

УДК 551.51

СТАТИСТИЧЕСКИЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ СМЕРЧЕЙ/ТОРНАДО

© 2023 г. И. И. Мохов^{a, b, *}

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

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 27.08.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

На основе данных наблюдений сделаны статистические оценки связи разных характеристик атмосферных смерчей (торнадо). В том числе получены статистически значимые оценки степенной зависимости длины пути торнадо/смерчей от их размеров. Отмечены особенности для разных диапазонов длин пути и размеров интенсивных атмосферных вихрей. Предложена простая модель для объяснения отмеченной степенной, в том числе корневой, зависимости длины пути торнадо/смерчей от их размеров.

Ключевые слова: связь характеристик атмосферных смерчей/торнадо, данные наблюдений, модельные оценки

DOI: 10.31857/S0002351523010091, **EDN:** EHDZSI

ВВЕДЕНИЕ

Сильнейшие атмосферные вихри – смерчи (торнадо) – в числе наиболее опасных атмосферных явлений [1–5]. Исследованию их разнообразных структурных и динамических проявлений посвящено много работ [1–22]. Торнадо/смерчи, формирование которых связано с кучево-дождевыми облаками, проявляются в виде хоботообразного быстро вращающегося столба воздуха – от облака до поверхности. Обычно подобные интенсивные атмосферные вихри циклонического типа, редко – антициклонического. При этом суточным вращением Земли вокруг своей оси, на несколько порядков более медленном, чем вращение воздуха в торнадо-смерчах, не могут быть объяснены более частые и мощные циклонические торнадо по сравнению с антициклоническими [5]. Подъем вращающегося воздуха осуществляется в условиях мощных конвективных ячеек с ядром низкого давления. Ключевой вклад в энергетику торнадо/смерчей связан с высвобождением скрытого тепла при конденсации водяного пара, необходимого для преодоления затрат на трение.

Согласно классификации Фуджита [7], скорость ветра даже в наиболее слабых торнадо/смерчах категорий F_0 (18–32 м/сек) и F_1 (33–49 м/сек) близка к ураганной скорости и превышает ее. Шкала Фуджита (шкала F) разработана с целью совмещения с 12-бальной шкалой Бофор-

та, использующейся Всемирной метеорологической организацией для оценки скорости ветра. Скорость ветра V_F [м/с] по шкале Фуджита F определяется по формуле $V_F = 6.30(F + 2)^{3/2}$. В сильных смерчах/торнадо категорий F_2 и F_3 скорость ветра находится в диапазонах 50–69 и 70–92 м/сек, а в разрушительных вихрях категорий F_4 и F_5 – в диапазонах 93–116 и 117–142 м/сек, соответственно. Следует отметить, что наряду с индексами традиционной шкалы Фуджита F используются индексы EF расширенной шкалы Фуджита (Enhanced Fujita Scale). Максимальные зарегистрированные значения скорости в торнадо – около $2/5$ скорости звука в атмосфере – близки к 500 км/час. Время жизни торнадо/смерчей – от 1–2 мин до десятков минут, размеры – от нескольких метров до километра и более, длина пути – от километра до более сотни километров. Существенно более редкие антициклонические торнадо могут быть спутниками более мощных торнадо, связанных с мезоциклоном. Антициклонические торнадо формируются и как основные торнадо в связи с мезовихрем. Торнадо-антициклоны могут быть связаны как с циклоническими, так и с антициклоническими суперячейками.

