

УДК 550.34: 551.515.2

ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

© 2025 г. М. И. Ярошевич^{1, *}, Л. Х. Ингель^{1, 2, **}¹ФГБУ «НПО «Тайфун», Обнинск, Россия²Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

*E-mail: myarosh32@gmail.com

**E-mail: lev.ingel@gmail.com

Сравниваются временные зависимости энергии тропических циклонов и землетрясений в северо-западной части Тихого океана за многолетний период. Выявлены определенные корреляционные связи между динамиками годовых значений энергии циклонов и землетрясений. Рассчитаны тенденции многолетней динамики годовых значений энергии циклонов и землетрясений. Полученные результаты подкрепляют имеющиеся в литературе сведения о влиянии тропических циклонов на сейсмичность регионов их активности.

Ключевые слова: тропические циклоны, сейсмическая активность, северо-западная часть Тихого океана, энергия тропических циклонов, энергия землетрясений, корреляция, воздействие циклонов на земную кору, запаздывание отклика.

Для цитирования: Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Тропические циклоны и сейсмичность северо-западной части Тихого океана // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 2. С. 66–73 https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_66

Введение

Северо-западная часть Тихого океана – регион очень высокой сейсмической активности и активности тропических циклонов. Здесь ежегодно возникают примерно 1000–1200 землетрясений разной интенсивности и в среднем порядка 30 тропических циклонов, из которых около половины достигают интенсивности тайфунов (максимальная скорость ветра $V_m \geq 33$ м/с).

Кинетическая энергия тайфуна может достигать порядка 10^{18} – 10^{19} Дж [Голицын, 2021]. Даже меньшее из этих значений так велико, что соответствует суммарной энергии 500 землетрясений с магнитудой $M=7$. Если допустить, что очень небольшая часть энергии тайфуна воздействует на земную кору, то и в этом случае тайфуны могут заметно влиять на сейсмический режим. Опубликовано много соображений об этом и свидетельств таких воздействий [Островский, Рыкунов, 1982; Табулевич, 1986; Мирзоев и др., 2009; Ярошевич, 2011а,б; Соболев, 2012; Лысенко, Ярошевич, 2015; Ярошевич, 2020; 2024; Bowen, 2003; Lovett, 2013; Fan et al., 2019; Pandey, 2022]. В настоящей работе предпринята попытка на большом статистическом материале более детально выявить влияние «циклонической» активности на сейсмическую активность в зависимости от рассматриваемого диапазона магнитуд и глубины гипоцентров землетрясений.

Метод исследования

Конкретные физические механизмы воздействия циклонов на земную кору и сейсмический режим весьма сложны (см., например, [Табулевич, 1986; Гарагаш и др., 2004; Ингель и др., 2009]) и недостаточно исследованы. Поэтому представляется целесообразным использование статистического сопоставления тенденций сейсмической и «циклонической» активности. Количественные показатели

сейсмической активности хорошо разработаны и анализ ее тенденций не представляет принципиальной трудности. Иначе обстоит дело с количественными показателями активности тропических циклонов (ТЦ) по отношению к земной коре. Лишь в последние полтора десятилетия одним из авторов [Ярошевич, 2011a,б] предложена последовательная система расчета таких показателей.

Для каждого зарегистрированного циклона по простой модельной схеме рассчитывается горизонтальное распределение его кинетической энергии, зависящее от времени. Регионы, подверженные действию ТЦ, разбиваются на относительно небольшие трапеции (в данном случае 5×5 градусов широты), и отслеживаются изменения суммарной кинетической энергии всех циклонов, приходящиеся на каждый квадрат. Затем эта энергия суммируется по всем трапециям. Детали такой системы расчета количественных показателей «циклонической» активности подробно изложены, например, в работах [Ярошевич, 2011a,б]. Эта модель позволяет анализировать многолетние вариации активности ТЦ, которые можно сопоставлять с ходом сейсмической активности.

Исходной информацией в выполненных расчетных экспериментах служат тропические циклоны и землетрясения, произошедшие в обширной области северо-западной части Тихого океана ($5-45^\circ \text{ N} - 115-175^\circ \text{ E}$) в течение 1980–2015 гг. Сопоставлялся ход годовых значений циклонической (E_c) и сейсмической энергии (E_s). Годовые значения сейсмической энергии рассматриваемых диапазонов магнитуд рассчитываются по данным сейсмологических бюллетеней Геофизической службы (ГС) РАН. Годовые значения циклонической энергии рассчитываются по вышеупомянутой модели [Ярошевич, 2011a,б].

