

Исследование взаимосвязей атмосферы с океаном и литосферой на примере взаимодействия интенсивных тропических циклонов и сильнейших землетрясений

С. П. Головачев¹, М. Н. Дубров¹, В. А. Волков²,
Д. В. Александров¹, И. С. Еремин¹, Д. С. Каленов¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Московская обл., Фрязино, 141190, Россия

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия
E-mail: mnd139@ire216.msk.su

Получены результаты, указывающие на существование причинно-следственной взаимосвязи интенсивных тропических циклонов (тайфунов, ураганов) и сильнейших землетрясений. Выполнен статистический анализ активности тропических циклонов, сопровождавших 11 наиболее сильных землетрясений с магнитудой 7,8–9,1 за период 1997–2007 гг. Рассматривается динамика общей интенсивности тропических циклонов относительно времени землетрясения в очаге для выделенных землетрясений, каждое из которых является сильнейшим в году. Предложен новый физический подход к описанию триггерного эффекта при инициировании сильного землетрясения в результате взаимодействия океана, атмосферы и литосферы. Процесс представляет собой пространственно-временную циклическую последовательность зон низкого давления, формирующихся над тектоническими плитами Земли и охватывающих тектоническую плиту в её самом широком месте. Период цикла во времени составляет 3–4 нед. Процесс начинается за несколько недель до землетрясения в виде роста суммарной мощности циклонов и последующего её спада до минимума. При возобновлении активности циклонов вероятность возникновения мощного сейсмического толчка становится максимальной. Длительность процесса увеличивается до 2–3 мес перед наиболее сильными землетрясениями магнитудой 8–9 и состоит из двух и более пространственно-временных циклов.

Ключевые слова: тропические циклоны, ураганы, тайфуны, сейсмическая активность, землетрясения, взаимодействие атмосферы с океаном и литосферой

Одобрена к печати: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-99-111

Введение

Использование средств дистанционного зондирования позволяет с большой точностью определять траекторию и метеопараметры тропических циклонов, что открывает возможность детального изучения их движения и физических свойств. Наличие пространственно-временной корреляции между тропическими циклонами (тайфунами, ураганами) и землетрясениями исследуется и широко обсуждается на протяжении последних десятилетий (Боков и др., 2011; Головачев и др., 2011; Костин и др., 2022; Морозова, 2006; Сытинский, 1997; Ярошевич, 1991; Fan et al., 2019). Связь сейсмической активности и циклогенеза, следовавшая из сравнительного анализа этих процессов (Ярошевич, 1991), была выявлена с помощью спутниковых снимков облачных покровов в северо-западной части Тихого океана (Морозова, 2006) и дополнена результатами расчётов (Лысенко, Ярошевич, 2015) и параллельных наблюдений сейсмичности и циклонической активности в других частях Мирового океана (Dubrov, Golovachev, 2010).

Эффективным методом изучения сейсмичности является анализ условий подготовки сильнейших землетрясений с магнитудой $M \geq 8$. Такие землетрясения, в среднем, происходят реже чем один раз в год и поэтому не подвержены сезонным вариациям, в отличие от более слабых землетрясений с M в пределах 5–6, для которых, как и для тропических циклонов, наблюдается сезонная динамика (Лысенко, Ярошевич, 2015). С помощью лазерных

деформографов, гравиметров и прецизионных наклономеров выявлены деформации земли, сопутствующие мощным атмосферным процессам и землетрясениям. Опираясь на эти результаты, нами было высказано мнение, что триггером сейсмичности (Соболев, Пономарев, 2003) могут быть тропические циклоны, формирующиеся над тектоническими плитами за период от десятков часов до 1–2 мес (Dubrov et al., 2014; Volkov et al., 2020). Для подтверждения этой гипотезы требовались дополнительные исследования происходящих геофизических процессов, в том числе их статистический анализ. На основе 11-летнего ряда сейсмических данных о сильнейших землетрясениях 1997–2007 гг., а также мировых метеорологических и океанологических данных дистанционного зондирования, дополненных материалами наших многолетних наблюдений, в настоящей работе проводится детальное изучение особенностей обнаруженной закономерности.

Обоснование физических взаимосвязей землетрясений и тропических циклонов

Наблюдаемые перед землетрясениями геофизические аномалии — сдвиги, наклоны, деформации твёрдой земли имеют большое сходство с барическими предвестниками штормов и ураганов. Бухтообразные аномалии перед землетрясениями нередко сочетаются с контрастными вариациями в виде всплесков или затухания интенсивности микросейсмических и акустических сигналов — весьма подобно «затишью» перед бурей.

Суточная энергоёмкость мощного урагана (категории С5 шкалы Саффира–Симпсона SSHWS, *англ.* Saffir–Simpson Hurricane Wind Scale) может достигать значения $\sim 1,5 \cdot 10^{19}$ Дж, что эквивалентно энергии, выделяемой при сильном землетрясении с $M > 8,3$ (Dubrov et al., 2014; Volkov et al., 2020). Активная зона тропического циклона, включая диаметр внешней замкнутой изобары, может составлять до 10^3 км, что соответствует размеру территории подготовки крупного землетрясения (Добровольский, 2006; Соболев, Пономарев, 2003). Процессы, близкие по энергии, в соседних областях пространства и времени будут взаимодействовать. Взаимосвязь мощных ураганов и сильных землетрясений обоснована, если области их формирования и подготовки находятся друг от друга на расстояниях до 1000–2000 км.

Однако исследования (Головачев и др., 2011; Dubrov, Golovachev, 2010; Dubrov et al., 2014; Volkov et al., 2020, 2023) обнаруживают корреляцию между тропическими циклонами и землетрясениями на значительно больших расстояниях. Поиск новых физических механизмов взаимодействия здесь мог бы обосновать «дальнодействие» предвестников, наблюдаемых на расстояниях, превышающих размеры как очага, так и территории подготовки землетрясения (Александров и др., 2019; Добровольский, 2006; Дубров, 2010; Nersesov, Latynina et al., 1992; Volkov et al., 2020). Глобальные атмосферные и сейсмические возмущения, создаваемые тропическим циклоном, могут распространяться на расстояние 10^3 – 10^4 км и, воздействуя на среду и регистрирующие приборы, проявляться в виде предвестников готовящегося сейсмического события. Временной масштаб корреляционных взаимосвязей, который для различных физических моделей может изменяться от часов и суток (Дубров, 2010; Морозова, 2006) до нескольких месяцев (Volkov et al., 2020) и даже лет (Лысенко, Ярошевич, 2015; Sobolev, 2011), в данном случае приобретает особо большое значение.

Пространственно-временное распределение тропических циклонов в сопоставлении с наиболее сильными землетрясениями

Для выявления взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений требуется параллельное изучение динамики геофизических сред, в которых эти явления происходят. Впервые такой анализ был выполнен нами по данным трёх синхронно работающих на расстоянии до 140 км друг от друга инструментов в Подмоскowie и активности тропических циклонов в юго-западном бассейне Тихого океана в марте 1998 г. Зарегистрированные процессы оказались коррелированы с сильнейшим землетрясением 25.03.1998 с $M = 8,1$ в районе о-вов Баллени (*англ.* Balleny Islands) у берегов Антарктиды (Dubrov, Golovachev, 2010).