Наиболее часто торнадо проявляется в Северной Америке (до 1000 и более событий в год) – в регионах с высокой вероятностью встречи тепло-го и влажного воздуха с юга (с Мексиканского за-

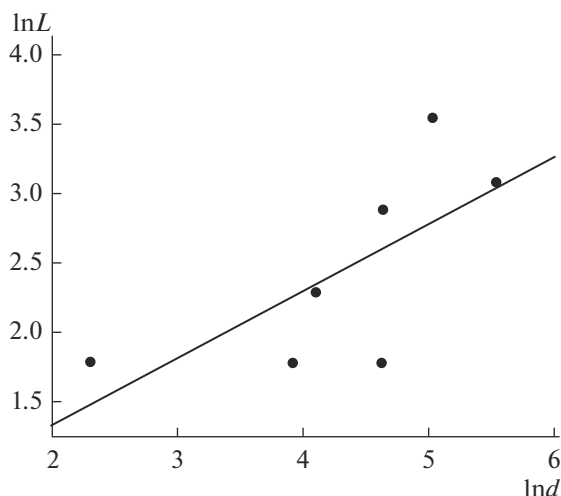


Рис. 1. Длина пути смерчей L [км] (≥ 5 км) в зависимости от их размера d [м] в логарифмических масштабах по данным [9]. Прямая линия соответствует линейной регрессии $\ln L$ на $\ln d$.

лива) и относительно холодного и сухого воздуха с севера (в так называемой “аллее торнадо”). В евроазиатских регионах частота подобных явлений существенно меньше, особенно наиболее разрушительных вихрей. Это связано с топографическими и климатическими особенностями [5]. Следует отметить, что количество смерчей может недооцениваться, особенно короткоживущих и маломасштабных, в частности в регионах с недостаточно плотной наблюдательной сетью. В [22], например, представлены новые более подробные данные об атмосферных смерчах в регионах Северной Евразии с начала XX века с использованием, в том числе, спутниковых данных о ветровалях. Показано, что в российских регионах может ежегодно формироваться до 100–150 смерчей – существенно больше, чем ранее оценивалось.

Существенно, что при глобальном потеплении с трансформацией вертикальной температурной стратификации атмосферы уменьшается статическая устойчивость и увеличивается конвективная неустойчивость тропосферы [23], способствуя усилению конвективных процессов в атмосфере, в том числе с увеличением роли конвективной облачности и усилением регионального смерчегенеза. Оценки, полученные в [19] с использованием данных реанализа для последних десятилетий и модельных расчетов с климатическими моделями с учетом антропогенных воздействий для XXI века, свидетельствуют об росте повторяемости способствующих формированию смерчей атмосферных и климатических режимов в регионах Северной Евразии (см. также [5]).

Для более адекватных оценок рисков и диагностических и прогностических оценок необхо-

дим не только разносторонний анализ различных статистических характеристик смерчей/торнадо и их изменений, но и анализ взаимосвязи различных характеристик. Результаты анализа функциональных связей разных характеристик смерчей/торнадо по данным наблюдений могут быть полезны и для тестирования моделей.

В данной работе представлены оценки связи различных характеристик смерчей (торнадо), в частности длины их пути и размера, по данным наблюдений, в сопоставлении с качественными оценками на основе предложенной простейшей модели, характеризующей энергетику подобных вихрей.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

При анализе использовались данные для смерчей с информацией о разных характеристиках вихрей, в том числе об их интенсивности, ширине (максимальном размере) и длине пути. В частности, в [9] представлены данные для 248 смерчей в разных регионах Северной Евразии. При этом одновременно данные о размере смерчей и длине их пути без диапазона их вариаций представлены только для 9 смерчей категорий F0, F1 и F2 по классификации Фуджиты [7]. Из них только для 7 смерчей длина пути была не менее 5 км.

Использовались также данные [10] для 107 торнадо в европейских регионах (50 вихрей категории F2, 44 – категории F3, 11 – категории F4, 2 – категории F5).

Наряду с данными [9, 10] для отдельных торнадо/смерчей использовались осредненные данные [8, 15] для длины пути и размера (ширины) вихрей в зависимости от категории в рамках шкалы Фуджиты.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рис. 1 характеризует зависимость длины пути смерчей $L \geq 5$ км в зависимости от их размера d (в диапазоне от 10 до 250 м) по данным [9] для смерчей в Северной Евразии. Прямая на рис. 1 соответствует линейной регрессии

$$\ln L = 0.37 + 0.49(\pm 0.23)\ln d, \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.69$. В скобках отмечено среднеквадратическое отклонение коэффициента линейной регрессии, характеризующего параметр связи L и d : $k_d \equiv d \ln L / d \ln d = 0.49(\pm 0.23)$. Отмеченная связь статистически значима на уровне 90%.