Результаты расчетных экспериментов

На рис. 1 представлен график хода сглаженной многолетней динамики циклонической энергии за 1980–2015 гг.

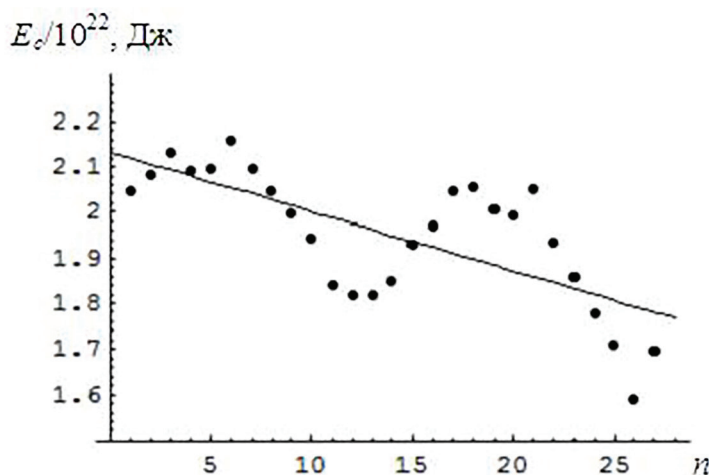


Рис. 1. Динамика сглаженных годовых значений циклонической энергии тропических циклонов, произошедших в 1980–2015 гг. Сглаживание — скользящее, по десяти последовательным значениям; n — количество лет

Динамика характеризуется относительно медленными колебаниями циклонической энергии и тенденцией к общему, с годами, ослаблению энергии. Развитие динамики выражается регрессионным соотношением $E_c/10^{22} \text{ Дж} = 2.131 - 0.013 \times n$.

На рис. 2 представлена многолетняя динамика годовых значений сейсмической энергии. Она рассчитана по всем землетрясениям, всех магнитуд, при условии, что глубины гипоцентров всех землетрясений $H \leq 33$ км. В этом случае наблюдается тенденция к общему, с годами, нарастанию сейсмической активности: ($E_s/10^{17} \text{ Дж} = 1.038 + 0.11 \times n$).

Коэффициент корреляции между динамикой циклонической энергии (рис. 1) и динамикой сейсмической энергии (рис. 2) $k = -0.83^1$.

¹ Учитывая уровень точности определения параметров тропических циклонов, землетрясений и расчетов соответствующих энергий, представляется, что коэффициент корреляции, равный -0.83 , является достаточно высокой и достоверной оценкой соотношений динамик, приведенных на рисунках 1, 2.

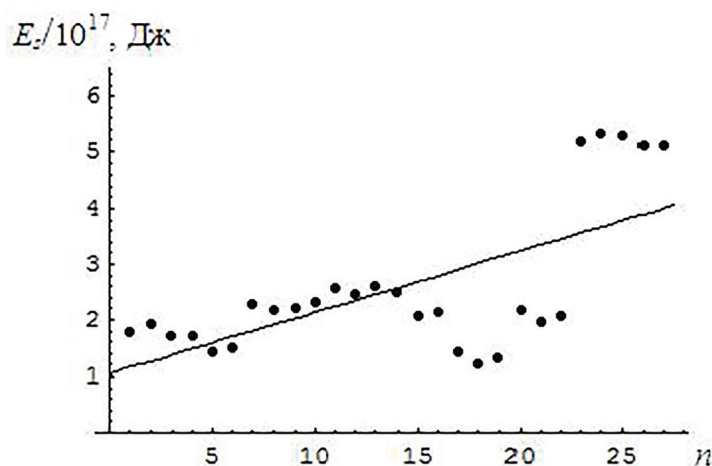


Рис. 2. Динамика сглаженных годовых значений сейсмической энергии за 1980–2015 гг. Расчеты относятся ко всем землетрясениям всех магнитуд и значениям $H \leq 33$ км

В следующем расчетном эксперименте рассматривались землетрясения диапазона $M \geq 6$ в двух вариантах: в одном только землетрясения с $H \leq 33$ км, в другом – землетрясения с любыми значениями H . На рис. 3 приведены результаты этого эксперимента.

