

УДК 550.34:551.515.2

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

© 2024 г. М. И. Ярошевич\*

Москва, Россия

\*E-mail: myarosh32@gmail.com

Проведены расчетные эксперименты, выявившие признаки влияния тропических циклонов на сейсмичность в зоне действия тропических циклонов. В основе расчетов лежат многолетние данные о тропических циклонах и землетрясениях северо-западной части Тихого океана. Результаты исследований, как кажется, могут представить определенный интерес в общем направлении исследований взаимодействия геосфер.

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

**Для цитирования:** Ярошевич М.И. О некоторых особенностях сейсмичности в зоне действия тропических циклонов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 25–31. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2024\\_16\\_1\\_25](http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_25)

### Введение

Тропические циклоны (тропические штормы, тайфуны, ураганы) обладают огромной энергией. Так среднесуточная энергия среднего тропического циклона оценивается величиной  $1 \times 10^{18}$  Дж [Голицын, 1997], что равно суммарной энергии 500 землетрясений с магнитудой  $M = 7$  или, примерно, суммарной годовой энергии всех землетрясений земного шара [Жарков, 1983].

Время существования тропических циклонов, примерно, от 5 до 12–14 дней и перемещаются они на большие расстояния. Таким образом, можно с большой уверенностью полагать, что циклоны передают океану огромную энергию, о чем, в частности, свидетельствует возникновение особого вида сейсмических волн – штормовых микросейсм. Штормовые микросейсм, по крайней мере на качественном уровне, хорошо отражают динамику перемещающегося тропического циклона. Исследования штормовых микросейсм получили особое развитие во второй половине XX века [Hasselmann, 1963; Островский, Рыкунов, 1982; Табулевич, 1986; Bowen et al., 2003] и др.

Сейчас не удастся более или менее точно рассчитать циклоническую энергию, поступающую в земную кору за время жизни циклона. Поэтому пока можно лишь говорить о некоторых оценках этой энергии. Энергия микросейсм за время жизни циклона сравнивается с энергией единичного землетрясения с магнитудой  $M = 5$  [Табулевич, 1986] и землетрясения с магнитудой  $M = 5.8–5.9$  [Ингель и др., 2009].

Зарегистрированные сейсмографами штормовые микросейсм – это сейсмическая энергия тропического циклона. Исследования различных взрывов показали, что отношения величины сейсмической энергии взрыва к величине его полной энергии – значения крайне малые [Садовский, 1986; Пасечник, 1970]. Так, при воздушных взрывах, совершенных над мелкой водой, отношение сейсмической энергии объемных волн к полной энергии взрыва оценивается величиной  $10^{-7}$ , а в случае подводных взрывов –  $(1 – 4) \times 10^{-2}$ . Причем, последняя – это наибольшая величина этих отношений. Конечно, мы понимаем несопоставимость взрывов и трансляции энергии тропических циклонов – слишком различна физика процессов. Однако возникает определенное представление, что и в случае тропических циклонов существенно большая часть кинетической энергии циклона поступает непосредственно в земную кору, то есть именно эта часть циклонической энергии может как-то повлиять на сейсмическую активность.

Здесь в расчетных экспериментах рассматривается северо-западная часть Тихого океана –  $5^{\circ} - 45^{\circ} \text{ N}$ ,  $115^{\circ} - 175^{\circ} \text{ E}$ . Это зона очень высокой циклонической и сейсмической активности. К тому же, как известно, здесь земная кора значительно тоньше континентальной земной коры.

Необходимо еще одно примечание. При этом заранее принимаем версию, что тропические циклоны могут влиять на сейсмичность рассматриваемой территории. В земной коре большое число зон напряженностей, и мы совершенно не знаем картину этой сложной динамики в каждый момент времени. В этой ситуации попытки связать конкретное землетрясение с конкретным тропическим циклоном – это иллюзия связи. Сильный тропический ураган может действовать при слабых напряженностях земной коры и при этом землетрясения не произойдет и, наоборот, слабый циклон в случае критического состояния коры может вызвать землетрясение или группу землетрясений. Более того, вполне возможно, что землетрясение произойдет вовсе не под траекторией циклона, а на его периферии – там, где кора в данное время наиболее напряжена.

В связи со сказанным здесь в расчетных экспериментах мы оперируем не отдельными циклонами и отдельными землетрясениями, а суммарными циклоническими и сейсмическими энергиями, рассчитанными по большой площади и по большим отрезкам времени. В этом случае, как кажется, статистически выявленные закономерности достовернее отражают физическую картину событий.

