

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

## Возбуждение торнадо шквальной бурей

С. А. Арсеньев<sup>а</sup>, Н. К. Шелковников<sup>б</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: <sup>а</sup>arsenyeov@yandex.ru, <sup>б</sup>shelkovnikov@phys.msu.ru*

Статья поступила 31.12.2010, подписана в печать ?? 2011

Построена теория генерации торнадо шквальной бурей. Результаты сравниваются с данными наблюдений.

*Ключевые слова:* торнадо, смерчи, шквальная буря, турбулентность в тропосфере, солитоны, ураганный ветер.

УДК: 551.510. PACS: 92.60.Qx; 92.60.Fm; 92.60.Gn; 92.60.hk. 47.35.Fg.

## Введение

По определению, шквальная буря — это кратковременное (от 1 до 30 мин) и сильное увеличение скорости ветра у поверхности Земли (от 1 до 35 м/с), возникающее при прохождении быстрых синоптических циклонов, несущих облачность и дожди [1, 2]. Значительное увеличение скорости ветра на небольшом временном интервале вызывает большие ускорения и силы, которые разрушают легкие дачные дома, ломают деревья и опрокидывают корабли в море. По характеру воздействия на поверхность Земли шквальные бури не отличаются от штормовых торнадо класса T1–T2 по шкале TORRO или B10–B12 по шкале Бофорта [3], но существенным отличием от штормовых торнадо является отсутствие в шквальных бурях вращения ветра вокруг общего центра макровихря, характерного для торнадо.

Теория шквальных бурь была недавно предложена в работе [2]. Было показано, что шквальная буря является диссипативным солитоном давления воздуха и скорости ветра, бегущим по поверхности подоблачной температурной инверсии со скоростью длинных волн  $V = (gH)^{1/2}$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести и  $H$  — высота нижней кромки облаков. Однако подоблачная инверсия существует не всегда. Большие вертикальные скорости ветра, обусловленные, например, сильными восходящими движениями на холодном атмосферном фронте, разрушают ее, и воздух стекается к этим холодным пятнам, образуя мощные грозовые облака Cb [3, 4]. Если несколько небольших гроз объединяются в суперячейку, то образуется слабо вращающийся мезоциклон, который может сформировать торнадо. Как отмечается в [4], в 40% случаев этого не происходит. Однако в остальных случаях торнадо возникает внутри мезоциклона и быстро распространяется вниз до поверхности Земли. Согласно современной теории [3, 5, 6], мезоциклон генерирует торнадо, если кинетическая энергия и угловой момент турбулентных вихрей внутри мезоциклона являются достаточно большими. В работах [3, 5, 6] найдены точные критерии этого механизма в виде чисел подобия. Когда эти числа превышают критические значения, наступает неустой-

чивость и начинается процесс возникновения торнадо. В настоящей работе мы рассмотрим возможность альтернативного, дополнительного механизма генерации торнадо шквальной бурей. Бегущая по поверхности подоблачной инверсии, она может попасть в мезоциклон, где эта инверсия разрушена. Поэтому должен наблюдаться захват солитона шквальной бури мезоциклоном с последующим приспособлением давления воздуха и скорости ветра друг к другу. Как мы покажем в настоящей статье, эта взаимная адаптация метеорологических полей приводит к возникновению торнадо, причем скорость ветра и падение давления воздуха могут достигать значительных величин.

## Математическая модель

Выпишем формулы, определяющие шквальную бурю. Согласно теории [1] имеем

$$u = \left( \frac{\beta}{H} \right) \sec h^2 \left( \frac{\chi}{\Delta} \right), \quad (1)$$

$$P = p_0 + \rho g H - \rho g \frac{\beta}{\sqrt{gH}} \sec h^2 \left( \frac{\chi}{\Delta} \right). \quad (2)$$