И здесь в обоих случаях, в течение 1980–2015 гг. можно отметить общее стремление к нарастанию сейсмической активности: $E_s/10^{16}$ Дж = $0.978 + 0.109 \times n$ (рис. 3а) и $E_s/10^{16}$ Дж = $6.165 + 0.086 \times n$ (рис. 3б). Существенно, что в этом варианте расчетов различаются коэффициенты корреляции между многолетними динамиками циклонической и сейсмической энергии. В случае, когда рассматриваются землетрясения с $M \geq 6$, ограниченные $H \leq 33$ км, коэффициент корреляции $k = -0.83$, а в случае этого же диапазона землетрясений, но с любыми значениями H , $k = -0.14$. Это важное различие обсуждается ниже.

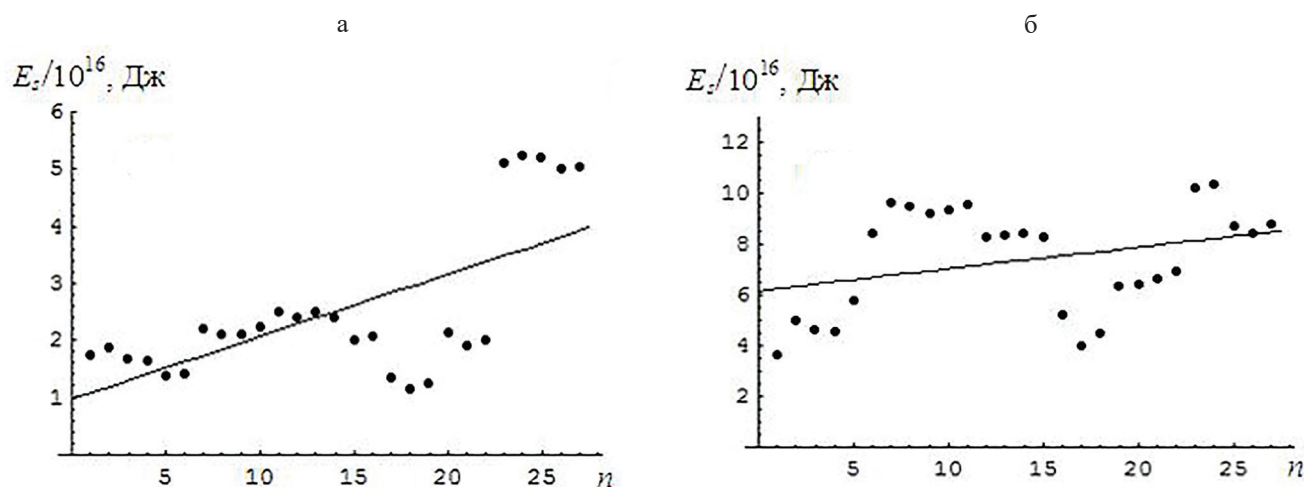


Рис. 3. Динамика сглаженных годовых значений сейсмической энергии за 1980–2015 гг. а – все землетрясения с $M \geq 6$ и с $H \leq 33$ км; б – все землетрясения с $M \geq 6$ при всех значениях H

В еще одном расчетном эксперименте определялась сглаженная многолетняя динамика сейсмической активности, рассчитанная по всем землетрясениям $M \geq 7$ и по всем значениям H . Результат расчетов представлен на рис. 4. Здесь общее многолетнее нарастание сейсмичности описывается регрессионным соотношением $E_s/10^{16}$ Дж = $5.136 + 0.075 \times n$. В этом случае коэффициент корреляции между многолетними динамиками циклонической и сейсмической энергии $k = -0.476$. Такой характер и умеренный уровень корреляции между многолетними динамиками циклонической и сейсмической энергии, вероятно, можно объяснить неоднородностью рассматриваемого материала – сочетанием сильных землетрясений ($M \geq 7$), гипоцентры которых расположены как на глубинах $H \leq 33$ км, так и на глубинах $H > 33$ км.