Результат линейной регрессии (1) соответствует степенной зависимости

$$L \sim d^{k_d}, \quad (2)$$

близкую к корневой зависимости

$$L \sim d^{1/2}, \quad (2a)$$

при $k_d \approx 0.5$.

Без ограничения $L \geq 5$ км по данным [9] соответствующая линейная регрессия имеет вид

$$\ln L = 0.75 + 0.65(\pm 0.35) \ln d, \quad (3)$$

(с коэффициентом корреляции $r = 0.58$). Отмеченная связь статистически значима на уровне 90%. Результат линейной регрессии (3) соответствует степенной зависимости (2), близкой к

$$L \sim d^{2/3}. \quad (2б)$$

Аналогичный анализ проведен по данным [10] для торнадо/смерчей в европейских регионах. Согласно результатам анализа этих данных для 78 торнадо, для которых доступны значения L и d , оценена зависимость (2) с $k_d = 0.57$ [12]. Средняя длина пути этих атмосферных вихрей была равна 8.5 км, а средний размер (ширина пути) – 300 м.

В [10] только для 36 вихрей с длиной пути не менее 5 км представлены данные и о ширине и длине пути. На рис. 2 представлена зависимость длины пути смерчей $L \geq 5$ км в зависимости от их размера $d < 3000$ м по данным [10] для 35 вихрей.

Прямая на рис. 2 для достаточно широкого диапазона размеров торнадо/смерчей (с шириной от 30 м до 3 км) и длиной пути от 5 км до более 50 км соответствует линейной регрессии

$$\ln L = 0.60 + 0.34(\pm 0.09) \ln d, \quad (4)$$

(с коэффициентом корреляции $r = 0.53$). Отмеченная связь статистически значима на уровне 99%. Результат линейной регрессии (4) соответствует степенной зависимости (2), близкой к

$$L \sim d^{1/3}. \quad (2в)$$

Согласно рис. 2 проявляются особенности связи L и d для их разных диапазонов. Рисунок 3 характеризует связь длины пути L , не превышающей 20 км, для торнадо/смерчей сравнительно небольших размеров – не более 150 м. Прямая на рис. 3 соответствует линейной регрессии

$$\ln L = 0.03 + 0.46(\pm 0.18) \ln d, \quad (5)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.67$. Отмеченная связь статистически значима на уровне 95%.

Результат линейной регрессии (5) соответствует степенной зависимости L от d , близкой к корневой зависимости (2а). Близкая к корневой получена также зависимость L от d и для более крупных торнадо/смерчей. В частности, для 23 торнадо/смерчей

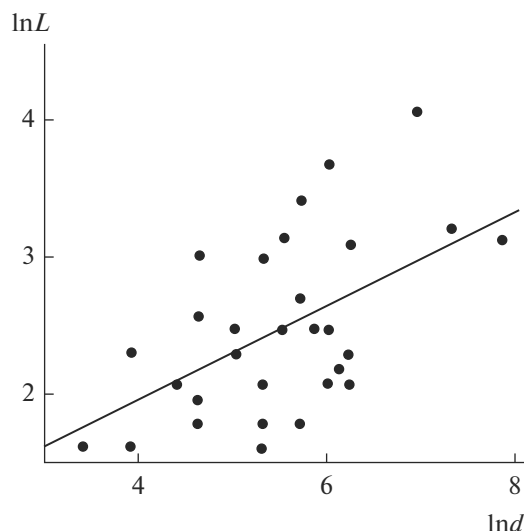


Рис. 2. Длина пути смерчей L [км] (≥ 5 км) в зависимости от их размера d [м] ($d < 3000$ м) в логарифмических масштабах по данным [10]. Прямая линия соответствует линейной регрессии $\ln L$ на $\ln d$.

