

Какова вероятность прохождения смерчей (торнадо) через объекты на земной поверхности?

М. В. Курганский

*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,
Москва, Россия*

E-mail : kurgansk@ifaran.ru.

**Международная конференция, посвященная 70-летию
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА**

**Кисловодск, Россия
06 – 09 апреля 2026 года**

Предшествующая литература

- [1] *Гнеденко Б.В.* Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1965. 400 с.
- [2] *Курганский М.В.* Статистическое распределение интенсивных влажно-конвективных спиральных вихрей в атмосфере // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 2. С. 240–242.
- [3] *Курганский М.В.* Спиральность в атмосферных динамических процессах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 147–163.
- [4] *Курганский М.В., Чернокульский А.В., Захарченко Д.И.* Смерчи / В кн. «Интенсивные атмосферные вихри и их динамика». Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС. 2018. 482 с.
- [5] *Снитковский А.И.* Смерчи на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.
- [6] *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.
- [7] *Dotzek N., Kurgansky M.V., Grieser J., Feuerstein B., Névir P.* Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L24813.

Введение



A tornado near Anadarko,
Oklahoma
on May 3, 1999 (VORTEX 99)



Смерч под Ханты-Мансийском
(Западная Сибирь, 61°с.ш.)
(Курганский М.В., Чернокульский
А.В., Мохов И.И. Смерч под Ханты-
Мансийском: пока исключение или
уже симптом? Метеорология и
гидрология 2013 №8)

<http://www.nakanune.ru/news/2012/6/13/22276978/>

Введение

Балл смерча по F-шкале	Скорости ветра, м с ⁻¹	Балл смерча по EF-шкале	Скорости ветра, м с ⁻¹
F0	18 – 32	EF0	29 – 37
F1	33 – 49	EF1	38 – 49
F2	50 – 69	EF2	50 – 60
F3	70 – 92	EF3	61 – 73
F4	93 – 116	EF4	74 – 90
F5	117 – 142	EF5	> 90

Таблица 1. Традиционная и улучшенная (enhanced) шкалы Фуджиты [ср. Курганский и др., 2018].

$$v(F) = 6.30 \cdot (F + 2)^{3/2} \text{ м с}^{-1}$$

Вероятность прохождения торнадо

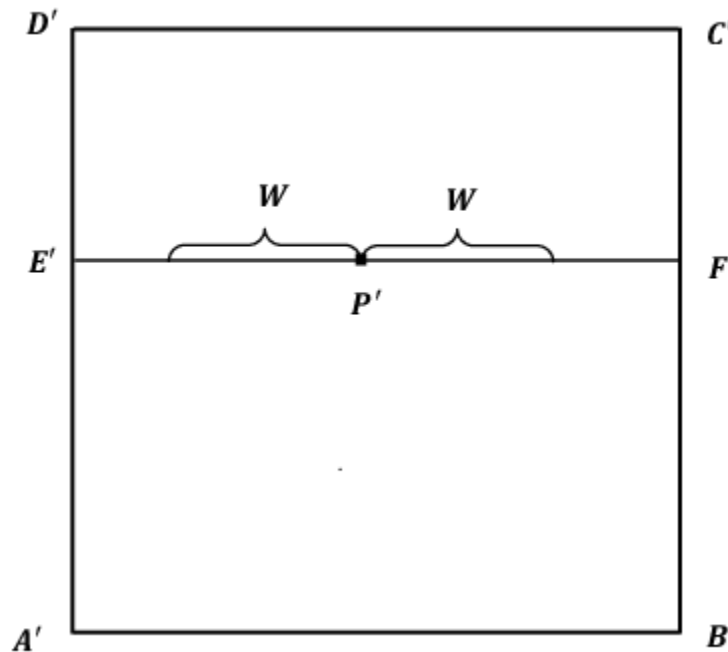


Рис. 1. Схема прохождения торнадо с шириной следа W и длиной следа L через точку P' ; торнадо движется в направлении перпендикулярном линии $E'F'$. Вероятность независимого прохождения N торнадо:

$$P = 1 - (1 - 4WL/A)^N \approx 4WLN/A$$

Вероятность прохождения торнадо

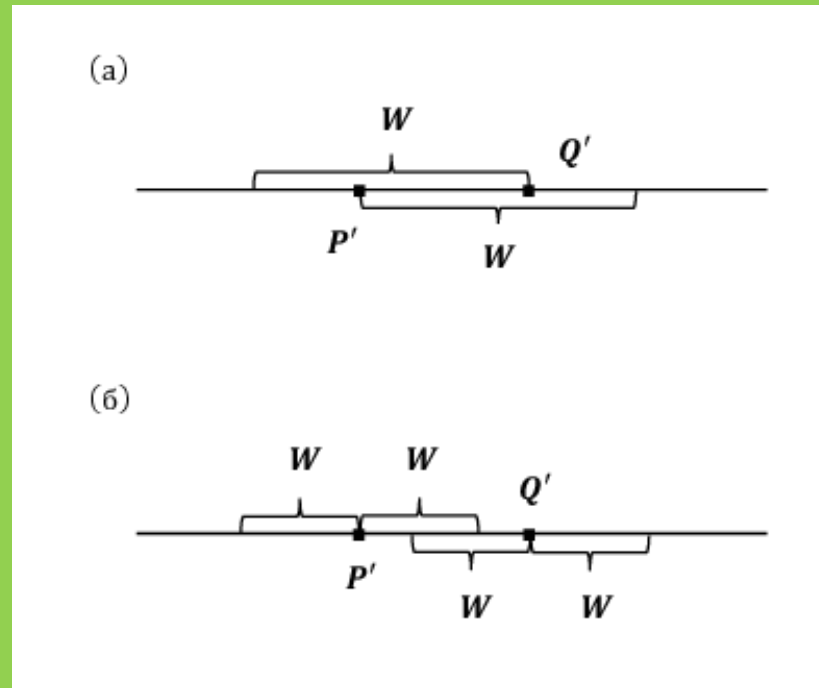


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая расчет вероятности прохождения торнадо с шириной следа W через обе точки P' и Q' (а) и хотя бы через одну точку P' или Q' (б); торнадо движется в направлении перпендикулярном отрезку $P'Q'$ длиной D .

(а): $P = 2(2W - D)L/A, \quad W > D$

(б): $P = 2(2W + D)L/A, \quad W < D$

Вероятность прохождения торнадо

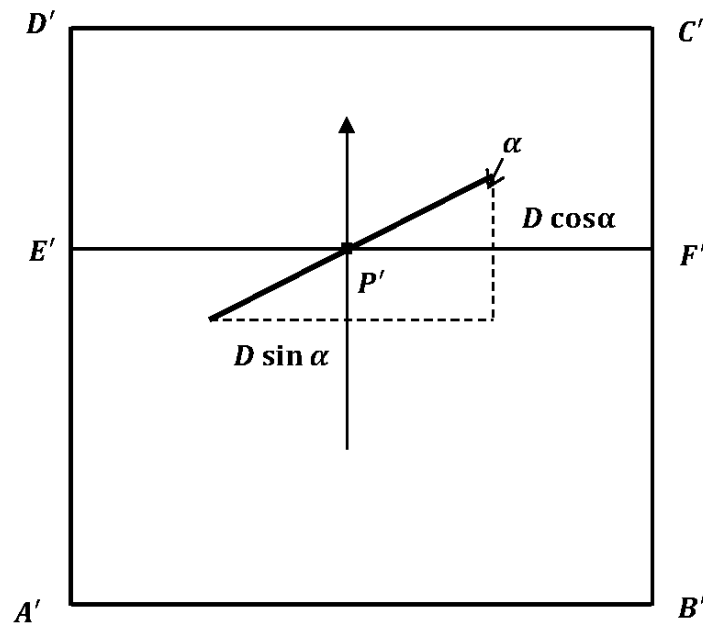


Рис. 3. Схема прохождения торнадо через отрезок длиной D под углами α отличными от прямого угла. Полная вероятность составляет:

$$P = \frac{(2W + D \sin \alpha)(2L + D \cos \alpha)}{A}$$

Распределение Рэлея для торнадо

$$p(v_m^2) = \frac{1}{\langle v_m^2 \rangle_h - v_h^2} \exp \left(-\frac{v_m^2 - v_h^2}{\langle v_m^2 \rangle_h - v_h^2} \right) \equiv \frac{1}{v_0^2} \exp \left(-\frac{v_m^2 - v_h^2}{v_0^2} \right)$$

$$r_h = r_m \left(\frac{v_m}{v_h} \pm \sqrt{\frac{v_m^2}{v_h^2} - 1} \right)$$

$$r_m(v_m^2) = 0.02 v_m^2$$

$$L(v_m^2) = 0.0001 v_m^4 + 2.2108 v_m^2 \\ \equiv \gamma v_m^4 + \delta v_m^2$$

$$P = \frac{8M}{A} \int_{v_h^2}^{\infty} r_h(v_m^2) L(v_m^2) p(v_m^2) d(v_m^2).$$

Преобразование между шкалами F и EF Фуджита сугубо нелинейное, но шкалы F2 и EF2 имеют совпадающее нижнее пороговое значение 50 м/с; см. Таблицу 1. Поэтому ограничиваемся рассмотрением наиболее опасных торнадо интенсивностей $\geq F/EF2$, полагая $v_h = v_0 = 50$ м/с [Dotzek et al., 2005].

Вероятность торнадо $\geq F/EF2$ в штате Оклахома, США

Используются статистические данные о торнадо интенсивности $\geq F/EF2$ в штате Оклахома за период с 1950 по 2024 год (<https://www.weather.gov/oun/tornadodata-ok-fscalebyyear>).

За 75 лет число таких торнадо составляет 1100.

Поэтому в среднем приходится $M = 1100/75 = 13.5$ торнадо/год.

Площадь территории штата $A \approx 18.1 \cdot 10^4 \text{ км}^2$.

Вероятность прохождения торнадо через произвольно взятую точку $P \approx 3.64 \cdot 10^{-3}$. Этому отвечает период возврата торнадо на данную точку (recurrence interval) $T = 1/P \approx 275$ лет.

Вероятность прохождения торнадо под прямым углом через протяженный линейный объект длины $D = 100 \text{ км}$:

$$P \approx \frac{2DM}{A} \left\{ \gamma \left[(\langle v_m^2 \rangle)^2 + (\langle v_m^2 \rangle - v_{m0}^2)^2 \right] + \delta \langle v_m^2 \rangle \right\} \approx 0.092.$$

Этому отвечает период возврата торнадо $T = 1/P \approx 11$ лет.

Вероятность смерчей $\geq F2$ в ЦФО РФ

Используются данные за 1950–2018 гг. о 84 смерчах категории $\geq F2$ на территории Центрального федерального округа (ЦФО) РФ площадью $A \approx 65.0 \cdot 10^4 \text{ км}^2$ [Чернукульский и др., 2021].

Средняя плотность вихрей в расчете на 10^4 км^2 примерно в **40.4** раза меньше чем для штата Оклахома.

Годовая вероятность прохождения смерча категории $\geq F2$ через точечный объект и под прямым углом через линейный объект 100-км длины оценивается, соответственно, как $P = 9.0 \cdot 10^{-5}$ и $P = 2.2 \cdot 10^{-3}$.

Последняя вероятность зависит от угла α и максимальна при $\alpha \approx 45^\circ$: $P = 9.2 \cdot 10^{-3}$. Этому отвечает период возврата торнадо $T = 1/P \approx 109$ лет.