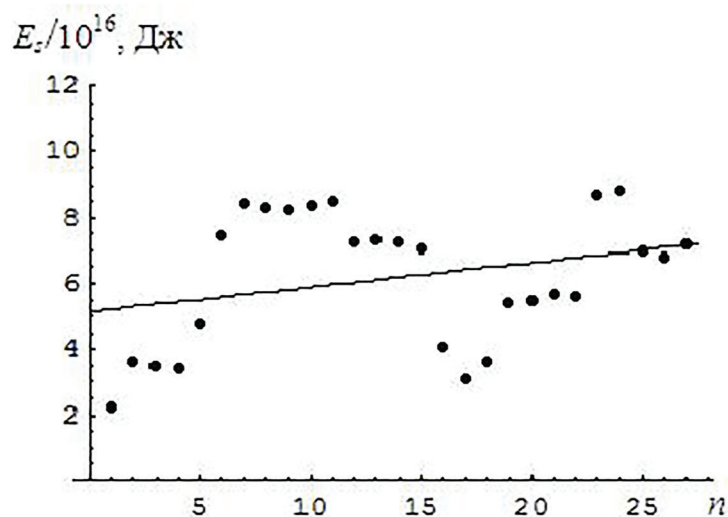


Рис. 4. Динамика сглаженных годовых значений сейсмической энергии за 1980–2015 гг. Просуммированы все землетрясения с $M \geq 7$ со всеми значениями H

Эффект «последствия»

Вышеприведенные корреляции дают дополнительные основания для предположений о влиянии тропических циклонов на сейсмическую активность. Такое влияние, вообще говоря, может проявляться и с некоторым запозданием вследствие вероятной инертности процессов в земной коре. Для проверки такой возможности были проведены некоторые дополнительные расчеты, в которых рассматривались корреляции хода сейсмической и циклонической активности со сдвигами по времени.

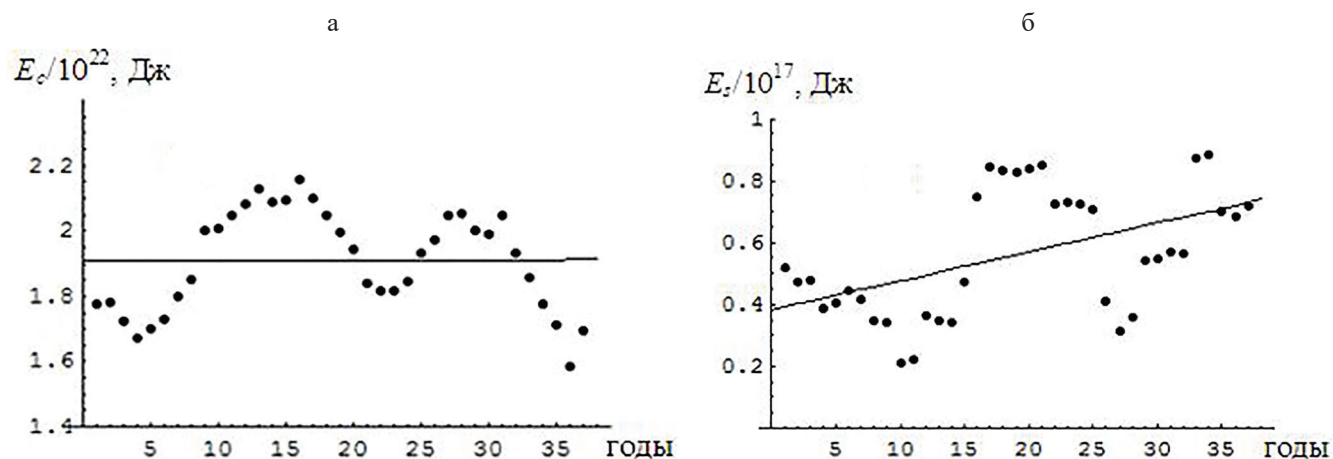


Рис. 5. Сглаженная динамика исходных, не смещенных относительно друг друга по времени годовых значений циклонической (а) и сейсмической (б) энергии. Энергии рассчитаны по тропическим циклонам и землетрясениям ($M \geq 7$), произошедшим в 1970–2015 гг. в области активности ТЦ в северо-западной части Тихого океана. Сглаживание — скользящее, окном в 10 последовательных значений. Расчеты проведены по 214 землетрясениям с магнитудой $M \geq 7$ и по около 1400 тропическим циклонам

Было рассчитано большое число вариантов, отличающихся как годовыми длительностями рядов, так и диапазонами магнитуд землетрясений. Из всех вариантов наибольший коэффициент корреляции между рядами (0.91) достигнут в период 1970–2015 гг., для землетрясений с $M \geq 7$ и при «запаздывании» сейсмического хронологического ряда на 6 лет². При этом, при больших и меньших «запаздываниях» сейсмического ряда коэффициенты корреляции постепенно и симметрично ослаблялись.

