, как  $\Delta$ . Параметр  $\Delta$  естественно назвать погрешностью оценки среднесуточной функции. В том случае, если стандартное отклонение  $\sigma_{24}$  реальной среднесуточной функции не превосходит  $\Delta$ , следует признать, что суточная вариация потока землетрясений на самом деле отсутствует, а рассчитанная среднесуточная функция отражает те или иные случайные флуктуации потока землетрясений. Если же расчеты показывают, что  $\sigma_{24}$  во много раз превосходит  $\Delta$ , то гипотезу об отсутствии суточной вариации потока землетрясений следует отклонить. Оценки показывают, что уровни значимости в этом случае близки к уровням значимости обычного нормального распределения.

Значения рассчитанных отношений  $\sigma_{24}/E_{24}$  и  $\sigma_{24}/\Delta$  для всех построенных выборок приведены в табл. 2. Для наглядности в таблице фоном выделены выборки строго представительных и строго непредставительных землетрясений, а значимые амплитуды су-

точной вариации выделены жирным шрифтом и цветом. Полученные результаты со всей очевидностью показывают, что значимый суточный ход присутствует только в выборках непредставительных землетрясений. При этом его амплитуда достигает весьма высоких значений. Для строго непредставительных событий (выборки 00to14) размах суточной вариации сопоставим со средним потоком землетрясений. Что интересно, амплитуда суточной вариации в этом случае практически одинакова и в центре, и на периферии: отношение  $\sigma_{24}/E_{24}$  близко к 0.35. При этом нет ни малейших сомнений в значимости суточной вариации: отношение  $\sigma_{24}/\Delta$  равно 24 в центре, 12 на периферии и почти 26 для объединенной выборки. Стоит заметить, что более высокая значимость суточной вариации в центре по сравнению с периферией объясняется в данном случае не тем, что суточный ход на периферии менее выражен (это не так: амплитуды  $\sigma_{24}/E_{24}$  в Ц и П практически одинаковы), а прежде всего многократно бóльшим количеством землетрясений этой энергии в регионе Ц. Там их примерно вчетверо больше (см. табл. 1).

**Таблица 2.** Абсолютная (в процентах к среднему потоку землетрясений) и относительная (по отношению к погрешности оценки) амплитуда суточного хода количества землетрясений в выборках событий разной энергии

Выборка	Каталог в целом		Регион «Центр»		Регион «Периферия»	
	$\sigma_{24}/E_{24}$ , %	$\sigma_{24}/\Delta$	$\sigma_{24}/E_{24}$ , %	$\sigma_{24}/\Delta$	$\sigma_{24}/E_{24}$ , %	$\sigma_{24}/\Delta$
N_00to14	<b>0.35</b>	<b>25.94</b>	<b>0.35</b>	<b>24.06</b>	<b>0.34</b>	<b>12.18</b>
N_15to21	<b>0.13</b>	<b>13.54</b>	<b>0.07</b>	<b>5.94</b>	<b>0.23</b>	<b>14.65</b>
N_22to26	<b>0.06</b>	<b>4.00</b>	<b>0.03</b>	<b>1.04</b>	<b>0.10</b>	<b>5.30</b>
N_27to30	0.03	1.39	0.05	1.07	0.04	1.38
N_31to35	0.03	0.93	0.08	1.22	0.04	0.97
N_36to99	0.02	0.38	0.09	0.81	0.03	0.43

*Примечание.* Графически выделены (закрашены) выборки землетрясений:

- «строго непредставительные» (т.е. непредставительные по всей площади каталога);
- гарантированно представительные по всей площади выборки, а также значения отношений  $\sigma_{24}/E_{24}$  и  $\sigma_{24}/\Delta$  для этих выборок;
- значимый суточный ход (амплитуда суточной вариации более  $4\sigma$ );
- высокозначимый суточный ход (амплитуда суточной вариации более  $10\sigma$ ).

Выборки, для которых суточный ход отсутствует (амплитуда суточной вариации менее  $1.4\sigma$ ), показаны курсивом.