Попытка связать другое сильное землетрясение — у восточного побережья Камчатки 05.12.1997 с $M = 7,9$ — с действием супертайфуна РАКА (28.11–23.12.1997) в северо-западной части Тихого океана и возбуждением колебаний земли с периодом 20–60 мин была сделана в работе (Sobolev, 2011). Хотя развитие циклона началось до землетрясения, стадии тайфуна, а затем и супертайфуна он достиг через 5–12 сут после землетрясения, связь рассматриваемых процессов была принята сомнительной.

В обоих случаях выделяются два обстоятельства: 1) землетрясение с $M = 7,9$ (Камчатка) — сильнейшее в 1997 г., а с $M = 8,1$ (о-ва Баллени) — в 1998 г.; 2) наблюдается большое удаление циклонов от очагов землетрясений. С октября 1997 г. по март 1998 г. в Мировом океане средствами дистанционного зондирования международных метеорологических служб (Покровская, Шарков, 2006; Knapp et al., 2023; Tropical..., 2023) зафиксировано 25 тропических циклонов категории С1–С5 по шкале SSHWS (табл. 1). Их траектории показаны на рис. 1а, б (см. с. 102) относительно основных тектонических плит. Кружками на картах и на пространственно-временной диаграмме рис. 1в изображены области земной поверхности (океана, океанического дна), над которыми находятся центры циклонов в момент их максимальной интенсивности и наибольшего воздействия на литосферу. Назовём эти области гипоцентрами циклонов, а их долготу отложим по оси ординат (см. рис. 1в).

Таблица 1. Параметры тропических циклонов 1997–1998 гг. по данным дистанционного зондирования (Покровская, Шарков, 2006; Knapp et al., 2023; Tropical..., 2023)

№	Имя	Категория SSHWS	Продолжительность	Бассейн
1	PAULINE	4	05–10.10.1997	СВ Тихого океана
2	IVAN	5	10–25.10.1997	СЗ Тихого океана
3	JOAN		11–25.10.1997	
4	LINDA	1	31.10–09.11.1997	Тихий – Индийский океан
5	KEITH	5	26.10–09.11.1997	СЗ Тихого океана
6	MARTIN	3	28.10–08.11.1997	Юг Тихого океана
7	RICK	2	07–10.11.1997	СВ Тихого океана
8	MORT	1	07–16.11.1997	СЗ Тихого океана
9	NUTE		15–21.11.1997	
10	OSEA	2	22–28.11.1997	Юг Тихого океана
11	PAM	1	02–14.12.1997	
12	PAKA	5	28.11–23.12.1997	
13	SELWYN	2	25.12.1997–03.01.1998	Австралийский регион
14	SUSAN	5	20.12.1997–09.01.1998	Юг Тихого океана
15	RON		01–08.01.1998	
16	KATRINA	2	01–29.01.1998	Австралийский регион
17	TIFFANY	4	22–31.01.1998	
18	URSULA	1	29.01–05.02.1998	Юг Тихого океана
19	VELI		30.01–04.02.1998	
20	ANACELLE	4	05–14.02.1998	Индийский океан
21	VICTOR-CINDY	2	04–19.02.1998	
22	ELSIE		04–20.03.1998	
23	YALI	4	16–31.03.1998	Юг Тихого океана
24	NATHAN		18–31.03.1998	Австралийский регион
25	ZUMAN	3	26.03–10.04.1998	Юг Тихого океана

Примечание: СВ — северо-восток, СЗ — северо-запад.

