

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.511

## ЭНЕРГЕТИКА ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ В ИХ РАЗВИТИИ

© 2024 г. М. Г. Акперов<sup>1,\*</sup>, академик РАН Г. С. Голицын<sup>1</sup>,  
академик РАН В. А. Семенов<sup>1,2</sup>

Поступило 08.07.2024 г.

После доработки 19.07.2024 г.

Принято к публикации 09.07.2024 г.

Используя статистические свойства решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) для скоростей и координат, а также с использованием метода идентификации вихрей, получены количественные оценки распределений различных характеристик циклонов и антициклонов (в т.ч. время жизни, скорость ветра, размер, характерный форсинг и кинетическая энергия) в зависимости от их интенсивности. Расчёты выполнены по данным реанализа ERA5 за период 2010–2021 гг. Время жизни вихрей, оцененное с использованием ФПК, соответствует времени жизни, полученным с использованием метода идентификации вихрей, а теоретическое распределение циклонов по интенсивности практически совпадает с наблюдаемыми. Также исследованы характеристики вихрей в течение их жизненного цикла. В целом, все анализируемые характеристики циклонов растут при их интенсификации. Но для интенсивных антициклонов увеличение не так выражено, как для циклонов.

**Ключевые слова:** циклоны и антициклоны, интенсивные вихри, форсинг, энергетика вихрей, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова

**DOI:** 10.31857/S2686739724110172

### ВВЕДЕНИЕ

Внетропические циклоны и антициклоны, представляют собой крупные вихри, размеры которых достигают нескольких тысяч километров. Они играют важную роль в общей циркуляции атмосферы и в формировании погодной изменчивости [1, 2]. Они играют ведущую роль в переносе тепла и влаги в атмосфере, таким образом, оказывая значительное влияние на погоду и климат. С наиболее интенсивными циклонами связаны сильный ветер и осадки (сильные снегопады зимой и наводнения летом) [3], а с антициклонами – аномальная жара летом и экстремальные холода зимой [4]. Таким образом, важно оценить распределения энергии и других характеристик нетропических вихрей, особенно в условиях происходящих изменений климата.

Оценки различных характеристик нетропических циклонов, включая кинетическую энергию, были сделаны ранее в следующих работах с использованием классического подхода путём интегрирования характеристик по области вихря [5, 6]. Было получено, что кинетическая энергия для нетропических циклонов колеблется в диапазоне от  $10^5$  до  $10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, это примерно соответствует энергии от  $10^{17}$  до  $10^{18}$  Дж для циклона радиусом 1000 км, что сопоставимо с энергией взрыва водородных бомб. При этом анализу антициклонов посвящено меньше работ. В нашей работе помимо прямых оценок зависимости различных характеристик вихрей, включая их энергетику, от их интенсивности с использованием метода идентификации вихрей [16, 17] на основе данных реанализа ERA5 для периода 2010–2021 гг., получены оценки с использованием принципиально другого подхода, с помощью уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова.

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии Российской Академии наук,  
Москва, Россия

\*E-mail: aseid@ifaran.ru

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФПК ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕЙ

Работа А. Н. Колмогорова 1934 года “Случайные движения” [7] вводит в научный обиход эво-

люцию распределения вероятностей 6-мерного вектора  $p(t, u_i, x_i)$  для скоростей  $u_i$  и координат  $x_i$  ансамбля частиц ( $i=1, 2, 3$ ), для которого заданы ускорения  $\dot{u}_i = \ddot{u}_i(t, x_i)$  в виде Марковского процесса, т.е. с дельта коррелированными во времени ускорениями частиц. Это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 p}{\partial u_i^2}, \quad (1)$$

которое в советской литературе было названо уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК), здесь  $u_i, x_i$  – компоненты 6-мерного вектора [7, 9]. Фундаментальное решение этого уравнения имеет вид [9, 10].

$$p(t, u_i, x_i) = \left( \frac{\sqrt{3}}{2\pi D t} \right)^3 \exp \left[ - \left( \frac{u_i^2}{D t} - \frac{3u_i x_i}{D t^2} + \frac{3x_i^2}{D t^3} \right) \right] \quad (2)$$

А. М. Обухов первым проанализировал уравнение (1) и показал, что коэффициент диффузии  $D = \varepsilon/2$  (см. [8]) пропорционален скорости генерации (диссипации) кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$ .