Для непредставительных выборок 15to21 картина несколько отличается. В регионе П амплитуда суточного хода уменьшается примерно на треть по сравнению со слабейшими, строго непредставительными землетрясениями (отношение  $\sigma_{24}/E_{24} = 0.23$ ). А вот в регионе Ц амплитуда падает впятеро, до 0.07. Столь большое различие амплитуд в двух близких (фактически соседних) регионах невозможно объяснить реальными изменениями динамики сейсмического потока. Фактически оно допускает единственное объяснение: налицо одно из следствий эффекта наблюдательной селекции. В регионе Ц сейсмическая сеть намного лучше регистрирует землетрясения такой энергии. Для большинства территориальных ячеек в регионе Ц значение  $M_c$  лежит между 1.5 и 2.1. Это означает, что в выборке 15to21 в регионе Ц значительную часть составляют представительные землетрясения, а непредставительные являются меньшинством. Предполагая, что суточная вариация потока землетрясений характерна только для непредставительных землетрясений, можно оценить их долю в выборке 15to21N как приблизительно 20 %.

В регионе П значения  $M_c$  значительно выше, и доля непредставительных землетрясений в выборке 15to21OUT существенно выше. Именно вклад этих событий и обуславливает довольно высокую амплитуду суточной вариации для этой выборки.

Для представительных землетрясений суточная периодичность не обнаружена. Отношение  $\sigma_{24}/\Delta$  для всех представительных выборок не превосходит 1.4, что однозначно указывает на отсутствие значимой суточной вариации потока землетрясений. Очень важны в этой связи результаты, полученные по выборке 22to26. В регионе Ц эта выборка является представительной – и суточная вариация потока землетрясений отсутствует. В регионе П в нее входит значительное количество событий с энергией меньше  $M_c$  – примерно в половине территориальных ячеек локальный порог  $M_c$  выше 2.2. Амплитуда суточного хода потока событий этой выборки достигает 0.10 в единицах  $\sigma_{24}/E_{24}$ , а значимость превышает  $5\sigma$ . Как и в случае с диапазоном 15to21, столь разительные отличия очень трудно объяснить в рамках концепции, предполагающей, что наблюдаемый суточный ход отражает реальные изменения сейсмической активности. И наоборот, в рамках гипотезы наблюдательной селекции все эти различия находят вполне очевидное объяснение.

В заключение остановимся еще на одном эффекте, заметном в табл. 2. Как видно в этой таблице, амплитуда суточного хода потока наиболее сильных событий в единицах  $\sigma_{24}/E_{24}$  в регионе Ц в 2–3 раза выше, чем в регионе П. Стоит ли искать за этим фактом какой-то реальный эффект? На наш взгляд, этот вопрос заслуживает отдельного обсуждения.

Прежде всего, заметим, что количество событий в выборках 31to35 и 36to99 в регионе Ц примерно в 3 раза меньше, чем в регионе П. Это связано с тем, что площадь региона Ц существенно меньше. Поскольку в регионе П (так же, как и в регионе Ц) все такие события регистрируются без пропусков, их общее количество соответственно больше. По этой причине случайные особенности кривой суточного хода в регионе П подавляются гораздо лучше, поэтому она имеет меньшую дисперсию и отношение  $\sigma_{24}/E_{24}$  для нее тоже меньше.

Однако при трехкратном увеличении количества событий ожидаемая степень подавления случайных особенностей близка к 2 (точнее, к  $1.7 = \sqrt{3}$ ). В действительности же различия для выборки 36to99 близки к 3-кратным. Поэтому нельзя исключить, что в этом случае в данных проявляется еще один эффект, а именно, эффект искусственного засорения каталога взрывами. На это может указывать характерный вид кривой суточной вариации потока землетрясений для этой выборки с четким максимумом в дневное (а не ночное!) время (см. рис. 3, б). Ранее мы обнаружили аналогичный эффект засорения взрывами для каталога землетрясений Душанбино-Вахшского района, причем доля взрывов достигала десятков процентов, при том, что их абсолютное количество составляло десятки, максимум сотни штук [Дещеревский, Сидорин, 2015].

В каталоге Греции общее количество землетрясений значительно больше, поэтому доля взрывов не может быть столь же существенной. Однако для самых сильных событий, которых не так уж много (в выборке 36to99IN – 430 шт.), вклад искусственных событий может оказаться заметным. При этом неудивительно, что эффект взрывов фиксируется именно в регионе Ц: во-первых, в регионе П больше событий (в выборке 36to99OUT – 1175 шт.), а во-вторых, регион П включает значительные морские территории, из-за чего промышленные помехи там вносят относительно меньший вклад, чем в регионе Ц.

В пользу гипотезы о засорении каталога взрывами указывает и еще один результат, полученный в работе [Децеровский и др., 2016]. В этой работе рассмотрена суточная периодичность одиночных и групповых землетрясений разных энергий в каталоге Греции в эпоху 2011–2016 гг. При этом оказалось, что дневной максимум присутствует в выборке одиночных землетрясений, но отсутствует в групповых. Именно такая ситуация и должна наблюдаться в случае засорения каталога взрывами.

