

---

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ  
АКТИВНОСТЬ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ  
ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

© 2012 г. М. И. Ярошевич

Государственное учреждение «Научно-производственное объединение «ТАЙФУН», Обнинск

E-mail: yarosh@typhoon.obninsk.ru

Поступила в редакцию 30.06.2011 г.

Рассматривается возможность влияния тропических циклонов на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана. Прямых надежных методов расчета воздействия тропических циклонов на земную кору нет. Поэтому в исследовании решается своего рода обратная задача: по особенностям внутригодовой динамики сейсмической активности оценивается качественно возможное влияние на нее действия тропических циклонов. Проведен ряд дополняющих друг друга и различных по методике расчетов. Выявлено, что для территорий циклонической зоны внутригодовые динамики циклонической и сейсмической активности хорошо коррелированы. На основании полученных результатов высказывается предположение: тропические циклоны могут рассматриваться в качестве фактора, влияющего на сейсмичность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, циклоническая активность, сейсмическая активность

#### ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях, результаты которых изложены ниже, тропические циклоны (ТЦ) изначально рассматривались в качестве возможного фактора, влияющего на сейсмичность зоны их действия. Приоритетным районом исследований была избрана циклоническая зона северо-западной части Тихого океана. Избранный район характерен особо высокой циклонической и сейсмической активностью. Предполагалось, что в этих условиях искомые особенности и закономерности, если таковые будут, проявятся четче.

Предположения о возможном влиянии ТЦ на сейсмичность основывались на некоторых фактах: регулярно регистрируются так называемые штормовые микросейсмы – специфические сейсмические волны, порождаемые перемещающимся ТЦ, большие значения кинетической энергии циклонов и, в определенной степени, результаты исследований влияния перепадов атмосферного давления на сейсмическую активность (Сытинский, 1979).

Такие исследования представляются целесообразными. Выявленные связи между интенсивностью ТЦ и реакцией в земной коре могут способствовать расширению собственно исследований в этих средах и решению некоторых прикладных задач прогностического характера.

Одной из важнейших прикладных задач является разработка систем оценки циклонической и

сейсмической опасности. В настоящее время эти задачи решаются в каждой среде по отдельности и независимо друг от друга. При этом уровень достижений существенно различается. Выявив даже отдельные связи между циклонической и сейсмической активностью и принимая во внимание особо высокую циклоническую и сейсмическую активность рассматриваемого района, представляется, что была бы целесообразна разработка совместной циклонической и сейсмической системы оценок опасности и риска.

Мы выше уже упомянули о высокой сейсмической и циклонической активности рассматриваемого района. Так, на площади  $5^{\circ}$ – $50^{\circ}$  с.ш.,  $115^{\circ}$ – $165^{\circ}$  в.д. в течение 1999–2008 гг. зарегистрировано около 14000 землетрясений со среднегодовой энергией  $6.3 \times 10^{16}$  Дж. В эти же годы, на этой же территории действовали 310 ТЦ, из которых примерно половина достигли стадии ураганов. Циклоны здесь делятся примерно от 4 до 16 сут. Это очень высокий уровень циклонической активности. В указанной зоне ТЦ могут возникать в любое время года, но их максимальная интенсивность, как по энергии, так и по их количеству, приходится на июль–октябрь месяцы (Тараканов, 1980; Хаин, Сутырин, 1983). В периоды активной циклонической деятельности довольно часты ситуации, когда несколько ТЦ по времени частично или полностью совпадают друг с другом.

То, что ТЦ порождают штормовые микросейсм и, стало быть, каким-то образом воздействуют на земную кору, известно давно (Винник, 1971; Островский, Рыкунов, 1982; Табулевич, 1986; Bowen, 2003; Hasselman, 1963; Longuet-Higgins, 1950; Webb, 1992). В этих и в других публикациях излагались теории генераций штормовых микросейсм, исследовались их спектры, оценивалась доля энергии ТЦ, затрачиваемая на штормовые микросейсм (Табулевич, 1986). Была показана принципиальная возможность оценки некоторых параметров циклонов по штормовым микросейсмам (Ярошевич, 1997, 1999). Однако заметим, что штормовые микросейсм — это только “наблюдаемая” и численно оцениваемая реакция земной коры на циклоническое воздействие (эта реакция определяется как сейсмическая энергия источника). Исследования различных типов взрывов показали, что, во-первых, отношения сейсмической энергии к полной энергии взрыва — очень малые величины, и, кроме того, значения этих отношений характеризуются очень большими разбросами (Садовский и др., 1986; Пасечник, 1970). Так, при воздушных взрывах, произведенных над океаническими островами, отношение сейсмической энергии объемных волн к полной энергии взрыва оценивается величиной в  $10^{-7}$ . Наибольшие значения таких отношений достигаются в случае подводных взрывов —  $(1-4) \times 10^{-2}$  (Пасечник, 1970). Таким образом, если ТЦ влияют на сейсмическую активность, то, видимо, это может происходить только за счет той части циклонической энергии, которая, достигнув коры, диссипировалась в ней и которая, скорее всего, значительно превышает сейсмическую часть энергии. В наших исследованиях именно эта часть энергии представляет интерес.

Конечно, землетрясения в определенной мере схожи со взрывами. Применительно к землетрясениям значения отношений сейсмической и диссипативной энергий взрывов могут восприниматься не иначе, как приближенные оценки или как получение представления о соотношениях энергий. Тем более оценивать отношение энергии штормовых микросейсм к циклонической энергии, поступившей в земную кору исходя из аналогичных соотношений при взрывах, как минимум, не корректно — очевидны существенные различия в механизмах генерации сейсмических волн и, например, в скорости нарастания мощности во взрывах и циклонах. Можно, исходя из изложенного выше, лишь предполагать, что существенно большая часть циклонической энергии, поступившей в кору, в ней же и трансформируется.

Ответ на вопрос, влияют ли ТЦ на сейсмичность зоны их действия, логичнее всего получить прямыми расчетами. Но для этого необходимо

решить ряд задач. Следует определить работу, совершаемую циклоном над океаном. Это, по-видимому, решаемая задача и частично она решена (Голицын, Ярошевич, 2000). Далее необходимо рассчитать, какая часть энергии, поступившая в океан, будет отдана коре. Это, похоже, более сложная задача. Далее, если бы удалось как-то оценить величину энергии, поступившей в кору, то эта оценка, скорее всего, была бы недостаточно уверенной. Но если бы и удалось преодолеть эти задачи, мы столкнулись бы с третьей и, как представляется, неразрешимой трудностью. Напряженность в земной коре непрерывно меняется как во времени, так и в пространстве. Для расчетов реакции коры на действия циклонов мы должны в любой момент времени и с необходимой пространственной детализацией, на обширных территориях и до глубин хотя бы неглубоких землетрясений (70 км) знать ее поля напряженности. Кроме того, также с пространственной детализацией, следует знать характеристики сред слоев земной коры. Из сказанного понятно, что прямые расчеты воздействий пока невозможны.

В виду невозможности прямых расчетов был избран путь решения своего рода обратной задачи — по качественному анализу временных и пространственных динамик сейсмической и циклонической активности попытаться выявить признаки влияния ТЦ на сейсмичность циклонической зоны.

### НЕКОТОРЫЕ ДЕТАЛИ РАСЧЕТОВ

Расчет энергетических характеристик циклонической интенсивности основывается на методе расчета кинетической энергии отдельного циклона (Голицын, 1997). В этой работе кинетическая энергия рассчитывалась по зоне максимальных ветров ( $V_m$ ), и для круга с характерным радиусом максимальных ветров  $r_m \approx 50$  км. В наших расчетах мы должны были принять во внимание, что циклонический ветер достигает достаточно большой силы и на расстояниях ( $r$ ), многократно превышающих  $r_m$ , и это непременно следует учитывать в оценках энергии циклона. Скорость циклонического ветра ( $V_r$ ) с удалением от центра циклона на расстоянии  $r$  определяется из оценочного соотношения

$$V_r = (V_m \times r_m^{0.5}) / r^{0.5}.$$

Выше уже упоминалось, что в рассматриваемом районе нередко несколько циклонов действуют одновременно. Непонятно было, как учитывать энергетический вклад каждого циклона и как оценивать распределение этой “суммарной” энергии по пространству, принимая, к тому же, во внимание, что “след” циклона покрывает большие территории. Проблема эта была решена путем построения простой модели (схемы) форми-

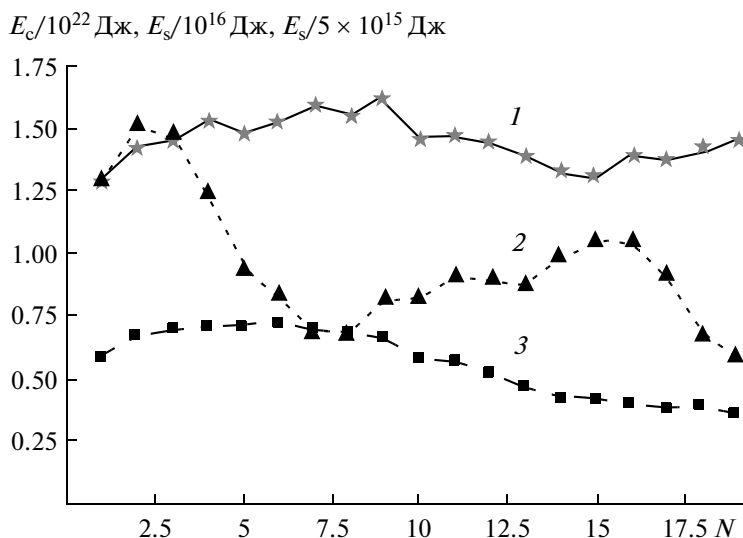
рования ветровых полей и расчетов энергии этих полей. Методика расчетов полей достаточно подробно описана в (Ярошевич, 2007). Здесь же кратко изложим лишь суть схемы расчетов.

Мы использовали параметры ТЦ, соответствующие 00:00 и 12:00 GMT (параметры ТЦ взяты, в основном, в Интернете из – Unisys Weather Hurricane-Tropical Data for Western (Eastern) Pacific). Координаты циклона в эти фиксированные моменты времени представляются в качестве источников ветра и центров круговых ветровых полей. Циклоническая зона 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 соответствующим каждому источнику значениям  $V_m$ ,  $r_m$ , и множеству значений  $r$  и  $V_r$  рассчитывается значение кинетической энергии для центра каждого элементарного квадрата. Правильнее будет сказать, что рассчитывается величина с размерностью энергии. Строго – максимальная энергия ТЦ одна и определяется в момент достижения самого большого значения максимальных ветров. Мы же в расчетах учитываем работу, совершаемую циклоном на всех этапах его развития, “величиной с размерностью энергии”. В эксперименте и в тексте, для удобства изложения, эту величину условно обозначили энергией. Здесь  $r$  и  $V_r$  – соответственно расстояние от конкретного “источника” до центра конкретного элементарного квадрата и скорость ветра в центре квадрата. В модели 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 с этого места центра циклона. Значения энергий прошлых моментов времени ослабляются по экспоненте в зависимости от числа прошедших 12-часовых отрезков времени. Таким образом, в каждом элементарном квадрате формируется “суперпозиция” значений энергии. В связи с тем, что спад по экспоненте довольно быстрый, 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 интенсивность (циклоническую энергию) на данный момент на всей рассматриваемой площади. В результате такого подхода, были решены означенные выше проблемы.

Уместно, кстати, заметить, что в результате использования этой модели поток циклонов предстал в виде непрерывного и единого процесса, благодаря чему стали возможны исследования взаимосвязей этапов развития циклонической активности (Ярошевич, 2009).

В экспериментах (расчетах) землетрясения группируются по времени, территориально, по магнитудам и глубинам гипоцентров. Информационной базой является архив землетрясений Геофизической службы РАН. (Сейсмологический архив Геофизической службы РАН формируется на основе данных о землетрясениях, зарегистрированных дистанционно многими сейсмическими станциями, в том числе и станциями, достаточно удаленными от рассматриваемой зоны. Это важно, ибо такой подход положительно отражается на достоверности информации. Здесь же уместно отметить, что и параметры ТЦ определяются дистанционно). Во всех расчетах энергия землетрясений определялась по поверхностным сейсмическим волнам по соотношению  $\lg E_s = 11.8 + 1.5M$ , где  $M$  – магнитуда землетрясения. В некоторых расчетах, когда рассматриваются землетрясения с  $M < 6.0$ , приходится пользоваться архивами последних лет. Это связано с тем, что, по крайней мере, по зоне Тихого океана землетрясения указанного диапазона магнитуд до 1979 г. представлены не полностью (далее в сейсмологическом архиве Геофизической службы РАН годовое число таких землетрясений по рассматриваемому району Тихого океана быстро нарастало).

Необходимо сделать одно замечание. Соблазнительно наиболее быстрый и, похоже, самый простой путь выявления возможного циклонического влияния на сейсмическую активность – это поиск связей между отдельными циклонами и землетрясениями. При очень большом потоке землетрясений и большом числе циклонов не представляет труда, за время развития циклона или после него, найти “сопровождающие” землетрясения с “нужными” для иллюстрации параметрами и принять их в качестве результата воздействия циклона. В принципе, наверно, такое возможно, но как эту конкретную связь доказать? При незнании картины напряжений коры в зоне прохождения циклона такие связи могут оказаться иллюзией. Ведь логично предположить, что действие даже самого интенсивного тайфуна, когда земная кора находится в слабом напряжении, вряд ли породит землетрясение, и наоборот – не особо интенсивный циклон в “критическом” состоянии коры может вызвать землетрясение. К тому же, эпицентры землетрясений, вызванные циклоном, не обязательно должны располагаться под траекторией циклона. Землетрясения, вероятнее всего, состоятся в “ослабленных” местах коры в зоне действия циклонов или в ее ближай-



**Рис. 1.** Сглаженные графики сезонных значений циклонической энергии  $E_c$  (1) и годовых значений сейсмической энергии  $E_s$  (2, 3): 2 –  $6 \leq M < 7$ , 3 –  $4 \leq M < 5$ .  $N$  – число сезонов (годов) после сглаживания.

шей периферии. Кроме того, следует допустить, что иногда сейсмическая реакция может и несколько запаздать. Поэтому для начала связи между этими процессами корректнее искать, оперируя относительно большими отрезками времени и на относительно больших площадях. В этом случае в процессах сглаживается роль случайных “выбросов”, более интегрировано представляется циклоническое воздействие и реакция коры, что должно привести к более четко выраженным закономерностям.

Видимо, можно предположить, что ТЦ способны спровоцировать различные по силе землетрясения. И все же в эксперименте показалось целесообразным рассматривать динамику значений сейсмических энергий раздельно по различным диапазонам магнитуд. Кроме того, предполагалось, что преимущественно это должны быть неглубокие землетрясения.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Некоторые особенности потоков землетрясений в зоне действия ТЦ*

В одном из экспериментов изучался хронологический характер сезонных значений циклонической энергии и годовых значений сейсмической энергии. Сезон циклонов определялся отрезком времени с 01 июля по 31 октября – период максимальной циклонической активности в северо-западной части Тихого океана. Сейсмическая энергия определялась для каждого полного календарного года. Расчеты были проведены для 1955–2004 гг. и по территории  $5^\circ$ – $45^\circ$  с.ш.,  $115^\circ$ – $175^\circ$  в.д. После проведения процедуры сглаживания в обоих графиках, отражающих динамику

циклонической и сейсмической энергии, выявилась цикличность. Время между последовательными всплесками циклонической и сейсмической активности составляет примерно 23–26 лет. По фазе сейсмическая энергия запаздывает относительно циклонической энергии на 5–6 лет (Ярошевич, 2008).

Разумеется, схожесть графиков при этом не была воспринята как доказательство того, что сейсмическая цикличность – результат циклонической цикличности. Возможно, обе цикличности предопределены некими солнечными или космическими процессами, а относительный их сдвиг объясняется различной инерционностью сред.

В следующем эксперименте исследовалась динамика годовых значений сейсмических энергий, рассчитанных отдельно по слабым и сильным землетрясениям. Такие расчеты были проведены для различных по энергии групп землетрясений, произошедших в 1979–2004 гг. На рис. 1 представлен пример динамики сезонных и годовых значений циклонической и сейсмических энергий. Из рис. 1 видно, что кривая годовых значений сейсмической энергии (3), рассчитанная по землетрясениям диапазона  $4 \leq M < 5$ , в целом схожа с кривой сезонных значений циклонической энергии (1), в то время как кривая (2), отображающая динамику годовых значений сейсмической энергии в диапазоне  $6 \leq M < 7$ , в большей степени следует в противофазе. Рисунок иллюстрирует: с ростом циклонической активности снижается общая сейсмическая активность, выражаемая кривой (2) при одновременном увеличении доли суммарной сейсмической энергии слабых землетрясений.

Этот результат упрощенно можно объяснить: динамика напряжений в слоях земной коры — процесс непрерывного перераспределения и нарастания напряжений; рост напряжений, достигнув критического уровня прочности сред, прерывается — происходит, как правило, сильное землетрясение. Пространственно среда коры неоднородна и характеризуется множеством “ослабленных” по прочности мест. Циклоническая активность пространственно рассредоточена и потому возможно ее почти одновременное воздействие на кору во многих местах. Эти воздействия в ослабленных местах могут вызвать рой слабых землетрясений, от чего, видимо, снижается уровень общего напряжения. В результате либо снижается вероятность сильного землетрясения, либо такое землетрясение отодвигается во времени.

Полученный результат усиливает предположение о вероятном воздействии ТЦ на сейсмичность. Кроме того, он позволяет в качестве варианта объяснить причину запаздывания сейсмической цикличности относительно циклонической цикличности.

Напряжения в земной коре накапливаются, возможно, с какой-то средней скоростью и независимо от циклонов. Усиление циклонической активности на протяжении нескольких сезонов провоцирует по широкому пространству рост числа слабых землетрясений, ослабляя тем самым скорость нарастания напряжений. Когда же циклоническая активность начинает спадать, нарастание напряжений ускоряется. Возможно, для компенсации “потерянных возможностей” в период циклонической активности и накопления критических напряжений как раз и нужны те самые 5–6 лет, и потому происходит сдвиг цикличностей.

#### *Сезонность сейсмической активности и ТЦ*

Годовой цикл активности ТЦ известен: в Северном полушарии низкая в начале года циклоническая активность со временем нарастает, достигая максимума в августе–октябре месяцах. В целом хорошо известны и причины этой периодичности (Хаин, Сутырин, 1983). Значительно меньше известно о внутригодовой периодичности сейсмической активности.

Исследования, направленные на выявление сезонности сейсмической активности и причин этой сезонности, проводятся давно, хотя по большей части эпизодически. В качестве возможных причин рассматриваются внешние по отношению к слоям Земли механизмы. Однако до сих пор нет единой и уверенной картины внутригодовой динамики сейсмической активности. Пока обозначаются отдельные, не всегда статистиче-

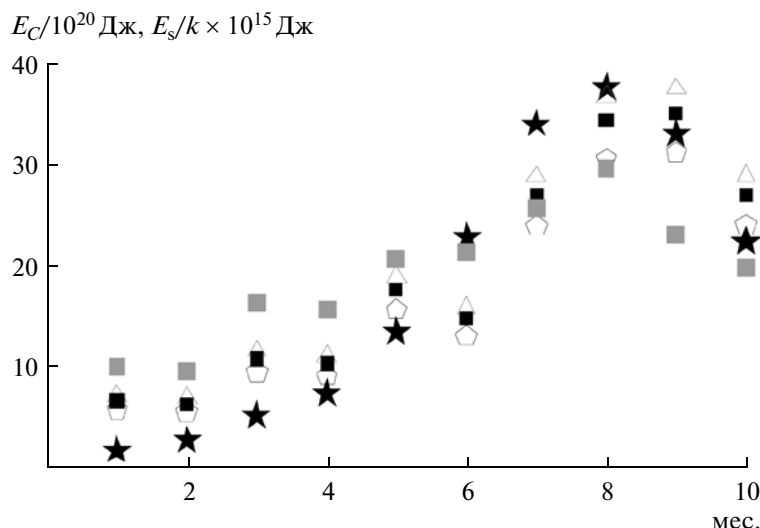
ски достаточно уверенные цикличности, предположения и гипотезы.

В статье (Левин и др., 2005) изложены результаты исследований внутригодовой повторяемости сейсмической активности в нескольких районах Тихого океана. Анализ проводился для различных диапазонов магнитуд землетрясений и глубин гипоцентров. В этих исследованиях максимум числа землетрясений достигается в декабре. Предполагается, что такая сезонность может быть связана с несколькими факторами, из которых приоритетным является приливное воздействие Солнца. Сейсмическая активность исследуется отдельно по каждому району. Необходимо заметить, что эти районы по размерам относительно невелики и часто имеют общую границу. К таковым, например, относятся регионы “Новая Зеландия” и “Океания-Юг-1” с размерами территорий  $770 \times 2200$  км и  $1100 \times 1100$  км соответственно, а также “Курильские острова” и “Камчатка” с территориями  $880 \times 1300$  км и  $880 \times 1100$  км. При этом графики сейсмической сезонности в соседних регионах заметно различаются.

Не совсем понятно, как такое глобальное явление, как приливные силы Солнца, по-разному воздействуют на сейсмичность соседствующих и относительно небольших территорий. Вообще в экспериментах такого рода, когда есть определенные проблемы с объемом и точностью исходной информации, необходимы особая продуманность и тщательность методики классификации информации и расчетов (Ярошевич, 2010). Иногда в этих условиях целесообразно апробировать не одну методику.

В наших экспериментах главной характеристикой сейсмической интенсивности стала среднемесячная сейсмическая энергия, рассчитанная отдельно по каждому месяцу по многолетним данным. В расчетах в качестве меры энергии принята сумма сейсмических энергий всех землетрясений рассматриваемого диапазона, произошедших на протяжении конкретного месяца и на данной территории. Энергия рассчитывалась по поверхностным сейсмическим волнам. Рассматривались землетрясения, произошедшие внутри территории  $0^\circ$ – $45^\circ$  с.ш.– $110^\circ$ – $150^\circ$  в.д., начиная с 1963 г., но чаще по более поздним годам. Последнее вызвано необходимостью работать с более полными базами данных. Как правило, нами рассматривались неглубокие землетрясения ( $h \leq 70$  км). Расчеты проводились по более, чем двадцати различным временным и энергетическим диапазонам землетрясений. Число землетрясений в диапазоне зависело от рассматриваемого интервала лет, диапазона магнитуд и колебалось от нескольких сотен — до почти 15 тыс.

Ряды среднемесячных значений сейсмической энергии нередко выглядят “изрезанными”, и в



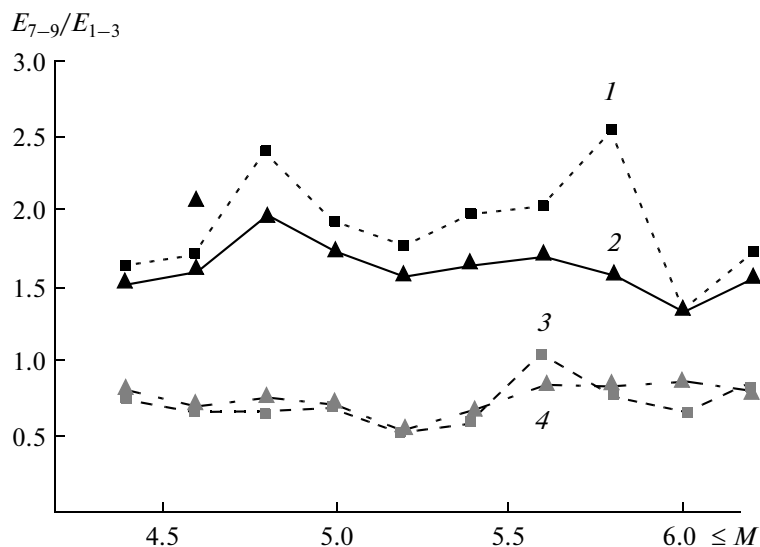
**Рис. 2.** Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической энергии ( $E_C$ ), рассчитанной по 1945–2007 гг. (звезды), и сейсмической энергии ( $E_S$ ) для диапазонов:  $M > 5$ , рассчитанной по 1980–2007 гг., – треугольники,  $k = 5$ ;  $M > 5.5$ , рассчитанной по 1980–2007 гг., – черные квадраты,  $k = 4.7$ ;  $M \geq 6.0$ , рассчитанной по 1980–2007 гг., – пятиугольники,  $k = 4.2$ ;  $M \geq 6.0$ , рассчитанной по 1963–2007 гг., – серые квадраты,  $k = 4.3$  ( $k$  – масштабный коэффициент расположения графиков на рисунке).

них не всегда четко проявляются какие-то закономерности. Это, скорее всего, можно объяснить двумя причинами. Даже узкий по магнитуде диапазон является достаточно широким диапазоном по сейсмической энергии. Поэтому, если в каком-то месяце оказались два–три землетрясения, близкие по магнитуде к верхней границе рассматриваемого диапазона, при относительно небольшом числе землетрясений в диапазоне, то они вполне могут месячную сейсмическую энергию сильно “выделить” по сравнению с энергией предшествующего и последующего месяца. Число и размеры “выбросов” могут уменьшиться лишь с существенным ростом числа землетрясений в каждой единице времени. Таким образом, второй причиной является недостаточное для достоверных статистических расчетов число землетрясений. В связи с этим пришлось ко всем рядам применить сглаживание. Во всех случаях сглаживание осуществлялось по трем среднемесячным значениям сейсмической энергии.

Результаты расчетов сглаженных среднемесячных значений сейсмической энергии, в которые включены все сильные землетрясения, представлены на рис. 2. Рассмотрены следующие диапазоны:  $M > 5.0$ ,  $M > 5.5$ ,  $M \geq 6.0$  по 1980–2007 гг. и  $M \geq 6.0$  по 1963–2007 гг. На рис. 2 приведен также график сглаженных среднемесячных значений циклонической энергии, рассчитанной по характеристикам реальных ТЦ, произошедших в 1945–2007 гг. в районе анализируемых землетрясений. (С целью совмещения по вертикали графиков циклонической и сейсмической энергий для последних введены масштабные коэффициенты;

для придания рисунку большей четкости значения коэффициентов различаются). Заметим, что график сглаженных среднемесячных значений циклонической энергии, рассчитанный по 1980–2007 гг., совпадает с графиком на рис. 2. Исходные значения циклонической энергии рассчитывались по описанной выше схеме.

Графики внутригодовой динамики сейсмической активности, в которых отражены все значимые по энергии землетрясения, схожи с графиком внутригодовой динамики циклонической интенсивности. Коэффициенты корреляции между графиком циклонической энергии и графиками сейсмической энергии высокие. Так, для варианта  $M > 5.0$  самый высокий коэффициент корреляции (0.97) получен без сдвига (запаздывания) сейсмического графика относительно циклонического графика. Лучший коэффициент корреляции (0.93) для варианта  $M \geq 6.0$  и интервала 1963–2007 гг. также получен, когда нет запаздывания сейсмического графика. Для вариантов  $M > 5.5$  и  $M \geq 6.0$  и интервала 1980–2007 гг. высший коэффициент корреляции (0.96) получен при запаздывании графиков сейсмической энергии на один месяц. Понятно, что высокие коэффициенты корреляции, полученные для осредненных и сглаженных рядов, вовсе не означают постоянной и значимой корреляции между обычными месячными значениями циклонической и сейсмической энергии. Для такой характеристики, как сейсмическая энергия, диапазон, которой составляет 7–7.5 порядков, хорошие корреляции по не осредненным и не сглаженным рядам, веро-



**Рис. 3.** Отношения суммарных сейсмических энергий землетрясений в зависимости от диапазона значений магнитуд и территорий. Отношения: суммарная энергия за июль–сентябрь к суммарной энергии за январь–март 1999–2008 гг.: 1 – по территории 15°–45° с.ш., 130°–155° в.д. (океан); 2 – по территории 10°–40° с.ш., 120°–150° в.д. (океан); 3 – по территории 20°–50° с.ш., 55°–100° в.д. (континент); 4 – по территории 25°–40° с.ш., 60°–90° в.д. (континент).

ятно, возможны при очень большом числе землетрясений в единицу времени.

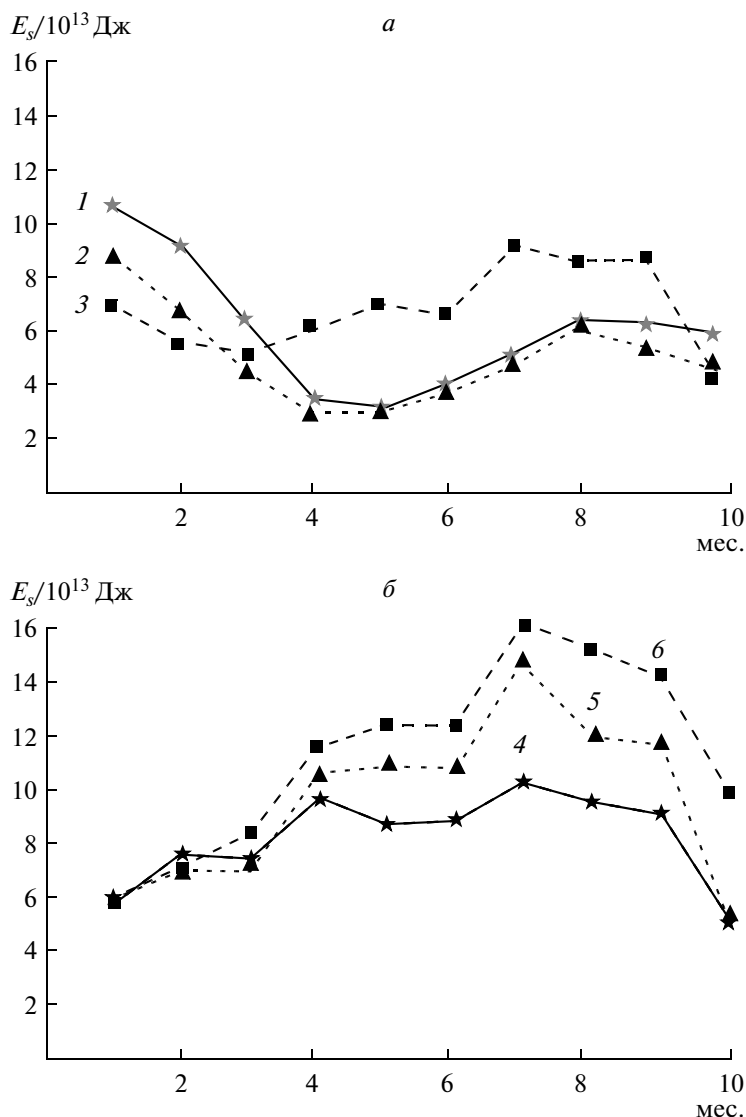
Поскольку в северо-западной части Тихого океана циклоническая активность в предосенние и осенние месяцы существенно превосходит активность в начале года, то для сравнения были оценены отношения величин сейсмических энергий, определенных для осенних и, например, зимних месяцев. Эти отношения определялись для различных диапазонов магнитуд, для зон действия ТЦ и для удаленных от океана районов суши.

На рис. 3 представлены графики отношений суммарных сейсмических энергий, рассчитанных по 1999–2008 гг. Рассматриваемые отношения – это величина суммарной сейсмической энергии за время с 1 июля по 30 сентября ( $E_{7-9}$ ), деленная на величину суммарной сейсмической энергии за время с 1 января по 31 марта ( $E_{1-3}$ ). Значения суммарных энергий задаются диапазоном магнитуд до величины магнитуды, обозначенной на горизонтальной оси рисунка. Здесь максимальная магнитуда равна 6.2. На рис. 3 отношения сейсмических энергий, рассчитанных по площадям, ограничены координатами: 1 – 15°–45° с.ш., 130°–155° в.д.; 2 – 10°–40° с.ш., 120°–150° в.д. – обе – океан, зоны циклонической активности; 3 – 25°–40° с.ш., 60°–90° в.д. – Таджикистан, Афганистан, Пакистан и юго-восточные районы Туркмении и Узбекистана, 4 – 20°–50° с.ш.; 55°–100° в.д. – восточная часть Туркмении, Узбекистан, Таджикистан, Киргизия, восточный Иран, Афганистан, Пакистан, частично Северная Индия, западный Китай, Монголия, юг Казахстана. Большая “изрезанность” графиков отношений энергий связана с тем, что с каждым шагом роста верхней границы диапазона

магнитуд быстро падает число добавляемых землетрясений, но одновременно и сильно растет их энергетический вес.

Из графиков рис. 3 следует, что по крайней мере в диапазонах обозначенных магнитуд в зонах действия ТЦ, в июле–сентябре, т.е. в период сильного нарастания циклонической активности, сейсмическая активность увеличивается. И, наоборот, для указанных здесь континентальных районов в эти месяцы сейсмическая активность понижается.

Другой эксперимент состоял в том, что по океанической зоне исследовалась годовая динамика среднемесячных значений сейсмических энергий для одинаковых по площади территорий, но пошагово смещенных по широте. На рис. 4 приведены сглаженные графики среднемесячных энергий для шести территорий, каждая размером 25° × 25°. У этих территорий одинаковые границы по долготе: 120° в.д., 145° в.д. По широте самая южная территория ограничена 10° ю.ш. и 15° с.ш. Далее каждая последующая территория смещается на север с шагом в 5°. В данном случае рассматривались только землетрясения с  $M \leq 6.5$  и с глубинами гипоцентров не более 33 км, произошедшие в 1999–2008 гг. Примечательно меняется характер графиков. По мере смещения рассматриваемых территорий на север, все сильнее проявляется рост сейсмической активности в летне–осенние месяцы (кривые 4, 5, 6). На территориях, у которых южные широтные границы расположены южнее экватора, и на экваторе наблюдаются два усиления сейсмической активности: в летне–осенние месяцы и в начале года (кривые 1, 2, 3). При этом по мере “ухода” из зоны Южного полу-



**Рис. 4.** Сглаженные годовые графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанных по землетрясениям с  $M \leq 6.5$  и глубиной очага  $h \leq 33$  км, произошедших в 1999–2008 гг. Среднемесячные значения энергий рассчитаны для территорий: 1 –  $10^\circ$  ю.ш.– $15^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.; 2 –  $05^\circ$  ю.ш.– $20^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.; 3 –  $0^\circ$ – $25^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.; 4 –  $05^\circ$ – $30^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.; 5 –  $10^\circ$ – $35^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.; 6 –  $15^\circ$ – $40^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $145^\circ$  в.д.

шария на север сейсмическая активность в начале года постепенно ослабевает и усиливается летнее–осенняя сейсмическая активность.

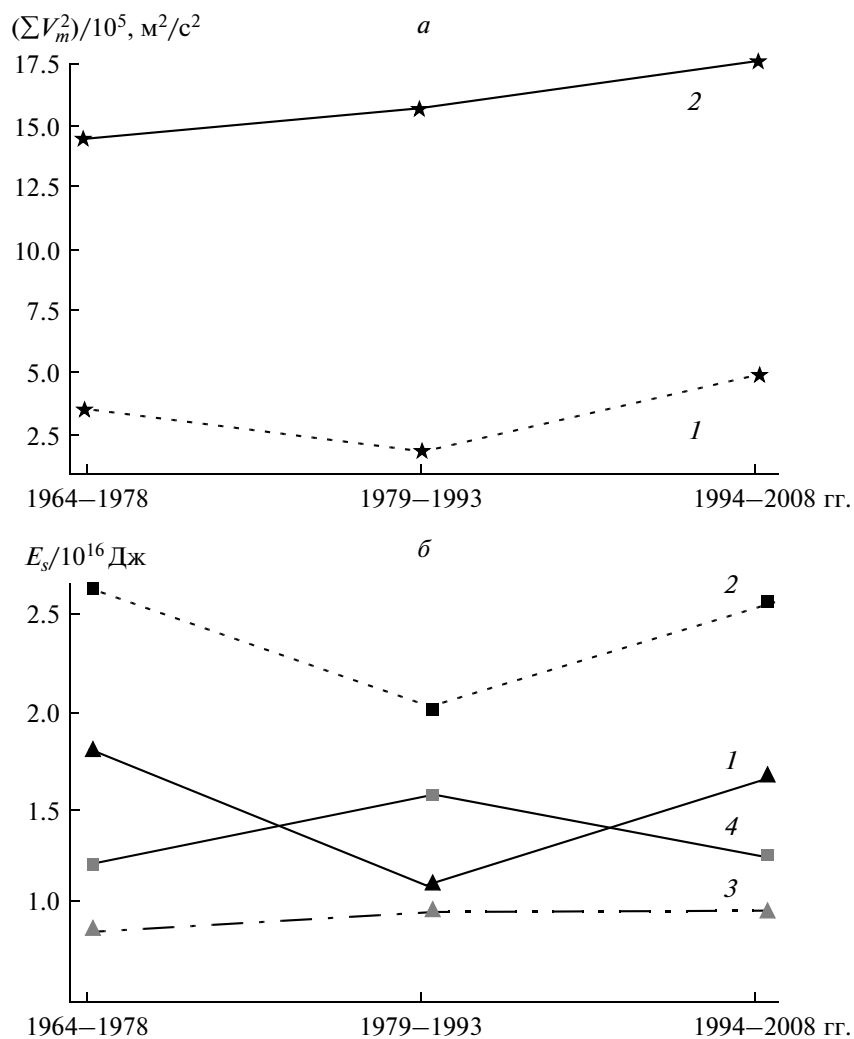
В Южном полушарии и, в частности, в южной части Тихого океана, максимум циклонической активности приходится на январь–март (Тараканов, 1980). Придерживаясь идеологии наших исследований, предполагаем, что сейсмическая активность в начале года связана с усилением в это время циклонической активности южнее экватора. Если это объяснение верно, то графики рис. 4 – это еще одно подтверждение того, что сезонность сейсмичности в рассматриваемом районе в определенной мере задается сезонностью циклонической активности.

#### *Некоторые особенности пространственной динамики циклонической и сейсмической активности*

Ниже приведены некоторые результаты исследований, целью которых было выяснить, сколь стабильны во времени значения циклонических и сейсмических интенсивностей, рассчитанных для одной территории относительно аналогичных характеристик, рассчитанных для другой, соседней территории циклонической зоны. Здесь рассмотрены территории: I –  $25^\circ$ – $45^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $150^\circ$  в.д. – район Японии и II –  $5^\circ$ – $25^\circ$  с.ш.,  $110^\circ$ – $140^\circ$  в.д. – район Филиппин.

Уже упоминалось, что, исследуя такие природные явления, как ТЦ и землетрясения, в развитии



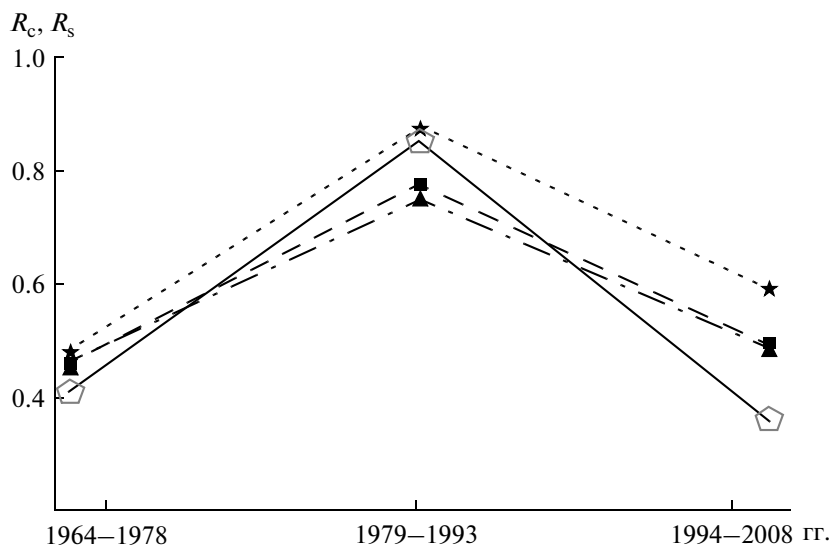


**Рис. 5.** Динамика циклонической (а) и сейсмической (б) интенсивности на территории  $25^{\circ}\text{--}45^{\circ}$  с.ш.,  $120^{\circ}\text{--}150^{\circ}$  в.д. (на а – 1, на б – 1, 2) и на территории  $05^{\circ}\text{--}25^{\circ}$  с.ш.,  $110^{\circ}\text{--}140^{\circ}$  в.д. (на а – 2, на б – 3, 4). Сейсмическая интенсивность рассчитывалась для  $M \leq 6.5$ ,  $h \leq 33$  км (кривые 1, 3),  $h \leq 100$  км (кривые 2, 4).

которых значителен фактор случайного, закономерности четче проявляются при большой статистике. Такая статистика лучше обеспечивается на больших временных интервалах. В данном случае рассматриваются три интервала: 1964–1978, 1979–1993 и 1994–2008 гг. Для каждого из них рассчитывается одно значение интенсивности. Рассматриваются только фрагменты траекторий циклонов, попавших на данную территорию. В этих расчетах значение циклонической интенсивности определяется как  $\sum V_m^2$ , где  $V_m$  – скорость максимальных ветров. Эта сумма формируется из всех значений  $V_m$  оговоренных фрагментов всех циклонов, произошедших в течение рассматриваемого интервала времени. В данном варианте расчетов учитываются только  $V_m \geq 100$  узлов и только в 00:00 и в 12:00 GMT.

Сейсмическая интенсивность также представляется в виде одного значения по каждому интервалу, но по каждому диапазону магнитуд и глубин гипоцентров ( $h$ ) землетрясений. Сейсмическая интенсивность определяется как сумма сейсмических энергий всех землетрясений заданного диапазона магнитуд и глубины гипоцентров, произошедших на данной территории за годы рассматриваемого интервала.

На рис. 5 показан результат одного из таких расчетов. Кривая 1 (рис. 5а) отражает динамику циклонической интенсивности по избранным интервалам времени и территории I, кривая 2 – по этим же интервалам времени и по территории II. Циклоническая интенсивность на территории I в 1979–1993 гг. снижается по сравнению с предыдущим временным интервалом почти в 2 раза и увеличивается к третьему интервалу в 2.7 раза. Циклоническая интенсивность на территории II



**Рис. 6.** Динамика отношений циклонической ( $R_c$ ) и сейсмической ( $R_s$ ) интенсивностей для одних и тех же отрезков времени и по разным площадям – I –  $25^\circ$ – $45^\circ$  с.ш.,  $120^\circ$ – $150^\circ$  в.д. и II –  $05^\circ$ – $25^\circ$  с.ш.,  $110^\circ$ – $140^\circ$  в.д. ( $R_c$ ,  $R_s$  – отношения интенсивностей по территории II к интенсивностям по территории I). Циклоническая интенсивность – пятиугольники; сейсмическая интенсивность при  $M \leq 6.5$ :  $h \leq 33$  км – звезды,  $h \leq 70$  км – треугольники,  $h \leq 100$  км – квадраты.

только усиливается. Динамика сейсмической интенсивности представлена на рис. 5б. Сейсмическая энергия рассчитывалась по всем землетрясениям с  $M \leq 6.5$  и для двух диапазонов глубин гипоцентров – 33 и 100 км. Кривые 1, 2 – динамика сейсмических интенсивностей, рассчитанных для глубин соответственно  $h \leq 33$  и  $h \leq 100$  км, по территории I; кривые 3, 4 – динамика сейсмических интенсивностей для глубин соответственно  $h \leq 33$  и  $h \leq 100$  км по территории II. По территории I сейсмическая интенсивность (кривые 1, 2) повторяет динамику циклонической интенсивности (рис. 5а, кривая 1) по той же территории. Схожи динамики циклонической интенсивности (рис. 5а, кривая 2) и сейсмической интенсивности для диапазона глубин  $h \leq 33$  км (рис. 5б, кривая 3) по территории II. В то же время сейсмическая интенсивность, рассчитанная по диапазону  $h \leq 100$  км, по территории II максимальна в интервале 1979–1993 гг. (рис. 5б, кривая 4).

Для каждого из приведенных выше 15-летних интервалов времени определялось отношение интенсивности, рассчитанной для одной территории, к аналогичной интенсивности, рассчитанной для другой территории. Отношения определяются по циклонической и сейсмической интенсивностям. Отношение сейсмической интенсивности определяется для различных диапазонов магнитуд землетрясений и глубин гипоцентров.

На рис. 6 приведена динамика таких отношений, рассчитанных для площадей I и II. В данном случае – это отношения интенсивностей, рассчитанных для второй (“южной”) территории к ин-

тенсивностям первой (“северной”) территории. По сути рис. 6 дублирует рис. 5, но на рис. 6 нагляднее проявляется одна особенность, которую можно было бы обозначить как относительное пространственно-временное перераспределение интенсивностей, или как относительную миграцию интенсивностей. Отношение циклонической интенсивности, вычисленное для 1979–1993 гг., выросло по сравнению с отношением циклонической интенсивности в 1964–1978 гг. примерно в 2.1 раза. Отношение сейсмической интенсивности для этих же интервалов времени возросло в 1.8 раза в случае  $h \leq 33$  км, в 1.6 раза в случае  $h \leq 70$  км и в 1.7 раза в случае  $h \leq 100$  км. Если отсчитывать от середины временных интервалов, то длительности нарастания отношений и последующего спада отношений длятся примерно 15 лет.

Особенно важно, что и нарастание и спад отношений достигается не за счет неизменности интенсивностей на одной территории и роста (снижения) на другой, а из-за одновременного усиления интенсивности на одной территории и ослабления на другой.

Таким образом, выявлены признаки пространственных миграций циклонической и сейсмической активности. Исходя из идеологии наших исследований, важно заметить, что миграции циклонической и сейсмической активностей синхронны.

## ОБСУЖДЕНИЕ, ВЫВОДЫ

Схожесть динамик циклонической и сейсмической интенсивностей, представленных на рис. 2, еще не является основанием для утверждения, что сейсмическая сезонность, в определенной мере, — результат циклонической сезонности. Вполне естественны предположения, что положительная корреляция этих разных процессов предопределена некой общей причиной, — например, солнечной активностью.

Уместно заметить, что результаты исследований взаимосвязи солнечной активности с сейсмичностью пока носят неопределенный характер. Утверждается, что между энергией землетрясений и числами Вольфа существует положительная корреляция (Сытинский, 1989) в то время, как в других исследованиях получена отрицательная корреляция (Белов, 2009). Как кажется, такой диапазон выводов можно объяснить, различиями в методиках исследований, в объемах и подборе сейсмической информации. Тем не менее нами также было рассмотрено соотношение между числами Вольфа и динамиками циклонической и сейсмической активностью. По годовым числам Вольфа были определены их средние значения для интервалов: 1964–1978 гг. —  $W = 55.867$ ; 1979–1993 гг. —  $W = 95.627$ ; 1994–2008 гг. —  $W = 48.613$ . Из сопоставления средних чисел Вольфа с соответствующими значениями циклонической и сейсмической интенсивности следует, что для циклонической интенсивности, рассчитанной по рассматриваемой здесь северной территории (рис. 5а — 1), корреляция отрицательная. Для сейсмической интенсивности при  $M \leq 6.5$  и  $h \leq 100$  км для этой же территории (рис. 5б — 2) корреляция отрицательная, а для южной территории (рис. 5б — 4) корреляция положительная. Когда для двух довольно близких территорий корреляции противоположны, то возникают определенные сомнения во влиянии, по крайней мере напрямую, значений чисел Вольфа на сезонный характер сейсмической активности.

Рисунок 1 иллюстрирует вероятность перераспределения землетрясений по их энергиям под воздействием ТЦ. Рисунки 2–4, усиливая друг друга, демонстрируют реальность предположения: сейсмическая сезонность в большой мере предопределена циклонической сезонностью. Рисунки 5–6 по сути также указывают на связь циклонической и сейсмической активностей.

Таким образом, по полученным результатам относительно к циклонической зоне северо-западной части Тихого океана, можно сделать следующие выводы:

— выявлена сезонность сейсмической активности, которая рассматривается как следствие циклонической активности;

— выявлены признаки идентичной по характеру пространственной миграции циклонической и сейсмической активности. Предполагается, что причиной идентичности является динамика циклонической активности;

— ТЦ, действующие в северо-западной части Тихого океана, могут рассматриваться в качестве фактора, влияющего на сейсмичность этого района.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Докл. РАН. 2009. Т. 428. № 4. С. 104–108.
- Голицын Г.С. Статистика и энергетика тропических циклонов // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 4. С. 535–538.
- Голицын Г.С., Ярошевич М.И. Особенности повторяемости тропических циклонов по энергиям // Докл. РАН. 2000. Т. 372. № 4. С. 544–546.
- Винник Л.П. Происхождение микросейсмических продольных волн // Физика Земли. 1971. № 10. С. 17–30.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А. Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // Докл. РАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 534–540.
- 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 // Физика Земли. 1986. № 2. С. 3–10.
- Сытинский А.Д. Об одном солнечном — атмосферном эффекте во время сильных землетрясений // Докл. РАН. 1979. Т. 245. № 6. С. 1337–1340.
- Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–30.
- Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
- Тараканов Г.Г. Тропическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 175 с.
- Хаин А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.
- Ярошевич М.И. О некоторых параметрах тропических циклонов и сейсмической модели их оценки // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 1. С. 109–112.
- Ярошевич М.И. Сейсмическая энергия тропического циклона как мера его энергии // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 3. С. 389–392.
- 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.* Элементы краткосрочного оценочного прогноза циклонической активности // Центр стратегических исследований МЧС России. Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 1. С. 22–31.

*Ярошевич М.И.* Внутригодовая динамика сейсмической активности в циклонической зоне северо-западной части Тихого океана // Докл. РАН. 2010. Т. 431. № 3. С. 403–407.

*Bowen S.P., Richard J., Macini J.D., et al.* Microseism and infrasound generation by cyclones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. № 5. P. 2562–2573.

*Hasselmann K.A.* A statistical analysis of the generation of microseisms // Rev. Geophys. 1963. V. 1. № 2. P. 177–210.

*Longuet-Higgins M.S.* A theory of the origin of microseisms // Trans. Phil. Roy. Soc. 1950. V. 243A. P. 35.

*Webb S.C.* The Equilibrium Oceanic Microseism Spectrum // 1992. JASA. V. 92. № 4. Part 1. P. 2141–2157.

## **Tropical Cyclones and Seismic Activity of Cyclonic Area of the Nord-West Pacific**

**M. I. Yaroshevich**

*Research and Production Association “Typhoon”*

There is considered the possibility of tropical cyclones influence on the seismic activity of cyclonic area of the Nord-West Pacific. There are no direct methods of calculation of tropical cyclones influence on the Earth crust. Therefore, the present investigation solves a same inverse problem: by using the peculiarities of annual dynamics of the seismic activity, there is explored a qualitative estimation the possible influence of tropical cyclones on the dynamics of the seismic activity. There is performed a series of inter-supplementing and methodically different calculations. It is revealed that for the cyclonic areas, the annual dynamics of cyclonic and seismic activities correlate well. Based on the results obtained, the following assumption is suggested: tropical cyclones can be considered as a factor influencing on the seismic activity of cyclonic area of the Nord-West Pacific.

**Keywords:** tropical cyclones, cyclonic activity, seismic activity