Решение (2) имеет три масштаба (угловые скобки означают среднее для распределения по ансамблю):

$$\langle u_i^2 \rangle = c_1 t \quad (3)$$

$$\langle u_i x_i \rangle = c_2 t^2 \equiv K \quad (4)$$

$$\langle x_i^2 \rangle = c_3 t^3 \equiv r^2, \quad (5)$$

где  $c_1, c_2$  и  $c_3$  – безразмерные численные коэффициенты, которые можно оценить путём анализа эмпирических данных [10]. Выражая время из (5) и подставляя в (3) и (4), получаем

$$\langle u_i^2 \rangle = c_1 c_3^{-1/3} (r)^{2/3} \quad (6)$$

$$K = c_2 c_3^{-2/31/3} r^{4/3}, \quad (7)$$

где  $K$  – кинематический коэффициент перемешивания. Согласно [3]  $c_1 c_2^{-1/3} \approx 1.8 \pm 0.2$  и  $c_2 c_3^{-2/3} \approx 0.2$  для турбулентности в инерционном интервале масштабов. С другой стороны, замены переменных в виде  $u_i = \tilde{u}_i(t)^{1/2}$  и  $x_i = \tilde{x}_i(t^{3/2})$ , где  $\tilde{u}$  и  $\tilde{x}$  – безразмерные переменные, превращают уравнение (1) в полностью безразмерное, убирая из него коэффициент диффузии  $D$ . Поскольку квадрат скорости по размерности совпадает с энергией на единицу удвоенной массы, то такое безразмерное уравнение пригодно для любых видов энергии, например, сжатия, что и демонстрирует его пригодность для процессов геодинамики (см. [10]).

Временные зависимости (3)–(5) проверялись численно для ограниченных ансамблей частиц [11], где было показано, что уже при общем числе частиц  $N = 10$  зависимость (3) начинает вы-

полняться удовлетворительно, а (5) достаточно хорошо, поскольку  $\langle x_i(t) \rangle = \int u_i dt$ , а интегрирование производит дополнительное усредняющее действие. Существование вторых моментов распределения вероятностей следует из структуры фундаментального решения (2), поскольку оно максимизирует распределение вероятностей, представимое фундаментальным решением (2). При величине ансамбля  $N = 100$  численные решения совпадают с теоретическими [7].

Вторые моменты (3)–(5) связывают наблюдаемые величины с форсингом их вызывающим, и со временем их развития, т.е. по наблюдениям можно оценивать форсинг и время, пока оно невелико со временем вращения объекта. Наиболее чётко пока это было проведено для торнадо и смерчей [12], где по линейным размерам вихря и по оценкам скоростей в нем был оценен форсинг в единицах тротила. Оценки также были проведены для тропических ураганов [13, 14], используя теорию подобия и размерности, а также теорию ФПК [10]. При этом следует отметить, что оба метода оказались эквивалентны.

Кинетическую энергию  $E$  вихря можно оценить произведением (3) на (5) и массой единичного столба атмосферы  $M$ . Время определяется вращением планеты, точнее силой Кориолиса, поэтому

$$E = M \langle u_i^2 \rangle r^2 \sim M \varepsilon^2 l_c^{-4}, \quad (8)$$

где  $l_c = 4\pi/T_0 \sin\theta$  – параметр Кориолиса,  $T_0$  – период вращения Земли,  $\theta$  – широта. Эта формула была выведена для расчёта кинетической энергии тропических ураганов [9].

Скорость генерации/диссипации кинетической энергии вихря  $\varepsilon$  (форсинг) можно оценить через (3) или (5). Таким образом, за время воздействия вихря на окружающую среду  $\varepsilon$  можно представить как

$$\varepsilon = \frac{1}{c_1} \frac{\bar{u}^2}{t} \quad (9)$$

Для удобства расчётов для циклонов и антициклонов примем  $1/c_1 \approx 1$ .

Путём деления (5) на (3) можно также получить время воздействия вихря на окружающую среду (или характерное время жизни вихря)  $t$

$$t = \frac{c_1}{c_3} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( s / \bar{u}^2 \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где  $s = \pi r^2$  – площадь осесимметричного вихря.