Здесь обозначено:

$$\Delta = \sqrt{\frac{4A_L}{i_*}} = H(1-n) \sqrt{\frac{4A_L}{3A}}, \quad (3)$$

$\Delta$  — ширина диссипативных солитонов (1), (2),  $A_L$  и  $A$  — коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости, соответственно  $H$  — средняя высота инверсии ( $H \approx [500, 2000]$  м),  $n = z_g/H$  и  $z_g$  — высота выступов шероховатости на поверхности Земли,  $i_*$  — частота трения

$$i_* = \frac{3A}{H^2(1-n)^2}, \quad (4)$$

$\chi = x + Vt$  — бегущая координата,  $x$  — координата, направленная вдоль распространения солитонов (1), (2), и  $t$  — время. Кроме того, введены обозначения

$$\beta = \frac{3}{2} \frac{i_*}{\alpha}, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{C_g}{k^2 H^2}, \quad (6)$$

$C_g$  — коэффициент сопротивления воздуха на инверсии (на нижней границе облаков),  $k \leq 1$  — ветровой коэффициент на этой границе,  $P$  — давление воздуха у поверхности Земли,  $p_0$  — давление воздуха на инверсии,  $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха, которая принимается постоянной,  $v$  — скорость ветра.

Как мы уже отмечали, бегущий по подоблачной инверсии солитон шквальной бури (1), (2), может попасть в торнадогенный мезоциклон, имеющий собственное вращение, вызванное, например, сдвиговой вихревой неустойчивостью [3, 7]. В этом случае, происходит захват солитона мезоциклоном, поскольку температурная инверсия здесь разрушена сильными восходящими движениями на грозовом фронте. Вращение воздуха в области мезоциклона описывается циклострофическим балансом

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{v^2}{r}, \quad (7)$$

где  $r$  — радиальная координата, направленная от центра вращения наружу. Таким образом, шквальная буря может вызвать дополнительное падение внутри грозовой суперячейки и усилить вращение ветра, порождая торнадо.

Очевидно, для того чтобы найти скорости ветра в возникающем торнадо, необходимо заменить в формуле (2)  $x$  на  $r$ , затем продифференцировать ее по  $r$  и подставить результат в формулу (7). Разрешая полученное выражение относительно азимутальной скорости  $v$ , получим формулу, позволяющую вычислить скорость ветра в возникающем торнадо:

$$v = \sec h \left( \frac{\chi}{\Delta} \right) \sqrt{\frac{2g\beta r}{\Delta V} \text{th} \left( \frac{\chi}{\Delta} \right)}. \quad (8)$$

Давление воздуха внутри торнадо у поверхности Земли будет определяться формулой (2).

### Верификация теории по данным наблюдений за торнадо

Торнадо — это сильно вращающийся столб воздуха, возникающий в грозовом облаке и достигающий поверхности Земли [3]. Ураганные ветры, типичные для торнадо, вызывают разрушения, поэтому внутри торнадо много обломков домов, машин и деревьев, комьев грунта, воды и пыли, делающих задачу измерения здесь физических величин трудноразрешимой. Блунштейн [8] описал основные методы полевых исследований торнадо в США, из которых наиболее эффективными являются дистанционные измерения скорости и направления ветра с помощью доплеровских радаров (в том числе радаров, установленных на автомобилях). Другим способом является установка на пути торнадо автономных портативных комплексов аппаратуры для измерения скорости и направления ветра, давления и температуры воздуха, влажности и электромагнитных полей [8]. На рис. 1 в качестве примера показаны результаты измерений давления воздуха внутри торнадо 8 июля 1995 г. вблизи городка Allison (штат Техас), полученные Б. Винн с коллегами из Лэнгмюровской Лаборатории в Нью-Мексико (США) [8, 9]. Измерения проводились при помощи небольшого прибора, названного «черепахой», который был закопан в грунт на пути торнадо. Из рис. 1 видно, что давление воздуха

у поверхности Земли в торнадо сильно флуктуирует, особенно вблизи центра, что связано с наличием внутри торнадо множества турбулентных мезовихрей [3]. Тем не менее после осреднения этих флуктуаций имеет место монотонное падение давления к центру торнадо, оно показано на рис. 2 квадратами. Общее падение давления, вызванное торнадо, оказалось небольшим, около 50 гПа. Однако, согласно формуле (7), скорость ветра в торнадо определяется градиентами давления по радиусу (а не самим давлением). Таким образом, резкие пространственные изменения давления воздуха внутри торнадо могут создавать очень сильный ветер.

