

УДК 551.515:551.583

ДЕЙСТВИЕ КАК ИНТЕГРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АТМОСФЕРНЫХ (КЛИМАТИЧЕСКИХ) СТРУКТУР: ОЦЕНКИ ДЛЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

© 2020 г. И. И. Мохов^{a, b, *}, А. Г. Порошенко^b

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 03.07.2020 г.

После доработки 29.07.2020 г.

Принята к публикации 05.08.2020 г.

Для оценки изменений энергетики тропических циклонов использовалась специальная характеристика – действие с размерностью [энергия] × [время]. Получены оценки изменений общего действия тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным для периода 1951–2019 гг. Отмечено значительное увеличение межгодовой изменчивости действия тропических циклонов в последние десятилетия на фоне увеличения средних значений. Отмечены также тенденции увеличения действия тропических циклонов и тайфунов, достигающих внетропических широт, при значительных межгодовых вариациях.

Ключевые слова: тропические циклоны, трансформирование во внетропические циклоны, тайфуны, действие, северо-западный бассейн Тихого океана, межгодовая изменчивость, тренды

DOI: 10.31857/S0002351520060073

ВВЕДЕНИЕ

При глобальном потеплении с увеличением температуры поверхности океана в тропиках высок риск усиления активности тропических циклонов (ТЦ), с которыми связаны сильнейшие погодно-климатические аномалии и социально-экономические последствия не только в тропических широтах [1–18]. Существенно, что значительная часть ТЦ трансформируется во внетропические [5, 6, 11, 13–16, 18].

Для характеристики в энергетическом режиме земной климатической системы роли различных структурных образований в атмосфере и океане, в [19, 20] предложено использовать специальную величину – действие S . Подобная характеристика системы, имеющая размерность [энергия E] × [время t], используется в физике [21]. Широко известен принцип наименьшего действия, используемый при получении уравнений движения. В [19, 20] были представлены оценки действия S и его изменений для блокирующих атмосферных антициклонов или блокингов, с которыми связаны значительные региональные климатические аномалии – экстремальные морозы зимой и засухи летом.

Использование действия позволяет получать оценки интегральных эффектов, связанных с раз-

личными климатическими структурами, в частности вихревыми – циклоническими и антициклоническими, и их изменениями. Тенденции изменения для отдельных параметров структурных образований (включая атмосферные и океанические вихри), в том числе их повторяемости, интенсивности, времени жизни, при климатических изменениях могут различаться даже в знаке. Оценки действия позволяют характеризовать общие энергетические эффекты климатических структурных особенностей с учетом их динамики за время жизни [19, 20].

Соответствующие оценки действия получены также для других вихревых образований в атмосфере [22, 23]. В частности, в [22] были получены оценки действия S и его изменений для внетропических циклонов, с которыми связана метеорологическая изменчивость. В [23] сделаны оценки действия для ТЦ. Следует отметить также использование в [8, 9, 12] специальных индексов для оценки диссипации ТЦ.

Цель данной работы – по данным для последних десятилетий на фоне значимых климатических изменений оценить изменения действия ТЦ, включая самые мощные – тайфуны (ураганы), с выделением достигших внетропических широт.

