

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.551; 551.559; 551.556.1; 551.510.522; 551.511.6

ЭНЕРГЕТИКА ТОРНАДО И СМЕРЧЕЙ

© 2023 г. Академик РАН Г. С. Голицын¹, А. В. Чернокульский^{1,*}, Н. В. Вазаева^{1,2}

Поступило 25.06.2023 г.

После доработки 28.06.2023 г.

Принято к публикации 04.07.2023 г.

По данным о размерах и интенсивности торнадо и смерчей находятся их характерные времена и форсинги. В зависимости от интенсивности средние времена меняются в 3 раза, а форсинги — в 6 раз. Оценена энергия вихрей, которая выражается в том числе в единицах масс тротилового эквивалента.

Ключевые слова: уравнение случайных движений и его моменты, Колмогоров 34 г., связь размеров и скоростей, разрушительная сила в массах тротила

DOI: 10.31857/S2686739723601400, EDN: LGWBVY

В 1934 г. появилась замечательная двухстраничная статья А.Н. Колмогорова под названием “Случайные движения” [1], установившая для природных событий и явлений тесную связь между случайными скоростями и размерами области движений. Все это делается на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для распределений вероятности 6-мерного вектора $p(t, u_i, x_i)$, вторые моменты которого по скорости и координатам были установлены в 1958 г. А.М. Обуховым [2] и проверены в [3, 4]. В книге [4] приведено до десятка различных природных процессов и явлений, объяснения которых даются на основе использования идей А.Н. Колмогорова [1]. Применим данные идеи для оценки моментов мощных мелкомасштабных атмосферных вихрей — торнадо, возникающих в тыловой части мезомасштабных конвективных систем или суперячейковых облаков. Выявление их параметров позволяет оценивать скорость генерации энергий ϵ , как это сделано для ряда процессов в [3, 4]. Эти моменты выглядят следующим образом:

$$\langle u^2(t) \rangle = c_1 \epsilon t, \quad (1)$$

$$\langle x^2(t) \rangle = S = c_2 \epsilon t^3, \quad (2)$$

где c_1 и c_2 — безразмерные константы, находимые из сравнения теории и эксперимента и/или сравнения расчетов по определению скоростей генерации кинетической энергии на единицу массы ϵ , угловые скобки означают среднее для распределения по ансамблю. Для определенности примем, что обе эти константы порядка единицы.

В качестве эмпирических данных будем использовать данные о событиях 164 смерчей [5], прошедших на территории России с начала 20 века, зафиксированных наблюдателями, имеющих высокую достоверность и сопровождающихся информацией об интенсивности смерча, выраженной по шкале Фудзиты, и о максимальной ширине смерча (горизонтальный размер вихря D). Диаметры этих вихрей изменяются от 15 до 1750 м (рис. 1 а), а средняя скорость (оцененная как среднее значение диапазона скоростей, соответствующего интенсивности) — от 25 до 100 м/с (табл. 1).

Считая вихрь осесимметричным, положим, что его площадь равна

$$S = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3)$$

где R и D — радиус и диаметр вихря соответственно.

Интенсивность смерча, выраженная по шкале Фудзиты, может быть переведена в диапазон горизонтальной скорости ветра u , характерной для той или иной интенсивности смерча-торнадо. За неимением другого в дальнейшем анализе за $\langle u^2(t) \rangle$ примем $\bar{u}^2$ (где $\bar{u}$ — средняя скорость ветра