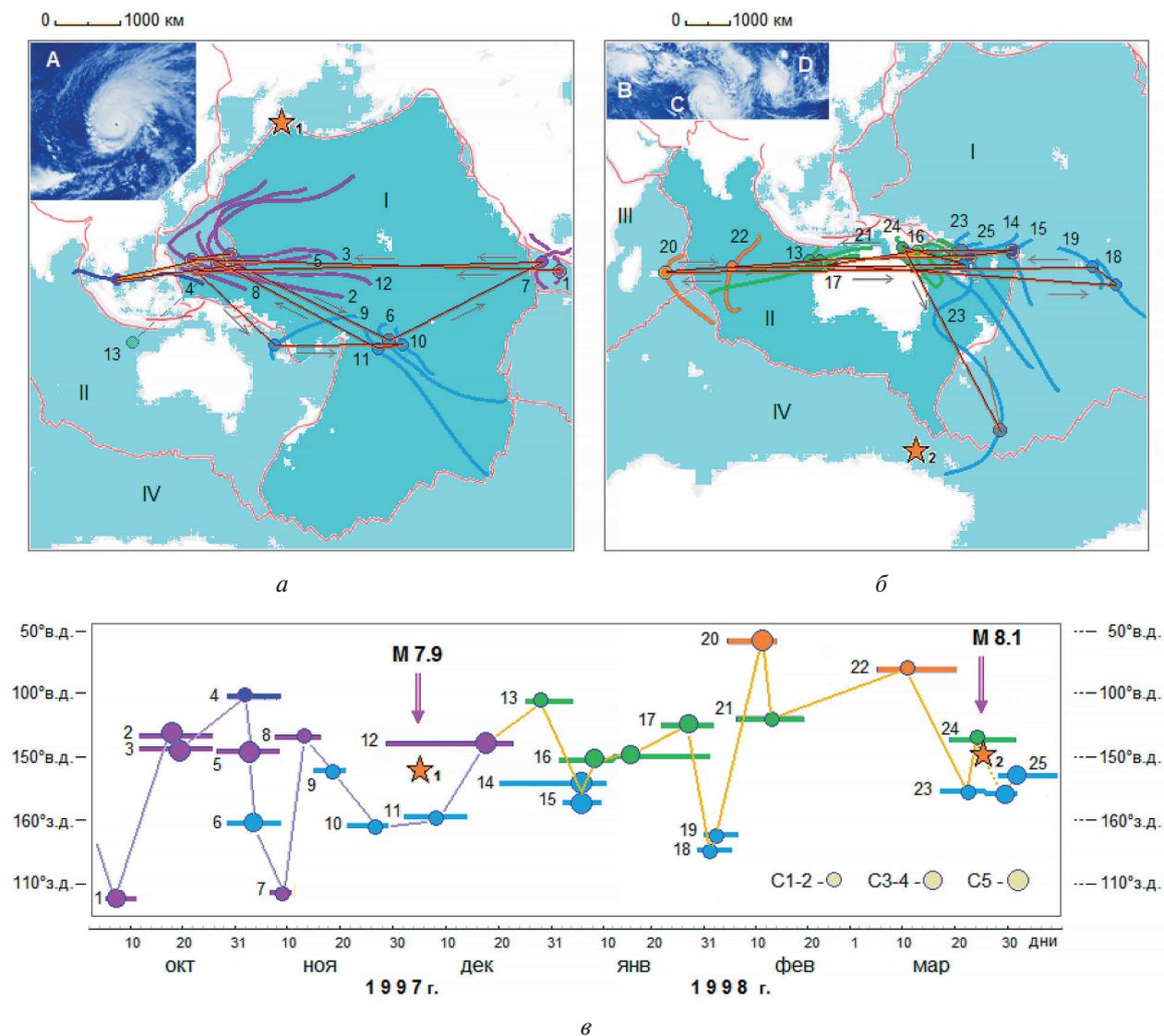


Рис. 1. Пространственное (а, б) и временное (в) распределение циклонов 1–25 (табл. 1), тектонические плиты: I — Тихоокеанская, II — Индо-Австралийская, III — Африканская, IV — Антарктическая; 1 — землетрясение 05.12.1997, $M = 7,9$; 2 — землетрясение 25.03.1998, $M = 8,1$; А, В, С и D — спутниковые снимки циклонов 12, 16, 14, 15 (см. текст)

В октябре–декабре 1997 г. (см. рис. 1а) гипоцентры циклонов группируются в трёх районах Тихоокеанской плиты (I). Один район расположен у её восточного борта, второй — у западного, а третий смещён на юг от центра плиты. Распределение гипоцентров во времени (рис. 1в) представляет собой циклический процесс. Его начинает 05.10.1997 ураган PAULINE (1) у восточного борта плиты (I), который сменяется двумя супертайфунами IVAN (2) и JOAN (3) у её западного борта. Тайфун LINDA (4) завершает западное перемещение гипоцентров, а супертайфун KEITH (5) начинает возвратное движение атмосферной активности. Его сменяет на юге MARTIN (6) и затем ураган RICK (7) на востоке у берегов Мексики. Путь перемещения гипоцентров (1)–(7) на карте (см. рис. 1а) выделен прямыми линиями и отмечен стрелками. Он охватывает Тихий океан в наиболее широкой части — пять самых мощных циклонов прошли в течение 1–2 мес до землетрясения 05.12.1997. Максимальная амплитуда знакопеременного перемещения гипоцентров в широтном (восточно-западном) направлении PAULINE (1) – LINDA (4) превышает 150° (см. рис. 1в).

Второй цикл колебаний организуют ураган RICK (7), тайфун MORT (8), циклоны NUTE (9), OSEA (10), PAM (11) и отмеченный в работе (Sobolev, 2011) ПАКА (12)

(см. рис. 1а, в). Гипоцентры (7)–(12), за исключением циклона NUTE (9), лежат в вершинах треугольника, образованного в предыдущем цикле. Однако гипоцентры РАМ (11) и РАКА (12) движутся в обратном — в северо-западном — направлении, а их связь с землетрясением 05.12.1997 и аномальными геофизическими процессами, которые можно интерпретировать как предвестники землетрясения, прослеживается достаточно хорошо (рис. 2). Супертайфун РАКА (см. фрагмент А на рис. 1а, <http://www.aev.class.noaa.gov/>), по данным дистанционного зондирования (Кнарр et al., 2023), в течение 15 сут демонстрирует волнообразный рост интенсивности с периодом колебаний 3,5–4,0 сут (см. рис. 2а). Начальный период 02–05.12.1997 совпадает с усилением форшоковой активности перед основным толчком (Sobolev, 2011). За 30–40 ч до землетрясения скорость ветра (1) и атмосферное давление (3) достигают локальных экстремумов, а формы кривых имеют бухтообразный вид, характерный для предвестников землетрясений (Соболев, Пономарев, 2003). В этот же период по данным разнесённых сейсмических станций в Якутии и Подмосковье был выделен упоминавшийся выше (Sobolev, 2011) сейсмический предвестник (см. рис. 2б). Необычной является траектория циклона РАМ (см. рис. 2в), который 02–04.12.1997 на стадии зарождения движется на северо-запад, а за сутки до землетрясения разворачивается на 180° на юго-восток (Кнарр et al., 2023). Подобное петлеобразное движение (разворот на ~140°) совершает за три дня до этого и циклон РАКА, также находясь на стадии формирования. Описанные процессы могут быть представлены как финальный этап «раскачивания» Тихоокеанской плиты в октябре–ноябре 1997 г. (см. рис. 1а, в), завершившийся 05.12.1997 землетрясением с $M = 7,9$ у северной оконечности плиты.

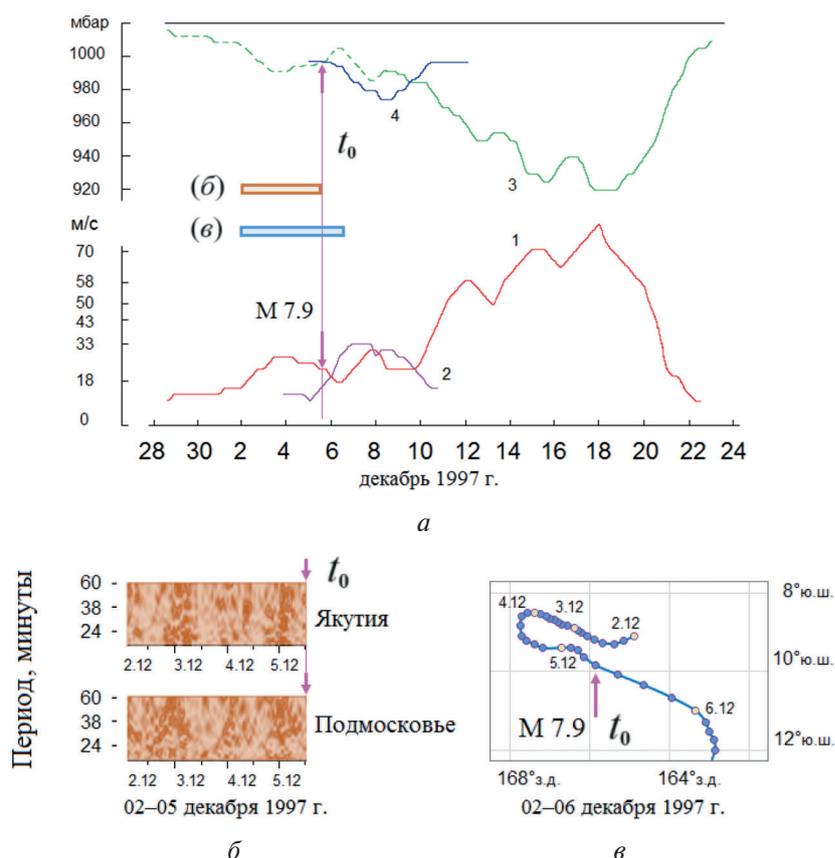


Рис. 2. Барические явления в атмосфере и микросейсмические процессы в литосфере: а — скорость максимальных устойчивых ветров (1, 2) и минимальное давление в центре (3, 4) циклонов РАКА и РАМ соответственно (Кнарр et al., 2023); б — спектрально-временные диаграммы, отображающие в яркостном виде всплески сейсмических колебаний с периодом 20–60 мин 02–05.12.1997 в Якутии и Подмосковье (Sobolev, 2011); в — траектория циклона РАМ 02–06.12.1997; полосы (б) и (в) на рис. 2а соответствуют интервалам времени рис. 2б и в; t_0 — момент землетрясения

В январе–марте 1998 г. циклоны действуют в Южном полушарии (см. *рис. 1б, в*): SELWYN (13) и два самых мощных в сезоне SUSAN (14) и RON (15) возобновляют процесс колебаний гипоцентров. При этом SUSAN (14), RON (15) и KATRINA (16) действуют одновременно в восточной части Индо-Австралийской плиты в течение недели (фрагменты В, С и D на *рис. 1б*). Гипоцентры циклонов (17)–(21) с амплитудой пространственного перемещения до 170° (см. *рис. 1в*) охватывают плиту в её самой широкой части.

