

УДК 551.515.2

## СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНАХ ДЕЙСТВИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

© 2015 г. Д.А. Лысенко, М.И. Ярошевич

*Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ “НПО “Тайфун”,  
г. Обнинск, Калужская обл., Россия*

Рассматриваются новые результаты исследований возможного влияния тропических циклонов на сейсмическую активность в зонах их действия. В настоящее время прямой расчет воздействия тропических циклонов на земную кору невозможен. Это в первую очередь связано с тем, что исследователям в принципе недоступна информация о состоянии коры, о динамике распределения ее напряженности в пространстве и времени. В связи с этим, исследования ведутся решением своего рода обратной задачи – сопоставляются среднемесячные динамики сейсмической и циклонической активности, по которым оценивается возможное влияние тропических циклонов на сейсмичность данного региона. В развитие ранее проведенных исследований рассматриваются северо-западная часть Тихого океана (Япония и Дальний Восток), восточная часть Тихого океана и западная Атлантика. Показано, что на указанных территориях соответствующие среднемесячные динамики циклонической и сейсмической активности схожи; во всех случаях максимальная интенсивность достигается в конце лета и в осенние месяцы. Кроме того для этих территорий определена корреляция между годовыми значениями сейсмических и циклонических энергий. Полученные результаты делают более убедительным предположение о том, что тропические циклоны могут рассматриваться в качестве фактора, влияющего на сейсмичность в зонах их действия.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, землетрясения, энергия циклонов, энергия землетрясений.

### Введение

Сейсмологам давно известно, что при перемещениях тропических циклонов возникают особые сейсмические волны – штормовые микросейсм, – из чего следует, что циклоны воздействуют на земную кору. Механизмы возникновения штормовых микросейсм, их спектральный состав и диапазон характерных энергий изучены довольно подробно (см., например, [Монахов, 1956; Винник, 1971; Островский, Рыкунов, 1982; Табулевич, 1986; Bowen et al., 2003; Hasselman, 1963; Webb, 1992]). Как правило, анализом штормовых микросейсм занимаются сейсмологи, которые, что естественно, рассматривают их в качестве “сейсмологического шума”, создающего в той или иной мере неудобства при исследовании землетрясений. Несколько иной подход к использованию штормовых микросейсм описан в [Chi et al., 2010], где анализируется их динамика в зависимости от характеристик и особенностей траектории тропического циклона.

Кинетическая энергия среднего по силе тропического циклона оценивается в  $1 \cdot 10^{18}$  Дж [Голицын, 1997] и сопоставима с годовой энергией всех землетрясений на Земле [Жарков, 1983]. Сейсмическая энергия штормовых микросейсм за несколько дней оценивается примерно в  $2 \cdot 10^{12}$  Дж [Табулевич, 1986]. Однако не следует забывать, что штормовые микросейсм – это только наблюдаемая и численно оцениваемая реакция земной коры на циклоническое воздействие.

Если принять, что тропический циклон воздействует на кору, то возникают вопросы – какая же часть кинетической энергии циклона поступает в земную кору и каково при этом соотношение между сейсмической энергией и энергией диссипации? В настоящее время эти вопросы остаются без ответа, поскольку рассчитать поступившую в кору энергию тропического циклона и ее распределение между сейсмической и диссипированной энергиями невозможно.

Исследования взрывов разных типов показали, что отношение сейсмической энергии к полной энергии взрыва – величина очень малая, характеризующаяся к тому же очень большим разбросом [Пасечник, 1970; Садовский, Кедров, Пасечник, 1986]. Так, при воздушных взрывах, произведенных над океаническими островами, отношение сейсмической энергии объемных волн к полной энергии взрыва оценивается как  $1 \cdot 10^{-7}$ ; наибольшие значения отмечаются для подводных взрывов –  $(1 \div 4) \cdot 10^{-2}$  [Пасечник, 1970]. Очевидно, что определять отношение энергии штормовых микросейсм к циклонической энергии, поступившей в земную кору, исходя из аналогичных отношений при взрывах и землетрясениях, как минимум, не корректно, поскольку слишком уж различны механизмы генерации сейсмических волн, возникающих при проведении взрывов и под воздействием циклонов.