### Расчетные эксперименты

В этом расчетном эксперименте сопоставляются многолетние динамики годовых значений циклонической и сейсмической энергий. Годовые значения энергий рассчитываются по всем тропическим циклонам и всем землетрясениям выбранного диапазона магнитуд, действовавших в северо-западной части Тихого океана в рассматриваемом году<sup>1</sup>.

Годовая циклоническая энергия рассчитывалась по много раз описанной методике [Ярошевич, 2007; 2011]. В эксперименте рассчитывались годовые значения циклонической и сейсмической энергий для различных периодов времени. Сейсмическая энергия определялась отдельно по нескольким диапазонам магнитуд землетрясений. Соответствующие многолетние ряды циклонической и сейсмической энергий сопоставлялись для оценки уровня корреляции между ними.

Изначально было понимание, что возможен эффект «последствия». Данное предположение основывалось на том, что инертность земной коры больше, нежели инертность атмосферы и океана и, стало быть, если реакция земной коры состоится, то она должна на какое-то время задержаться. В эксперименте это означало, что в сопоставлении рядов сейсмический ряд должен начинаться позже, чем циклонический ряд.

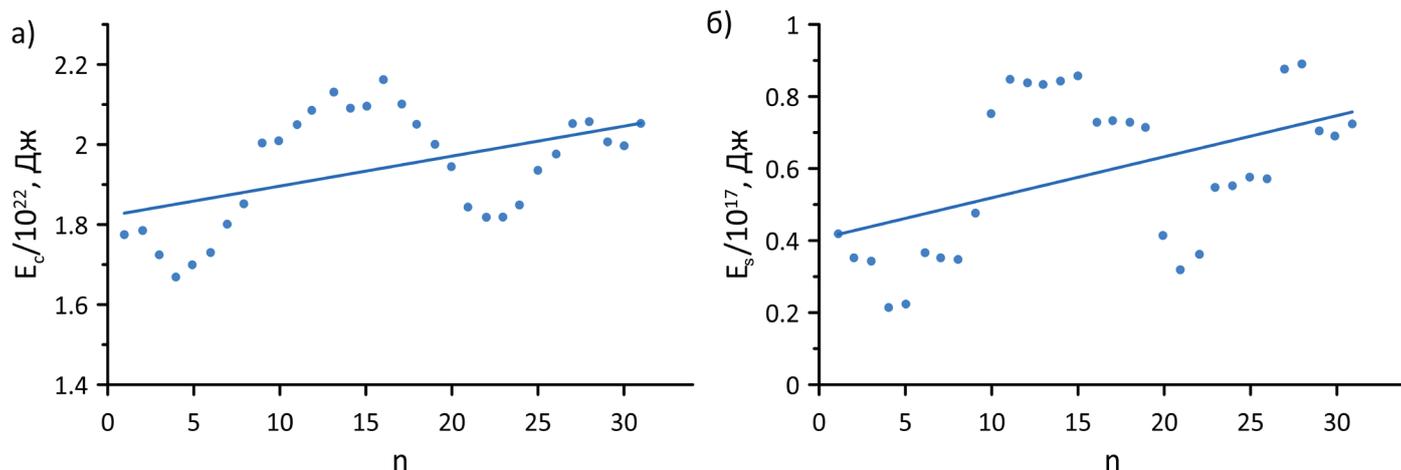
Был рассчитан ряд вариантов, отличающихся как годовыми длительностями рядов, так и диапазонами магнитуд землетрясений. Из всего разнообразия вариантов наибольший коэффициент корреляции между рядами достигнут при расчетах по интервалу 1970–2015 гг., диапазону землетрясений с  $M \geq 7$  и при «запаздывании» сейсмического ряда на 6 лет. В этом случае коэффициент корреляции  $k = 0.91$ . При этом при больших и меньших «запаздываниях» сейсмического ряда коэффициенты корреляции постепенно ослаблялись, что отражено в Таблице, где:  $n$  – время запаздывания сейсмической «реакции» относительно «воздействия» циклонической энергии; годы,  $k$  – коэффициент корреляции для различных интервалов лет между «воздействием» циклонической энергии и сейсмической «реакцией».

Таблица.

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k$	-0.18	-0.008	0.282	0.54	0.727	0.86	0.91	0.85	0.69	0.475	0.199	-0.09	-0.32

<sup>1</sup> Сведения о землетрясениях взяты из Сейсмологических бюллетеней Геофизической службы РАН, исходная информация о тропических циклонах взята из Интернета по адресу: Unisys Weather Hurricane-Tropical Data for Western Pacific, действовавшему до середины 2016 г..

На рис. 1 приведены сглаженные графики годовых значений циклонической и сейсмической энергии для приведенного выше случая.