После «затишья» в 1–2 нед циклоны ELSIE (22) и YALI (23) формируются над Индо-Австралийской плитой соответственно на её западе за 2 нед и на востоке за 2–3 дня до землетрясения 25.03.1998. Минимумы атмосферного давления (1) и (2) (*рис. 3а*) усиливает циклон NATHAN, поддерживая максимальную интенсивность и минимальное давление (3) в течение пяти суток 21–25.03.1998. Аномальным является поведение циклона YALI (23). Совершая зигзагообразные перемещения вдоль бортов Индо-Австралийской, Тихоокеанской и Антарктической плит (см. *рис. 1б*), он уже в качестве внетропического циклона второй раз достигает максимальной интенсивности в южной части Тихого океана и заканчивает своё существование 31.03.1998 в море Сомова, южнее о-вов Баллени (Knapp et al., 2023).

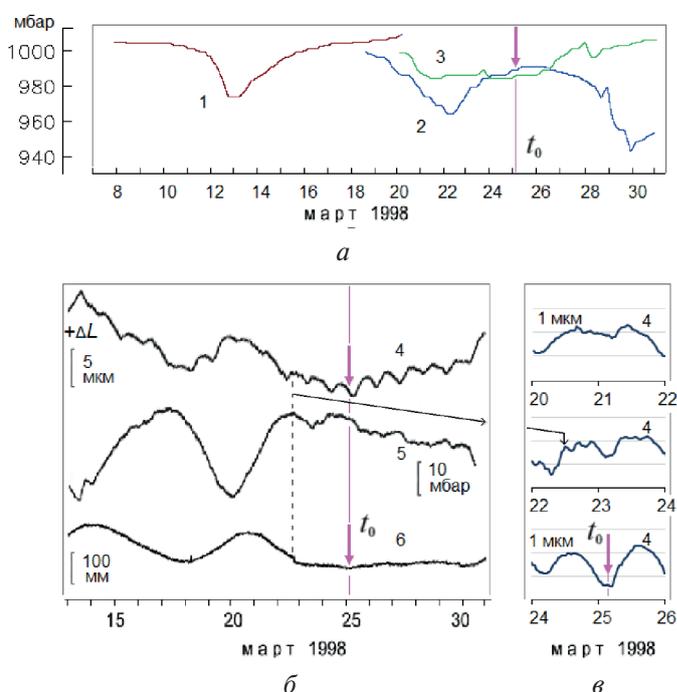


Рис. 3. Барические явления в атмосфере и геофизические процессы в твёрдой земле в период землетрясения с $M = 8,1$ у берегов Антарктиды 25.03.1998: *а* — ход давления в центрах циклонов ELSIE (1), YALI (2) и NATHAN (3); *б* — деформации земной поверхности (4), вариации атмосферного давления (5) и уровня подземных вод (6) в Московском регионе; *в* — три двухсуточных фрагмента деформаций (4) 20–26.03.1998

Происходящие в течение этого цикла геофизические явления в виде предвестников наблюдаются на большом удалении от зоны активности циклонов и эпицентра землетрясения (см. *рис. 3б, в*). Приборами в Московском регионе 19–22 марта зафиксированы аномальные деформации земной поверхности $\sim 1\text{--}5$ мкм (4), контрастные вариации атмосферного давления (5) и колебания уровня подземных вод ~ 100 мм (6), выделенные при удалении температурных трендов 10-метрового лазерного деформографа и скважинного уровнемера, синхронно работающих на расстоянии около 40 км друг от друга (Dubrov et al., 2007). Процессы (4)–(6) связаны с локальными циклонами в пунктах регистрации, а их активизация коррелирует с развитием (1)–(3) тропических циклонов (см. *рис. 3а*) в южной части Тихого океана. Выделенные лазерным деформографом 4–5-часовые колебания амплитудой

<1 мкм (см. средний фрагмент двухсуточной записи на *рис. 3в*) 22–23 марта (Дубров, 2010) продолжаются ~20 ч и по времени совпадают с максимумом интенсивности и минимумом давления (2) тропического циклона YALI. Возбуждение этих колебаний за 30–50 ч до землетрясения 25.03.1998 является аналогом сейсмического предвестника перед землетрясением 05.12.1997 (см. *рис. 2б*). Как и в предыдущем случае, раскачивание Индо-Австралийской плиты в январе – марте 1998 г. (см. *рис. 1б, в*) могло инициировать землетрясение 25.03.1998 с $M = 8,1$ — вблизи контакта с Антарктической плитой.

Статистический анализ данных и обсуждение полученных результатов

Рассмотрим динамику общей интенсивности тропических циклонов относительно момента времени t_0 в очаге землетрясения. Интенсивность тропического циклона определяется категорией от C1 до C5 по шкале SSHWS. Пошаговому повышению этой категории на единицу от C1 = 1 (скорость ветра 33–42 м/с) до C5 = 5 (скорость >70 м/с) соответствует пропорциональное возрастание квадрата скорости ветра в ~4,5–5 раз. Таким образом, категория (в общем случае обозначим её через C) является энергетической характеристикой циклона, а его мощность:

$$P(C) \sim P_0 C, \quad (1)$$

где $C = 1, 2, \dots, 5$ — категория циклона по SSHWS; P_0 — нормировочный коэффициент, который вычислим с использованием расчётной суточной энергоёмкости урагана категории C5 по SSHWS (см. разд. «Обоснование физических взаимосвязей...»). Энергия этого циклона в единицу времени 1 с соответствует его мощности $P(5) = 1,5 \cdot 10^{19}$ Дж / 86 400 с = $1,74 \cdot 10^{14}$ Вт. С помощью соотношения (1) найдём нормировочный коэффициент:

$$P_0 \sim P(5)/C5 = 0,2P(5) = 0,35 \cdot 10^{14} \text{ Вт}. \quad (2)$$

Динамика или зависимость от времени t суммарной мощности $P(t)$ тропических циклонов:

$$P(t) = \sum P_i(C, t) = P_0 \sum C_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, I(t), \quad (3)$$

где $P_i(t)$ — мощность циклона с индексом i ; $C_i(t)$ — его категория; $I(t)$ — количество циклонов в данный момент времени. Полная энергия циклона определяется его мощностью и длительностью от четырёх дней до четырёх недель (*табл. 1*, см. *рис. 1в*). Пусть единичный интервал времени $T = 1$ нед (семь дней), тогда зависимость $P(t)$ (3) можно представить в виде дискретного временного ряда:

$$P(t_0 + mT) = P_0 \sum C_i(t_0 + mT), \quad m = -T_1, -T_1 + 1, \dots, 0, 1, \dots, T_2, \quad (4)$$

где t_0 — время землетрясения в очаге; m — номер интервала или количество недель до землетрясения ($m < 0$) и после него ($m > 0$), суммирование ведётся по $i = 1, 2, \dots, I(t_0 + mT)$; T_1 и T_2 — количество недельных интервалов до землетрясения и после него.