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

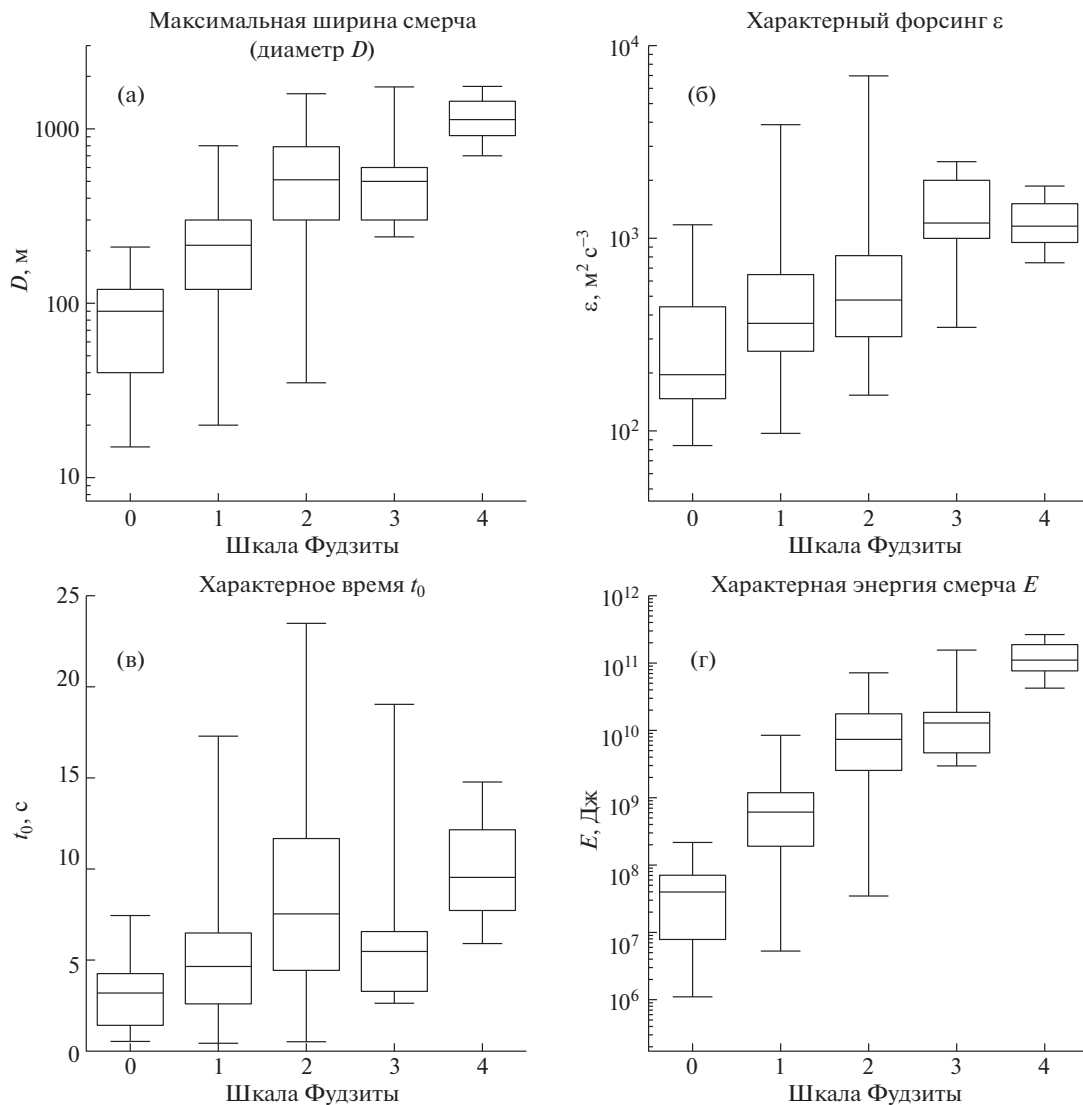


Рис. 1. Распределение характеристик смерчей в зависимости от интенсивности по шкале Фудзиты: максимальная ширина смерча (диаметр D) (из данных [5]) (а), а также рассчитанные в данной работе величины форсинга (скорости генерации энергии) ε (б), характерного времени воздействия t_0 (в) и характерной энергии E (г).

для каждого диапазона интенсивности), хотя это должно приводить к некоторым флуктуациям по сравнению с более точно измеренными параметрами, например, в определении величины форсинга ε , находимому из (1) путем

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{u}^2}{t_0}, \quad (4)$$

или из (2) путем

$$\varepsilon_2 = \frac{S}{t_0^3}. \quad (5)$$

За время воздействия вихря на окружающую среду примем

$$t_0 = \sqrt{\frac{S}{\bar{u}^2}}, \quad (6)$$

т.е. мы допускаем единство характерного времени процесса, принимая время воздействия вихря единым как по скоростям, так и по размерам.

Формулы (4)–(6) позволяют получить единую формулу для форсинга ε

$$\varepsilon = \frac{\bar{u}^3}{\sqrt{S}}. \quad (7)$$

При незнании ошибок измерений все эти формулы дают одинаковые результаты, но при известных ошибках формула (4) дает меньшую ошибку в оценке форсинга вследствие более низкой степени t_0 . Для анализируемой выборки

Таблица 1. Выборка используемых в работе смерчей

Интенсивность по шкале Фудзиты	Диапазон скоростей для данной интенсивности, м/с	Средняя скорость в диапазоне, м/с	Количество смерчей данной интенсивности в выборке
F0	18–32	25	21
F1	33–50	41	66
F2	51–70	60	61
F3	71–92	81	13
F4	93–116	105	3

Таблица 2. Медианные значения характеристик смерчей разной интенсивности

Интенсивность по шкале Фудзиты	Форсинг ϵ , $\text{м}^2\text{с}^{-3}$	Характерное время t_0 , с	Энергия смерча E , Дж	Энергия в тротиловом эквиваленте, т ТНТ	Энергия смерча E' для характерного размера дома, Дж
F0	195.9	3.2	3.98×10^7	9.5×10^{-3}	7.72×10^5
F1	361.9	4.6	6.11×10^8	0.1	2.13×10^6
F2	477.9	7.5	7.35×10^9	1.8	3.60×10^6
F3	1199.4	5.5	1.29×10^{10}	3.1	6.56×10^6
F4	1156.0	9.5	1.11×10^{11}	26.4	1.10×10^7

смерчей значения форсинга ϵ изменяются в пределах от $0.8 \times 10^2 \text{ м}^2/\text{с}^3$ до $7 \times 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^3$ (рис. 1 б, табл. 2), что до 7 порядков превосходит величину $5 \text{ см}^2/\text{с}^3 = 5 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^3$, обычно наблюдаемую в пределах оценок в земной атмосфере [3]. Непротиворечивость получаемых оценок здравому смыслу будем считать следствием закона случайных движений Колмогорова. Полученные характерные оценки t_0 находятся в пределах от 0.4 до 23.5 с (рис. 1 в). Отметим, что медианные значения характерного времени воздействия t_0 меняются относительно слабо (всего в три раза, см. табл. 2) при переходе от смерчей интенсивности F0 к смерчам интенсивности F4. Время t_0 близко к времени оборота вихря вокруг своей оси, а обратная величина t_0^{-1} имеет смысл вертикальной завихренности. Она больше для слабых вихрей и относительно меньше для самых интенсивных вихрей.

Оценим конечную энергию индивидуального вихря. Считая, что безразмерные константы c_1 и c_2 , порядка единицы, зная высоту вихря и пере-

множая (1) и (2) на массу атмосферного столба M , мы можем оценить кинетическую энергию E , участвующую в движении, или, что более практически интересно, в разрушении:

$$E = M\epsilon^2 t^4 \quad (7)$$

с точностью до множителя $c_1 c_2 = O(1)$. Эта формула была выведена в [6], где время входит через параметр Кориолиса $l_c = 2\omega \sin \theta = \frac{4\pi}{t} \sin \theta$, $l_c \sim t^{-1}$.

Характерное время воздействия выражаем через (6), а за высоту слоя, участвующего в разрушении, т.е. в индексе Фудзиты, примем 10 м (учитывая, что наиболее сильный ветер наблюдается в нижней части смерча [7]), т.е. $M = 10 \text{ кг}/\text{м}^2$, что соответствует температуре, близкой к 300 К. Для данных предположений получим для анализируемых смерчей характерные значения для E порядка 10^9 Дж (варьирует от 10^7 до 10^{11} Дж) (рис. 1 г), что на 8 порядков меньше, чем характерные значения энергии тропических ураганов [6]. Если выразить энергию смерчей в тротиловом эквиваленте, то медианные значения будут варьировать от 9.5 кг

ТНТ для смерчей интенсивности F0 до 26.4 т ТНТ для смерчей 4-й интенсивности F4 (табл. 2). Также, оценим характерные значения энергии E' для объема $10 \times 10 \times 10 = 10^3 \text{ м}^3$, что близко к объему сельских строений, наиболее часто подвергающихся разрушениям: $E' = \frac{E \times 100}{S}$. Значения E' варьируют от $4.4 \times 10^3 \text{ Дж}$ до $3.18 \times 10^8 \text{ Дж}$, возрастающая при увеличении интенсивности смерча (табл. 2).

Стоит отметить, что приведенные оценки приблизительны и относятся к высоте порядка 10 м, в которых находятся одноэтажные сельские строения. Скорости приведены по шкале Фудзиты, которые соотносятся по характеру разрушений, а наибольшие скорости в торнадо по данным [7] наблюдаются вблизи поверхности. Отметим, что это является следствием закона сохранения углового момента, как в струе, вытекающей из крана с закруткой. В связи с этим законом сохранения наблюдаемое изменение диаметра струи приводит к увеличению горизонтальных скоростей в ней [8, 9]. Можно также упомянуть простейшую модель вихревой воронки торнадо, предложенную в [10] (см. также [11]). Большую роль в усилении приземной скорости ветра в смерче играет динамическое взаимодействие вихря с подстилающей поверхностью [12]. Использование расчетов [13–16] позволяет оценивать взаимосвязь ширины и продолжительности вихря (выраженной через длину пути вихря) с его интенсивностью.

Полученные оценки энергии смерчей могут учитываться для анализа возможных разрушений в связи с прохождением смерчей, в том числе в целях адаптации к изменениям климата с учетом общей интенсификации опасных конвективных явлений, наблюдаемой в российских регионах [17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М.В. Курганского за полезное обсуждение полученных результатов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ (проект № 22-77-00098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolmogorov A.N. Zufällige Bewegungen, *Annals of Mathematics*. 1934. № 35. С. 116–117.
2. Obukhov A.M. Description of turbulence in terms of Lagrangian variables, *Adv. Geophys.* 1959. 6. P. 113–116.
3. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. М: Наука. 1967. 720 с.
4. Голицын Г.С. Вероятностные структуры макромира: землетрясения, ураганы, наводнения. М: Физматлит. 2022, 184 с.
5. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Куне Т. Смерчи в российских регионах. *Метеорология и гидрология*. 2021. № 2. С. 17–34.
6. Голицын Г.С. Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий их возникновения. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 5. С. 579–590.
7. Kosiba K., Wurman J. The strongest winds in tornadoes are very near the ground // *Communications Earth and Environment*. 2023. V. 4. Art. № 50.
8. Курганский М.В. Статистическое распределение интенсивных, влажно-конвективных, спиральных вихрей в атмосфере // *ДАН*. 2000. Т. 371. № 2. С. 240–242.
9. Dotzek N., Kurgansky M.V., Grieser J., Feuerstein B., Névir P. Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy // *Geophysical Research Letters*. 2005. 32. L24813.
10. Yih C.-S. Tornado-like flows. *Phys. Fluids*. 2007. 19. 076601.
11. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Конеицев В.Н. Торнадо. М.: Физматлит. 2011.
12. Lewellen D.C., Lewellen W.S., Xia J. The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface // *Journal of Atmospheric Sciences*. 2000. V. 57. P. 527–544.
13. Писниченко И.А. Роль фазовых переходов влаги в процессе образования смерчей // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 1993. Т. 29. № 6. С. 193–198.
14. Brooks H.E. On the Relationship of Tornado Path Length and Width to Intensity // *Weather Forecasting*. 2004. V. 19. P. 310–319.
15. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 553–567.
16. Мохов И.И. Статистические и модельные оценки связи характеристик атмосферных смерчей/торнадо // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59. № 1. С. 27–32.
17. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 27–41.

ENERGY OF TORNADOES AND LANDSPOUTS

Academician of the RAS G. S. Golitsyn^a, A. V. Chernokulsky^{a,#}, and N. V. Vazaeva^{a,b}

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru*

According to the data on the sizes and intensity of tornadoes and landspouts, their characteristic times and forcings are found. Depending on the intensity, the average times vary by a factor of 3 and the forcings by a factor of 6. The energy of the vortices has been estimated and is expressed, among other things, in TNT equivalent mass units.

Keywords: equation of random motions and its moments, Kolmogorov 1934, relationship between sizes and velocities, destructive force in masses of TNT