Как можно заметить, выражение (10) пропорционально выражению для периода вращения вихря вокруг своей оси

$$T = \frac{2\pi r}{\bar{u}} = 2\sqrt{\pi} \left( s / \bar{u}^2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

Таким образом, характерное время жизни вихря (10) можно охарактеризовать количеством оборотов вихря вокруг своей оси за всё время своего существования, т.е.

$$t = n * T, \quad (12)$$

где  $n$  – количество оборотов.

Постоянную  $n$  для выражения (12) можно найти путём сопоставления времени жизни циклонов и антициклонов, полученное по данным прямого анализа вихрей с использованием метода идентификации циклонов/антициклонов [13], с оценками на основе (11).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Применим данные оценки к циклонам и антициклонам внутротических широт Северного полушария ( $>20^{\circ}$  с.ш.). Для анализа вихрей будем использовать массив данных по характеристикам циклонов и антициклонов, полученные с использованием метода идентификации атмосферных вихрей [13] на основе данных реанализа ERA5 для высот изобарической поверхности 850 гПа для периода 2010–2021 гг. [15–17]. В частности, будут анализироваться такие характеристики как количество, время жизни вихря, интенсивность (глубина), определяемая разностью между минимальным/максимальным значением геопотенциала на высоте 850 гПа в циклоне/антициклоне и значением на последней замкнутой изогипсе, площадь (область занимаемая вихрем) и размер (средний радиус) вихря. Для удобства геопотенциальные метры были переведены в гектопаскали (гПа), используя уравнение гидростатического приближения. Согласно работам (например,

[18, 19]), кинетическая энергия вихря прямо пропорциональна квадрату его интенсивности (глубины). Также в настоящей работе будут использованы данные о средней скорости ветра на уровне 850 гПа, рассчитанной внутри вихря с учётом его размера.

На рис. 1 а, б представлены распределения количества циклонических и антициклонических вихрей на изобарической высоте 850 гПа в зависимости от их интенсивности (глубины). В логарифмическом масштабе эти зависимости очень близки к линейным, подтверждая сделанные ранее выводы, что их распределения близки к экспоненциальному [18]. Отметим, что большие глубины,  $dp > 50$  гПа для циклонов и  $dp > 25$  гПа для антициклонов проявляются у сотен и меньше вихрей.

Характерные времена жизни вихрей по данным прямых оценок, используя массивы данных по характеристикам циклонов/антициклонов, в сопоставлении с характерным временем жизни в сутках, вычисленные из (12) представлены на рис. 2. Для каждого диапазона глубин вихрей были эмпирически рассчитаны коэффициенты  $n$  из (12). При этом коэффициенты  $n$  варьируются в достаточно широких пределах (от 0.2 до 0.9), достигая максимума ( $n=0.9$ ) при глубине циклона от 10 до 15 гПа. Для антициклонов коэффициенты  $n$  почти в два раза меньше в сравнении с циклонами и достигают максимума ( $n = 0.5$ ) при глубине от 10 до 15 гПа.

Согласно характеристикам циклонов по данным алгоритма идентификации вихрей, медианные значения времени возрастают с увеличением интенсивности циклонов в диапазоне от 1 до 6 суток, в то время как крайние значения изменя-