### Обсуждение

Ранее в работе [Децеровский, Сидорин, 2012а] была обнаружена значимая суточная периодичность представительных землетрясений. Этот результат был установлен при анализе каталога Греции в эпохи 1995–2004 и 2005–2010 гг. с высокой степенью достоверности на основе анализа нескольких независимых выборок, и у нас нет никаких оснований сомневаться в ранее полученных результатах. С методической точки зрения, в работе [Децеровский, Сидорин, 2012а] все было сделано достаточно аккуратно. Выборки представительных землетрясений формировались очень консервативно, с большим запасом по порогу представительности, позволяющим аккуратно учесть возможную пространственную неоднородность  $M_s$ . Значимый суточный ход потока представительных землетрясений был обнаружен не вследствие каких-либо методических недоработок, а по той причине, что такие вариации действительно присутствовали в рассматриваемом каталоге.

Напомним, что в цитированной работе наличие значимого суточного хода количества землетрясений выявлено в выборках событий 27to32, 32to41 и 32to99 в эпохи 1995–2004 и 2005–2010 гг. При анализе каталога был сделан вывод, что в эпоху 2005–2010 гг. все эти выборки, кроме выборки 27to32, были представительны. Отсутствие значимого суточного хода среди представительных выборок в эпохи 1995–2004 и 2005–2010 гг. было зафиксировано только для выборки 41to99. Однако было неясно, связано это с реальным отсутствием суточной вариации сильных землетрясений или же с недостаточной статистикой таких событий, что мешало доказать значимость периодичности землетрясений этой выборки.

Подчеркнем, что при всех расчетах в указанной выше работе использовалась точно такая же методика, как и в настоящей работе. Оценка представительности каталога, формирование выборок землетрясений, построение рядов количества землетрясений, расчет средней суточной вариации и оценка ее параметров проводились по тем же алгоритмам, которые успешно применялись и для анализа каталогов землетрясений других регионов мира [Децеровский, Сидорин, 2014а, б; Децеровский и др., 2016а–в].

Важнейшим отличием от [Децеровский, Сидорин, 2012а] стало использование в настоящей работе более качественного каталога землетрясений с примерно пятикратным увеличением количества ежегодно регистрируемых событий [Попандопуло и др., 2016] по сравнению с эпохой 1995–2004 гг. Увеличение статистики событий позволило раздельно проанализировать данные двух различных регионов.

Результаты, полученные в настоящей работе, с полной уверенностью показывают, что в эпоху 2011–2016 гг. вся наблюдаемая картина совершенно переменялась, а именно: для всех без исключения перечисленных выборок, т.е. для любых событий с энергией  $M \geq 2.7$ , включая выборки 27to32, 32to41 и 32to99, суточный ход отсутствует. Этот результат получен по значительно более полному каталогу и подтвержден для двух независимых регионов.

По-видимому, до создания Объединенной сети сейсмических наблюдений Греции в каталоге землетрясений присутствовал какой-то методический дефект, который приводил к искажению результатов расчетов суточной периодичности для событий разной энергии. Подозрение о наличии такого дефекта было высказано нами в уже работе [Децеровский, Сидорин, 2012б]. Основанием для таких подозрений стали резкие изменения потоков событий разных энергий от эпохи к эпохе и, главное, резкие изменения отношения числа более сильных событий к числу более слабых. Однако более конкретно идентифицировать суть проблемы тогда не удалось. В качестве возможных причин предполагалось систематическое искажение магнитуд у некоторой части событий, а также другие причины, что могло приводить к ошибкам при оценке представительности и неправильным выводам о характеристиках сформированных выборок. По-видимому, в отдельные периоды времени до 2011 г. каталог землетрясений Греции (кстати, один из лучших в мире) не вполне адекватно отражал реальную сейсмичность.

Проверки, аналогичные выполненным в работе [Децеровский, Сидорин, 2012б], показывают, что в эпоху 2011–2016 гг. подобные дефекты в рассматриваемом каталоге отсутствуют. Это дает основания предполагать, что полученные в настоящей работе результаты более корректны. Таким образом, проведенный анализ потоков событий в каталоге Греции свидетельствует о хорошем согласии всех результатов с гипотезой, связывающей возникновение суточной периодичности землетрясений с гипотезой наблюдательной селекции. Привлекать какие-либо другие гипотезы для объяснения полученных результатов нет никакой необходимости.