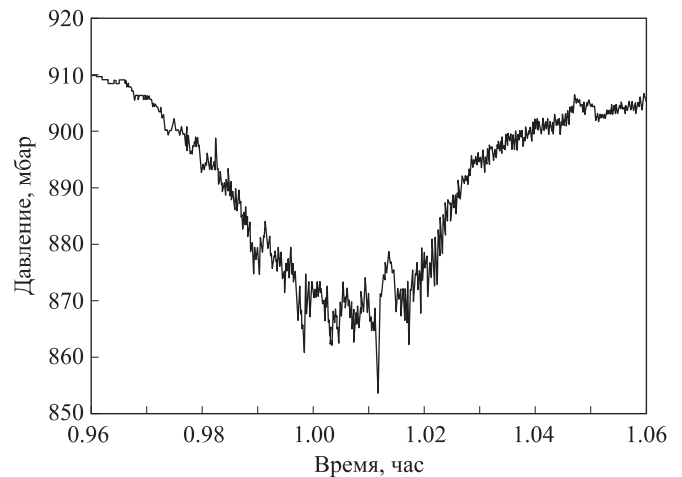


Рис. 1. Результаты измерений давления воздуха в торнадо как функции времени, выполненные Винн и коллегами в США [8, 9]

На том же рисунке толстой кривой показан результат теоретического расчета давления приземного воздуха, выполненного по формуле (2). Вычисления проводились для следующих значений величин, входящих в формулу (2):  $H = 980 \text{ м}$ ,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ,  $V = 98 \text{ м/с}$ ,  $\rho_0 = 785.15 \text{ гПа}$ ;  $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$ ,  $A = 1.709 \text{ м/с}^2$ ,  $A_L = 67.32 \text{ м/с}^2$ ,  $C_g = 0.02$ ,  $k = 1$ ,  $z_0 = 0.05 \text{ м}$  (трава, рожь), так что значения  $\beta$  и  $\Delta$  оказались равными  $384.62 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $7101.82 \text{ м}$  соответственно. Для удобства расчетов мы ввели расчетное время  $t = T - 3636 \text{ с}$ , где  $T$  — текущее время измерений в секундах, показанное на рис. 1. Таким образом, начало координат по оси времени смещено в точку  $T = 3636 \text{ с} = 1.01 \text{ ч}$ , и вся картина на рис. 2 оказалась симметричной относительно этого начала. Совпадение теоретической кривой с результатами измерений (рис. 2) подтверждает развиваемую здесь теорию.

Для проверки формулы (8) мы привлекли данные измерений скорости ветра внутри торнадо доплеровским радаром [10]. Эти данные показаны на рис. 3 квадратами. Сплошная кривая на рис. 3 — это теоретический расчет по формуле (8). Были выбраны следующие значения параметров:  $H = 980 \text{ м}$ ,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ,  $A = 300 \text{ м/с}^2$ ,  $A_L = 3.96 \text{ м/с}^2$ ,  $C_g = 0.02$ ,  $k = 1$ ,  $z_0 = 0.05 \text{ м}$  (трава, рожь), так что  $\beta = 67500 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\Delta = 130 \text{ м}$ . Совпадение теории с наблюдениями в данном случае оказалось хуже, чем при расчетах давления. Из рис. 3 видно, что на измеренной кривой имеются дополнительные вторичные максимумы