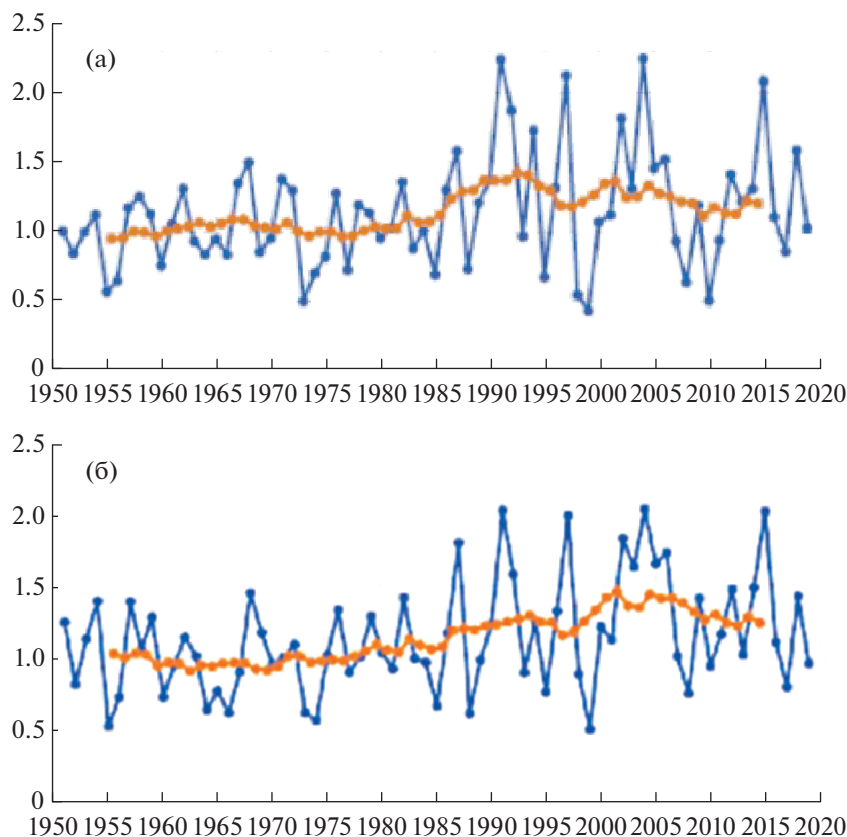


Рис. 1. Межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_{tc})$ (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_{tc})/N_{tc}$ (б) ТЦ в СЗТО в 1951–2019 гг. Величины нормированы на среднее значение для периода 1951–1980 гг. Представлены также изменения при 10-летнем скользящем осреднении.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЦ

Для отдельных структурных образований, в рассматриваемом случае – ТЦ, с интенсивностью I (характеризуемой перепадом давления ΔP между периферией вихря и его центром), размером L (площадью L^2) и временем жизни τ действие S можно оценить аналогично [20] в виде

$$S \sim \int_0^{\tau} E(t) dt \sim \int_0^{\tau} I(t)L^2(t) dt, \quad (1)$$

где интегрирование производится от 0 до τ , τ – время жизни вихря.

Интегральное действие S_{Σ} для ансамбля N вихрей (ТЦ) определяется суммой значений действия для отдельных вихрей:

$$S_{\Sigma} \sim \sum_{i=1}^N \int_0^{t_i} E_i(t) dt \sim \sum_{i=1}^N \int_0^{t_i} I_i(t)L_i^2(t) dt. \quad (2)$$

Оценить интегральное действие S_{Σ} можно с использованием средних значений (с индексом m) для интенсивности (I_m) и площади (L_m^2) вихрей:

$$S_{\Sigma} \sim NI_m L_m^2 \tau_m. \quad (3)$$

Оценки действия ТЦ можно сделать с использованием простейших, при этом достаточно общих и широко используемых, модельных представлений о структуре ТЦ. В частности, изменения действия ТЦ можно оценить с учетом пропорциональности кинетической энергии вихря $(\Delta P)^2$ [24, 25] (см. также [26–29]):

$$S_{\Sigma} \sim N \Delta P_m^2 \tau_m. \quad (4)$$

Анализ проводился, в частности, для ТЦ в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) – этот бассейн характеризуется наибольшим количеством ТЦ N_{tc} за год. Согласно наблюдениям за последние десятилетия, в СЗТО ежегодно формируется в среднем 25 ТЦ – 44% от общего числа в Северном полушарии [18]. При этом в среднем около 9 ТЦ в бассейне СЗТО трансформируются во внетропические циклоны со значимой тенден-

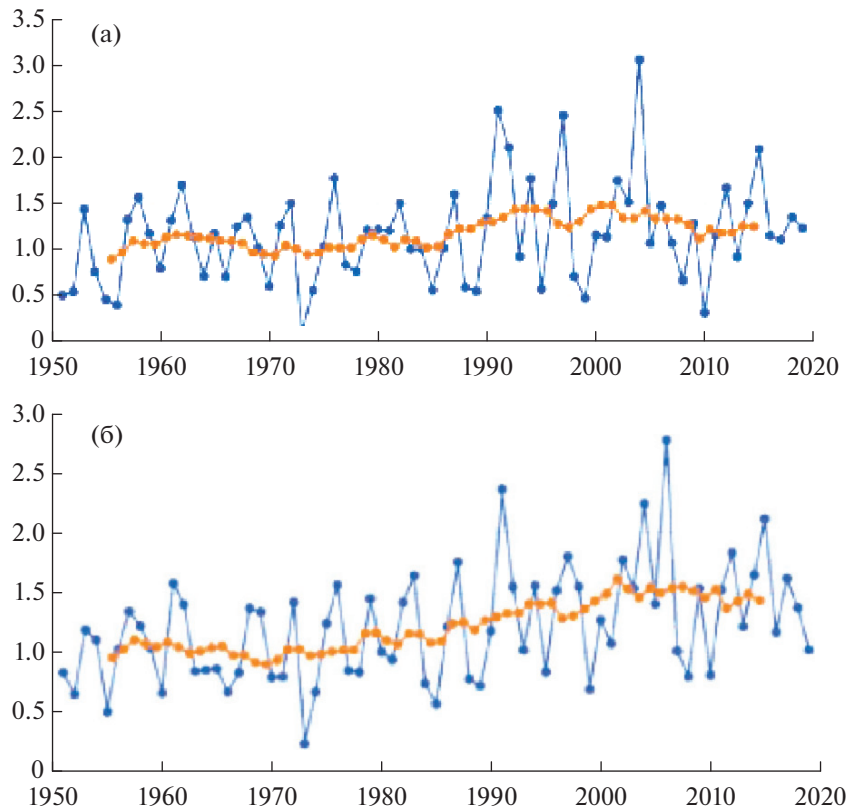


Рис. 2. Межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_{etc})$ (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_{etc})/N_{etc}$ (б) ТЦ, трансформировавшихся во внетропические в СЗТО в 1951–2019 гг. Величины нормированы на среднее значение для периода 1951–1980 гг. Представлены также изменения при 10-летнем скользящем осреднении.

цией роста — число подобных трансформаций (N_{etc}) увеличивается на 1 циклон за 14–15 лет или более чем на 4% за десятилетие для N_{etc}/N_{tc} [18]. В связи с этим актуальны оценки энергетики ТЦ, в том числе энергетики ТЦ, достигающих внетропических широт, в частности в СЗТО.

При анализе использовались данные RSMC (<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/>) для периода 1951–2019 гг. В том числе использовались данные для давления в центре ТЦ с 6-часовым шагом по времени для СЗТО. Значения ΔP для ТЦ в СЗТО определялись аналогично [4]. Анализ проводился для разных категорий ТЦ, включая самые мощные ТЦ — тайфуны. При этом использовалось общепринятое разделение ТЦ по стадиям развития: тропическая депрессия — при скорости ветра 15–17 м/с, тропический шторм — при скорости ветра 18–23 м/с, сильный тропический шторм — при скорости ветра 24–32 м/с, тайфун (или ураган) — при скорости ветра более 32 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены межгодовые изменения общего действия $S_{\Sigma}(N_{tc})$ для N_{tc} ТЦ, нормиро-

ванные на среднее значение для 1951–1980 гг., (а) и среднего действия одного ТЦ $S_{\Sigma}(N_{tc})/N_{tc}$ (б) в СЗТО в 1951–2019 гг. Согласно рис. 1, в последние три десятилетия значительно увеличилась межгодовая изменчивость как общего действия $S_{\Sigma}(N_{tc})$, так и среднего действия одного ТЦ $S_{\Sigma}(N_{tc})/N_{tc}$ в СЗТО по сравнению с предыдущими 3–4 десятилетиями с середины XX века. При этом отмечено и увеличение средних 10-летних значений — более высоких в последние десятилетия.

В последние три десятилетия несколько раз был достигнут и даже превышен уровень, вдвое превышающий средний уровень для базового периода 1951–1980 гг. Средние значения $S_{\Sigma}(N_{tc})$ и $S_{\Sigma}(N_{tc})/N_{tc}$ со второй половины 1980-х годов заметно больше, чем для базового периода, несмотря на наличие лет с очень низкими значениями S_{Σ} . Рисунки 1а, 1б свидетельствуют, что межгодовая изменчивость суммарного действия ТЦ в СЗТО существенно связана с межгодовой изменчивостью интенсивности ТЦ.