### Заключение

В работе [Децеровский, Сидорин, 2012а] в результате детальных исследований каталога землетрясений Греции, в частности пространственно-временных вариаций его представительности, были сформированы выборки строго представительных, субпредставительных и строго непредставительных землетрясений. Статистический анализ временных вариаций потоков событий этих выборок надежно, с высокой степенью достоверности установил наличие суточной периодичности представительных землетрясений в эпохи 1995–2004 и 2005–2010 гг., что стало одним из решающих аргументов против объяснения суточной периодичности эффектами шумовой дискриминации или в более общем значении – наблюдательной селекции. Авторы уверены в правильности и статистической надежности сделанных в работе [Децеровский, Сидорин, 2012а] выводов, однако некоторые особенности анализировавшегося тогда каталога давали основания подозревать возможность наличия в каталоге каких-то методических дефектов.

Примерно с 2011 г., после создания в 2007 г. Объединенной сети сейсмических наблюдений, качество каталога землетрясений Греции значительно улучшилось. Это существенно расширило возможности исследований закономерностей динамики сейсмического процесса. Фактически появился новый каталог для изучавшейся ранее территории. В связи с этим авторы вернулись к вопросу о существовании суточной периодичности представительных землетрясений Греции – ключевому для выяснения механизма возникновения суточной периодичности землетрясений. По каталогу землетрясений Греции за 2011–2016 гг. были построены однородные (в смысле уровня представительности) выборки землетрясений разной энергии для двух регионов рассматриваемой территории. По данным каждой выборки рассчитан средний суточный ход количества землетрясений.

Показано, что для выборок непредставительных землетрясений поток событий резко отличается в дневное и ночное время; разница между максимальным (ночью) и минимальным (днем) потоком событий достигает двух раз и более. В выборках субпредставительных землетрясений обнаруживаются слабые эффекты суточной вариации. Предположительно, они связаны с просачиванием в такие выборки непредставительных событий из-за высокой территориальной неоднородности порога представительности  $M_s$ . Эти результаты согласуются с результатами, полученными ранее по данным каталога землетрясений Греции за 1964–2010 гг.

Для строго представительных землетрясений результаты, полученные по данным более качественного каталога в эпоху 2011–2016 гг., отличаются от результатов анализа предшествующих эпох. С высокой степенью значимости установлено, что в эпоху 2011–2016 гг. суточный ход отсутствует. Это дает основания считать, что описанная в работе [Децеровский, Сидорин, 2012а] суточная периодичность представительных землетрясений Греции могла быть обусловлена какими-то дефектами каталога.

В целом полученные в настоящей работе результаты согласуются с гипотезой шумовой дискриминации (наблюдательной селекции), объясняющей суточную вариацию потока землетрясений различной эффективной чувствительностью сейсмической сети в дневное и ночное время, что связано с изменениями уровня природных и техногенных помех в течение суток.

## Литература

- Беляков А.С., Журавлев В.И., Лукк А.А. Суточная периодичность слабых землетрясений и высокочастотного подземного шума на Камчатке // Физика Земли. 2011. № 4. С. 16–38.
- Богомолов Л.М., Сычёв В.Н., Сычёва Н.А. Сейсмологические приложения нестандартного статистического анализа // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 3. С. 19–25.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 40 с.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Суточная периодичность представительных землетрясений Греции // Сейсмические приборы. 2012а. Т. 48, № 3. С. 5–31.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Поиск влияния гравитационных приливов на региональную сейсмичность Греции разными методами: 1. Спектральный и периодограммный анализ // Сейсмические приборы. 2012б. Т. 48, № 4. С. 5–26.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Суточная периодичность землетрясений Южной Калифорнии // Сейсмические приборы. 2014а. Т. 50, № 1. С. 27–50.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Суточная периодичность потока землетрясений Аляски // Геофизические процессы и биосфера. 2014б. Т. 13, № 4. С. 97–112.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Анализ суточной периодичности в Душанбино-Вахшском каталоге землетрясений методом годографов Рэля–Шустера // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 3. С. 71–92.
- Децеровский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Технологии анализа геофизических временных рядов. Ч. 2. WinABD – пакет программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. 2016а. Т. 52, № 3. С. 50–80.
- Децеровский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WinABD // Геофизические процессы и биосфера. 2016б. Т. 15, № 3. С. 5–34.