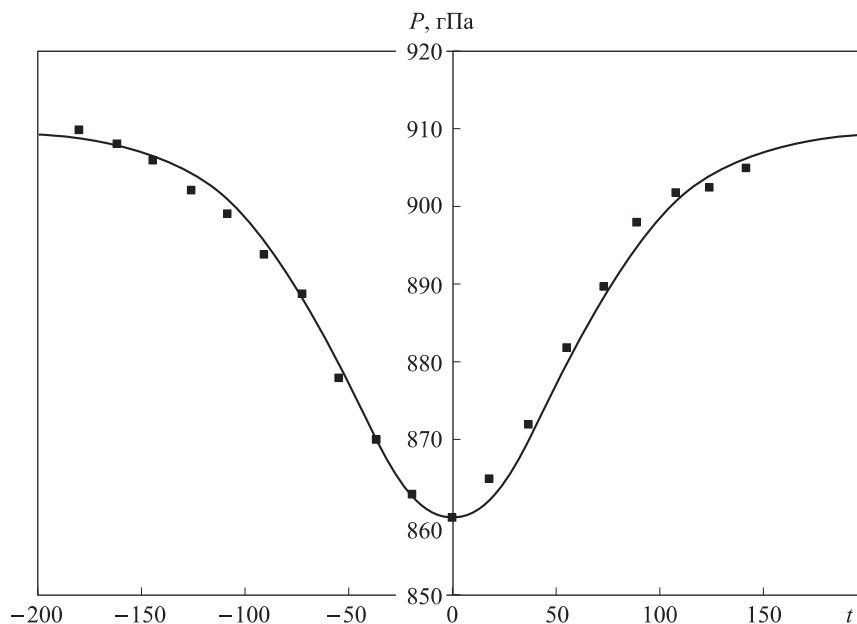


Рис. 2. Теоретический расчет изменений давления воздуха в торнадо, выполненный по формуле (2) — сплошная кривая  $t = T - 3636$  с. Квадратами показаны осредненные значения давления воздуха, соответствующие измерениям на рис. 1

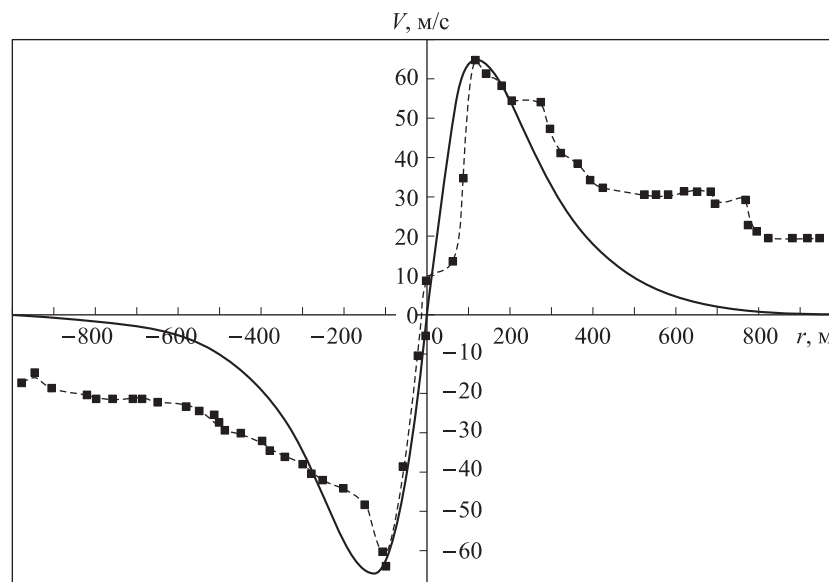


Рис. 3. Теоретический расчет изменений азимутальной скорости ветра в торнадо, выполненный по формуле (8) — сплошная кривая. Квадратами показаны результаты измерений скорости ветра в торнадо [10]

для скорости ветра (при  $r \approx 300, 650, 780, -500$  и  $-780$  м). Очевидно, что они связаны с крупными мезомасштабными турбулентными вихрями, заполняющими торнадо. Таким образом, торнадо было измерено в момент времени, близкий к началу возникновения, и поэтому оказалось существенно мультивихревым. По этой причине затухание скорости ветра при удалении от центра торнадо происходит гораздо медленнее, чем это предсказывается теорией.