Рисунки 2а, 2б характеризуют межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_{etc})$ (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_{etc})/N_{etc}$ (б) ТЦ, трансформировавшихся во внетропические в

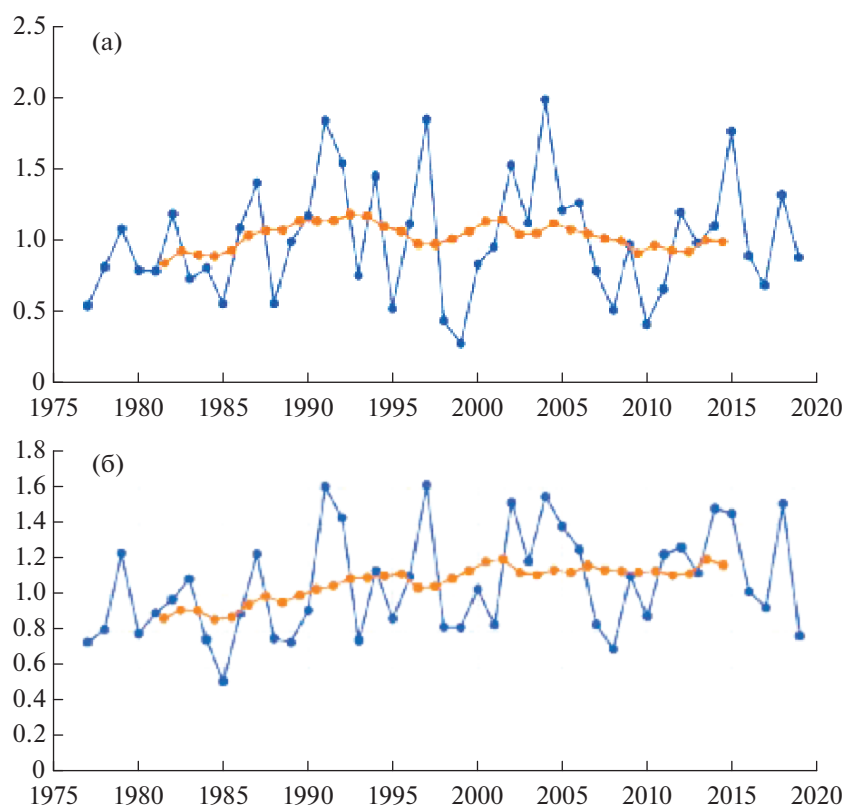


Рис. 3. Межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_t)$ для N_t тайфунов (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_t)/N_t$ тайфунов (б) в СЗТО в 1977–2019 гг. Представлены также изменения при 10-летнем скользящем осреднении.

СЗТО в 1951–2019 гг. Общее увеличение $S_{\Sigma}(N_{etc})$ и $S_{\Sigma}(N_{etc})/N_{etc}$ в течение последних десятилетий сопровождается значительными межгодовыми вариациями. При этом более четко проявляется увеличение средних значений $S_{\Sigma}(N_{etc})/N_{etc}$, которые для последних двух десятилетий в полтора раза больше, чем в 1950–1970-е годы.

На рис. 3 представлены межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_t)$ для N_t тайфунов (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_t)/N_t$ тайфунов (б) в СЗТО в 1977–2019 гг. Представлены также изменения при 10-летнем скользящем осреднении. На фоне большой межгодовой изменчивости $S_{\Sigma}(N_t)$ и $S_{\Sigma}(N_t)/N_t$ проявляется тенденция увеличения среднего действия тайфунов в СЗТО при 10-летнем скользящем осреднении.

Рисунок 4 характеризует межгодовые изменения нормированного среднего действия $S_{\Sigma}(N_{et})/N_{et}$ тайфунов, достигших внетропических широт в СЗТО в 1977–2019 гг. Проявляется общая тенденция увеличения среднего действия тайфунов, сформированных в СЗТО и достигавших внетропических широт в последние десятилетия на фоне значительной межгодовой изменчивости. Средние значения $S_{\Sigma}(N_{et})/N_{et}$ в последнее десятилетие примерно в полтора раза больше, чем в 1970–1980-е годы.