Результаты обработки данных о циклонах 1997–1998 гг. (*табл. 1*) представлены первой и второй диаграммой на *рис. 4* (см. с. 106). Время указано в неделях (m) до и после землетрясения, P_n — нормированная суммарная мощность циклонов на интервале m :

$$P_n = P(m)/P_0 = \sum C_i(m). \quad (5)$$

На первой диаграмме максимальная активность циклонов наблюдается за 7 нед до землетрясения (момент t_0 показан вертикальными стрелками). На второй диаграмме для более сильного землетрясения — за 7 и 12 нед до землетрясения. Подобную закономерность циклонической активности мы наблюдали перед многими другими сильными землетрясениями (Александров и др., 2019; Головачев и др., 2011; Dubrov et al., 2014; Volkov et al., 2020, 2023). Для подтверждения описанной методики (1)–(5) нами обработаны мировые данные дистанционного зондирования тропических циклонов (Покровская, Шарков, 2006; Knapp et al., 2023; Tropical..., 2023) в периоды сильнейших землетрясений, зарегистрированных отечественными (<http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl>) и зарубежными (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>) сейсмическими службами в 1997–2007 гг. (*табл. 2*).

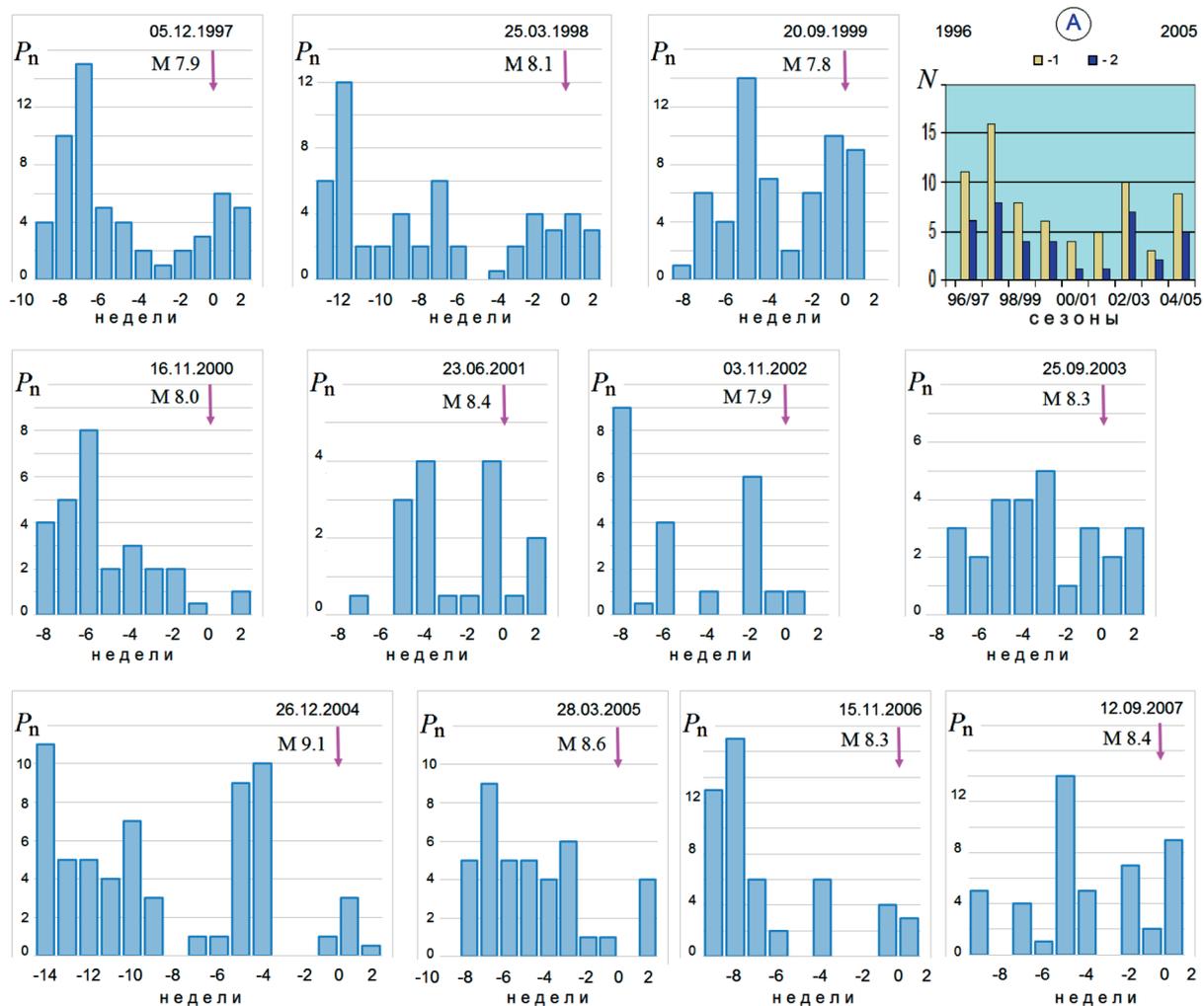


Рис. 4. Распределение суммарной мощности P_n циклонов 1997–2007 гг., предворяющих 11 сильнейших землетрясений в соответствующем году; А — активность тропических циклонов в 1996–2005 гг. в южной части Тихого океана (Padgett, 2005): 1 — общее количество циклонов, 2 — количество циклонов категории С1 и выше

Таблица 2. Сильнейшие землетрясения с 1997 по 2007 г. согласно данным <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl> и <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

Дата	Время (UTC)	Широта	Долгота	Магнитуда	Район
05.12.1997	11:26:54	54,86° с. ш.	162,0° в. д.	7,9	Камчатка
25.03.1998	03:12:25	62,80° ю. ш.	149,4° в. д.	8,1	район о-вов Баллени
20.09.1999	17:47:18	23,8° с. ш.	121,0° в. д.	7,8	Тайвань
16.11.2000	04:54:57	4,0° ю. ш.	152,2° в. д.	8,0	Папуа — Новая Гвинея
23.06.2001	20:33:13	16,31° ю. ш.	73,70° з. д.	8,4	У побережья Перу
03.11.2002	22:12:41	63,5° с. ш.	147,4° з. д.	7,9	Центральная Аляска
25.09.2003	19:50:07	41,90° с. ш.	143,9° в. д.	8,3	о-в Хоккайдо, Япония
26.12.2004	00:58:53	3,32° с. ш.	95,85° в. д.	9,1	о-в Суматра, Индонезия
28.02.2005	16:09:37	2,1° с. ш.	97,1° в. д.	8,6	
15.11.2006	11:14:14	46,6° с. ш.	153,3° в. д.	8,3	Курильские о-ва
12.09.2007	11:10:27	4,4° ю. ш.	101,4° в. д.	8,4	о-в Суматра, Индонезия

Примечание: UTC — *англ.* Coordinated Universal Time.

На *рис. 4* приведены результаты расчётов суммарной мощности P_n циклонов, сопровождавших 11 выделенных землетрясений, каждое — сильнейшее в году. Продолжительность максимальной длительности — 14 нед (~3 мес) — предшествует наиболее сильному землетрясению 26.12.2004 с $M=9,1$ (Volkov et al., 2020). Сезон 1997–1998 гг. (см. разд. «Пространственно-временное...») характеризуется высокой активностью, связанной с мощной фазой Эль-Ниньо в экваториальной части Тихого океана (Padgett, 2005) (см. диаграмму А на *рис. 4*). Минимальное количество циклонов N отмечается для сезона 2000–2001 гг. и соответствует минимальным значениям P_n перед землетрясением 23.06.2001 с $M=8,4$ (*табл. 2*).

Из представленного на *рис. 4* материала для статистического анализа выбраны два однородных массива данных: 7-летний (1997–2003) и 11-летний (1997–2007) длительностью 10 и 9 нед. С помощью P_n (5) для каждого землетрясения вычислялось интегральное по массиву распределение P_Σ путём временного усреднения с накоплением:

$$P_\Sigma(m) = \Sigma P_{nk}(m) = \Sigma \Sigma C_{ik}(m), k = 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

где $C_{ik}(m)$ — категория циклона i , действующего на интервале m ; K — количество лет в массиве данных. Математическое среднее может быть получено из выражения (6) делением функции P_Σ на K . Результаты обработки двух массивов данных приведены на *рис. 5*. Максимум функции P_Σ за 7 нед до землетрясения сменяется снижением с периодом 3–4 нед. На обеих диаграммах P_Σ достигает минимума за 3 нед до землетрясения, после чего начинается рост циклонической активности и вероятность сейсмического события становится максимальной. Превышение максимального среднего значения $\langle P_\Sigma(7) \rangle = 5,1 \pm 1,7$ над минимальным средним $\langle P_\Sigma(3) \rangle = 1,8 \pm 1,4$ для массива *рис. 5a* составляет около 2σ , где σ — среднеквадратическое отклонение, равное 1,7 в максимуме и 1,4 в минимуме функции P_Σ . Соответствующие средние значения для массива *рис. 5б* за 7 нед до землетрясения — $5,0 \pm 1,2$ и за 3 нед до землетрясения — $1,7 \pm 1,2$, превышение составляет $2,75\sigma$. Полученные результаты демонстрируют статистически значимую связь циклонов и землетрясений с M в пределах 7,7–9,1 на временных промежутках до 8 нед, предшествующих моменту основного толчка для всех 11 сильнейших землетрясений.

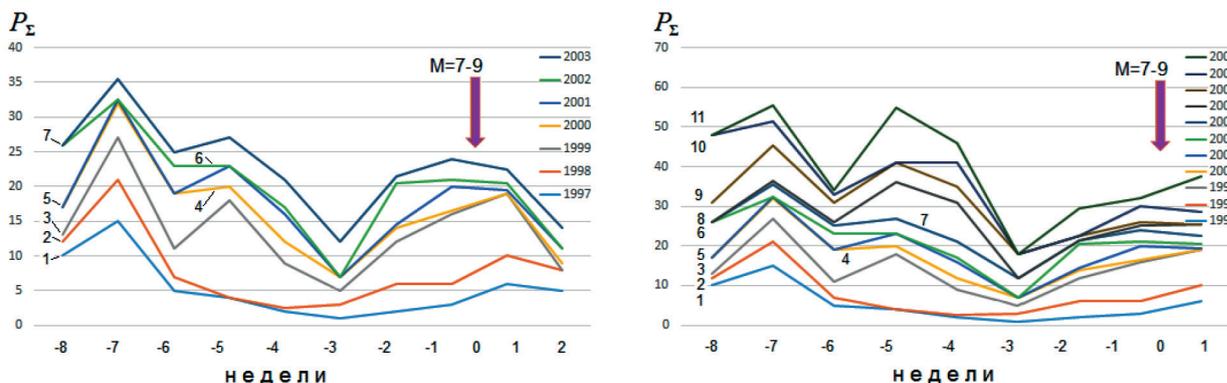


Рис. 5. Диаграммы с накоплением для интегрального распределения P_Σ суммарной мощности P_n циклонов, сопровождающих сильнейшие землетрясения с 1997 по 2003 г. (*а*) и с 1997 по 2007 г. (*б*); 1–11 соответствуют 1997–2007 гг.

Таким образом, коллективное воздействие циклонов на литосферную плиту в виде вертикальных подъёмных сил, прикладываемых низким давлением циклонов поочерёдно к противоположным краям плиты, при достижении некоторого порогового уровня может стать триггером землетрясения (Соболев, Пономарев, 2003). Существуют механизмы и обратного воздействия сейсмогенных процессов в земле на атмосферу и гидросферу. Среди таких явлений — волны цунами, звуковые и инфразвуковые волны, вызываемые землетрясениями в океане, выделение инертных и парниковых газов перед землетрясениями (Карелин, 2009).

Вероятно, существует и воздействие процессов подготовки землетрясения на формирование и развитие тропических циклонов. Иначе трудно объяснить замысловатое поведение циклона YALI (23) (см. *рис. 1б*), который, проделав извилистый путь длиной около 10 тыс. км от Соломоновых о-вов на юг, оказался в нескольких сотнях километров от очага землетрясения с $M = 8,1$ у берегов Антарктиды спустя шесть дней после основного толчка. Интересно, что примерно так же вёл себя 05–08.02.2023 средиземноморский циклон BARBARA, перемещавшийся вдоль границы Аравийской и Анатолийской тектонических плит во время катастрофического землетрясения с $M = 7,8$ в Турции 06.02.2023 (Volkov et al., 2023). Сюда же можно отнести и петлеобразное движение тропического циклона PAM (см. *рис. 2в*), находящегося ещё на стадии формирования за сутки до землетрясения. Подобные явления были отмечены нами и в других районах Мирового океана (Головачев и др., 2011; Dubrov et al., 2014; Volkov et al., 2020). Для выяснения этого вопроса требуются более детальные исследования аномального проявления гравитационного (Макоско и др., 2019), электромагнитного и других (Шарков, 2014) физических полей земли.