### Базовые допущения

Несмотря на отмеченное выше, мы временно принимаем допущение, что существенно бóльшая часть циклонической энергии, поступившей в земную кору, диссипируется. В исследованиях возможного влияния тропических циклонов на сейсмичность, по-видимому, именно эта часть энергии является определяющей. Однако необходимо заметить, что даже если бы удалось оценить поступившую в кору циклоническую энергию, мы столкнемся с неразрешимой проблемой. Состояние земной коры непрерывно меняется как во времени, так и в пространстве. Для расчетов реакции коры на воздействие циклонов необходимо знать ее поля напряженности в любой момент времени на обширных пространствах и до глубин очагов землетрясений (хотя бы неглубоких); кроме этого важно знание и характеристик слоев, слагающих кору. Такая сложная и многозначная информация в настоящее время недоступна.

В связи с невозможностью прямых расчетов предполагаемого воздействия тропических циклонов на сейсмичность Земли был принят путь решения своего рода обратной задачи, но в качественной её интерпретации. Задача решалась опосредованно, т.е. сопоставлением на территориях действия тропических циклонов одновременных годовых и внутrigодовых динамик циклонической и сейсмической активности.

Такие, начатые сравнительно недавно (см., например, [Ярошевич, 2008, 2010, 2011; Соболев, Закржевская, Соболев, 2012]) исследования позволили выявить 22–24-годовые периодичности годовых значений циклонической и сейсмической энергии. Фазы сейсмической цикличности отстают от циклонической примерно на 5 лет. Было показано, что в случае особо высокой циклонической активности, длящейся на протяжении нескольких сезонов кряду, наблюдается рост числа слабых землетрясений. Предположительно, увеличение числа очагов слабых землетрясений объясняется тем, что циклоническая активность, накачивая относительно большую энергию в земную кору, частично изменяет пространственную картину ее напряженности [Ярошевич, 2008].

В работах [Ярошевич, 2010, 2011] показаны динамики среднемесячных значений циклонической и сейсмической энергии, которые иллюстрируют сезонную схожесть. Исследования были проведены для довольно большой территории северо-западной

части Тихого океана – зоны особо высокой циклонической и сейсмической активности. При анализе раздельно рассматривались землетрясения с магнитудами  $M \geq 5$  и  $M \geq 6$ .

В статье [Соболев, Закржевская, Соболев, 2012] сопоставляется сейсмическая и циклоническая активность в трех районах северо-западной части Тихого океана. Рассматриваются только очень сильные ураганы, в которых максимальная скорость ветра  $V_{\text{mm}} \geq 72$  м/с. Такой выбор, видимо, основан на предположении, что если циклоны могут спровоцировать землетрясение, то это под силу только очень сильным ураганам. Авторами названной работы анализируется состояние сейсмической активности до начала урагана и после него. Циклоническая активность характеризуется числом таких ураганов и суммарным временем их длительности в течение года; интенсивность землетрясений оценивается по энергии событий.

Результаты, полученные нами ранее (см., например, [Ярошевич, 2011]), мы рассматриваем как предварительные, служащие основанием для продолжения исследований, при проведении которых изначально был принят ряд условий и допущений, которые нам представляются принципиальными.

1. Состояние напряженности земной коры нам неизвестно; если предположить, что тропический циклон может “спровоцировать” землетрясение (землетрясения), то в состоянии сильной (критической) неустойчивости коры это может произойти под воздействием циклона любой силы.

2. Эпицентры землетрясений, вызванные циклонической активностью, могут оказаться как под следом циклона, так и на его близкой периферии.

3. Принимая во внимание неопределенность динамики состояния коры во времени и пространстве, на начальном этапе исследований следует сопоставлять циклоническую и сейсмическую активность на относительно больших территориях и в течение длительных интервалов времени. В этом случае при большой статистике уменьшается вероятность влияния случайных “выбросов”, и в результате повышается вероятность выявления возможных закономерностей.