Отмеченные на фоне долгопериодных изменений межгодовые вариации генерации и активности всех ТЦ и сильнейших ТЦ – тайфунов связаны квазициклическими естественными процессами Эль-Ниньо [13, 16]. В частности, максимальные значения действия для всех ТЦ и для тайфунов в СЗТО отмечены в 1991, 1997 и 2004 г. – в годы определенных фазовых переходов для процессов Эль-Ниньо [30, 31]. Эти годы начинались в нейтральной фазе, а заканчивались в фазе Эль-Ниньо. Согласно [18] в СЗТО в годы, начинающиеся в нейтральной фазе, N_{etc} соответственно на 3 (25%) и 2 (18%) циклона больше, чем в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При этом доля тайфунов в общем числе ТЦ (N_t/N_{tc}) в годы, начинающиеся в нейтральной фазе, оценена минимальной (меньше половины), а доля тайфунов, перешедших во внетропические широты (N_{et}/N_t) в эти годы оценена максимальной – почти 2/3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные для ТЦ в СЗТО, свидетельствуют об общем росте их действия в последние десятилетия на фоне высокой межгодовой изменчивости. В том числе отмечено существенное увеличение среднего действия ТЦ и

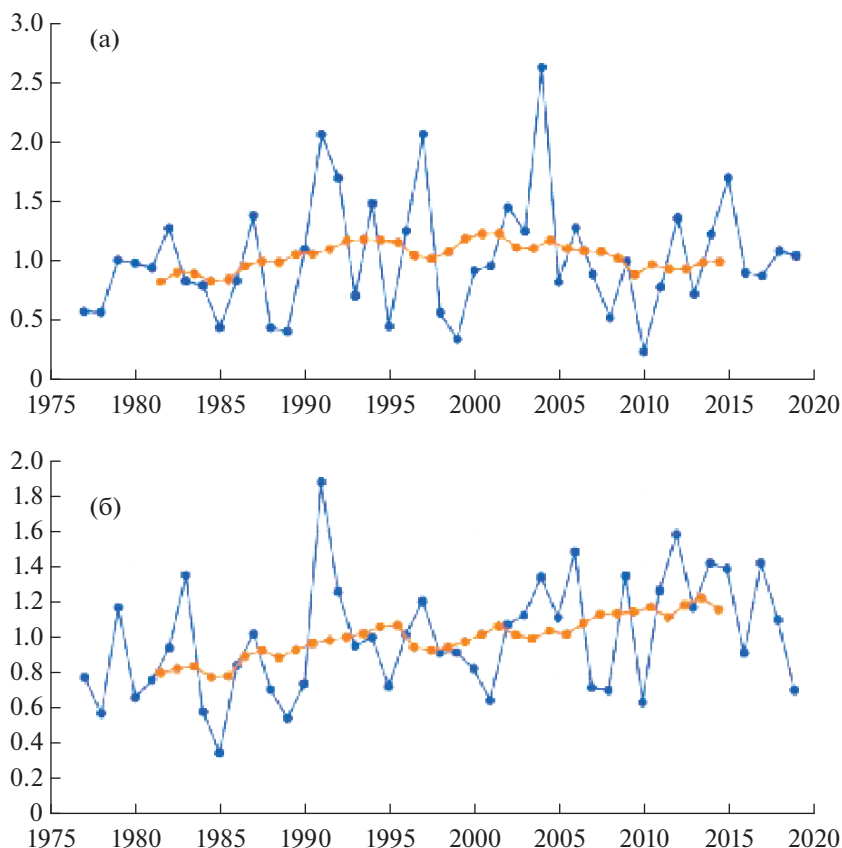


Рис. 4. Межгодовые изменения нормированного суммарного действия $S_{\Sigma}(N_{et})$ для N_{et} тайфунов (а) и среднего действия $S_{\Sigma}(N_{et})/N_{et}$ (б) тайфунов, достигших внетропических широт в СЗТО в 1977–2019 гг. Представлены также изменения при 10-летнем скользящем осреднении.

тайфунов, достигающих внетропических широт. Это повышает риск усиления их негативных последствий во внетропических широтах, включая регионы Дальнего Востока.