Как показано в работе [3], мезомасштабные вихри в торнадо могут передавать энергию среднему течению и поэтому со временем уменьшают свои размеры, кинетическую энергию и угловой момент. Поэтому мы выполнили еще один вариант расчетов скорости ветра

применительно к большому, очень мощному торнадо, находящемуся в стадии, близкой к максимальному развитию. На рис. 4 кружками показаны данные измерений скорости ветра на высоте 100 м в торнадо класса F5, полученные с помощью доплеровского радиолокатора [10–12]. Это violent торнадо 3 мая 1999 г. атаковало город Оклахому в США и получило собственное название «tornado Bridge Creek» [13]. По данным работы [14], максимальная скорость ветра достигла 144 м/с, что соответствует скорости 512 км/ч, или 318 миль/ч. Торнадо «Bridge Creek» уничтожило более 4000 жилых домов и 47 коммерческих зданий, погибло 48 человек и множество людей получили ранения различной степени тяжести. На рис. 4 показана

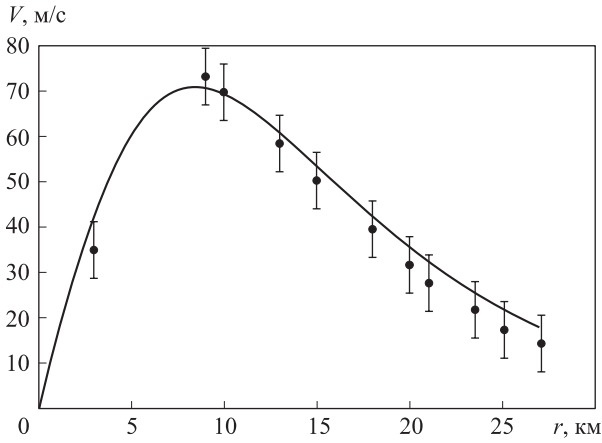


Рис. 4. Теоретический расчет изменений азимутальной скорости ветра в торнадо, выполненный по формуле (8) — сплошная кривая. Кружками показаны результаты измерений скорости ветра в торнадо F5, выполненные 3 мая 1999 года в г. Оклахома (США) [11–14]

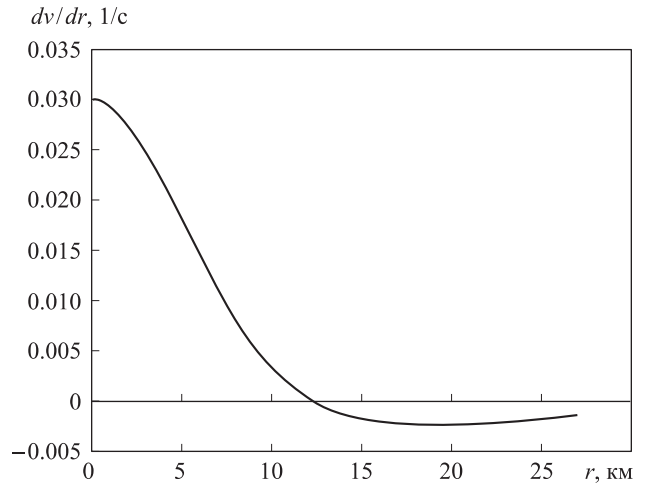


Рис. 5. Расчет пространственной изменчивости скорости ветра для торнадо F5 (рис. 4), выполненный по формуле (9)

также 10%-ная относительная ошибка измерений. Она неизбежна, поскольку измерения проводились в неконтролируемых полевых условиях. На том же рисунке изображена и теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (8) при следующих значениях параметров:  $t = 0$ ,  $\chi = r$ ,  $H = 980$  м,  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $A = 355.55$  м/с<sup>2</sup>,  $A_L = 19591.84$  м/с<sup>2</sup>,  $C_g = 0.02$ ,  $k = 1$ ,  $z_0 = 0.05$  м (трава, рожь), так что  $\beta = 80\,000$  м<sup>2</sup>/с и  $\Delta = 8400$  м. Как видно, теория и наблюдения в пределах 10%-ной точности совпадают.