4. Рассматриваются не отдельные циклоны, а весь поток циклонов на больших интервалах времени. Сопоставление конкретного циклона с конкретным землетрясением из-за неизвестного состояния коры и возможного запаздывания сейсмической реакции некорректно, а “выявленная” между ними связь с очень большой вероятностью будет совершенно недоказуемой.

5. Циклоническая и сейсмическая активность должны сопоставляться в идентичных признаках и, как правило, в энергетических характеристиках.

В данной статье расширена география экспериментальных расчетов и исследуется возможное воздействие тропических циклонов на сейсмичность в четырех районах – в Японии, на Дальнем Востоке, фрагментарно в циклонических зонах западной части Атлантики и востока Тихого океана. По каждому из перечисленных районов, по 10-летним интервалам рассчитывались среднемесячные значения циклонической  $E_{TC}$  и сейсмической  $E_S$  энергии. Годовые динамики соответствующих среднемесячных значений сопоставляются в качественных оценках.

### Исходная геофизическая информация

Параметры землетрясений, включая значения  $E_S$ , взяты из Сейсмологических каталогов Геофизической службы РАН. Во всех экспериментах рассматривалась энергия землетрясений, рассчитанная по поверхностным сейсмическим волнам. В расчетах предпочтение отдавалось сейсмологическим архивам последних лет, поскольку есть основания предполагать, что примерно до 1979 г. землетрясения с магнитудой  $M \leq 5$

по крайней мере для зоны Тихого океана представлены в каталогах не полностью. Отметим, что с годами сведения о землетрясениях этого диапазона магнитуд становились более представительными.

Характеристики тропических циклонов получены из метеосводок Гидрометцентра РФ и из Интернета (см. [http://www.weather.unisys.com/hurricane/w\\_pacific](http://www.weather.unisys.com/hurricane/w_pacific) и <http://www.weather.unisys.com/hurricane/atlantic>). Надо отметить, что в последние десятилетия доступные сведения о циклонах также стали более полными и, вероятно, более достоверными.

### Экспериментальные расчеты

Расчет циклонической кинетической энергии основывается на методе расчета энергии отдельного циклона. При этом энергия рассчитывается по максимальной в циклоне скорости ветров для круга радиусом максимальных ветров  $r_m \approx 50$  км [Голицын, 1997]. В своих расчетах мы должны были принимать во внимание то, что циклонический ветер достигает значительной силы и на расстояниях, значительно превышающих  $r_m$ , что непременно следует учитывать при оценках энергии циклона. (Скорость циклонического ветра  $V_r$  с удалением от центра циклона на расстоянии  $r$  определяется из соотношения  $V_r = (V_m \times r_m^{0.5}) / r^{0.5}$ ). Кроме того, тропические циклоны в периоды наибольшей циклонической активности действуют группами. При этом непонятно, как учитывать одновременный энергетический вклад каждого циклона и как оценивать распределение этой “совмещенной” энергии по пространству, принимая во внимание, что ширина действия циклона (след циклона) достигает нескольких сотен километров.

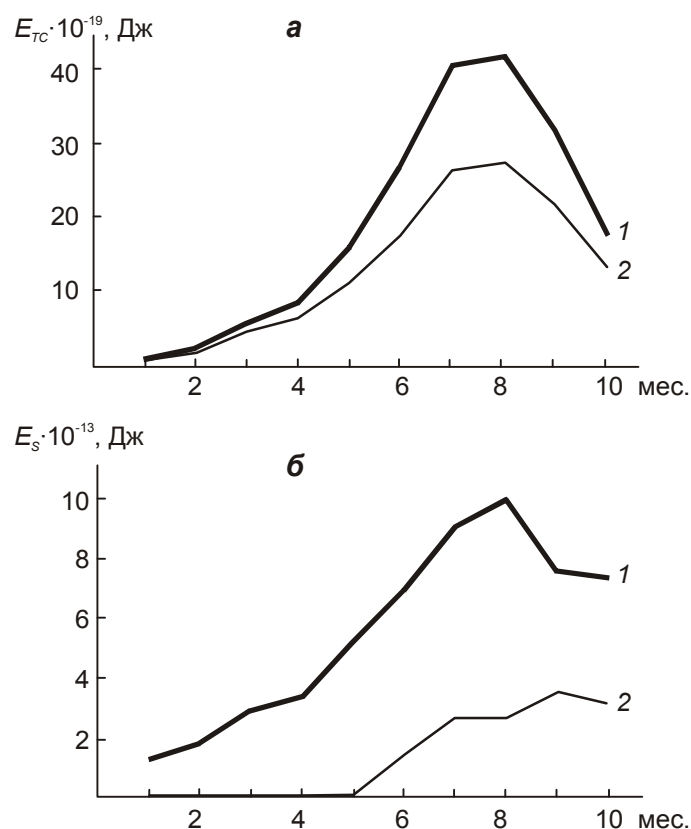
Эта проблема была решена оригинальным представлением ветровых полей и расчетов энергии  $E_{TC}^1$ . Методика расчетов достаточно подробно описана в [Ярошевич, 2007], здесь мы кратко изложим лишь ее суть.

Параметры реальных тропических циклонов (дата, время, координаты, скорость максимальных ветров, дефицит давления и др.) в метеорологической информации чаще всего заданы для 00 ч и в 12 ч по Гринвичу. В нашей схеме расчетов в качестве координат циклона в фиксированные моменты времени используются координаты источников ветра и центров круговых ветровых полей. Рассматриваемая циклоническая территория разбивается на элементарные квадраты размерами от  $1^\circ \times 1^\circ$  до  $5^\circ \times 5^\circ$  в зависимости от решаемой задачи и размеров площади, по которой ведется расчет. Для всех “источников” всех циклонов, действовавших на этот момент времени, по значениям  $V_m$ ,  $r_m$  каждого источника и множеству соответствующих значений  $r$  и  $V_r$  рассчитывается кинетическая энергия для центра каждого элементарного квадрата. (Здесь  $r$  и  $V_r$  – соответственно расстояние от конкретного “источника” до центра конкретного элементарного квадрата и скорость ветра в центре квадрата). В расчетах энергия в центре квадрата отнесена ко всему квадрату. В каждом элементарном квадрате к энергии, рассчитанной для данного момента времени, прибавляется энергия, рассчитанная для этих же “источников” в прошлые моменты времени. Это связано с тем, что циклонические ветры какое-то время достаточно ощутимы и после ухода центра циклона со своего места. Значения энергий прошлых моментов времени спадают по экспоненте в зависимости от числа истекших 12-часовых интервалов времени. Таким образом в каждом элементарном квадрате формируется “суперпозиция” значений энергии.

<sup>1</sup> Строго говоря, это не совсем энергия, а некая величина с размерностью энергии. Возможно, правильнее было рассматривать её как работу, совершаемую циклоном над океаном.

В связи с тем, что спад по экспоненте происходит довольно быстро, основной вклад в величину циклонической энергии на территории элементарного квадрата формируется дошедшей до него энергией источника за первые 3–4 полусуток. Сумма “суперпозиционных” энергий элементарных квадратов по всей рассматриваемой площади и характеризует циклоническую активность (циклоническую “энергию” –  $E_{TC}$ ) на данный момент на всей рассматриваемой площади.

