

## Многолетние изменения повторяемости тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана и их связь с разными факторами формирования

В. В. Крохин\*, А. Ю. Филь\*,  
В. Ю. Верятин\*\*

*Проанализированы изменения за период 1961—2015 гг. повторяемости тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана и их связь с разными факторами — повторяемостью форм атмосферной циркуляции по типизации Вангенгейма — Гирса для тихоокеано-американского сектора, температурой поверхности воды в северной части Тихого океана и положением центра северотихоокеанского антициклона. Установлены устойчивые зависимости между этими характеристиками.*

**Ключевые слова:** тропический циклон, северо-запад Тихого океана, повторяемость, формы атмосферной циркуляции, температура поверхности воды, северотихоокеанский антициклон.

### 1. Введение

Тропические циклоны (ТЦ) — одно из самых разрушительных явлений на нашей планете. Ежегодно они уносят жизни сотен людей и наносят немалый материальный ущерб морской и прибрежной инфраструктуре. Не является исключением и территория российского Дальнего Востока и дальневосточных морей, ежегодно подвергающаяся негативному влиянию тайфунов — тропических циклонов, формирующихся в северо-западной части Тихого океана. Отметим, что разработаны и функционируют отечественные технологии, позволяющие прогнозировать на средние сроки положение и эволюцию ТЦ на Дальнем Востоке и северо-западе Тихого океана [3, 6].

Известно, что межгодовая изменчивость повторяемости ТЦ в северо-западной части Тихого океана зависит от разных крупномасштабных явлений и процессов, включая квазидвухлетнее колебание (КДК) [11], Эль-Ниньо — южное колебание (ЭНЮК) [12], северотихоокеанское колебание [34], колебание Маддена — Джулиана [24], также отмечалась связь с аномалиями атмосферной циркуляции над северо-западной частью Тихого

\* Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт.

\*\* Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”; e-mail: krokhin@mail.ru.

океана [25] и с крупномасштабными формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу для тихоокеано-американского сектора [2, 8, 10].

Тропические циклоны, возникающие на северо-западе Тихого океана, наряду с южными циклонами и ультраполярными воздействиями рассматриваются как мощный циркуляционный механизм, определяющий внутри-сезонный ход дальневосточного муссона [9]. Достаточно подробный обзор проблемы взаимосвязи между условиями развития тайфунов и колебаниями общей циркуляции атмосферы дан в работе [1]. Также было сделано предположение [23], что межгодовая изменчивость активности ТЦ в большой степени определяется активностью восточно-азиатского муссона. Данное направление исследований было развито в работах [17, 19, 36, 37].

В качестве основного показателя атмосферной циркуляции в работах [36, 37] был выбран индекс Гадлея (или НС-индекс — Hadley Cell Index). Он определяется как максимальное значение зонально усредненного (в полосе  $0\text{—}30^\circ$  с. ш.) меридионального переноса массы воздуха. Было показано, что при большом значении индекса Гадлея в весенний сезон летний азиатский муссон становится менее интенсивным, что сопровождается сильным вертикальным сдвигом ветра и неблагоприятными условиями для развития тайфунов. Условия благоприятны для возникновения тайфунов при малом значении НС-индекса. В работе [17] анализировалась изменчивость восточно-азиатского муссона в зависимости от арктического колебания, характеризующего интенсивность западных ветров во внетропических широтах.

Результаты, полученные в данных исследованиях, позволяют предположить, что также существует и взаимосвязь между сезонной повторяемостью форм крупномасштабной атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу для тихоокеано-американского сектора и межгодовыми изменениями активности ТЦ в северо-западной части Тихого океана.

Целью данной работы является изучение многолетних изменений повторяемости тайфунов и их связи с разными факторами формирования: режимом крупномасштабной атмосферной циркуляции и тепловым состоянием поверхности океана. Выполнен спектральный анализ временного ряда числа ТЦ в северо-западной части Тихого океана с помощью совместного применения метода анализа сингулярного спектра (SSA — Singular Spectrum Analysis) и метода максимальной энтропии (MEM — Maximum Entropy Method).

## 2. Исходные данные и методы расчетов

Архив данных о ТЦ в северо-западной части Тихого океана за период 1945—2015 гг. был получен по материалам ведущего метеорологического агентства по изучению тропических циклонов — Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC). Данные включают координаты (широта и долгота) центра ТЦ, минимальное давление в центре и максимальный ветер на всех стадиях развития ТЦ — депрессия, тропический шторм, тайфун. Анализировались данные только о ТЦ, достигших стадии тропического шторма.

Также использованы данные реанализа NCEP/NCAR за 1961—2015 гг. с шагом 2,5 [21] и средние месячные данные о температуре поверхности

океана (ТПО) с горизонтальным разрешением  $2 \times 2$  из архива COADS (Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set) за этот же период [31].

Ежемесячные данные о положении северотихоокеанского центра действия атмосферы (ЦДА) до 2015 г. взяты из архивов ВНИИГМИ-МЦД [5] и телеграмм Гидрометцентра России.

Кроме того, были использованы архивы данных о ежемесячном числе дней с формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу (Z, M1, M2) по тихоокеано-американскому сектору за период 1900—2015 гг. Меридиональные формы циркуляции M1 и M2 предполагают наличие в средней тропосфере длинных волн большой амплитуды с устойчивой противоположной географической локализацией ложбин и гребней над рассматриваемым сектором Северного полушария. Зональная форма циркуляции Z, напротив, характеризуется отсутствием ярко выраженных длинных волн большой амплитуды.

Хотя данные о ТЦ были доступны с 1945 г., сведения о количестве ТЦ — с 1884 г. [13], а о повторяемости форм циркуляции по Вангенгейму — Гирсу — с 1900 г., в работе был использован единый период — с 1961 по 2015 г. Выбор данного периода обоснован статистически однородными результатами анализа кривых накопленных годовых стандартизированных аномалий повторяемости ТЦ и ежегодного числа дней с формами циркуляции Z, M1 и M2 по методу, изложенному в работе [30].

При проведении корреляционного анализа статистическая значимость рассчитывалась с учетом межгодовой связности рядов рассматриваемых параметров [26]. Все математические и графические расчеты выполнялись в системе OCTAVE.

### 3. Анализ межгодовой изменчивости годового числа тропических циклонов

Впервые совместное применение двух методов — метода анализа сингулярного спектра и метода максимальной энтропии (далее SSA + MEM) было использовано для анализа частоты атлантических ураганов [14]. Так как такие работы для тихоокеанских тайфунов авторам неизвестны, был проведен аналогичный анализ межгодовой изменчивости их числа.

Метод анализа сингулярного спектра основан на преобразовании одномерного временного ряда в многомерный ряд с последующим применением к полученному многомерному временному ряду метода главных компонент [15]. Лаг-ковариационная матрица оценивалась непосредственно по методу Брумхеда — Кинга, т. е. по исходному ряду как теплицева матрица с константами на диагоналях [33] (общий вид сдвиговой процедуры напоминает гусеницу, поэтому в отечественной научной литературе метод называется “Гусеница”). Поскольку полученные результаты почти не изменялись при варьировании длины спектрального окна в диапазоне от 9 до 15 лет при исходной длине ряда 55 случаев (1961—2015 гг.), была выбрана длина спектрального окна, равная 11 годам.

Процедура SSA, примененная непосредственно к исходному ряду годового числа ТЦ, согласно [15], позволяет выделить низкочастотный нелинейный тренд, содержащийся в первом компоненте. Как видно на рис. 1, в

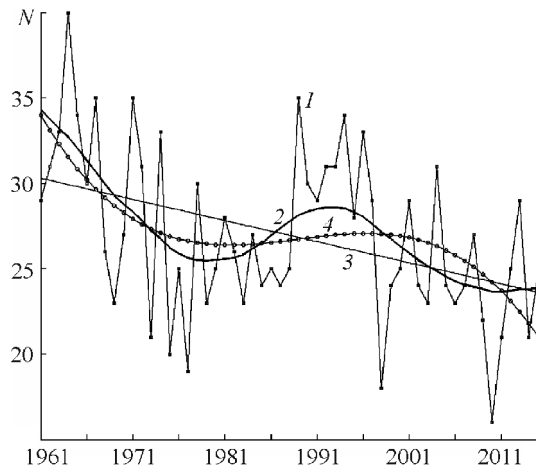


Рис. 1. Годовая повторяемость ТЦ ( $N$ ) за 1961—2015 гг. (1), нелинейный SSA-тренд (2), линейный тренд (3) и тренд третьего порядка (4).

течение периода 1961—2015 гг. значительная межгодовая изменчивость повторяемости тайфунов сменялась незначительной; на такую характерную черту межгодовой изменчивости числа тайфунов указывалось еще в работе [35]. Заметим, что нелинейный тренд, рассчитанный по методу SSA, менее подвержен искажениям на краях выборки (эффект “виляющего хвоста”), чем тренды первого и, особенно, третьего порядка. Среднее значение годового числа ТЦ за 1961—2015 гг. составило 26 (далее — норма).

После удаления нелинейного тренда полученные ряды годового числа ТЦ и дней с формами циркуляции по Вангенгейму — Гирсу были приведены к безразмерному виду и вторично подвергались SSA-процедуре. Для временных рядов с удаленным линейным трендом были получены три основных компонента (первые шесть векторов), которые описывали 80 и 74—78% общей дисперсии для рядов числа ТЦ и числа дней с формами циркуляции по Вангенгейму — Гирсу соответственно. Далее к трем главным реконструированным компонентам этих рядов был применен метод максимальной энтропии [19]. Достоинством процедуры MEM является повышенное спектральное разрешение, однако необходимо принимать во внимание проблему спорных спектральных пиков в случае применения авторегрессионной модели высокого порядка [28].

Проведенный спектральный анализ позволил выявить в рассматриваемых рядах следующие циклы (*годы*):

Место	1-е	2-е	3-е
ТЦ	3—4	2—3	10—12
Форма Z	10—12	29—32	5—6
Форма M1	10—11	3—4	5—6
Форма M2	11—12	6—7	2—3

(циклы статистически значимы с доверительной вероятностью более 95% и ранжированы по вкладу в общую дисперсию).

Критические значения спектральной плотности (на уровне значимости 5%) рассчитаны по методу Монте-Карло [27]. Первый и второй реконструированные компоненты рядов годового числа ТЦ содержат 57% общей дисперсии, имеют спектральные пики 3—4 и 2—3 *года* соответственно. Третий компонент, описывающий примерно 19% общей дисперсии ряда, имеет периодичность 10—12 *лет*. Выявленные периодичности в рядах числа дней с формами циркуляции по Вангенгейму — Гирсу по тихоокеано-амер-

риканскому сектору Северного полушария также имеют сходные величины, но другой порядок вклада в общую дисперсию — на первом месте 10—12-летний цикл, имеются циклы 2—3, 3—4 и 5—6 лет.

Полученные циклы числа ТЦ близки к периодичностям КДК (2—3 года), ЭНЮК (4—6 лет согласно [32]) и к 11-летнему циклу чисел Вольфа, описывающему солнечную активность. Заметим, что 11-летняя цикличность во временных рядах числа ТЦ ранее независимо выявлялась в работах [7, 20]. В работе [14] для повторяемости атлантических ураганов были получены циклы 5—6 лет и 2—3 года.

Таким образом, совместное применение методов сингулярного анализа и максимальной энтропии позволяет сделать вывод о влиянии на межгодовую изменчивость числа ТЦ в северо-западной части Тихого океана крупномасштабных колебаний в атмосфере и океане — КДК и ЭНЮК.

#### 4. Повторяемость тропических циклонов и особенности сезонной атмосферной циркуляции

Выявленные в предыдущем разделе циклы описывают взаимосвязи рядов повторяемости ТЦ и форм циркуляции по Вангенгейму — Гирсу в масштабе года — с удаленным нелинейным трендом. Для лучшего понимания этих связей рассмотрим сезонные особенности атмосферной циркуляции.

Анализ данных таблицы показывает, что существует значимая статистическая связь между числом тайфунов за год и числом дней с зональной циркуляцией в предшествующий весенний период (предварительно данные были преобразованы в аномалии и нормализованы при помощи стандартного отклонения). Коэффициент корреляции, равный  $-0,36$ , значим с доверительной вероятностью 99%. С целью исключения возможного влияния долгопериодных тенденций из рядов также исключался линейный тренд. При этом коэффициент корреляции ( $-0,47$ ) остался значимым. Таким образом, если число дней с зональной циркуляцией в тихоокеано-американском секторе в весенний период больше среднего, то число тайфунов будет меньше среднего значения, и наоборот.

**Коэффициенты корреляции Пирсона между годовым числом ТЦ в северо-западной части Тихого океана и числом дней с формами циркуляции по Вангенгейму — Гирсу по тихоокеано-американскому сектору Северного полушария в разные сезоны за 1961—2015 гг.**

Форма циркуляции	Учет линейного тренда	Сезон		
		Предшествующий		Текущий
		зима	весна	лето
Z	+	-0,13 (66,5)	-0,36 (99,2)	-0,08 (—)
	-	-0,12 (62,3)	-0,47 (99,8)	-0,07 (—)
M1	+	0,20 (85,0)	0,34 (93,9)	-0,21 (89,1)
	-	0,11 (—)	0,35 (94,7)	-0,06 (—)
M2	+	-0,06 (—)	0,12 (—)	0,20 (85,0)
	-	0,03 (—)	0,22 (89,3)	0,09 (—)

*Примечание.* “+” — линейный тренд включен; “-” — линейный тренд исключен. В скобках указана доверительная вероятность (%).

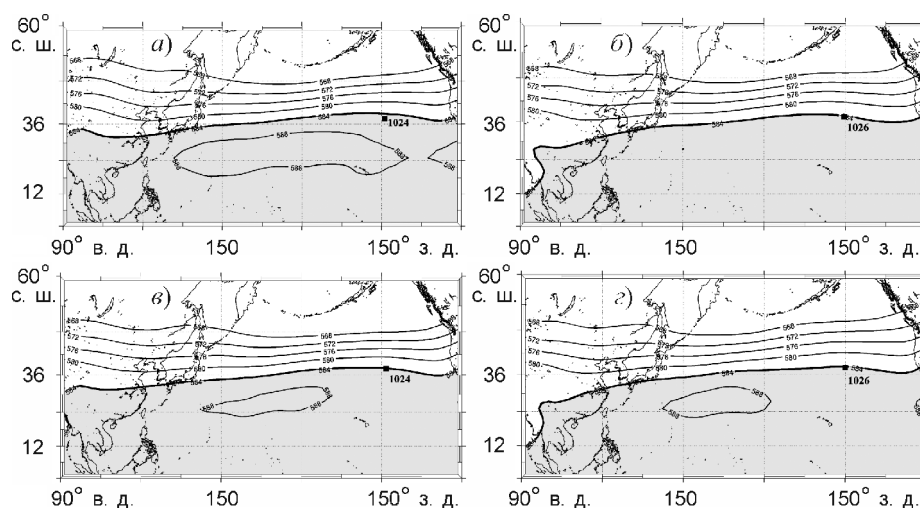


Рис. 2. Средние поля для летнего периода геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа в годы, когда число тайфунов меньше среднего (а) и больше среднего (б), и в годы, когда число дней с формой зональной циркуляции в весенний период больше (в) и меньше среднего (г).

Квадратом отмечено соответствующее положение северотихоокеанского ЦДА в летний период, рядом указана его интенсивность (гПа).

Композиционный анализ (рис. 2) подтверждает, что в годы с числом ТЦ больше нормы восточно-азиатский муссон усилен, центр северотихоокеанского ЦДА смещен к западу и усилен, что видно по положению характерной изогипсы 584 дам. Такое развитие северотихоокеанского ЦДА в зависимости от активности восточно-азиатского муссона отмечалось также в работах [22, 29]. Очевидно сходство средних месячных полей геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа на рис. 2а, в — для лет, когда число ТЦ было меньше среднего, а число дней с формой зональной циркуляции в весенний период больше среднего, а также для противоположной ситуации (рис. 2б, г); коэффициенты корреляции между полями (выраженными в средних сезонных аномалиях) равны 0,62 и 0,21 соответственно (с доверительной вероятностью более 95%).

Активность восточно-азиатского муссона в западной части Тихого океана в годы с разным числом ТЦ может быть также отслежена по такому показателю, как вертикальный сдвиг скорости ветра в слое 850—200 гПа [18]. Была проанализирована корреляция между средними полями сдвига ветра в слое 850—200 гПа в летний сезон и числом дней с зональной циркуляцией по Вангенгейму — Гирсу весной, а также числом ТЦ (рис. 3). Анализ поля корреляции на рис. 3б подтверждает известную закономерность, что сильный вертикальный сдвиг ветра не способствует зарождению и развитию ТЦ [18, 36]. Поле корреляции на рис. 3а во многом противоположно полю на рис. 3б, т. е. районы А, Б, В с значимой положительной корреляцией и район Г с отрицательной корреляцией на рис. 3а соответствуют районам с корреляцией противоположного знака на рис. 3б.

Одним из факторов, отвечающих за подобные взаимосвязи, выявленные для северо-западной части Тихого океана, может быть тепловая инерция океана [36].

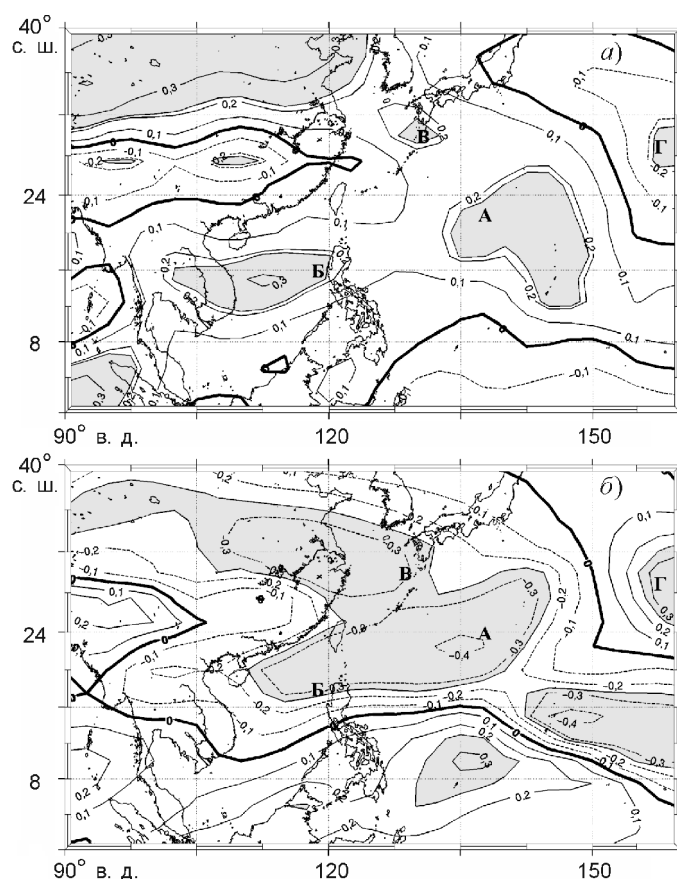


Рис. 3. Поле корреляции между средними месячными полями вертикального сдвига ветра летом и числом дней с зональной циркуляцией по Вангенгейму — Гирсу в весенний период (а), а также годовым числом ТЦ в северо-западной части Тихого океана (б).

Серым цветом отмечены корреляции с доверительной вероятностью 95% и более.

На рис. 4 показаны поля корреляции между числом дней с зональной циркуляцией по Вангенгейму — Гирсу и температурой поверхности океана в весенний и летний сезоны, между числом ТЦ и ТПО в летний период. Очевидно, что тепловое состояние океана (выраженное в виде “подковообразной” структуры поля корреляции), “заложённое” весенними атмосферными процессами, в той или иной мере сохраняется и летом. Структура поля корреляции между числом ТЦ и полем ТПО на рис. 4в некоторым образом является обратной структуре полей на рис. 4а, б. Обращает на себя внимание область отрицательной корреляции между ТПО и числом ТЦ южнее 24 с. ш. и западнее 165 в. д. (рис. 4в).

Изложенное выше подтверждает выводы работ [36, 37] о существовании связей между сезонными (весна — лето) режимами циркуляции и их влиянии на повторяемость тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана.

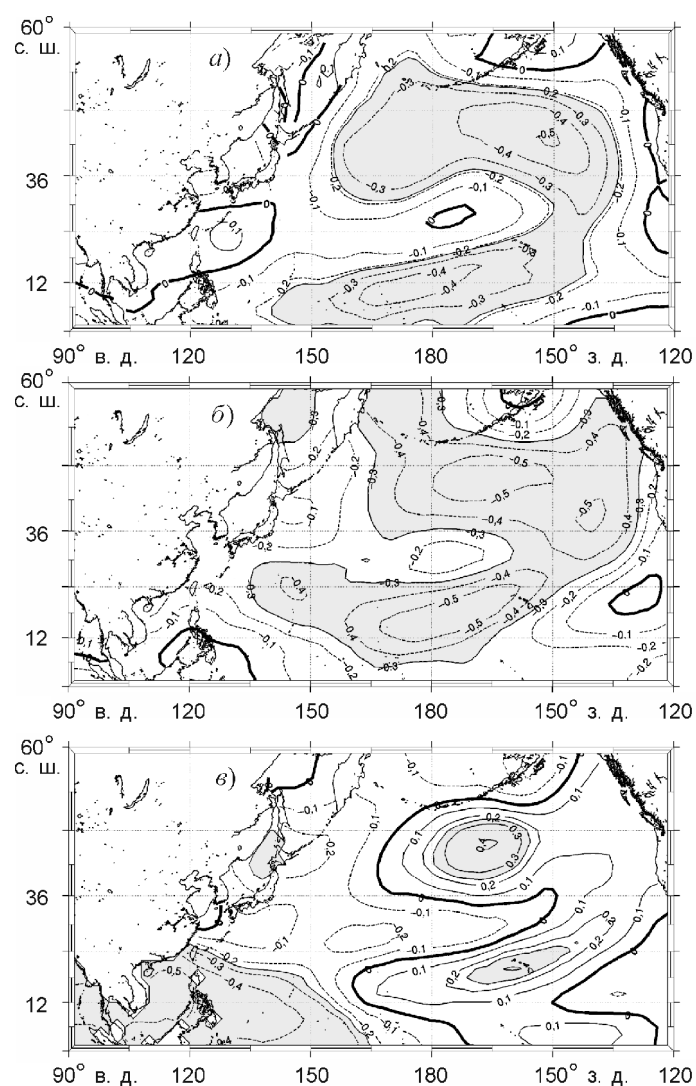


Рис. 4. Поля корреляции между числом дней с зональной формой циркуляции по Вангенгейму — Гирсу для тихоокеано-американского сектора и температурой поверхности океана в весенний (а) и летний (б) сезоны, а также между числом ТЦ и температурой поверхности океана в летний период (в).

### 5. Особенности характеристик тропических циклонов при разных формах циркуляции по Вангенгейму — Гирсу

Проведен анализ зависимости траекторий ТЦ в годы с преобладанием каждого из типов крупномасштабной атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу для тихоокеано-американского сектора за период 1971—2015 гг. В качестве характерного месяца рассматривался август. Выбор периода 1971—2015 гг. объяснялся наличием информации о минимальном давлении в ТЦ с 1971 г.



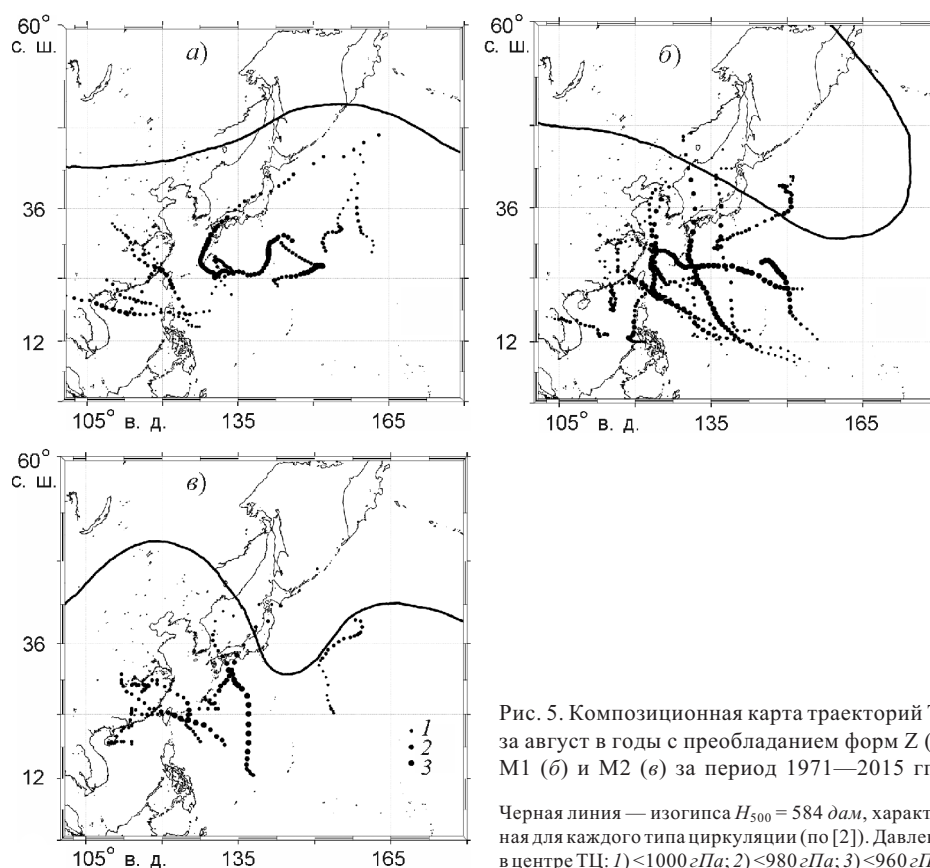


Рис. 5. Композиционная карта траекторий ТЦ за август в годы с преобладанием форм Z (а), М1 (б) и М2 (в) за период 1971—2015 гг.

Черная линия — изогипса  $H_{500} = 584$  дам, характерная для каждого типа циркуляции (по [2]). Давление в центре ТЦ: 1)  $<1000$  гПа; 2)  $<980$  гПа; 3)  $<960$  гПа.

Получены следующие характеристики интенсивности ТЦ в северо-западной части Тихого океана при разных формах атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу:

Показатель	Число случаев	Среднее минимальное давление в центре, гПа
Форма Z	439	982
Форма М1	298	978
Форма М2	173	984

Как видно, больше всего тайфунов отмечается при меридиональной форме циркуляции и именно в этом случае — при форме М1 — отмечаются наиболее глубокие тропические циклоны.

Различие характеристик ТЦ при разных формах циркуляции проявляется также в типах их траекторий (рис. 5). При зональном типе циркуляции (рис. 5а) траектории ТЦ сдвинуты к северу и западу, ограничиваются выходом на территорию Китая, проходят южнее Японских островов и имеют характерную широтную составляющую. При меридиональной форме М1 траектории ТЦ имеют, наоборот, ярко выраженную меридиональную составляющую. Именно в этом случае на российский Дальний Восток выходит больше всего ТЦ с наиболее низким давлением в центре. Что же каса-

ется циклонов при форме М2, то они менее многочисленны и глубоки, чем ТЦ при форме М1.

## 6. Выводы

Таким образом, анализ многолетних изменений повторяемости тайфунов в северо-западной части Тихого океана и их связи с разными факторами формирования позволил сделать следующие выводы.

Подтверждено наличие сигналов КДК и ЭНЮК в межгодовой изменчивости в рядах годового числа ТЦ и числа дней в году с определенными типами крупномасштабной атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу.

Получены значимые (с доверительной вероятностью более 95%) статистические связи между интенсивностью зональной циркуляции (выраженной в числе дней формы Z) в весенний период с крупномасштабным полем геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, положением северотихоокеанского ЦДА и сдвигом ветра в слое 850—200 гПа в летний период — факторами, определяющими благоприятные или неблагоприятные условия развития ТЦ в северо-западной части Тихого океана.

Выявлен физический механизм — тепловая инерция поверхностных вод в течение периода весна — лето для северной части Тихого океана, влияющая на зависимость числа ТЦ от температуры поверхности океана в летний период.

Показано, что существуют различия траекторий и интенсивности ТЦ в зависимости от форм крупномасштабной атмосферной циркуляции по Вангенгейму — Гирсу для тихоокеано-американского сектора. Наиболее глубокие тайфуны отмечаются при меридиональной форме циркуляции. Как показано в работе [4], именно резкие меридиональные преобразования способны обострять или размывать участки внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Так, интенсивные меридиональные процессы в тихоокеано-американском секторе в 1964 и 1971 гг. обострили ВЗК и привели к рекордному числу ТЦ, а резкое ослабление меридиональной циркуляции в 1998 и 2010 гг. сопровождалось минимумом ТЦ в северо-западной части Тихого океана (см. рис. 1).

Работа выполнена в рамках целевой научно-технической программы “Научно-исследовательские, опытно-конструкторские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды”.

## Литература

1. Бурлуцкий Р. Ф., Рафаилова Х. Х., Семенов В. Г., Храбров Ю. Б. Колебания общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. — Л., Гидрометеоздат, 1967, 300 с.
2. Гирс А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. — Л., Гидрометеоздат, 1971, 280 с.
3. Крохин В. В., Ламаш Б. Е. Использование численной модели высокого разрешения HWRF для прогноза траектории и эволюции тайфунов северо-западной части Тихого океана. — Вестник Дальневосточного отделения РАН, 2012, № 3, с. 42—48.

- 4. Кружкова Т. С., Иванидзе Т. Г., Макарова М. Е.** Статистические характеристики тропических циклонов в годы противоположных экстремумов их повторяемости. — *Метеорология и гидрология*, 2001, № 12, с. 13—23.
- 5. Неушкин А. И., Сидоренков Н. С., Санина А. Т. и др.** Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие. Справочное пособие. — Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 2012, 124 с.
- 6. Новицкий М. А., Петриченко С. А., Терех Л. А.** Оценка значимости учета испарения брызг в приземном слое атмосферы для расчета перемещения и интенсивности тропических циклонов. — *Метеорология и гидрология*, 2016, № 5, с. 67—76.
- 7. Павлов Н. И.** Статистические способы долгосрочного прогноза повторяемости тайфунов. — *Труды ДВНИГМИ*, 1975, вып. 51, с. 154—160.
- 8. Павлов Н. И., Маковой Г. А.** О связи траекторий тайфунов с атмосферной циркуляцией в умеренных широтах. — *Труды ДВНИГМИ*, 1973, № 38, с. 172—177.
- 9. Свинухов Г. В.** Синоптико-статистические методы долгосрочных прогнозов погоды на Дальнем Востоке. — *Труды ДВНИГМИ*, 1978, вып. 65, 168 с.
- 10. Чжан Ц.** Многолетнее изменение некоторых метеорологических элементов и повторяемости тайфунов над Китаем и их связь с эпохальными преобразованиями форм W, C, E. — *Труды ГГО*, 1960, № 90, с. 63—78.
- 11. Chan J. C. L.** Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation. — *Mon. Wea. Rev.*, 1995, vol. 123, pp. 2567—2571.
- 12. Chia H. H. and Ropelewski C. F.** The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific. — *J. Climate*, 2002, vol. 15, pp. 2934—2944.
- 13. Chin P. C.** Tropical Cyclones in the Western Pacific and China Sea Area from 1884 to 1953. — Hong Kong, Royal Observatory, 1958, 94 p.
- 14. Elsner J. B., Kara A. B., and Owens M. A.** Fluctuations in North Atlantic hurricane frequency. — *J. Climate*, 1999, vol. 12, No. 2, pp. 427—437.
- 15. Elsner J. B. and Tsonis A. A.** Singular Spectrum Analysis. A New Tool in Time Series Analysis. — New York, Plenum Press, 1996.
- 16. Gong D. and Ho C.-H.** Arctic Oscillation signals in East Asian summer monsoon. — *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, No. D2; doi: 10.1029/2002JD002193.
- 17. Gong D., Yang J., Seong-Joong Kim S., and Gao Y.** Spring Arctic Oscillation — East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. — *Climate Dynamics*, 2011, vol. 37, No. 11—12, pp. 2199—2216.
- 18. Gray W. M., Landsea C. W., Mielke P. W. Jr., and Berry K. J.** Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 August. — *Wea. Forecast.*, 1993, vol. 8, pp. 73—86.
- 19. Hayes M. H.** Statistical Digital Signal Processing and Modeling. — John Wiley, 1996, 622 p.
- 20. Jordan C. L. and Ho T.** Variations in the annual frequency of tropical cyclones 1886—1958. — *Mon. Wea. Rev.*, 1962, vol. 90, No. 4, pp. 157—164.
- 21. Kalnay E. et al.** NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 77, pp. 437—471.
- 22. Kumar K. R. and Hingane L. S.** Global features pressure distribution in April and July associated with contrasting situations of Indian summer monsoon. — *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 1986, vol. 95, No. 2, pp. 299—309.
- 23. Lander M. A.** Special tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse oriented monsoon trough in the western North Pacific. — *Wea. Forecast.*, 1996, vol. 11, pp. 170—186.
- 24. Liebmann B., Hendon H. H., and Glick J. D.** The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian oceans and the Madden-Julian Oscillation. — *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 1996, vol. 72, pp. 401—411.
- 25. Matsuoka T.** Relation between long period circulation anomalies and typhoon formation. — *Geophys. Magazine*, 1971, vol. 35, No. 2, pp. 153—164.
- 26. Oort A. H. and Yienger J.** Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. — *J. Climate*, 1996, vol. 9, No. 11, pp. 2751—2767.
- 27. Pardo-Iguzquiza E. and Rodriguez-Tovar F. J.** MAXENPER: A program for maximum entropy spectral estimation with assessment of statistical significance by the permutation test. — *Computers & Geosciences*, 2005, vol. 31, No. 5, pp. 555—567.

- 28. Penland C. and Matrosova L.** Prediction of tropical Atlantic sea surface temperatures using linear inverse modeling. — *J. Climate*, 1998, vol. 11, pp. 483—496.
- 29. Rajendran K., Kitoh A., and Yukimoto S.** South and East Asian summer monsoon climate and variation in the MRI Coupled Model (MRI-CGCM2). — *J. Climate*, 2004, vol. 17, pp. 763—782.
- 30. Robbins M., Gallagher C., Lund R., and Aue A.** Mean shift testing in correlated data. — *J. Time Series Analysis*, 2011, vol. 32, No. 5, pp. 498—511.
- 31. Smith T. M. et al.** Reconstruction of historical sea surface temperature using empirical orthogonal functions. — *J. Climate*, 1996, vol. 9, pp. 1403—1434.
- 32. Trenberth K.** Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1976, vol. 102, pp. 639—653.
- 33. Vautard R. and Ghil M.** Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. — *Physica D*, 1989, vol. 35, pp. 395—424.
- 34. Wang H. J., Sun J. Q., and Fan K.** Relationships between the North Pacific Oscillation and the typhoon/hurricane frequencies. — *Sci. China, Ser. D: Earth Sci.*, 2007, vol. 50, No. 9, pp. 1409—1416.
- 35. Yi-hui D. and Reiter E.** Some conditions influencing the variability of typhoon formation over the West Pacific Ocean. — *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series A*, 1981, vol. 30, No. 4, pp. 327—342.
- 36. Zhou B. and Cui X.** Hadley circulation signal in the tropical cyclone frequency over the western North Pacific. — *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, No. D16107.
- 37. Zhou B. and Wang H.** Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley. — *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, D16109; doi: 10.1029/2005JD007006.

Поступила в редакцию 7 XII 2016 г., после доработки 23 V 2017 г.

## LONG-TERM VARIATIONS IN THE FREQUENCY OF TYPHOONS AND THEIR RELATION TO VARIOUS FORMATION FACTORS

V. V. Krokhin, A. Yu. Fil', and V. Yu. Veryatin

*The variations in the frequency of tropical cyclones in the Northwest Pacific in 1961–2015 and their relation to various factors are analyzed. The examined factors are the occurrence rates of the certain forms of atmospheric circulation (according to the Vangengeim–Girs classification) in the Pacific-American sector, sea surface temperature in the North Pacific, and the position of the North Pacific High center. The steady relationships between these parameters are revealed.*