**Анализ результатов**

Адекватность теории данным наблюдений убеждает в применимости формул (1)–(8) для расчетов реальных торнадо. Помимо давления воздуха и скорости ветра у поверхности Земли представляют интерес и другие характеристики. На рис. 5 показан расчет пространственной скорости изменения ветра, выполненный с помощью соотношения

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{2g\beta}{V\Delta v} \sec h^2 \left( \frac{r+Vt}{\Delta} \right) \times \left[ \operatorname{th} \left( \frac{r+Vt}{\Delta} \right) - \frac{r}{\Delta} \sec h^2 \left( \frac{r+Vt}{\Delta} \right) \right] - \frac{v}{\Delta} \operatorname{th} \left( \frac{r+Vt}{\Delta} \right), \quad (9)$$

где  $v$  определяется формулой (8). Расчет проведен для торнадо «Bridge Creek» при тех же значениях параметров, что и для рис. 4. Видно, что в центре ядра торнадо величина  $\partial v/\partial r$  постоянна (твердотельное вращение), а затем начинает убывать, обращаясь в нуль на внешней границе «стены урагана». После этого величина  $\partial v/\partial r$  становится отрицательной, что соответствует затуханию скорости ветра при удалении от центра торнадо.

Большой интерес представляет радиальное распределение завихренности в торнадо F5 показанное на рис. 6. Оно рассчитывалось с помощью соотношения

$$\Omega = \operatorname{rot}_z \mathbf{v} = \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}, \quad (10)$$

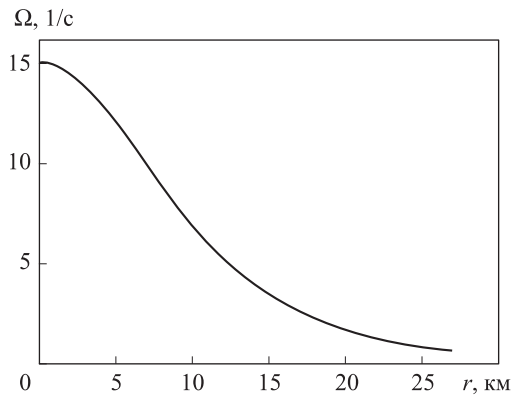


Рис. 6. Расчет радиального распределения завихренности для торнадо F5 (рис. 4), выполненный по формуле (10)

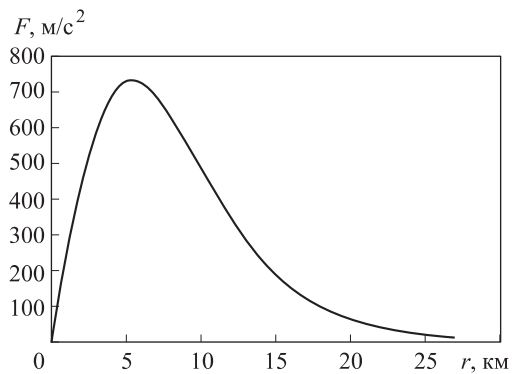


Рис. 7. Расчет вихревой силы для торнадо F5 (рис. 4), выполненный по формуле (11)

где  $v$  определяется формулой (8), а  $\partial v/\partial r$  — формулой (9). Как видно, максимальная завихренность имеет место в центре торнадо, причем для торнадо F5 она достигает очень большой величины 15 Гц (для сравнения укажем, что в тропических ураганах и тайфунах  $\Omega \approx 10^{-3}$  Гц, [15]).

На рис. 7 показан также расчет вихревой силы для торнадо F5

$$F = [\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{v}] = v\Omega = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2} \right) + \frac{v^2}{r}. \quad (11)$$

Она представляет собой сумму динамического напора и центробежной силы, которая связана с давлением уравнением (7)

$$F = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right). \quad (12)$$

Вихревая сила входит в уравнения Громека–Ламба

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \text{grad} \left( \frac{v^2}{2} \right) - [\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{v}] = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P + \eta \Delta \mathbf{v}, \quad (13)$$

которые являются следствием уравнений Навье–Стокса [16–18].