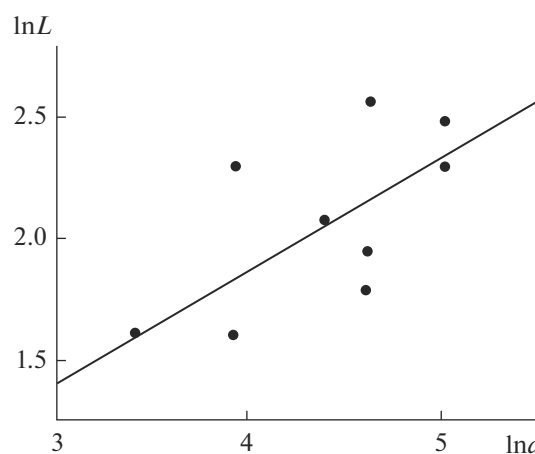


Рис. 3. Длина пути смерчей L [км] ($5 \text{ км} \leq L \leq 20 \text{ км}$) в зависимости от их размера d [м] ($d \leq 150$ м) в логарифмических масштабах по данным [10]. Прямая линия соответствует линейной регрессии $\ln L$ на $\ln d$.

с длиной пути L не менее 5 км в зависимости от их размера d в диапазоне от 150 до 1000 м соответствующая линейная регрессия имеет вид

$$\ln L = 0.40 + 0.51(\pm 0.27) \ln d, \quad (6)$$

(при коэффициенте корреляции $r = 0.38$). Отмеченная связь статистически значима на уровне 90%.

Для торнадо/смерчей с большей длиной пути проявляются существенные отличия от корневой зависимости L от d . На рис. 4 представлена зависимость длины пути смерчей $L \geq 12$ км в зависимости от их размера d в диапазоне от 150 м до 1000 м. Прямая на рис. 4 соответствует линейной регрессии

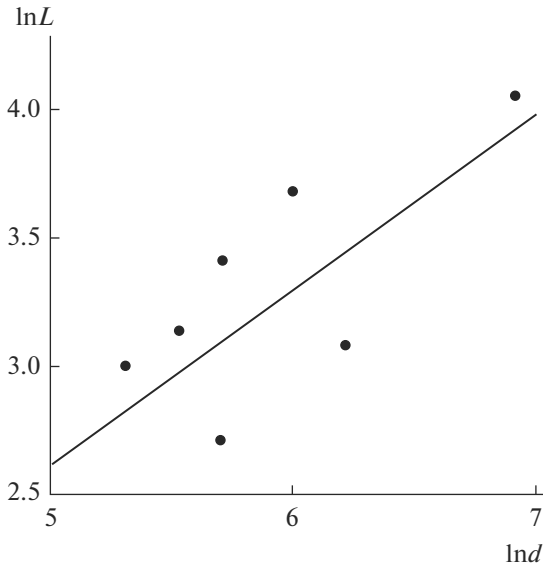


Рис. 4. Длина пути смерчей L [км] (≥ 12 км) в зависимости от их размера d [м] в диапазоне от 150 м до 1000 м в логарифмических масштабах по данным [10]. Прямая линия соответствует линейной регрессии $\ln L$ на $\ln d$.

$$\ln L = -0.79 + 0.68(\pm 0.27) \ln d, \quad (7)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.72$. Отмеченная связь статистически значима на уровне 95%. Результат линейной регрессии (7) соответствует степенной зависимости, близкой к (26).

Наряду с данными [9] и [10] для отдельных торнадо/смерчей использовались осредненные данные [8] и [15] для длины пути L_F и размера (ширины) d_F вихрей в зависимости от категории в рамках шкалы Фуджиты. При этом по данным [8] получено, что связь L_F и d_F характеризуется степенной зависимостью

$$L_F \sim d_F^{k_F}, \quad (8)$$

с $k_F = 4/3$ (точнее 1.34), а по данным [15] — с $k_F = 6/5$ (1.20). Выявленные различия свидетельствуют о необходимости правильной интерпретации полученных результатов при использовании разных осреднений и модельных классификаций, в том числе для редких событий, нестационарных процессов и процессов с высоким уровнем шума.

Отмеченные по данным наблюдений особенности связи характеристик смерчей, в частности связи длины пути и размера смерчей, можно оценить на основе предлагаемой простой модели (см. также [24–26]), основанной на уравнении для изменения кинетической энергии смерча E

$$dE/dt = \varepsilon_+ - \varepsilon_-. \quad (9)$$

Здесь $E \sim V^2/2$, V — горизонтальная скорость в смерче, ε_+ и ε_- — скорости генерации и диссипа-

ции кинетической энергии смерча. В рассматриваемой модели $\varepsilon_+ \sim -L_H W \partial q_m / \partial z$, L_H — удельная теплота конденсации, q_m — удельная влажность насыщенного воздуха, z — высота, W — вертикальная скорость. При V и W в смерче одного порядка

$$\varepsilon_+ \sim C_H V, \quad (10)$$

C_H — коэффициент теплообмена, связанного с освобождением тепла при конденсации водяного пара. При

$$C_H \sim V^m, \quad (11)$$

(10) имеет вид

$$\varepsilon_+ \sim C_H V^{m+1}. \quad (12)$$

При учете диссипации за счет трения в виде степенной функции скорости V

$$\varepsilon_- \sim C_D V^n, \quad (13)$$

где C_D — коэффициент сопротивления, характеризующий трение, и при $\varepsilon_+ = \varepsilon_-$ и (12) уравнение (9) имеет стационарное решение, соответствующее балансу притока и диссипации энергии вихря,

$$V_s(m, n) = (C_H/C_D)^{1/(n-m-1)}. \quad (14)$$

Согласно (14) при $m = 0$ и $n = 3$ (при силе трения пропорциональной квадрату скорости)

$$V_s(m = 0, n = 3) = (C_H/C_D)^{1/2}, \quad (14a)$$

при $m = 0$ и $n = 2$

$$V_s(m = 0, n = 2) = C_H/C_D, \quad (14b)$$

В частности, при $m = 0$ и $n = 2$ решение (9) имеет вид

$$V(t) = V_s(1 - e^{-t/\tau_s}), \quad (15)$$

с $V_s(m = 0, n = 2) = C_H/C_D$ и характерным временем релаксации $\tau_s(m = 0, n = 2) = 1/C_D$.

В области стационарного режима с $V_s \approx (C_H/C_D)^{1/2}$ при $m = 0$ и $n = 3$ уравнение (9) принимает вид

$$dV/dt \approx -(V - V_s)/\tau_s, \quad (16)$$

где $V_s(m = 0, n = 3) = (C_H/C_D)^{1/2}$, а $\tau_s(m = 0, n = 3) = (C_H C_D)^{-1/2}/2$ — характерное время.

В режиме доминирования диссипативного процесса, связанного с трением, уравнение (9) при $m = 0$ и $n = 3$ имеет вид

$$dV^{-1}/dt = C_D. \quad (17)$$

Можно оценить характерное (минимальное) время τ_r для процесса диссипации, описываемого уравнением (17), согласно

$$\tau_r = (C_H C_D)^{-1/2} \equiv 2\tau_s(m = 0, n = 3). \quad (18)$$

При слабом влиянии трения (9) с учетом (12) сводится к

$$dV/dt = (C_H)V^m, \quad (19)$$

и связь характерного времени τ_c для вихря с характерной скоростью в нем V_c имеет вид

$$\tau_c \sim V_c^{1-m}, \quad \text{если } m \neq 1, \quad (20a)$$

$$\tau_c \sim \ln V_c, \quad \text{если } m = 1. \quad (20б)$$

В простейшем случае при $C_H = \text{const}$, т.е. при $m = 0$, характерное время τ_c пропорционально характерной скорости V_c для смерча:

$$\tau_c \sim V_c. \quad (20в)$$

Можно также учесть, что согласно [11] горизонтальный размер смерча d из соображений размерности можно выразить через его кинетическую энергию E и скорость ее генерации ϵ_+

$$d \sim E^{3/2}/\epsilon_+, \quad (21)$$

или при $V \sim W$

$$d \sim V^2/(L_H |\partial q_m / \partial z|). \quad (22)$$

Для характерных для смерча/торнадо значений $d_c \sim V_c^2$ из (20в) при $L_c \sim \tau_c$ (для торнадо/вихрей, движущихся с некоторой характерной скоростью) следует корневая зависимость

$$L_c \sim d_c^{1/2}, \quad (23)$$

аналогичная полученной в (1) по данным наблюдений.

В более общем случае при $C_H \sim V^m$

$$L_c \sim d_c^{(1-m)/2} \quad \text{при } m \neq 1, \quad (24a)$$

$$L_c \sim \ln d_c \quad \text{при } m = 1. \quad (24б)$$

При этом эмпирической оценке в варианте (26) соответствует $m = -1/3$, а эмпирической оценке (2в) соответствует $m = 1/3$. Вариант

$$L_c \sim d_c, \quad (25)$$

соответствует $m = -1$ – в этом варианте скорость генерации ϵ_+ не зависит от скорости V . Что касается оценок $k_F = 4/3$ и $k_F = 6/5$, то им соответствуют модельные значения $m = -5/3$ и $m = -7/5$.

В области стационарного режима и для диссипативного режима при $m = 0$ и $n = 3$ величины характерного времени и характерной скорости обратно пропорциональны корню квадратному из коэффициента сопротивления. При характерном размере торнадо/смерчей, пропорциональном квадрату характерной скорости, а длины пути, пропорциональной характерному времени, это соответствует в рассматриваемой простой модели корневой зависимости длины пути от размера торнадо/смерчей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках статистического анализа данных получены количественные оценки возможности аналитических параметризации связи различных характеристик смерчей/торнадо. Отмечены режимы, которые характеризуются статистически значимой степенной, в частности корневой, зависимостью длины пути вихрей от их размера. Степень применимости отмеченной зависимости, объяснимой на основе простой модели, требует конечно более детальных исследований для разных регионов и климатических условий. Выявление таких внутренних связей процессов по данным наблюдений важно для более детального оценивания адекватности используемых моделей. Существенно также, что подобные связи имеют прогностический потенциал, когда по измеряемым характеристикам можно оценивать другие характеристики и возможное развитие процессов.

Наряду с анализом значительно более часто встречающихся циклонических торнадо-смерчами, необходим соответствующий анализ относительно редких антициклонических торнадо-смерчей с исследованием особенностей механизмов их формирования. Существенно более редкие антициклонические торнадо могут быть спутниками более мощных торнадо, связанных с мезоциклоном. Антициклонические торнадо формируются и как основные торнадо в связи с мезовихрем. Торнадо-антициклоны могут быть связаны как с циклоническими, так и с антициклоническими суперячейками – конвективными облаками с достаточно устойчивым мезовихрем, простирающимся на всю толщу конвективного облака [5]. В [27] отмечены, в частности, особенности формирования антициклонических торнадо с частотой, сопоставимой с частотой формирования циклонических торнадо, в регионах со сложной топографией.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Автор выражает благодарность М.В. Курганскому за полезные обсуждения. Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (№ 19-17-00240). Особенности экстремальных атмосферных режимов в регионах Евразии оценивались в соответствии с соглашением № 075-15-2021-577 Министерства науки и высшего образования РФ с ИФА им. А.М. Обухова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наливкин Д.В.* Смерчи. М.: Наука, 1984. 112 с.
2. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Бенгтссона Л., Лайтхилла Дж. М.: Мир, 1985. 368 с.
3. Природные опасности России. Т.5. Гидрометеорологические опасности / Под ред. Голицына Г.С., Васильева А.А. М.: Крук, 2001. 296 с.
4. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes. Observations and Dynamics. Springer Praxis Books, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. 483 pp.

5. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чехтиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
6. *Thom H.C.S.* Tornado probabilities // *Mon. Wea. Rev.* 1963. V. 91. P. 730–736.
7. *Fujita T.T.* Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales // *J. Atmos. Sci.* 1981. V. 38. P. 1511–1534.
8. *Schaefer J.T., Kelly D.L., Abbey R.F.* A minimum assumption tornado-hazard probability model // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 1986. V. 25. P. 1934–1945.
9. *Снитковский А.И.* Смерчи на территории СССР // *Метеорология и гидрология.* 1987. № 9. С. 12–25.
10. *Dessens J., Snow J.T.* Tornadoes in France // *Wea. Forecast.* 1989. V. 4. P. 110–132.
11. *Писниченко И.А.* Роль фазовых переходов влаги в процессе образования смерчей // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* 1993. Т. 29. № 6. С. 793–798.
12. *Dessens J., Snow J.T.* Comparative description of tornadoes in France and the United States / In: *Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards.* Geophys. Monograph 79. 1993. P. 427–434.
13. *Mokhov I.I.* Frequency distributions of atmospheric vortices and their variations // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling.* Ed. By H. Ritchie. WMO TD-No.987. 2000. P. 2.18–2.19.
14. *Dotzek N., Grieser J., Brooks H.E.* Statistical modelling of tornado intensity distributions // *Atmos. Res.* 2003. V. 67–68. P. 163–187.
15. *Brooks H.E.* On the relationship of tornado path length and width to intensity // *Wea. Forecast.* 2004. V. 19. P. 310–319.
16. *Dotzek N., Kurgansky M.V., Grieser J., Feuerstein B., Nevir P.* Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 3. P. L24813.
17. *Malamud B.D., Turcotte D.L.* Statistics of severe tornadoes and severe tornado outbreaks // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 8459–8473.
18. *Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И.* Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? // *Метеорология и гидрология,* 2013. № 8. с. 40–50.
19. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И.* Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // *ДАН.* 2017. Т. 477. С. 722–727.
20. *Antonescu B., Schultz D.M., Holzer A., Groenemeijer P.* Tornadoes in Europe: An underestimated threat // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98. P. 713–728.
21. *Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kuhne T.* Tornadoes in northern Eurasia: From the middle age to the information era // *Mon. Wea. Rev.* 2020. V. 148. P. 3081–3110.
22. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне Т.* Смерчи в российских регионах // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 2. С. 17–34.
23. *Мохов И.И., Акперов М.Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
24. *Mokhov I.I., Pripitnev S.G.* Tropical cyclones: Statistical and model relations between intensity and duration // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling.* Ed. By H. Ritchie. 1999. WMO/TD-No. 942. P. 2.22–2.23.
25. *Мохов И.И., Порошенко А.Г.* Статистические и модельные оценки связи интенсивности и времени существования тропических циклонов // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 5. С. 25–30.
26. *Мохов И.И., Порошенко А.Г.* Статистические и модельные оценки связи размеров и времени жизни полярных мезоциклонов // *Вестник Московского университета. 3. Физика. Астрономия.* 2021. № 6. С. 53–57.
27. *Carbajal N., Leon-Cruz J.F., Pineda-Martinez L.F., Tuxpan-Vargas J., Tuxpan-Vargas J.H.* Occurrence of Anticyclonic Tornadoes in a Topographically Complex Region of Mexico // *Adv. Meteorol.* 2019. V. 2019. Art. ID 2763153.
<https://doi.org/10.1155/2019/2763153>

Statistical and Model Estimates of the Relationship between Characteristics of Atmospheric Tornadoes

I. I. Mokhov^{1, 2, *}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per. 3, Moscow, 119017 Russia*

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

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Based on the observational data, statistical estimates of the relationship between different characteristics of atmospheric tornadoes were received. Statistically significant estimates of the power-law relationship of the tornado path length and path width were obtained. Specific features are noted for different ranges of path length and path width of intense atmospheric vortices. A simple model is proposed to explain the noted power-law, including the root, dependence of the tornado path length on path width.

Keywords: relationship of characteristics of atmospheric tornadoes, tornadoes, observational data, model estimates