Отмеченные изменения для ТЦ, включая тайфуны, и для их переходов во внетропические широты связаны не только с изменением температурного режима, прежде всего температуры поверхности океана в тропиках, но и с рядом других факторов, в том числе изменением меридиональной ячейки Хэдли в атмосфере тропических широт – ее интенсивности и меридиональной протяженности [18, 32, 33]. При этом на фоне долгопериодных климатических изменений проявляются существенные вариации активности ТЦ, связанные с квазициклическими естественными процессами Эль-Ниньо, особо значимые в тихоокеанских бассейнах, в частности в СЗТО [13, 18, 34, 35]. Следует отметить, что результаты анализа данных и модельных расчетов свидетельствуют о реальной возможности учащения и усиления явлений Эль-Ниньо [36, 37] с соответствующим влиянием на межгодовую изменчивость активности ТЦ в целом и на активность самых мощных ТЦ – тайфунов.

Анализ тропических циклонов был проведен в рамках проекта РНФ (19-17-00240). Анализ тропических циклонов, в том числе тайфунов, достигших внетропических широт, проводился в рамках проекта РФФИ (17-29-05098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаин А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 272 с.
2. Интенсивные атмосферные вихри. Под ред. Л. Бенгтссона, Дж. Лайтхилла. М.: Мир, 1985. 368 с.
3. Гидрометеорологические опасности. Под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: КРУК, 2001. 296 с.
4. Голицын Г.С., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Припутнев С.Г. Тропические циклоны: статистические закономерности функций распределения в зависимости от интенсивности и времени жизни // ДАН. 1999. Т. 366. № 1. С. 116–120.
5. Klein P.M., Harr P.A., Elsberry R.L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage // Weather and Forecasting. 2000. V. 15. P. 373–395.
6. Jones S.C., Harr, P.A., Abraham J., Bosart L.F., Bowyer P.J., Evans J.L., Hanley D.E., Hanstrum B.N., Hart R.E.,

- Lalurette F., Sinclair M.R., Smith R.K., Thorncroft C.* The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions // *Weather and Forecasting*. 2003. V. 18(6). P. 1052–1092.
7. *Добрышман Е.М., Макарова М.Е.* Тайфуны как активная составляющая регионального климата // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 6. С. 49–58.
 8. *Emanuel K.* Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years // *Nature*. 2005. V. 436. P. 686–688.
 9. *Emanuel K.* Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation // *J. Climate*. 2007. V. 20. P. 5497–5509.
 10. *Голицын Г.С.* Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 5. С. 579–590.
 11. *Kitabatake N.* Climatology of extratropical transition of tropical cyclones in the Western North Pacific defined by using cyclone phase space // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 2011. V. 89. № 4. P. 309–325.
 12. *Villarini G., Vecchi G.A.* North Atlantic power dissipation index (PDI) and accumulated cyclone energy (ACE): Statistical modeling and sensitivity to sea surface temperature changes // *J. Climate*. 2012. V. 25. P. 625–637.
 13. *Мохов И.И., Добрышман Е.М., Макарова М.Е.* Трансформирование тропических циклонов во внутритропические: тенденции изменений в 1970–2012 гг. // *Докл. АН*. 2014. Т. 454. № 2. С. 216–220.
 14. *Evans C., Wood K.M., Abernethy S.D. et al.* The extratropical transition of tropical cyclones. Part I: Cyclone evolution and direct impacts // *Mon. Wea. Rev.* 2017. V. 145. P. 4317–4344.
 15. *Liu M., Vecchi G.A., Smith J.A., Murakami H.* The Present-Day Simulation and Twenty-First-Century Projection of the Climatology of Extratropical Transition in the North Atlantic // *J. Climate*. 2017. V. 30. P. 2739–2756.
 16. *Интенсивные атмосферные вихри и их динамика.* Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чехтиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
 17. *Knutson T., Camargo S.J., Chan J.C.L., Emanuel K., Ho C.-H., Kossin J., Mohapatra M., Satoh M., Sugi M., Walsh K., Wu L.* Tropical cyclones and climate change assessment // *BAMS*. 2019. V. 100. № 10. P. 1987–2007.
 18. *Мохов И.И., Макарова М.Е., Порошенко А.Г.* Тропические циклоны и их трансформирование во внутритропические: оценки полувекровых тенденций изменения // *ДАН*. 2020. Т. 493. № 1. С. 83–88.
 19. *Mokhov I.I.* Blocking activity in Northern Hemisphere: Detection of change and attribution of causes // *Proc. IV Intern. Conf. on Modelling of Global Climate Change and Variability*. Hamburg: MPI, 1999. P. 223.
 20. *Мохов И.И.* Действие как интегральная характеристика климатических структур: Оценки для атмосферных блокингов // *Докл. АН*. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
 21. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. В десяти томах. Т. 1. Механика. М. Физматлит. 2004. 224 с.
 22. *Mokhov I.I., Akperov M.G., Dufresne J.-L., Le Treut H.* Cyclonic activity and its total action over extratropical latitudes in Northern Hemisphere from model simulations // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. J. Cote (ed.). Geneva: World Climate Research Programme. 2009. Rep. 39. S. 7. P. 9–10.
 23. *Mokhov I.I., Poroshenko A.G.* Tropical cyclones in the Western North Pacific Ocean: Changes of their total action during past decades // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. *E. Astakhova* (ed.). 2020. S. 2.15–2.16.
 24. *Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю.* Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата // *Докл. АН*. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.
 25. *Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И.И.* Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 6. С. 705–712.
 26. *Willoughby H.E.* Gradient balance in tropical cyclones // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47(2). P. 265–274.
 27. *Schenkel B.A., Hart R.E.* An examination of the thermodynamic impacts of Western North Pacific tropical cyclones on their tropical tropospheric environment // *J. Climate*, 2015. V. 28. P. 7529–7560.
 28. *Chavas D.R., Lin N., Dong W., Lin Y.* Observed tropical cyclone size revisited // *J. Climate*. 2016. V. 29. P. 2923–2939.
 29. *Chavas D.R., Reed K.A., Knaff J.A.* Physical understanding of the tropical cyclone wind-pressure relationship // *Nature Comm.* 2017. V. 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01546-9>
 30. *Мохов И.И., Тимажеев А.В.* Климатические аномалии в регионах Евразии: эффекты явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья // *Докл. АН*. 2013. Т. 453. № 2. С. 211–214.
 31. *Мохов И.И., Тимажеев А.В.* Оценки риска погодноклиматических аномалий в российских регионах в связи с явлениями Эль-Ниньо // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 10. С. 22–33.
 32. *Sharmila S., Walsh K.J.E.* Recent poleward shift of tropical cyclone formation linked to Hadley cell expansion // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8. № 8. P. 730–736.
 33. *Studholme J., Gulev S.* Concurrent changes to Hadley circulation and the meridional distribution of tropical cyclones // *J. Climate*. 2018. V. 31. P. 4367–4389.
 34. *Пудов В.Д., Петриченко С.А.* Связь между эволюцией тропических циклонов северо-западной части Тихого океана и явлением Эль-Ниньо // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 4. С. 496–501.
 35. *Wang B., Chan J.C.L.* How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 1643–1658.
 36. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Хворостянов Д.В.* Эволюция характеристик климатической изменчивости, связанной с явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. 2000. Т. 36. № 6. С. 741–751.
 37. *Mokhov I.I., Khvorostyanov D.V., Eliseev A.V.* Decadal and longer term changes in El Niño – Southern Oscillation characteristics // *Intern. J. Climatol.* 2004. V. 24. P. 401–414.

Action as an Integral Characteristic of Atmospheric (Climatic) Structures: Estimates for Tropical Cyclones

I. I. Mokhov^{1, 2, *} and A. G. Poroshenko²

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics,*

Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky, 3, Moscow, 119017 Russia

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

To evaluate the integral energetic effect of tropical cyclones, a special characteristic was used – an action with the dimension [energy] × [time]. Estimates of changes in the total action of tropical cyclones in the North Western Pacific Ocean are obtained from observations for the period 1951–2019. A significant increase in the interannual variability of the tropical cyclones action in recent decades was noted against the background of an increase in average values. There are also tendencies of an increase in the action of tropical cyclones and typhoons reaching extratropical latitudes, with significant interannual variations.

Keywords: tropical cyclones, transformation into extratropical cyclones, typhoons, action, North Western Pacific Ocean, interannual variability, trends