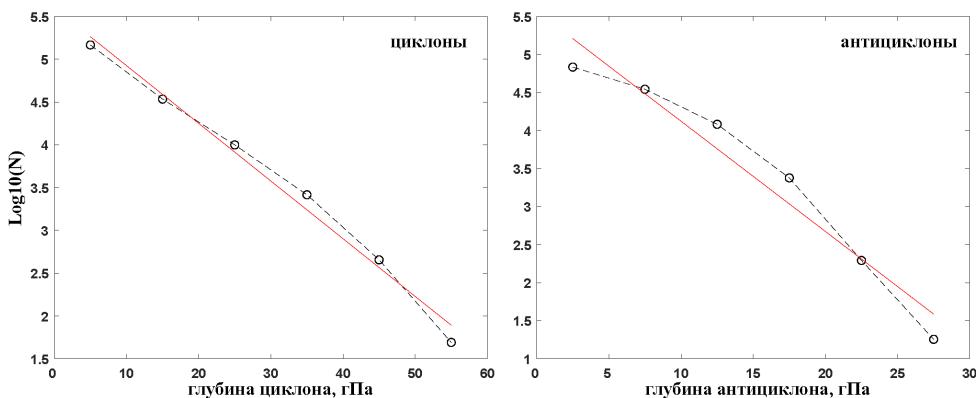


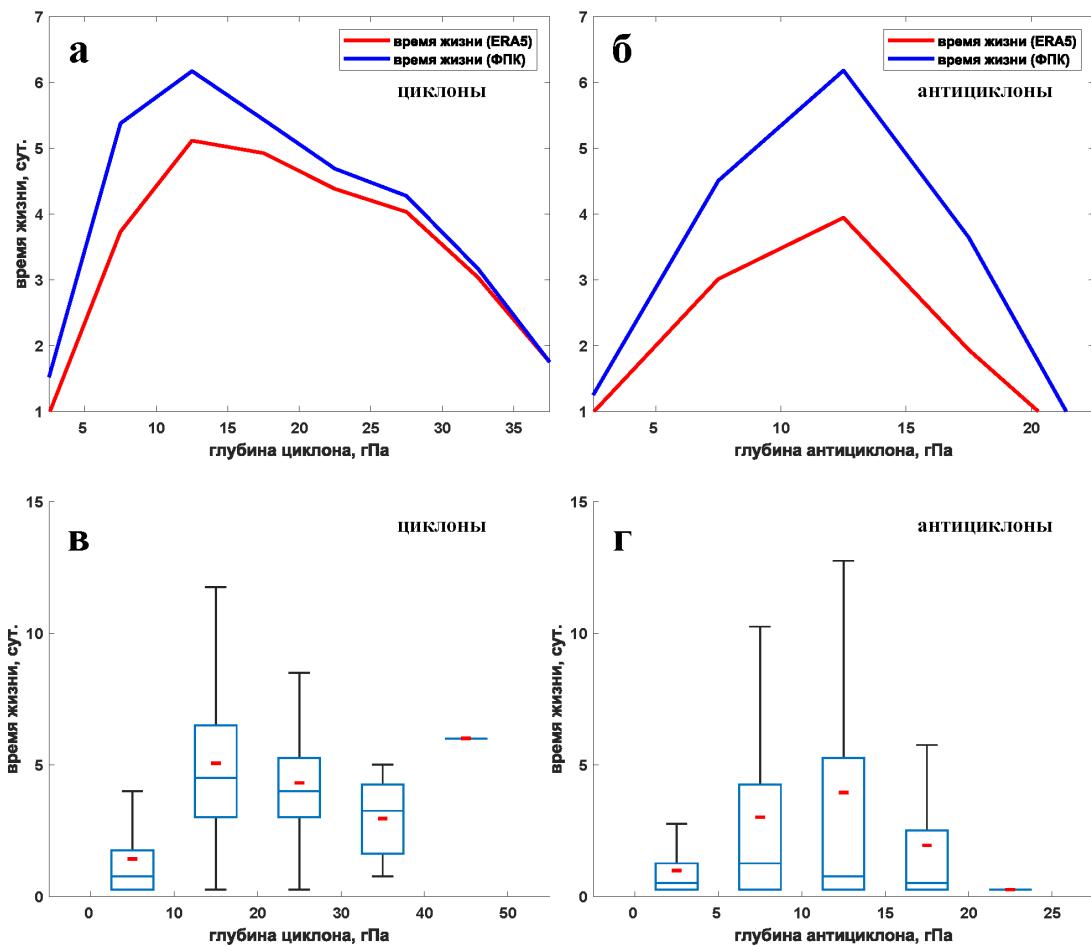
Рис. 1. Распределение количества (в логарифмическом масштабе) вихрей на изобарической высоте 850 гПа в зависимости от их интенсивности по результатам метода идентификации вихрей с использованием данных реанализа ERA5 за 2010–2021 гг.. Красной линией представлена аппроксимация кривой.

няются в диапазоне от нескольких часов до 12 суток (рис. 2 в). Возможно, такое продолжительное время жизни циклонов обусловлено их регенерацией. Для антициклонов медианное время жизни также возрастает в диапазоне от 4 до 7 суток, для 75% вихрей – от 5 до 8 суток, при этом максимальные значения времени жизни достигают 12 суток (рис. 2 г).