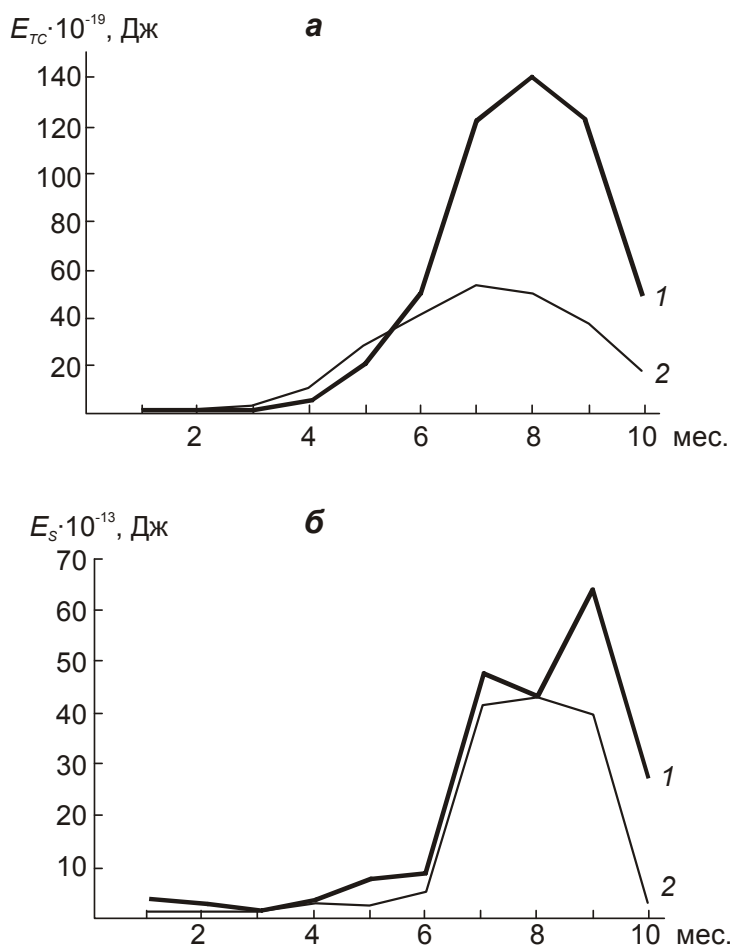
Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической и сейсмической энергии, рассчитанные для территорий, ограниченных координатами 30–45°с.ш. – 128–145 °в.д. (Япония) и 45–60 °с.ш. – 140–165 °в.д. (Дальний Восток), показаны на рис. 1. В расчетах учитывались тропические циклоны и землетрясения, произошедшие на этих территориях в 2000–2009 гг.; рассматривались землетрясения с магнитудой  $M \leq 6.5$  и глубиной очага  $h \leq 33$  км. (Следует подчеркнуть, что в предыдущих исследованиях [Ярошевич, 2011] анализировались землетрясения с  $M \geq 6.0$ .)



**Рис. 1.** Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической (а) и сейсмической энергии (б) для территории Японии (1) и Дальнего Востока (2). Скользящее сглаживание проводилось по трем значениям

Аналогичные графики, рассчитанные для территории западной Атлантики, включающей Мексиканский залив, Карибское море, Кубу, Никарагуа и др. (0–30 °с.ш. – 60–100 °з.д.) и востока Тихого океана, охватывающего прибрежные районы Мексики и западную часть Мексиканского залива (0–20 °с.ш. – 90–120 °з.д.), приведены на рис. 2. Рассматривались тропические циклоны и землетрясения, действовавшие на этих территориях в 1999–2008 гг.<sup>1</sup>; учитывались землетрясения с  $M \leq 7.5$  и  $h \leq 33$  км.

<sup>1</sup> Данными за 2008 г. завершался имеющийся в нашем распоряжении сейсмологический архив по этому району.

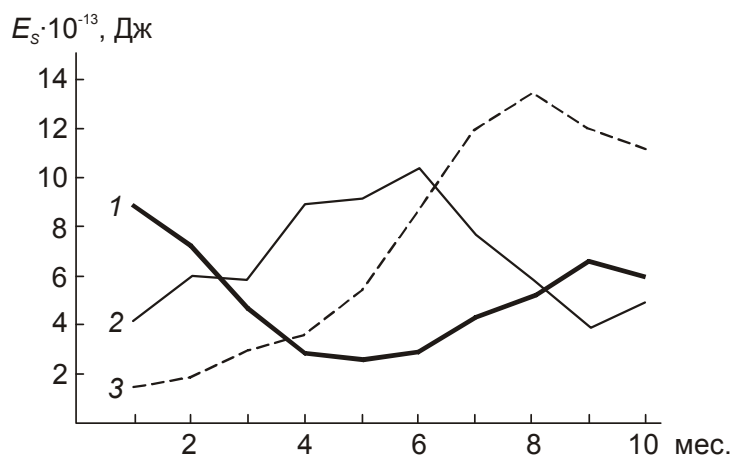


**Рис. 2.** Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической (а) и сейсмической энергии (б) для Западной Атлантики (1) и восточной части Тихого океана (2)