- Децереvский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Программный пакет ABD — универсальный инструмент для анализа данных режимных наблюдений // Наука и технологические разработки. 2016в. Т. 95, № 4. С. 35–48. DOI 10.21455/std2016.4-6.
- Децереvский А.В., Попандопуло Г.А., Сидорин А.Я. Сравнение некоторых параметров сейсмичности Греции по выборкам групповых и одиночных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016г. Т. 43, № 3. С. 69–82. DOI 10.21455/vis2016.3-5.
- Журавлев В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычева Н.А. Суточная периодичность слабых землетрясений Центральной Азии // Физика Земли. 2006. № 11. С. 29–43.
- Зотов О.Д. Эффект выходных дней в сейсмической активности // Физика Земли. 2007. № 12. С. 27–34.
- Попандопуло Г.А., Баскутас Я., Хатзиоанну Э. Пространственно-временной анализ представительной магнитуды и наклона графика повторяемости по данным каталога землетрясений Греции // Физика Земли. 2016. № 2. С. 45–61. DOI 10.7868/S0002333716010075.
- Сидорин А.Я. Влияние Солнца на сейсмичность и сейсмический шум // Сейсмические приборы. 2004. Вып. 40. С. 71–80.
- 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. Различия внутрисуточных фазовых диаграмм потоков землетрясений разной энергии // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 71–84.
- Atef A.H., Liu K.H., Gao S.S. Apparent weekly and daily earthquake periodicities in the Western United States // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2009. V. 99, N 4. P. 2273–2279.
- D'Alessandro A., Papanastassiou D., Baskoutas I. Hellenic Unified Seismological Network: An evaluation of its performance through SNES method // Geophys. J. Int. 2011. V. 185. P. 1417–1430.
- Davies D. Nocturnal earthquakes // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 28. P. 305.
- Davison C. Studies on the periodicity of earthquakes. London: Thomas Murby & Co., 1938. 107 p.
- Davison C. The diurnal periodicity of earthquakes // Phil. Magaz. 1896. V. 42. P. 463–476.
- Flinn E.A., Blandford R.R., Mack H. Comment on «Evidence for higher seismic activity during the night», by Michael Shimshoni // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 28. P. 307–309.
- Knopoff L., Gardner J. Higher seismic activity during local night on the raw worldwide earthquake catalogue // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 28. P. 311–313.
- Marzocchi W., Vilardo G., Hill D.P., Riccardi G.P., Ricco C. Common features and peculiarities of the seismic activity at Phlegraean Fields, Long Valley, and Vesuvius // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2001. V. 91. P. 191–205.
- Papanastassiou D. Earthquake detection – location capability of the Hellenic Unified Seismological Network (HUSN) operating by the Institute of Geodynamics, National Observatory of Athens // Hellen. J. of Geosci. 2011. V. 45. P. 209–216.
- Shimshoni M. Evidence for higher seismic activity during the night // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1971. V. 24. P. 97–99.
- Shimshoni M. Response to comments by Davies, by Flinn et al. and by Knopoff et al. on the «Evidence for higher seismic activity during the night» // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 28. P. 315.

#### Сведения об авторах

**ДЕЦЕРЕВСКИЙ Алексей Владимирович** – 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: adeshere@ifz.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 THE DIURNAL PERIODICITY OF GREECE REPRESENTATIVE EARTHQUAKES: DATA COMPARISON OF DIFFERENT OBSERVATION SYSTEMS**

**A.V. Desherevskii, A.Ya. Sidorin**

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

**Abstract.** The Hellenic Unified Seismic Network (HUSN) started monitoring of the Greece seismicity in the end of 2007. As a result, seismicity observation quality was considerably improved by 2011. In particular, the earthquake detection-location capability was improved, the magnitude of completeness clearly decreased, and the number of annually recorded events increased. The new observation system extended possibilities for studies in seismicity regularities. That is why the authors revisited their studies in the diurnal periodicity of the Greece representative earthquakes revealed a few years ago using the data before 2011. We formed 18 samples from the earthquakes of different magnitudes using the catalog data for 2011 – June of 2016 and calculated the diurnal course of earthquake flow for each of them. We compared the data of two regions for increasing reliability of the results. It has been proved with a high degree of statistical significance that the diurnal periodicity of the strongly representative earthquakes ( $M > M_c$  for all the sample events) is absent. This conclusion contradicts with the statistically reliable estimations obtained at the same area for the observation epochs of 1995–2004 and 2005–2010. The new results obtained are in agreement with the hypothesis of noise discrimination (observation selection) explaining the cause of the diurnal earthquake periodicity by the diurnal changes in seismic network sensitivity.

*Keywords:* earthquake, diurnal periodicity, magnitude of completeness, representative earthquake, Greece.