Также представляет особый интерес оценка форсинга (скорости генерации/диссипации кинетической энергии) для циклонов и антициклонов, рассчитанные по (9), где время выражено через (10). Значения форсинга получаются в единицах  $\text{см}^2/\text{с}^3$  на единицу массы воздуха и показаны на рис. 3 а, б. Для циклонов медианные значения форсинга в зависимости от их интенсивности растут от  $2.5 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до примерно

$12 \text{ см}^2/\text{с}^3$  с разбросом от  $6 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до  $16 \text{ см}^2/\text{с}^3$ , для антициклонов соответствующие цифры меняются в диапазоне от  $1 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до  $3 \text{ см}^2/\text{с}^3$  и по максимальным значениям от  $1.2 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до  $3.2 \text{ см}^2/\text{с}^3$ .

Используя выражение (8) и (9) можно рассчитать среднюю за время жизни вихрей кинетическую энергию (рис. 3 в, г). Так как более 80% вихрей, которые идентифицируются у поверхности Земли, видны также на высоте 850 гПа [20], то можно рассчитать для них кинетическую энергию. Выразив силу Кориолиса  $I_c$  через время  $t(10)$ , т.к.  $I_c \sim t^{-1}$ , а также приняв массу единичного столба атмосферы  $M \approx 8.5 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^2$ , получим оценки кинетической энергии вихрей для различной глубины. Таким образом, рассчитанные медианные значения кинетической энергии циклонов и антициклонов варьируются в пределах



**Рис. 2.** Распределение времени жизни (в сутках) циклонов (а, в) и антициклонов (б, г) в зависимости от их средней за время жизни интенсивности (в гПа) по теоретической оценке на основе ФПК в сопоставлении с данными метода идентификации вихрей (а, б). В качестве исходных данных использовались данные реанализа ERA5 для периода 2010–2021 гг. Диаграмма (в, г) показывает медиану (красная линия), нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки для времени жизни по данным метода идентификации вихрей.

от  $10^{18}$  до  $10^{19}$  Дж, что в целом превышает значения в сравнении с работами [5, 6].

Далее обсуждаются результаты анализа характеристик циклонов и антициклонов, полученных по результатам метода идентификации вихрей [13, 15]. Распределения размеров (радиусов) всех вихрей по их интенсивности представлены на рис. 3 д, е. Для циклонов медианный радиус меняется от 500 до 2000 км, а для антициклонов от 1000 до 2500 км, т.е. антициклоны в среднем больше по размерам, чем циклоны. В целом, при увеличении интенсивности (глубины) циклонов линейно, до глубины примерно 40 гПа, растёт также их размер. При этом для антициклонов наблюдается рост размера до интенсивности 20 гПа, после чего начинается его уменьшение. Такое поведение является достаточно интересным и требует дополнительного анализа для объяснения причин нелинейной зависимости.