Необходимо сделать одно замечание. В западной Атлантике и в восточной части Тихого океана количество землетрясений и тропических циклонов меньше, чем в северо-западной части Тихого океана. Однако уровни сейсмической и циклонической энергии на графиках, соответствующих этим регионам (см. рис. 2), выше, чем на графиках для северо-западной части Тихого океана (см. рис. 1). Это может быть объяснено двумя факторами. Стремясь увеличить учитываемую статистику землетрясений и тропических циклонов, мы перешли к диапазону землетрясений  $M \leq 7.5$  и в разы расширили территорию по сравнению с территориями Японии и Дальнего Востока.

На всех графиках, приведенных на рис. 1, 2, четко просматривается качественная идентичность годовых динамик среднемесячных значений циклонической и сейсмической энергии. Также видно, что меньшей циклонической интенсивности соответствует и меньшая сейсмическая интенсивность. Это может рассматриваться как еще один важный аргумент в пользу предположения о возможном влиянии тропических циклонов на сейсмичность. Коэффициент корреляции между суммарными годовыми значениями циклонической и сейсмической энергии по приведенным четырем территориям – 0.947.

На рис. 3 приведены сглаженные графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанные по трем равным по площади территориям западной части



**Рис. 3.** Сглаженные графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанных по трем территориям циклонической зоны Тихого океана и по землетрясениям с  $M \leq 6.5$  и  $h \leq 33$  км  
 1 –  $10^\circ$  ю.ш.– $10^\circ$  с.ш. –  $110$ – $140^\circ$  в.д.; 2 –  $10$ – $30^\circ$  с.ш. –  $120$ – $150^\circ$  в.д.; 3 –  $30$ – $50^\circ$  с.ш. –  $130$ – $160^\circ$  в.д.

Тихого океана. В этом случае также рассматривались землетрясения с  $M \leq 6.5$  и  $h \leq 33$  км за 2000–2009 гг. График 1 отражает динамику сейсмической энергии на территории, ограниченной координатами  $10^\circ$  ю.ш.– $10^\circ$  с.ш. –  $110$ – $140^\circ$  в.д.; прослеживается заметное превышение среднемесячной сейсмической энергии в начале и в конце года.

Мы полагаем, что это результат возможного сейсмического воздействия тропических циклонов южного полушария, максимальная интенсивность которых приходится на период с декабря по февраль. Траектории таких циклонов проходят южнее – примерно по  $5^\circ$  ю.ш. График 2 показывает ход среднемесячной сейсмической энергии на территории  $10$ – $30^\circ$  с.ш. –  $120$ – $150^\circ$  в.д. В этом случае из-за удаления территории от экватора предполагаемое влияние тропических циклонов южного полушария, похоже, исчезает или сильно ослабевает и просматривается начало предполагаемого влияния тропических циклонов северного полушария. График 3 иллюстрирует динамику среднемесячных значений сейсмической энергии на территории  $30$ – $50^\circ$  с.ш. –  $130$ – $160^\circ$  в.д. и повторяет характер сезонного хода значений сейсмической энергии показанного на рис. 1, 2. Таким образом, здесь вновь наблюдаются схожие сезонные динамики среднемесячных значений циклонической и сейсмической энергии.

Необходимо подчеркнуть, что представленные в настоящей статье результаты, полученные не только для западной Атлантики, восточной части Тихого океана, но и для значительно меньших по площади территорий, аналогичны описываемым в [Ярошевич, 2011]. Последнее, по мнению авторов, очень важно, хотя в соответствии с принятыми нами допущениями (см. Введение) размеры рассматриваемых территорий всё же не должны быть слишком малы.

### Выводы

Изложенные результаты показывают, что тропические циклоны могут рассматриваться как фактор, влияющий на сейсмичность района их действия.

Представляется целесообразным развитие представленных в статье исследований, в том числе и в интересах решения прикладных задач.