² Для этих же лет, но для землетрясений с $M \geq 5$ и 6 сохранилась та же закономерность корреляционных связей, но с немного меньшими коэффициентами корреляции. Так, например, в случае $M \geq 5$ при запаздывании сейсмического ряда на 5, 6 и 7 лет, коэффициенты корреляции были соответственно 0.83, 0.887 и 0.824.

Сначала приведем (рис. 5) сглаженные динамики исходных годовых значений циклонической и сейсмической энергии без запаздывания хронологического ряда годовых значений сейсмической энергии.

Коэффициент корреляции между приведенными несмещенными относительно друг друга рядами циклонической и сейсмической энергии в этом случае равен -0.18 . Таким образом, при подобном сопоставлении незаметна существенная статистическая связь между годовыми значениями циклонической и сейсмической энергии внутри года.

Для сравнения на рис. 6 (для этого же случая: $M \geq 7$, 1970–2015 гг.) представлено сопоставление со сдвигом по времени, когда хронологический ряд годовых значений сейсмической энергии запаздывает относительно хронологического ряда годовых значений циклонической энергии на 6 лет. Здесь, очевидно, просматривается положительная корреляция между рассматриваемыми рядами энергий двух геофизических сред.

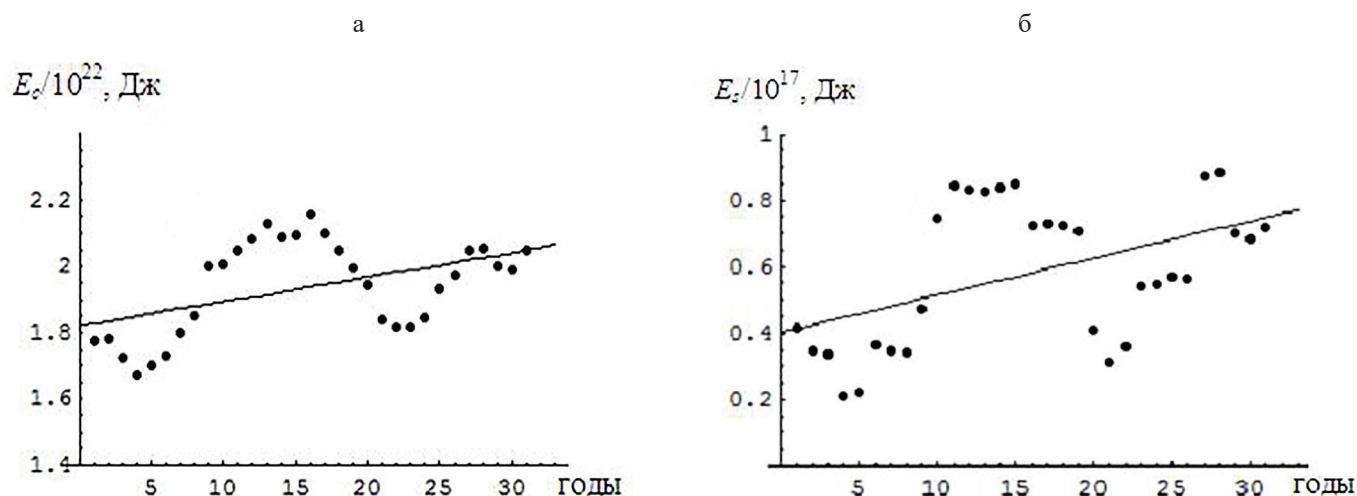


Рис. 6. Динамика сглаженных годовых значений циклонической (а) и сейсмической (б) энергии. Здесь ряд годовых значений E_s запаздывает относительно ряда E_c на 6 лет. Коэффициент корреляции между рядами годовых значений E_c и E_s равен 0.91

Обсуждение результатов

Прежде всего, остановимся на ситуациях, когда многолетние ряды циклонической и сейсмической энергии связаны относительно высоким, по абсолютной величине, отрицательным коэффициентом корреляции (рисунки 2 и 3а). Подобные ситуации свидетельствуют о том, что при нескольких годах непрерывной интенсивной «циклонической» активности сейсмическая активность относительно низкая и, наоборот, при слабой «циклонической» активности сейсмическая активность относительно высокая.

Этот результат может показаться парадоксальным. На первый взгляд, более логичным выглядит предположение, что при интенсивной «циклонической» активности в твердые слои Земли «накачивается» большая энергия и тем самым должна возбуждаться большая сейсмичность. Но нам представляется возможным следующее объяснение: воздействия циклонов могут в какой-то степени «разряжать» существующие в земной коре напряжения и этим препятствовать подготовке сильных землетрясений.

Земная кора насыщена многочисленными областями напряженностей. Интенсивность напряженностей меняется, и они непрерывно мигрируют. Если в результате миграции несколько областей напряженности взаимодействуют, объединяются, то может произойти среднее или сильное землетрясение. Его подготовка, правда, занимает время, иногда довольно длительное.

Тропические циклоны обладают не только большой энергией, но и занимают большие площади. Кроме того, нередко одновременно существует и воздействует на земную кору целая группа циклонов.

Таким образом, в периоды высокой «циклонической» активности в земную кору накачивается большая энергия на относительно большой площади. Предполагается, что эта энергия может «накладываться» на определенное число средних или слабых напряженностей, увеличивая их уровень. В этой ситуации, из-за необычно сильного и необычно быстрого воздействия циклонической энергии быстрее «срабатывают» возросшие напряженности земной коры и могут «гаситься» развитие и миграция напряженностей. В итоге «провоцируется» увеличение числа слабых землетрясений, например, землетрясений с $M \leq 4$ и снижается вероятность возникновения сильных землетрясений. Возрастание при этом количества слабых землетрясений ($M \leq 4$ и 5) относительно мало отразится на величине суммарной годовой сейсмической энергии³.

На этапах же низкой «циклонической» активности поступающая в земную кору энергия может быть недостаточной для эффективного воздействия на зоны напряженности. В этом случае зоны напряженности имеют больше возможностей и времени для развития и их слияний, что может привести к сильным землетрясениям, а значит к усилению сейсмической активности.

В проведенных расчетных экспериментах выявлена еще одна важная особенность: высокие, по абсолютной величине, значения отрицательных коэффициентов корреляции достигаются только при рассмотрении «неглубоких» землетрясений с $H \leq 33$ км, что хорошо иллюстрируется на рис. 3. Этот результат может свидетельствовать о том, что тропические циклоны преимущественно воздействуют на сейсмичность только в неглубоких слоях твердой Земли, что понятно из физических соображений.

В работе [Соболев и др., 2012] описываются результаты тщательного исследования возможного непосредственного влияния тропических циклонов на сейсмичность отдельных районов северо-западной части Тихого океана. В результате установлено, что тропические циклоны не оказывают значимого влияния на сейсмичность Камчатки, Японии и Филиппин в краткосрочном аспекте – в течение нескольких недель. Эти результаты и характер динамик циклонической и сейсмической энергии, представленных на рисунках 5 и 6, могут свидетельствовать о том, что быстрого интенсивного отклика сейсмической активности на краткосрочные воздействия тропических циклонов не наблюдается; говорят о возможности накопления и запаздывания эффектов.

Заключение

Представленные статистические результаты подтверждают предположения о возможности заметного влияния «циклонической» активности на сейсмическую активность в регионе действия ТЦ и, возможно, в ближней периферии. Представлены аргументы в пользу того, что эффекты воздействий тропических циклонов на земную кору могут накапливаться и проявляться с существенным запаздыванием по времени.

Это согласуется с некоторыми предшествующими результатами данного направления и развивает их. В частности, в работе [Ярошевич, 2011б] для северо-западной части Тихого океана по продолжительному ряду последовательных лет для всех месяцев года были рассчитаны среднемесячные значения циклонической энергии. При этом, как и следовало ожидать, сильно возростала циклоническая энергия в летне-осеннее время (июль–октябрь). Для этих же лет и по этой же территории определялись среднемесячные значения сейсмической энергии отдельно по землетрясениям с магнитудой $M \geq 5$ и по землетрясениям $M \geq 6$. Динамики среднемесячных значений циклонической и сейсмической энергий оказались очень схожими. Таким образом, у землетрясений проявилось существенно выраженное летне-осеннее усиление – сезонный ход, аналогичный активности тропических циклонов. При этом другой расчетный эксперимент, оценивающий динамику сейсмической энергии на континентальной территории (Монголия, Средняя Азия), не выявил какой-либо интенсификации сейсмической активности в летне-осенний период.