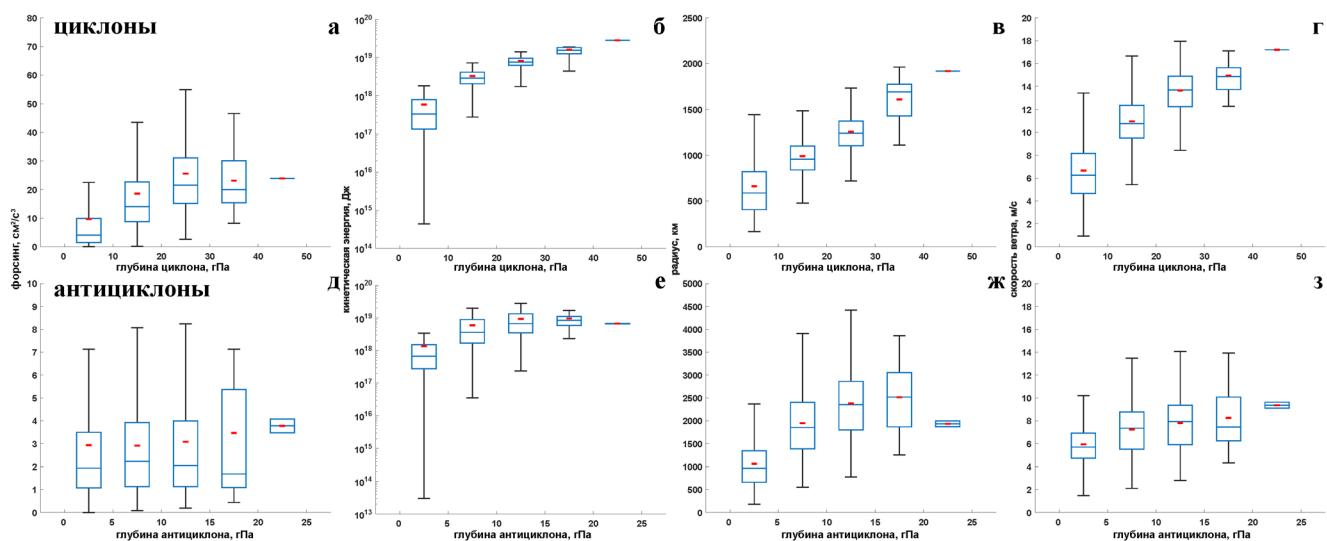
На рис. 3 ж, з показаны скорости ветра, осреднённые по площади, занимаемые вихрем. Для циклонов они меняются от 7.5 м/с до 17.5 м/с в зависимости от их интенсивности. Рост скоростей ветра начинает замедляться при больших интенсивностях циклонов. В антициклоне скорость ветра меняется от 6 м/с до 12 м/с. При этом начиная с интенсивности вихря от 20 гПа скорость ветра перестает расти.

Также представлены графики изменения всех вышеуказанных характеристик циклонов и антициклонов в течение их жизненного цикла, кото-

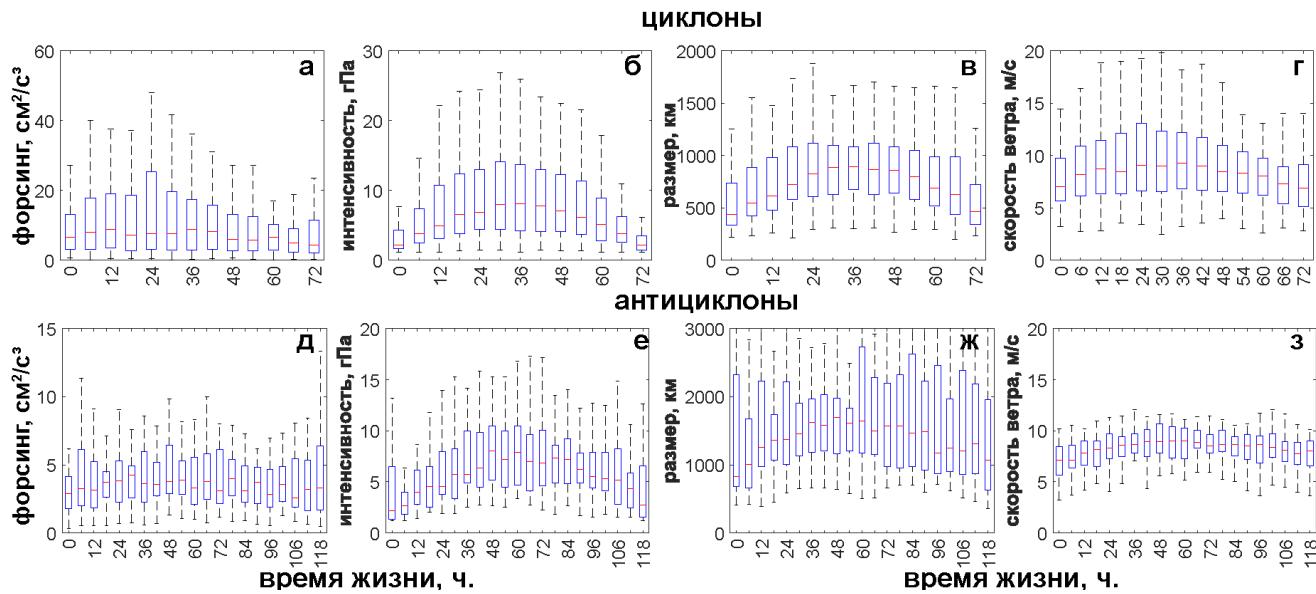
рые были рассчитаны за каждые 6 часов (рис. 4). При этом форсинг рассчитывался по формуле (9), в которой время жизни вихря определяется через его площадь и скорость. В качестве примера для анализируемой выборки были взяты циклоны со временем жизни 3 дня (рис. 4 а–г) и антициклоны длительностью 5 дней (рис. 4 д–з). У циклонов максимум развития достигается в среднем через 30–36 часов после их формирования (циклогенеза). Наиболее выраженный жизненный цикл наблюдается для интенсивности циклонов и скорости ветра. Что в целом ожидаемо, так как с наиболее интенсивными циклонами ассоциируются сильные ветра. Характерный форсинг и размер меняются слабее. У антициклонов эта картина менее симметрична, и максимальные значения приходятся на вторые-третьи сутки после их возникновения. Это особенно хорошо наблюдается для интенсивности антициклонов. При этом размер антициклонов во время жизненного цикла варьируется в достаточно широких пределах в со-поставлении с размерами циклонов.

## ВЫВОДЫ

Что же нового мы видим в этом анализе? Подтверждаются уже установленные факты. Это экспоненциальное распределение вихрей в зависимости от их интенсивности [10, 13, 18]. Детальная статистика вихрей позволяет оценить характерные времена развития (жизни) вихрей в зависимости от их интенсивности. Значение времени жизни вихрей  $t$ , рассчитанное на осно-



**Рис. 3.** Зависимость форсинга ( $\text{см}^2/\text{с}^3$ ) (а, д), кинетической энергии (Дж) (б, е), радиуса (км) (в, ж) и скорости ветра (м/с) (г, з) циклонов (а–г) и антициклонов (д–з) в зависимости от их средней за время жизни интенсивности (гПа) по данным ФПК. Диаграмма показывает медиану (красная линия), нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки.



**Рис. 4.** Характеристики жизненного цикла внутропических циклонов (а–г) и антициклонов (д–з) в виде диаграммы размаха по данным реанализа ERA5 для периода 2010–2021 гг. Диаграмма показывает медиану (красная линия), нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки.

ве ФПК, пропорционально периоду вращения вихря, умноженную на константу. Эти константы были рассчитаны для каждого диапазона глубин вихрей, с помощью сопоставления времени жизни, оцененным по ФПК со временем жизни, полученным на основе метода идентификации вихрей. Константа, характеризующая количество оборотов вихря вокруг своей оси, варьируется в достаточно широких пределах и достигающий максимума ( $n = 0.9$ ) при глубине циклонов от 10 до 15 гПа. Для антициклонов константа почти в два раза меньше в сравнении с циклонами и достигает максимума ( $n = 0.5$ ) при глубине от 10 до 15 гПа.

Используя оценки ФПК, также рассчитан диапазон форсинга и кинетической энергии вихрей в зависимости от их глубины. Рассчитанные величины форсинга для вихрей в зависимости от их интенсивности, варьируются от  $2.5 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до примерно  $12 \text{ см}^2/\text{с}^3$  для циклонов и от  $1 \text{ см}^2/\text{с}^3$  до  $3 \text{ см}^2/\text{с}^3$  для антициклонов. При этом медианные значения кинетической энергии вихрей варьируются в пределах  $10^{18}$ – $10^{19}$  Дж. С ростом глубины циклонов растет форсинг, кинетическая энергия, а также размеры и скорость ветра в циклонах. В антициклонах, с определённой глубины рост сменяется падением соответствующих величин. Количественное значение этих соотношений полезно проследить по мере изменения климатических условий.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ характеристик вихрей с помощью метода идентификации выполнен при поддержке проекта РНФ № 24-17-00138. Расчёт характеристик циклонов и антициклонов выполнен при поддержке проекта РНФ № 24-17-00211.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jaiser R., Akperov M., Timazhev A., Romanowsky E., Handorf D., Mokhov I. Linkages between Arctic and Mid-Latitude Weather and Climate: Unraveling the Impact of Changing Sea Ice and Sea Surface Temperatures during Winter // Meteorol. Z. 2023. 32. 173–194.  
<https://doi.org/10.1127/metz/2023/1154>, 2023
2. Бабанов Б.А., Семенов В.А., Акперов М.Г., Мохов И.И., Keenlyside N.S. Повторяемость зимних режимов атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом регионе и связанные с ними экстремальные погодно-климатические аномалии в Северном полушарии // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 04. С. 304–312.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20230407>.
3. Акперов М.Г., Мохов И.И. Изменения циклонической активности и осадков в атмосфере внутропических широт Северного полушария в последние десятилетия по данным реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 05. С. 377–380.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20230507>.
4. Акперов М.Г., Мохов И.И. Изменчивость режимов атмосферных антициклонов и их связь с темпера-