## Литература

- Голицын Г.С. Статистика и энергетика тропических циклонов // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 4. С.535–538.
- Винник Л.П. Происхождение микросейсмических продольных волн // Физика Земли. 1971. № 10. С.17–30.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 415 с.
- Монахов Ф.И. Характеристика источников штормовых микросейсм // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 6. С.634–643.
- Островский А.А., Рыкунов Л.Н. Экспериментальное изучение донного сейсмического шума в океане при прохождении циклона // Океанология. 1982. Т. 22, № 6. С.975–979.
- Пасечник И.П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М.: Наука, 1970. 191 с.
- Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. К вопросу об энергетической классификации землетрясений // Физика Земли. 1986. № 2. С.3–10.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С.1–12.
- Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
- Ярошевич М.И. Динамика сезонных значений суммарных интенсивностей тропических циклонов // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 4. С.549–552.
- Ярошевич М.И. Некоторые особенности динамики циклонической и сейсмической активности в северо-западной части Тихого океана // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 5. С.674–678.
- Ярошевич М.И. Внутригодовая динамика сейсмической активности в циклонической зоне северо-западной части Тихого океана // Докл. РАН. 2010. Т. 431, № 3. С.403–407.
- Ярошевич М.И. Тропические циклоны, как возможный фактор, влияющий на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Физика Земли. 2011. № 7. С.80–85.
- Bowen S.P., Richard J., Macini J.D., Fessatidis V., Crooker B. Microseism and infrasound generation by cyclones // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 113, N 5. P.2562–2573.
- Chi W.-C., Chen W.-J., Kuo, B.-Y., Dolenc D. Seismic monitoring of western Pacific typhoons // Mar. Geophys. Res. 2010. V. 31. P.239–251. DOI 10.1007/s11001-010-9105-x.
- Hasselmann K.A. A statistical analysis of the generation of microseisms // Rev. Geophys. 1963. V. 1, N 2. P.177–210.
- Webb S.C. The Equilibrium Oceanic Microseism Spectrum // 1992. JASA 92(4). Part 1. P.2141–2157.

### Сведения об авторах

**ЛЫСЕНКО Денис Александрович** – аспирант, ФГБУ “НПО “Тайфун”, Институт экспериментальной метеорологии. 249031, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4. Тел.: 8(48439) 7-19-80. E-mail: lysenko@typhoon.obninsk.ru

**ЯРОШЕВИЧ Михаил Иосифович** – ведущий научный сотрудник, ФГБУ “НПО “Тайфун”, Институт экспериментальной метеорологии. 249031, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4. Тел.: 8(48439) 7-15-44. E-mail: yarosh@typhoon.obninsk.ru



## SEASONAL DYNAMICS OF CYCLONIC AND SEISMIC ACTIVITY IN AREAS OF TROPICAL CYCLONES

D.A. Lysenko, M.I. Yaroshevich

*Institute of Experimental Meteorology Research and Production Association "Typhoon",  
Obninsk, Kaluga Region, Russia*

**Abstract.** New research results on the likely impact of tropical cyclones on seismic activity in the areas of their actions are considered. At present, the direct calculation of the impact of tropical cyclones on the earth's crust is impossible. This is primarily due to the fact that information on the state of the crust and on the dynamics of the intensity distribution in the crust in space and time is unavailable to researchers. In this regard, the studies conducted solve a kind of an inverse problem comparing the average monthly dynamics of seismic and cyclonic activity and assessing the likely impact of tropical cyclones on the seismicity of the region based on these properties. Here, to develop earlier results, four regions are considered: in the north-western Pacific (Japan and the Far East), in the eastern Pacific and the western Atlantic. It is shown that in these areas the corresponding average monthly dynamics of cyclonic and seismic activity are similar and in all cases the maximum intensity is reached in late summer and autumn months. Also the correlation between the annual values of seismic and cyclonic energies in the designated areas is determined. The obtained results reinforce the earlier assumptions that tropical cyclones may be considered as a factor affecting seismicity in the areas of their action.

**Keywords:** tropical cyclones, earthquakes, cyclone energy, the energy of earthquakes.