³ Для сопоставления напомним, что энергия одного землетрясения с $M = 7$, равна суммарной энергии более 31700 землетрясений с $M = 4$. Здесь, к сожалению, не рассматриваются реальные землетрясения $M \leq 4$, так как они за указанные выше годы не полностью представлены в Сейсмологическом бюллетене ГС РАН. Это, видимо, связано с некоторыми техническими возможностями сейсмографов тех лет.

Список литературы

- Гарагаш И.А., Ингель Л.Х., Ярошевич М.И. Об одном возможном механизме влияния атмосферных процессов на сейсмическую активность вблизи берегов океанов // Физика Земли. 2004. № 8. С. 91–96. <https://elibrary.ru/oxkcpz>
- Голицын Г.С. Вероятностные структуры микромира: Землетрясения, ураганы, наводнения. М. : Физматлит. 2021. – 174 с.
- Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Петрова Л.И. О механизме воздействия тропических циклонов на земную кору // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 5. С. 674–677. <https://elibrary.ru/jxozyj>
- Лысенко Д.А., Ярошевич М.И. Сезонная динамика циклонической и сейсмической активности в зонах действия тропических циклонов // Геофиз. исслед. 2015. Т. 16. № 1. С. 35–43. <https://elibrary.ru/tmgfqb>
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68. <https://elibrary.ru/kwiqwv>
- Островский А.А., Рыкунов Л.Н. Экспериментальное изучение донного сейсмического шума в океане при прохождении циклона // Океанология. 1982. Т. XXII. № 6. С. 975–979.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 1–12. <https://elibrary.ru/nkfiba>
- Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск : Наука. 1986. – 151 с.
- Ярошевич М.И. О некоторых взаимосвязях в динамике активности тропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011а. Т. 47. № 4. С. 547–551. <https://elibrary.ru/nyfvqf>
- Ярошевич М.И. Тропические циклоны, как возможный фактор, влияющий на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Физика Земли. 2011б. № 7. С. 80–85. <https://elibrary.ru/nxqhxx>
- Ярошевич М.И. Циклоническая активность тропических циклонов и ее динамика – единый непрерывный процесс // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 547–550. <https://doi.org/10.31857/S0002351520050120>
- Ярошевич М.И. О некоторых особенностях сейсмичности в зоне действия тропических циклонов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 25–31. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_25
- Bowen S.P., Richard J., Macini J.D. et al. Microseism and infrasound generation by cyclones // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. Vol. 113 (5). P. 2562–2573. <https://doi.org/10.1121/1.1567277>
- Fan W., McGuire J.J., de Groot-Hedlin C.D. et al. Stormquakes // Geophys. Research Lett. 2019. Vol. 46 (22). P. 12909–12918. <https://doi.org/10.1029/2019GL084217>
- Lovett R. Hurricane may have triggered earthquake aftershocks // Nature. 2013. <https://doi.org/10.1038/nature.2013.12839>.
- Pandey R.S. Statistical analysis of environmental parameters on the occurrences of tropical cyclones and earthquakes: an example from West North Pacific region // Mar. Geophys. Res. 2022. Vol. 43 (44). <https://doi.org/10.1007/s11001-022-09505-w>

TROPICAL CYCLONES AND SEISMICITY OF THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN

© 2025 M. I. Yaroshevich^{1, *}, L. Kh. Ingel^{1, 2 **}

¹*Federal State Budgetary Institution «NPO «Typhoon», Obninsk, Russia*

²*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

***E-mail: lev.ingel@gmail.com*

The time dependences of the energy of tropical cyclones and earthquakes in the northwestern Pacific Ocean over a long-term period are compared. Certain correlations between the dynamics of annual cyclone and earthquake energy values are revealed. The trends in the long-term dynamics of annual cyclone and earthquake energy values are calculated. The obtained results support the information available in the literature on the influence of tropical cyclones on the seismicity of the regions of their activity.

Keywords: tropical cyclones, seismic activity, northwestern Pacific Ocean, tropical cyclone energy, earthquake energy, correlation, cyclone impact on the earth's crust, response delay.