Вероятность смерчей $\geq F2$ в Московском регионе

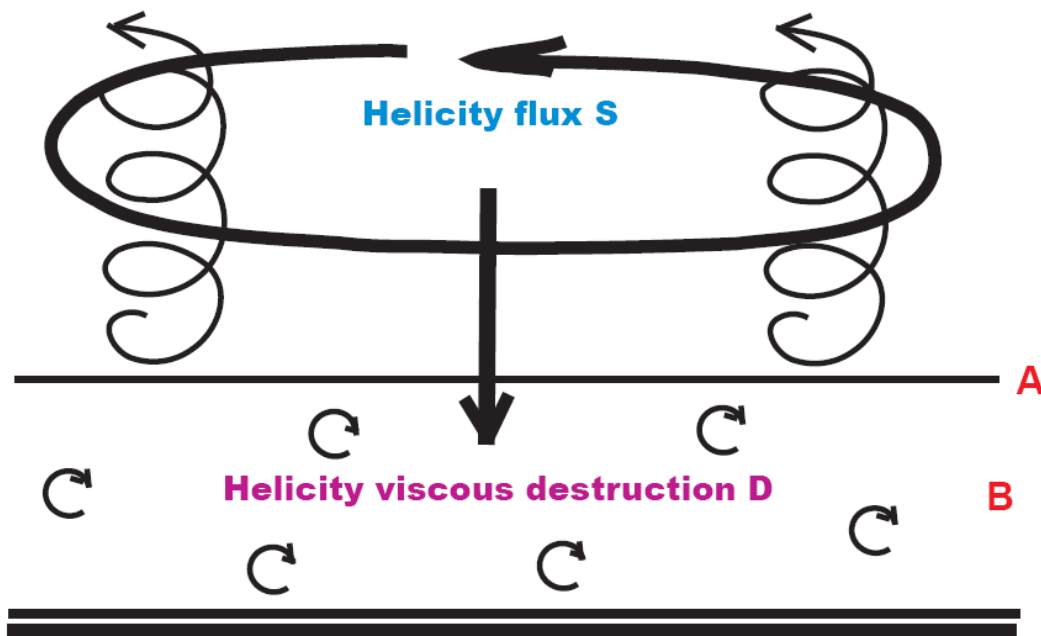
Для Московской области (включая Москву) плотность всех смерчей за 2009–2018 гг. составляет $\rho = 16.4/10^4 \text{ км}^2$. В среднем по ЦФО это $\rho = 3.8/10^4 \text{ км}^2$. Такую же пропорцию используем для смерчей категории $\geq F2$.

Годовая вероятность прохождения смерча категории $\geq F2$ через точечный объект составляет $P = 3.9 \cdot 10^{-4}$, чему отвечает период возврата $T = 1/P \approx 2560$ лет. Эта вероятность более чем в 3 раза выше значения $P = 1.2 \cdot 10^{-4}$, полученного в [Чернокульский и др., 2021] другим методом.

Годовая вероятность прохождения смерча категории $\geq F2$ под прямым углом через линейный объект 100-км длины составляет $P = 9.5 \cdot 10^{-3}$. Если смерчи проходят под углом $\approx 45^\circ$, то $P_{max} \approx 4.0 \cdot 10^{-2}$ и время возврата $T = 1/P \approx 25$ лет.

Поток спиральности в смерче

Helicity buoyant production G



$$S_z = -\frac{8\pi}{3} \int_0^\infty v^3 dr$$

$$v(r) = \frac{2v_m r/r_m}{1 + (r/r_m)^2},$$

$$S_z = -\frac{16\pi}{3} v_m^3 r_m.$$

$$r_m = v_m^2 / a, a \sim 50 \text{ м с}^{-2}$$

$$|S_z| \propto v_m^5$$

$$v(F) = 6.30 \cdot (F + 2)^{3/2} \text{ м с}^{-1}$$

$$|S_z| \propto (F + 2)^{15/2}$$

Схема баланса спиральности в интенсивных циклонических атмосферных вихрях, в том числе смерчах (торнадо).

Поток спиральности в смерче

$$r(F) = \left(\frac{F + 3}{F + 2} \right)^{15/2}$$

$$r^*(F) = \left(\frac{F + 3}{F + 2} \right)^{15/2} \frac{P(F + 1)}{P(F)},$$

F	0	1	2	3	4
$r(F)$	20.9	8.7	5.3	3.9	3.2
$r^*(F)$	20.4	4.7	1.2	0.4	0.14

Оценка прироста ущерба от смерча (торнадо) с ростом его балла по традиционной шкале Фуджита

F	0	1	2	3	4	5
$P(F)\%$	38	37	20	4.53	0.45	0.02

Теоретическая вероятность распределения смерчей по баллу Фуджита
[Курганский, 2000]

Заключительные замечания

■ Наиболее подвержены риску от прохождения торнадо протяженные линейные объекты, ориентированные под углом в 45° по отношению к преимущественному направлению перемещения вихрей. Поскольку над Европейской частью России это направление, как правило, с юго-запада на северо-восток, то это относится к линейным объектам, ориентированные или с юга на север, или с запада на восток. **Линейные объекты, ориентированные перпендикулярно преимущественному направлению перемещения вихрей**, т.е. с юго-востока на северо-запад, **меньше чем указанные выше подвержены риску от прохождения смерчей**. Это объясняется тем, что удвоенная типичная длина пути торнадо, $2L$, как правило, много меньше длины протяженного линейного объекта, $D \sim 10^5$ м. Что касается протяженного линейного объекта, ориентированного вдоль направления перемещения вихрей, то удвоенная типичная ширина пути торнадо $2W$ пренебрежимо мала по сравнению с протяженностью линейного объекта D . В этом случае риск от прохождения торнадо достаточно мал, чего можно ожидать априори.

Заключительные замечания

- **Оценка $P_{max} \approx 4.0 \cdot 10^{-2}$ ($\approx 4\%$) для Московского региона (МР) является оценкой сверху**, т.к. угол между направлением движения торнадо и линейным протяженным объектом не всегда составляет $\approx 45^\circ$, а варьирует в соответствии с «розой ветров». При пересчете статистики смерчей от ЦФО к МР не учитывалось, что 4-х кратное превышение плотности вихрей в МР может быть во многом обусловлено смерчами малой интенсивности, за счет их лучшего обнаружения за вследствие высокой плотности населения в МР.
- **Индекс $|S_z| \propto v_m^5$ позволяет оценить лишь относительную (при переходе от одной интенсивности вихря к другой), но не абсолютную разрушительную силу вихрей.** Последняя пропорциональна плотности воздуха, которая, например, на Марсе на два порядка меньше, чем на Земле. Сравнение разрушительной силы вихрей различной интенсивности и сравнительная оценка соответствующего ущерба имеют смысл для одинаковых свойств подстилающей поверхности: характеристик строений на ней, растительного покрова и т.п.

Заключительные замечания

- **Связь между интенсивностью и частотой смерчей (торнадо) с происходящими климатическими изменениями в настоящее время не до конца изучена**, что создает некоторые неопределенности в оценке тенденций будущих рисков от их прохождения. Остаются трудности, связанные, в том числе, с обнаружением и идентификацией этих вихрей из-за их малых размеров, а также с большой их межгодовой изменчивостью. **Имеются некоторые указания в пользу усиления роли наиболее интенсивных торнадо, сезонных и географических изменений в их проявлении [Чернокульский и др., 2017, 2022]**, но это требует дальнейших исследований.
- **Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 24-17-00357).** Я благодарен А.В. Чернокульскому за плодотворное сотрудничество и полезные обсуждения данной работы.

Спасибо за внимание!