Заключение

На основании анализа траекторий тропических циклонов и областей пониженного давления перед сильнейшими землетрясениями 1997–2007 гг., а также статистической обработки данных предложен новый физический подход к описанию триггерного эффекта и показана возможность его реализации при инициировании сильного землетрясения в результате взаимодействия океана, атмосферы и литосферы. Процесс представляет собой пространственно-временную циклическую последовательность зон низкого давления, формируемых тропическими циклонами (ураганами, тайфунами) над тектоническими плитами Земли. Цепочка циклонов может охватывать тектоническую плиту в её самом широком месте. Суммарная мощность циклонов возрастает за несколько недель до землетрясения и падает до минимума за 3 нед до землетрясения, при возобновлении циклонической активности вероятность мощного сейсмического толчка становится максимальной. Процесс интенсивного воздействия последовательной системы циклонов может продолжаться до 2–3 мес и состоять из двух и более пространственно-временных циклов длительностью 3–4 нед перед наиболее сильными землетрясениями с M в пределах 8–9.

Результаты работы свидетельствуют о наличии причинно-следственной физической взаимосвязи интенсивных тропических циклонов и сильнейших землетрясений. Изучение этого явления позволит поднять на новый уровень понимание механизмов взаимодействия атмосферы, океана и твёрдой земли.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Литература

1. Александров Д. В., Дубров М. Н., Ларионов И. А. и др. Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергоактивной и асейсмической зонах // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 72–80. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019372-80>.
2. Боков В. Н., Гутшабаш Е. Ш., Потиха Л. З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2011. № 18. С. 173–184.
3. Головачев С. П., Дубров М. Н., Волков В. А. Взаимосвязь тропического циклогенеза и сейсмической активности по данным спутниковых и наземных измерительных комплексов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 232–238.
4. Добровольский И. П. Прогноз тектонического землетрясения: определение места и энергии землетрясения по вертикальным перемещениям земной поверхности // Физика Земли. 2006. № 5. С. 78–82.

5. Дубров М. Н. Предвестники землетрясений: стратификация и обнаружение лазерной деформометрической системой // 5-я Международ. конф. «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»: сб. докл. 2010. С. 368–371. http://www.ikir.ru/ru/Events/Conferences/2010-V-international/05_earthquakes_precursors/node11.html.
6. Карелин А. В. О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2009. Т. 111. № 4. С. 43–50.
7. Костин В. М., Беляев Г. Г., Овчаренко О. Я., Трушкина Е. П. Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 125–139. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139>.
8. 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.
9. Макоско А. А., Набокова Е. В., Ярошевич М. И. О связи кинематических характеристик ветра в тропических циклонах и аномалий силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 139–146. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556139-146>.
10. Морозова Л. И. Тайфуны и сейсмичность // Докл. АН. 2006. Т. 410. № 3. С. 397–400.
11. Покровская И. В., Шарков Е. А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: 1983–2005. М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
12. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
13. Сытинский А. Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 2. С. 132–137.
14. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: Физические основы. М.: ИКИ РАН, 2014. Т. 1. 552 с.
15. Ярошевич М. И. Тропические циклоны и сейсмическая активность // Докл. АН СССР. 1991. Т. 316. № 1. С. 88–92.
16. Dubrov M. N., Golovachev S. P. Earthquake and hurricane remote monitoring by ground-based interferometry // ISPRS Technical Commission 8th Symp. 2010. V. 38. No. 8. P. 254–255. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part8/>.
17. Dubrov M. N., Kazantseva O. S., Manukin A. B. et al. The study of synchronously measured variations in the Earth's surface strain and groundwater level // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2007. V. 43. P. 404–411. <https://doi.org/10.1134/S1069351307050059>.
18. Dubrov M. N., Volkov V. A., Golovachev S. P. Earthquake and hurricane coupling is ascertained by ground-based laser interferometer and satellite observing techniques // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. No. 2. P. 935–961. <https://doi.org/10.5194/nhessd-2-935-2014>.
19. Fan W., McGuire J. J., de Groot-Hedlin C. D. et al. Stormquakes // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. No. 22. P. 12909–12918. <https://doi.org/10.1029/2019GL084217>.
20. Knapp K. R., Diamond H. J., Kossin J. P., Kruk M. C., Schreck C. J., Levinson D. H., Neumann C. J. International best track archive for climate stewardship (IBTrACS) / NOAA National Centers for Environmental Information. 2023. <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>.
21. Nersesov I. L., Latynina L. A. Strain processes before the Spitak earthquake // Tectonophysics. 1992. V. 202. P. 221–225.
22. Padgett G. Tropical cyclone summary: 2004–2005 season / RSMC NADI — Tropical Cyclone Centre. 2005. 14 p. https://web.archive.org/web/20090225212738/http://www.met.gov.fj/documents/TC_Seasonal_Summary_04-051190690498.pdf.
23. Sobolev G. A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. No. 11. P. 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>.
24. Tropical cyclones — Tropical weather outlook: Archive / Regional Specialized Meteorological Centre for Tropical Cyclones over North Indian Ocean. New Delhi, India, 2023. <https://rsmcnewdelhi.imd.gov.in/archive.php>.
25. Volkov V., Mrlina J., Dubrov M. et al. Atmosphere, ocean and lithosphere interaction as a possible drive of earthquake triggering // Geodesy and Geodynamics. 2020. V. 11. No. 6. P. 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.07.001>.
26. Volkov V., Dubrov M., Larionov I. et al. Atmosphere and lithosphere interaction could triggered the 2023 Mw 7.8 Turkey earthquake // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proc. Earth and Environmental Sciences. Cham: Springer, 2023. P. 121–130. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50248-4_13.

Study of interrelations between the atmosphere, ocean and lithosphere from the example of intense tropical cyclones and the strongest earthquakes interaction

S. P. Golovachev¹, M. N. Dubrov¹, V. A. Volkov²,
D. V. Aleksandrov¹, I. S. Eremin¹, D. S. Kalenov¹

¹ *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Moscow Region 141190, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia*
E-mail: mnd139@ire216.msk.su

Results have been obtained indicating the existence of a cause-and-effect relationship between intense tropical cyclones (typhoons, hurricanes) and strong earthquakes. A statistical analysis of the activity of tropical cyclones accompanying 11 of the strongest earthquakes with a magnitude of M of 7.8–9.1 for the period 1997–2007 was carried out. The dynamics of the overall intensity of tropical cyclones relative to earthquake time in the focus for the selected earthquakes, each of which is the strongest in the year, is considered. A new physical approach has been proposed for the implementation of the effect of a strong earthquake triggering caused by ocean, atmosphere and lithosphere interaction. The process represents a spatio-temporal cyclic sequence of low-pressure zones organizing over the Earth's tectonic plates and covering a tectonic plate at its widest site. The cycle period in time is 3–4 weeks. The process begins several weeks before the earthquake in the form of an increase in the total power of the cyclones and its subsequent reduction to a minimum. When cyclonic activity resumes, the probability of a powerful seismic shock becomes maximum. The duration of the process increases to 2–3 months before the most powerful M 8–9 earthquakes and consists of two or more spatio-temporal cycles.

Keywords: tropical cyclones, hurricanes, typhoons, seismic activity, earthquakes, interaction of atmosphere with ocean and lithosphere

Accepted: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-99-111

References

1. Aleksandrov D. V., Dubrov M. N., Larionov I. A. et al., Earth strain and acoustic monitoring of geodynamic processes in seismic and aseismic zones using highly sensitive, spatially separated instruments, *J. Volcanology and Seismology*, 2019, Vol. 13, No. 3, pp. 193–200, <https://doi.org/10.1134/S0742046319030023>.
2. Bokov V. N., Gutshabash E. Sh., Potiha L. Z., Atmospheric processes as trigger effect of earthquakes occurrence, *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* (Proc. Russian State Hydrometeorological Univ.), 2011, Issue 18, pp. 173–184 (in Russian).
3. Golovachev S., Dubrov M., Volkov V., The interaction between the tropical cyclogenesis and seismic activity as derived from spacecraft and ground-based measuring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 232–238 (in Russian).
4. Dobrovolsky I. P., Prediction of a tectonic earthquake: Determination of the earthquake place and energy from vertical displacements of the Earth's surface, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2006, Vol. 42, No. 5, pp. 429–433, <https://doi.org/10.1134/S1069351306050065>.
5. Dubrov M. N., Predvestniki zemletryaseni: stratifikatsiya i obnaruzhenie lazernoi deformometricheskoi sistemoi (Earthquake precursors: stratification and detection by laser strainmeter system), *5-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Solnechno-zemnye svyazi i fizika predvestnikov zemletryaseni"* (5th Intern. Conf. "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors": Proc.), 2010, pp. 367–370 (in Russian), https://www.ikir.ru/en/Events/Conferences/2010-V-international/05_earthquakes_precursors/node11.html.
6. Karelin A. V., On the possibility of space monitoring of the processes of the emergence of tropical hurricanes, *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIEEM* (Electromechanical matters. VNIIEEM Studies), 2009, Vol. 111, No. 4, pp. 43–50 (in Russian).

7. Kostin V. M., Belyaev G. G., Ovcharenko O. Ya., Trushkina E. P., Features of the relationship between tropical cyclones and earthquakes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 125–139 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139>.
8. Lysenko D. A., Yaroshevich M. I., Seasonal dynamics of cyclonic and seismic activity in areas of tropical cyclones, *Geophysical research*, 2015, Vol. 16, No. 1, pp. 35–43 (in Russian).
9. Makosko A. A., Nabokova E. V., Yaroshevich M. I., On the relationship between the kinematic characteristics of wind in tropical cyclones and gravity anomalies, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 6, pp. 612–618, <https://doi.org/10.1134/S0001433819060100>.
10. Morozova L. I., Typhoons and seismicity, *Doklady Earth Sciences*, 2006, Vol. 410, No. 7, pp. 1132–1135, <https://doi.org/10.1134/S1028334X06070294>.
11. Pokrovskaya I. V., Sharkov E. A., *Tropicheskie tsyklony i tropicheskie vozmuscheniya Mirovogo okeana: 1983–2005* (Tropical cyclones and tropical disturbances of the World Ocean: 1983–2005), Moscow: Poligraph Servis, 2006, 728 p. (in Russian).
12. Sobolev G. A., Ponomarev A. V., *Fizika zemletryasenii i predvestniki* (Earthquake physics and precursors), Moscow: Nauka, 2003, 270 p. (in Russian).
13. Sytinskij A. D., Planetary atmospheric disturbances during strong earthquakes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 1997, Vol. 37, No. 2, pp. 256–259 (in Russian).
14. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: Fizicheskie osnovy* (Radio-thermal remote sensing of the Earth: Physical bases), Moscow: IKI RAN, 2014, Vol. 1, 552 p. (in Russian).
15. Yaroshevich M. I., Tropical cyclones and seismic activity, *Doklady Akademii nauk*, 1991, Vol. 316, No. 1, pp. 88–92 (in Russian).
16. Dubrov M. N., Golovachev S. P., Earthquake and hurricane remote monitoring by ground-based interferometry, *ISPRS Technical Commission 8th Symp.*, 2010, Vol. 38, No. 8, pp. 254–255, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part8/>.
17. Dubrov M. N., Kazantseva O. S., Manukin A. B. et al., The study of synchronously measured variations in the Earth's surface strain and groundwater level, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2007, Vol. 43, pp. 404–411, <https://doi.org/10.1134/S1069351307050059>.
18. Dubrov M. N., Volkov V. A., Golovachev S. P., Earthquake and hurricane coupling is ascertained by ground-based laser interferometer and satellite observing techniques, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, No. 2, pp. 935–961, <https://doi.org/10.5194/nhessd-2-935-2014>.
19. Fan W., McGuire J. J., de Groot-Hedlin C. D. et al., Stormquakes, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, No. 22, pp. 12909–12918, <https://doi.org/10.1029/2019GL084217>.
20. Knapp K. R., Diamond H. J., Kossin J. P., Kruk M. C., Schreck C. J., Levinson D. H., Neumann C. J., *International best track archive for climate stewardship (IBTrACS)*, NOAA National Centers for Environmental Information, 2023, <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>.
21. Nersesov I. L., Latynina L. A., Strain processes before the Spitak earthquake, *Tectonophysics*, 1992, Vol. 202, pp. 221–225.
22. Padgett G. *Tropical cyclone summary: 2004–2005 season*, RSMC NADI — Tropical Cyclone Centre, 2005, 14 p., https://web.archive.org/web/20090225212738/http://www.met.gov.fj/documents/TC_Seasonal_Summary_04-051190690498.pdf.
23. Sobolev G. A., Seismicity dynamics and earthquake predictability, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, No. 11, pp. 445–458, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>.
24. *Tropical cyclones — Tropical weather outlook: Archive*, Regional Specialized Meteorological Centre for Tropical Cyclones over North Indian Ocean, New Delhi, India, 2023, <https://rsmcnewdelhi.imd.gov.in/archive.php>.
25. Volkov V., Mrlina J., Dubrov M. et al., Atmosphere, ocean and lithosphere interaction as a possible drive of earthquake triggering, *Geodesy and Geodynamics*, 2020, Vol. 11, No. 6, pp. 442–454, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.07.001>.
26. Volkov V., Dubrov M., Larionov I. et al., Atmosphere and lithosphere interaction could triggered the 2023 Mw 7.8 Turkey earthquake, In: *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023*, Springer Proc. Earth and Environmental Sciences, Cham: Springer, 2023, pp. 121–130, https://doi.org/10.1007/978-3-031-50248-4_13.