- турными вариациями во внутропических широтах северного полушария в последние десятилетия // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 01.  
<https://doi.org/10.31857/s0002351524010023>
5. *Smith P.J.* The energetics of extratropical cyclones // Rev. Geophys. 1980. 18(2). 378–386.  
<https://doi.org/10.1029/RG018i002p00378>.
  6. *Dzambo A., McFarquhar G., Sledd A., L'Ecuyer T.* Assessing latent and kinetic energy trend changes in extratropical cyclones from 1940 to 2020: Results from ERA-5 reanalysis // Geophysical Research Letters. 2023. 50. e2023GL105207.  
<https://doi.org/10.1029/2023GL105207>
  7. *Kolmogorov A.N.* Zufallige Bewegungen // Annals of Mathematics. 1934. 35. 116–117.
  8. *Obukhov A.M.* Description of turbulence in terms of Lagrangian variables // Adv. Geophys. 1959. 6. 113–116.
  9. Голицын Г.С. Работа А.Н. Колмогорова 1934 г. — основа для объяснения статистики природных явлений макромира // УФН. 2024. Т. 194. С. 86–96
  10. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч.2. М: Наука, 1967. 720 с.
  11. *Гледзер Е.Б., Голицын Г.С.* Скейлинг и конечные ансамбли частиц в движении с притоком энергии // ДАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 466–470.
  12. *Голицын Г.С., Чернокульский А.В., Вазаева Н.В.* Энергетика торнадо и смерчей // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023.
  13. *Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. и др.* Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа и модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
  14. *Голицын Г.С.* Вероятностные структуры макромира: землетрясения, ураганы, наводнения. М: Физматлит. 2022. 184 с.
  15. *Бардин М.Ю., Полонский А.Б.* Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 3–13
  16. *Akperov M., et al.* Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182. P. 103005
  17. *Mirseid Akperov, Vladimir Semenov, Igor Mokhov, Wolfgang Dorn and Annette Rinke.* Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: Insights from coupled regional climate model simulations // Environmental Research Letters. 2020.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6399>
  18. *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 // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.
  19. *Simmonds I., Keay K.* Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008 // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36, L19715.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL039810>
  20. *Pepler, A.S., Dowdy A.J.* Australia's Future Extratropical Cyclones // J. Climate. 2022. 35. 7795–7810.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0312.1>

## ENERGY OF CYCLONES AND ANTICYCLONES IN THEIR DEVELOPMENT

**M. G. Akperov<sup>a, #</sup>, academician of the RAS G. S. Golitsyn<sup>a</sup>,**  
**academician of the RAS V. A. Semenov<sup>a,b</sup>**

*<sup>a</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*#E-mail: aseid@ifaran.ru*

Using statistical properties of the solution of the Fokker-Planck-Kolmogorov equation (FPC) for velocities and coordinates, and using the vortex identification method, quantitative estimates of the distributions of various characteristics of cyclones and anticyclones (including lifetime, wind speed, size, characteristic forcing, and kinetic energy) as a function of their intensity have been obtained. The calculations are based on ERA5 reanalysis data for the period 2010–2021. The vortex lifetimes estimated using the FPC correspond to the lifetimes obtained using the vortex identification method, and the theoretical distribution of cyclones by intensity practically coincides with the observed ones. The characteristics of vortices during their life cycle are also investigated. In general, all analysed characteristics of cyclones increase with their intensification. But for intense anticyclones the increase is not as pronounced as for cyclones.

*Keywords:* cyclones and anticyclones, intense vortices, forcing, vortex energy, Fokker-Planck-Kolmogorov equation