**Рис. 1.** Динамика сглаженных годовых значений циклонической (а) и сейсмической (б) энергий. Здесь ряд годовых значений  $E_s$  запаздывает относительно ряда  $E_c$  на 6 лет. Коэффициент корреляции между рядами годовых значений  $E_c$  и  $E_s$  равен 0.91 ( $n$  – количество лет). Сглаживание – скользящее, окном в 10 последовательных значений. Расчеты проведены по 214 землетрясениям с магнитудой  $M \geq 7$  и по около 1400 тропическим циклонам, произошедших за 1970–2015 гг. в циклонической зоне северо-западной части Тихого океана

Принимая во внимание особенности используемых исходных циклонических и сейсмических параметров, уровень их точности и особенности расчетов дают основание считать, что коэффициент корреляции 0.91 достаточно представительный для таких геофизических исследований.

Важно отметить, что для этих же лет, но для землетрясений с  $M \geq 5$  и 6 сохранилась та же закономерность корреляционных связей, однако с немного меньшими коэффициентами корреляции. Так, например, в случае  $M \geq 5$  при запаздывании сейсмического ряда на 5, 6 и 7 лет максимальные коэффициенты корреляции были соответственно 0.83, 0.887 и 0.824.

В рассмотренном случае коэффициент корреляции между несмещенными относительно друг друга рядами циклонической и сейсмической энергий равен -0.18. То есть, не наблюдается какая-либо статистическая связь между годовыми значениями циклонической и сейсмической энергий внутри одного и того же года.

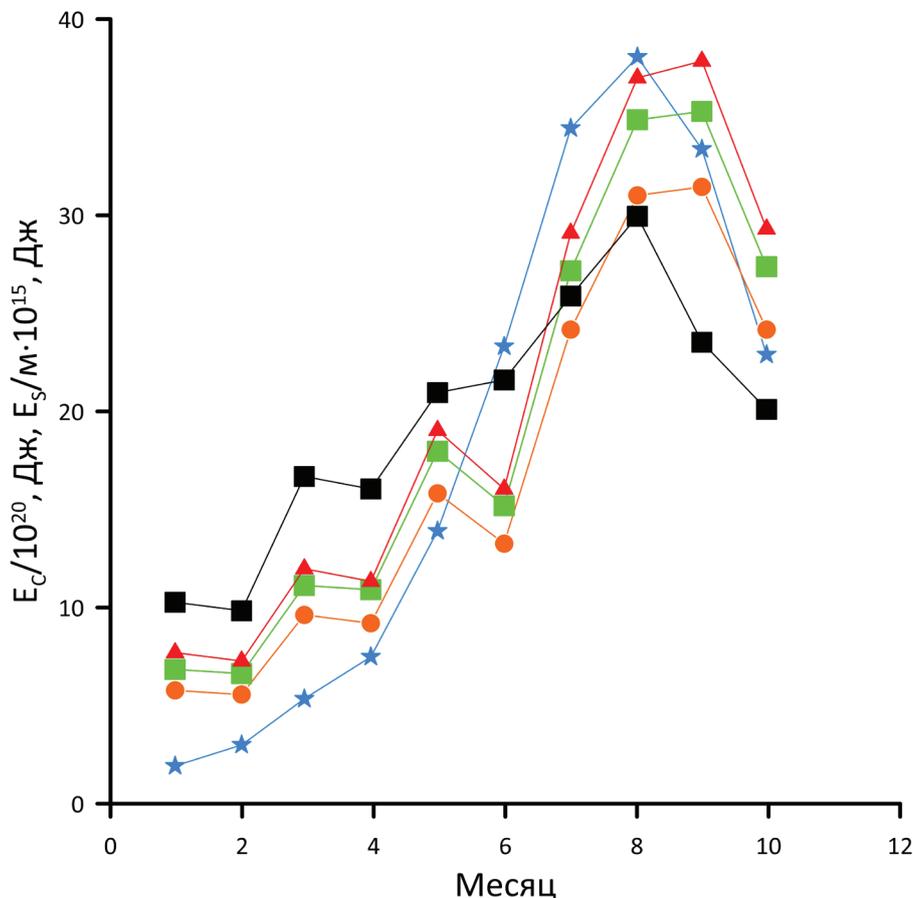
В публикации [Соболев и др., 2012] излагаются результаты исследования возможного непосредственного влияния тропических циклонов на сейсмичность отдельных районов северо-западной части Тихого океана. В результате было установлено, что тропические циклоны не оказывают значимого эффекта на сейсмичность Камчатки, Японии и Филиппин в краткосрочном аспекте – в течение нескольких недель.

Эти результаты и характер динамик циклонической и сейсмической энергий, представленных здесь на рис. 1 и в Таблице, похоже, свидетельствуют, что краткосрочного влияния тропических циклонов на сейсмичность не наблюдается.

В северо-западной части Тихого океана тропические циклоны могут возникать в любое время года. Однако здесь наблюдается сильно выраженная сезонность циклонической активности. Примерно с июля по октябрь включительно существенно возрастает количество тропических циклонов и их сила [Хаин, 1983].

В следующем расчетном эксперименте исследуется: влияет ли сезонность циклонической активности на характер сейсмической активности в зоне действия циклонов. По ряду лет для каждого месяца рассчитывались среднемесячные значения циклонической и сейсмической энергий. Все расчеты проведены по циклонам и землетрясениям циклонической зоны северо-западной части Тихого океана.

На рис. 2 показаны результаты этих расчетов. Графики рисунка иллюстрируют существенную сезонность как циклонической энергии, так и сейсмической и достаточно убедительную ежемесячную корреляцию их динамик.

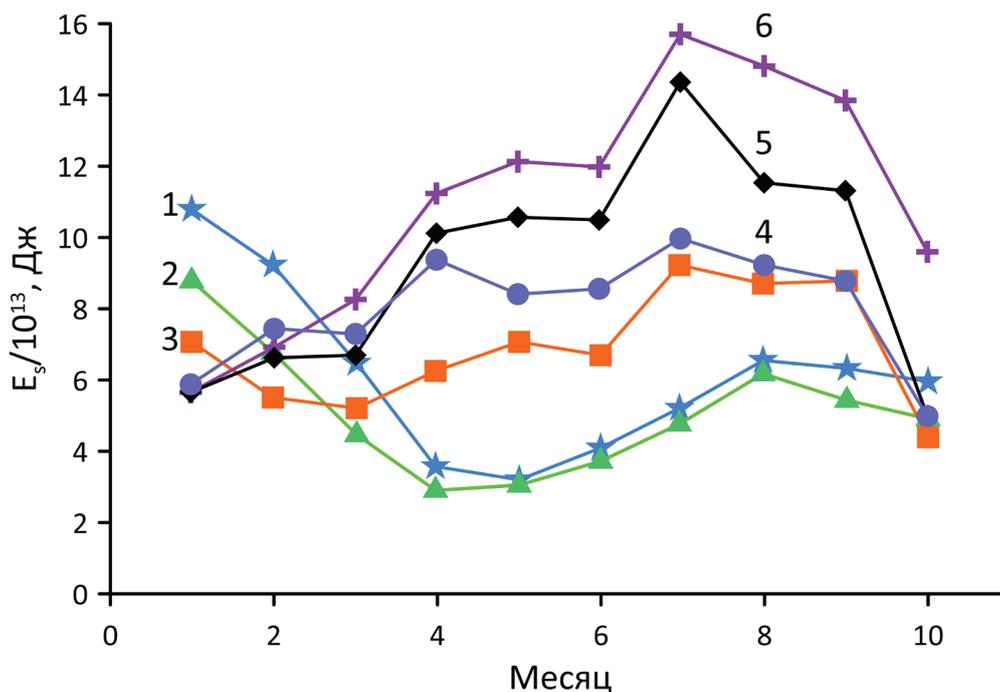


**Рис. 2.** Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической ( $E_c$  – звезды) и сейсмической энергии ( $E_s$ ). Сейсмическая энергия рассчитывалась по 2744 землетрясениям, с магнитудой  $M > 5$ , произошедших в 1980–2007 гг. (красные треугольники, масштабный коэффициент расположения графиков на рисунке;  $m = 5$ ); по 1081 землетрясению с  $M > 5.5$ , произошедших в 1980–2007 гг. (зеленые квадраты,  $m = 4.7$ ); по 525 землетрясениям с  $M \geq 6.0$ , произошедших в 1980–2007 гг. (оранжевые круги,  $m = 4.2$ ); по 916 землетрясениям с  $M \geq 6.0$ , произошедших в 1963–2007 гг. (черные квадраты,  $m = 4.3$ )

Аналогичные расчеты были проведены по континентальным территориям (север Китая, Монголия, часть Средней Азии). В этом случае какая-либо значимая сезонность не наблюдалась.

Тропические циклоны, как правило, не зарождаются вблизи экватора. В связи с этим был проведен следующий расчетный эксперимент. В эксперименте выявлялась динамика среднемесячных значений сейсмических энергий. Динамика определялась на ряде смежных территорий, каждая из которых размером  $25^\circ \times 25^\circ$ . Этих территорий шесть и все они ограничены долготными границами  $120^\circ$ – $145^\circ$  E. В эксперименте эти территории пошагово перемещаются по широте с юга на север, таким образом, что северная широта одной территории является южной широтой следующей территории. На рис. 3 показаны результаты этих расчетов. По широте самая южная территории ограничена  $10^\circ$  S и  $15^\circ$  N. Далее каждая последующая территория смещается на север с шагом в  $5^\circ$ . В данном случае рассматривались только землетрясения с  $M \leq 6.5$  и с глубинами очага не более 33 км, произошедших в 1999–2008 гг.

О чем свидетельствуют графики рис. 3? Перемещаясь по рассматриваемым территориям от экватора на север, все заметнее проявляется сейсмическая активность в летне-осенние месяцы (кривые 4, 5, 6) – она нарастает. На территориях, охватывающих экватор (кривые 1, 2), наблюдаются два небольших усиления сейсмической активности в летне-осеннее время и гораздо большее усиление сейсмичности в начале года. Кривая 3 представляет характер сейсмичности на территории, где уже зарождаются и действуют тропические циклоны. Здесь довольно четко проявляется летне-осенняя сезонность сейсмической энергии. Одновременно с «перемещением» рассматриваемых территорий на север сейсмическая активность в начале года существенно ослабевает.



**Рис. 3.** Сглаженные годовые графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанных по землетрясениям с  $M \leq 6.5$ . Среднемесячные значения энергий рассчитаны для площадей: 1 – ( $10^\circ \text{ S} - 15^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 145^\circ \text{ E}$ ), 2 – ( $5^\circ \text{ S} - 20^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 145^\circ \text{ E}$ ), 3 – ( $0^\circ - 25^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 145^\circ \text{ E}$ ), 4 – ( $5^\circ \text{ N} - 30^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 45^\circ \text{ E}$ ), 5 – ( $10^\circ \text{ N} - 35^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 145^\circ \text{ E}$ ), 6 – ( $15^\circ \text{ N} - 40^\circ \text{ N}$ ) – ( $120^\circ \text{ E} - 145^\circ \text{ E}$ )

### Выводы

Представленные в статье результаты позволяют, предположительно, рассматривать тропические циклоны в качестве одного из постоянных факторов влияния на сейсмическую ситуацию, по крайней мере, в циклонической зоне северо-западной части Тихого океана. Это еще один пример динамического влияния геофизического процесса, происходящего в одной геосфере на динамические процессы другой геосферы.

### Список литературы

- Голицын Г.С. Статистика и энергетика тропических циклонов // ДАН. 1997. Т. 354. № 4. С. 535–538.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М. : Наука. 1983. – 415 с.
- Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Петроан Л.И. О механизме воздействия тропических циклонов на земную кору // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 425. № 5. С. 674–677. <https://www.elibrary.ru/jxozuj>
- Островский А.А., Рыкунов Л.Н. Экспериментальное изучение донного сейсмического шума в океане при прохождении циклона // Океанология. 1982. Т. XXII. № 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 // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. № 2. С. 3–10.
- Соболев Г.А., Загржевская 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.
- Хаин А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л. : Гидрометеиздат. 1983. – 272 с.
- Ярошевич М.И. О некоторых взаимосвязях в динамике активности тропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 547–551. <https://www.elibrary.ru/nyfvqf>

Ярошевич М.И. Динамика сезонных значений суммарных интенсивностей тропических циклонов // ДАН. 2007. Т. 413. № 4. С. 549–552. <https://www.elibrary.ru/iaaniz>

Bowen S.P., Richard J., Macini J.D. et al. Microseism and infrasound generation by cyclones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Vol. 113 (5). P. 2562–2573. <https://doi.org/10.1121/1.1567277>

Hasselmann K.A. A statistical analysis of the generation of microseisms // Rev. of Geophys. 1963. Vol. 1 (2). P. 177–210. <https://doi.org/10.1029/RG001i002p00177>

## **ABOUT SOME FEATURES OF SEISMICITY IN THE ACTION AREA OF TROPISIC CYCLONES**

**© 2024 M. I. Yaroshevich\***

*Moscow, Russia*

*\*E-mail: myarosh32@gmail.com*

Calculation experiments were carried out that revealed signs of the influence of tropical cyclones on seismicity in the zone of tropical cyclone action. The calculations are based on long-term data of tropical cyclones and earthquakes in the northwestern Pacific Ocean. The research results seem to be of some interest in the general direction of research into the interaction of geospheres.

**Keywords:** tropical cyclones, earthquakes, tropical cyclone and earthquake energy.