Если вихревая сила отсутствует ( $F = 0$ ), то из (11) следует уравнение

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dr}{r}. \quad (14)$$

Его решением является закон гиперболического затухания скорости ветра  $v = v_0 \cdot r_0/r$ , соответствующий вихрю Ранка в идеальной жидкости без трения [3, 16, 17]. Из рис. 7 видно, что  $F \neq 0$ , т.е. вихрь Ранка в данном случае не реализуется, так как движение воздуха в торнадо происходит при наличии турбулентного трения. Максимальное значение  $F_{\max} = 740 \text{ м/с}^2$  достигается на внутренней границе «стены урагана». Умножая  $F_{\max}$  на  $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$ , находим  $\Phi \approx 762 \text{ н/м}^2$ , что соответствует давлению  $76 \text{ кгс/м}^2$  (так как  $1 \text{ кг-сила} = 9.81 \text{ Н}$ ), или  $0.076 \text{ т/м}^2$ . Таким образом, стена дома площадью  $50 \text{ м}^2$  испытывает давление от торнадо в  $3.8 \text{ т}$ . Очевидно, что для уменьшения этого давления необходимо сокращать площадь ветрового воздействия, т.е. строить дома обтекаемой формы. Разрушение домов от торнадо можно полностью ликвидировать, располагая дома под землей.

### Заключение

Сформулируем основные результаты, полученные в настоящей работе.

1. Построена теория генерации торнадо диссипативным солитоном шквальной бури, бегущим по поверхности подоблачной инверсии температуры. Когда солитон

шквальной бури попадает в грозовую суперячейку (мезоциклон), он захватывается ей. В результате происходит дополнительное падение давления в мезоциклоне, которое усиливает ветер и генерирует торнадо.

2. Определены пространственно-временные изменения давления воздуха внутри торнадо. Расчеты хорошо соответствуют наблюдениям.

3. Найдены аналитические формулы для расчетов пространственно-временных изменений скорости ветра в торнадо. Они проверяются с помощью данных полевых измерений в США и теория подтверждается наблюдениями.

Авторы благодарят академика Г.С. Голицына за обсуждение проблем, затронутых в статье.

### Список литературы

1. Арсеньев С.А., Шелковников Н.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 5. С. 76.
2. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Л., 1969.
3. Арсеньев С.А., Бабкин В.А., Губарь А.Ю., Николаевский В.Н. Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана. М., 2010.
4. Сноу Дж.Т. // В мире науки. № 6. С. 44.
5. Арсеньев С.А., Губарь А.Ю., Николаевский В.Н. // Доклады РАН. 2004. **396**. № 4. С. 541.
6. Губарь А.Ю., Аветисян А.И., Бабкова В.В. // Доклады РАН. 2008. **419**, № 4. С. 547.
7. Арсеньев С.А., Николаевский В.Н., Шелковников Н.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 5. С. 76.
8. Bluenstein H.B. // Weather and Forecasting. 1999. **14**. P. 558.
9. Winn W.P., Hunyady S.J., Aulich G.D. // J. Geophys. Res. 1999. **104D**. P. 22067.
10. Wurman J., Gill S. // Monthly Weather Review. 2000. **128**. P. 2135.
11. Wurman J.J., Straka E.N., Rasmussen M. et al. // J. Atmos. Oceanic Technol. 1997. **14**. P. 1502.
12. Wurman J. // Science. 1996. **272**. P. 1774.
13. Doswell-III. Atmospheric Research. 2003. **67–68**. P. 135.
14. Monastersky R. // Science News. 1999. May 15. **155**. N 20. P. 308.
15. Арсеньев С.А., Губарь А.Ю., Шелковников Н.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 2. С. 50.
16. Васильев О.Ф. Основы механики винтовых и циркуляционных потоков. М.; Л., 1958.
17. Сэффмен Ф.Дж. Динамика вихрей. М., 2000.
18. Алексеевко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. М., 2005.

### The excitation of tornado by squall storm

S. A. Arsenyev<sup>a</sup>, N. K. Shelkovnikov<sup>b</sup>

Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>arsenyev@yandex.ru, <sup>b</sup>shelkovnikov@phys.msu.ru.

The theory of generation of tornado by squall storm is created. Results of the theoretical calculations are compared with observations.

**Keywords:** tornado, spout, squall storm, solitons, turbulence in troposphere, hurricane wind.

PACS: 92.60.Qx; 92.60.Fm; 92.60.Gn; 92.60.hk. 47.35.Fg.

Received 31 December 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2011).

### Сведения об авторах

1. Арсеньев Сергей Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 911-34-09, e-mail: arsenyev@yandex.ru.

2. Шелковников Николай Константинович — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; e-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru.