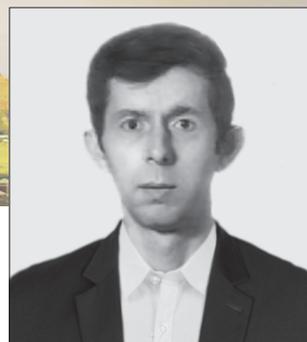


ТОРНАДО: ЕГО ЗАРОЖДЕНИЕ, СВОЙСТВА, РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ



М.Е. МАЗУРОВ,

доктор физико-математических наук

Российский экономический университет

DOI: 10.7868/S0044394819020051

В статье рассмотрены известные теории атмосферного торнадо, классификации торнадо по субстанции, из которой они состоят; по форме торнадо; по областям Земли, где они встречаются наиболее часто. Предложена математическая модель торнадо как структуры, возникающей в неоднородной активной среде, в которой возбужденные автоколебательные вогнутые спиральные автоволны (самоподдерживающиеся нелинейные волны в активных средах, которые содержат распределенные источники энергии), переносящие энергию, возбуждают вихри в материнской неактивной области, уходящей в атмосферу. Указаны основные факторы, определяющие форму торнадо. Дано пояснение некоторых специфических свойств торнадо, следующих из свойств математической модели: вращательное движение субстанции грозовой тучи вокруг основания воронки, "скачущий" характер движения "хобота" торнадо, пробивание мягкими предметами твердых.

СВОЙСТВА ТОРНАДО

Смерч, или торнадо – таинственное природное явление огромной разрушительной силы. Существует множество рассказов и описаний очевидцев, наблюдавших торнадо вблизи, имеется

множество теорий его возникновения, но ни одна из них не в состоянии объяснить всех загадок этого удивительного явления.

До сих пор нет ответов на следующие основополагающие вопросы о свойствах торнадо. Вот лишь некоторые из них:

– откуда берется энергия торнадо?

– что может быть субстанцией или материалом, из которого состоит торнадо?

– как изменяется форма торнадо после его зарождения?

– почему смерч, который во всех справочниках определяется как атмосферный вихрь, “падает” на землю с высоты?

– каково поведение торнадо при его движении?

– что представляет собой воронка торнадо? что придает ее стенкам столь сильное вращение и огромную разрушительную силу?

– почему торнадо устойчив?

– чем обусловлено свойство торнадо, которое может превращать обычные предметы в “пули”, в “осколки снарядов”, пробивающие значительно более плотные предметы?

– какие теории и математические модели торнадо известны в настоящее время? существуют ли эффективные способы уничтожения торнадо?

Постараемся ответить на некоторые из этих вопросов.

Исследовать торнадо не просто трудно, но и опасно – при непосредственном

контакте он уничтожает не только измерительную аппаратуру, но и наблюдателя. В *табл. 1* приведены параметры торнадо.

Для оценки интенсивности торнадо используется шкала Фудзиты. Улучшенный вариант ее был создан в 2007 г. и используется для оценки интенсивности торнадо в США и Канаде на основе ущерба, который они наносят. Шкала состоит из шести категорий: от EF₀ до EF₅. Шесть категорий для шкалы EF с указанием нанесенных повреждений перечислены ниже в *табл. 2* в порядке возрастания интенсивности.

ОБЛАСТИ НАИБОЛЕЕ ЧАСТЫХ ТОРНАДО И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Классическая страна торнадо – США. Например, в 1990 г. здесь зарегистрировано 1100 разрушительных смерчей.

Главной причиной, вызывающей частое появление торнадо в США, считается теплый влажный воздух с Мексиканского залива, который “сталкивается” на его территории с холодным воздухом из Канады и сухим – со Скалистых

Таблица 1

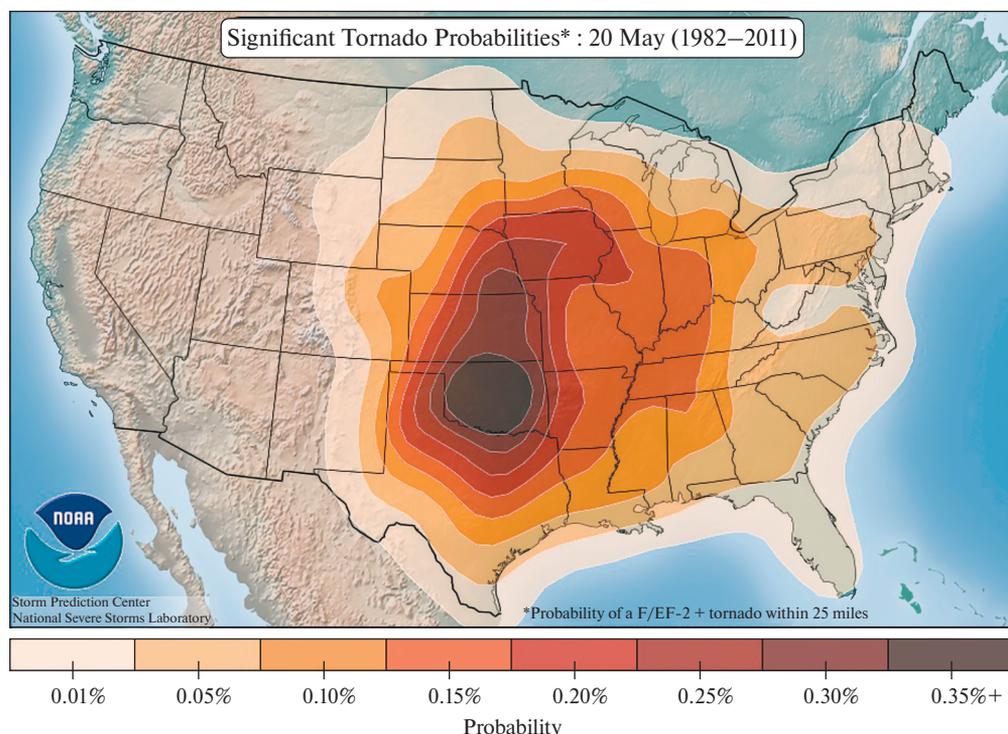
Известные ориентировочные параметры торнадо

Параметры	Минимальное значение	Максимальное значение
Высота видимой части смерча	10–100 м	1,5–2 км
Диаметр у земли	1–10 м	1,5–2 км
Диаметр у облака	1 км	1,5–3 км
Линейная скорость стенок	20–30 м/с	100–300 м/с
Пиковая мощность	–	30 ГВт
Длительность существования	1–10 мин	5 ч
Длина пути	10–100 м	100 км
Площадь разрушения	10–100 м ²	400 км ²
Скорость перемещения	0	150 км/ч
Давление внутри смерча	0,4–0,5 атм	может быть равно 0

Таблица 2

Шкала Фудзиты

Категория	Скорость ветра, км/ч	Потенциальный урон
EF0	105–137	незначителен или отсутствует
EF1	138–177	умеренный
EF2	178–217	значительный
EF3	218–266	сильный
EF4	267–322	катастрофический
EF5	> 322	полное уничтожение зданий



Карта Северной Америки, на которой показана вероятность встречаемости торнадо интенсивностью EF2 в 1982–2011 гг. на территории США. Разработана Центром предупреждения торнадо. На шкале внизу показаны цифры вероятности возникновения торнадо (По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA))

гор (между 60° и 32° с.ш.; тянутся на 4830 км с севера на юг). При таких условиях возникают многочисленные грозы, несущие в себе угрозу возникновения смерча. Самые разрушительные и смертоносные торнадо образуются

под огромными кучевыми дождевыми облаками. Они могут возникать где угодно: на западном или на восточном побережье США, а также в Канаде и других государствах. Наглядное представление о встречаемости

в США смерчей различной интенсивности дает карта, разработанная Центром предупреждения торнадо в США, где показана вероятность встречаемости смерча интенсивности EF2 по шкале Фудзиты в зависимости от широты и долготы места. В России торнадо также случаются, но гораздо реже.

Типы смерчей разнообразны, известны различные их классификации по их параметрам и свойствам. По субстрату вихря можно выделить следующие типы торнадо: атмосферные (воздушные), электрические, огненные, пылевые, водяные, снежные и др.

Рассмотрим классификацию атмосферных торнадо по форме:

- бичеподобные, тонкие, иногда извилистые;

- колоннообразные;

- бочкообразные (как правило, диаметр бочкообразных смерчей превышает полкилометра, иногда их ширина даже превышает высоту); они также называются расплывчатыми, поскольку их контур не ровный, а как бы лохматый;

- составные – совокупность нескольких (как правило, очень мощных) торнадо. Торнадо можно создавать искусственно. Такие смерчи выделяются в отдельный класс, более подробно рассмотрим его в дальнейшем. Этот класс позволяет наглядно представить механизм возникновения и свойства торнадо.

ИЗВЕСТНЫЕ ТЕОРИИ ТОРНАДО

Теорий торнадо много, перечислим некоторые из них:

- *Самоорганизация при математическом моделировании сильнонеравновесных и нелинейных процессов;*

- *Модель зарождения торнадо.* Согласно ей, важную роль в этом процессе играют особо возмущенные участки атмосферы, где искажения электрического поля достигают критических значений;

- *Разделение электрических зарядов.* В силу определенных причин, в том числе еще не до конца исследованных и непонятных, накопление электрических зарядов в атмосфере происходит неравномерно и сопровождается их разделением по полярности. Установлено, что возникновение торнадо нахо-

дится в прямой зависимости от развития исключительно мощных грозовых процессов;

- *Возникновение множества внутренних волн.* Предполагается, что существование торнадо обеспечивается множеством внутренних молний;

- *Мезомасштабной турбулентности.* В ее основу положена простая идея: малый вихрь – элемент турбулентной структуры – подчиняется собственной динамике как объект, вращающийся со своей круговой скоростью в соответствии с законом Ньютона для конечного тела. Получена 3D-визуализация, топологически эквивалентная одной из форм торнадо;

- *Газодинамическая структура смерча специалиста по газовой динамике В.С. Политова.* Основана на представлении смерча в виде закрученного потока атмосферного воздуха с осью симметрии, перпендикулярной поверхности Земли. Характерная особенность системы – возникновение вращательного движения частиц грозового облака. За счет внутреннего трения вращательное движение передается находящемуся ниже его атмосферному воздуху. В ряде других работ исследуются закрученные вихри и их приложения.

По субстрату вихря можно выделить следующие типы торнадо: атмосферные (воздушные), электрические, огненные, пылевые, водяные, снежные и др.



а



б



в



г

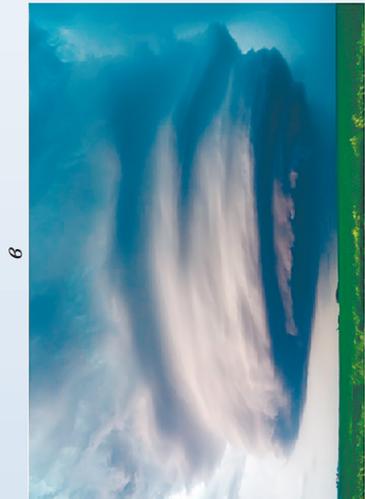


д

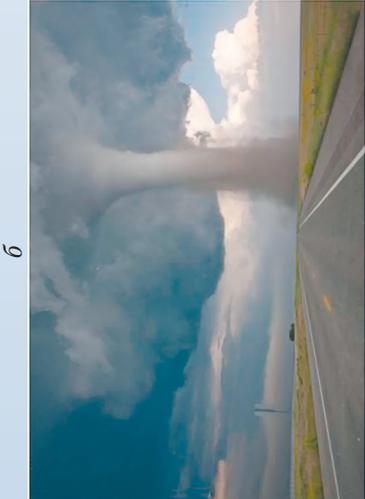


е

Виды торнадо в зависимости от источника возникновения: а) атмосферные (воздушные); б) электрические; в) огненные; г) пылевые; д) жидкостные; е) снежные. Источник сведений – наблюдения очевидцев



в



б



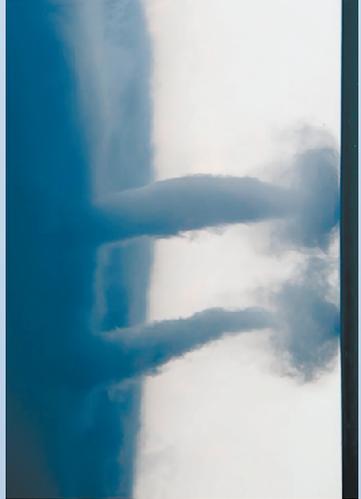
а



е



д



з

Формы атмосферных (воздушных) торнадо: а) бичеобразные, б) колоннообразные, в) бочкообразные, г) лохматые, д) составные. Источник сведений – наблюдения очевидцев

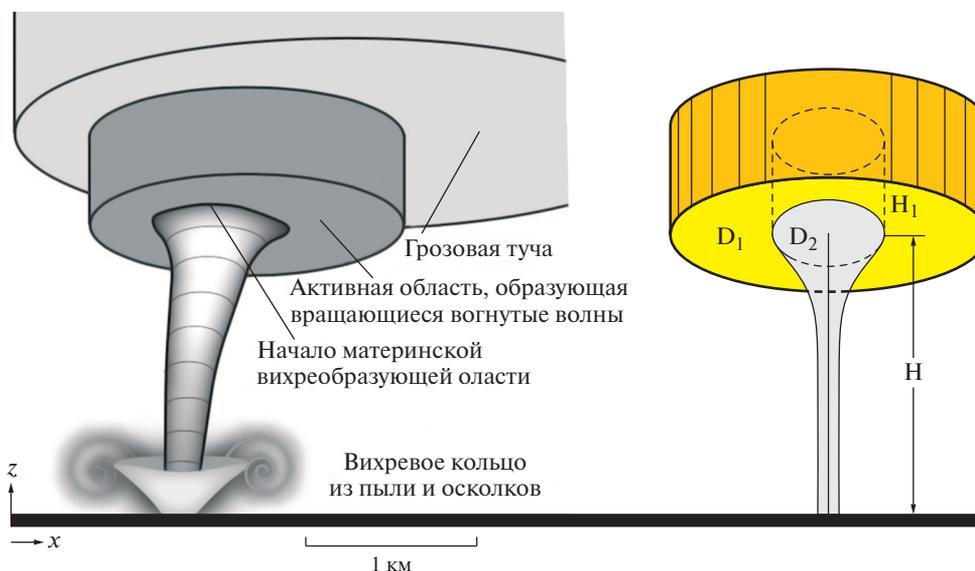


Схема торнадо: слева – устройство смерча и грозового облака; справа – предлагаемая модель. Включает активную среду в виде цилиндра диаметром D_1 и материнскую область диаметром D_2 и высотой H_1 , где происходит образование вихря торнадо. Высота активной среды от поверхности Земли равна H . (По данным автора статьи)

Структура торнадо возникает в неоднородной активной среде, в которой возбужденные автоколебательные вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию, возбуждают в изначально неактивной области вихри, которые уходят в окружающую среду. С физической точки зрения, атмосферный торнадо – автоколебательная система в активной среде грозового облака, генерирующая атмосферные вихри.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОРНАДО

Согласно определению структуры атмосферного торнадо, его специфические свойства определяются активной

средой – грозovým облаком и субстратом создаваемого вихря. Рассмотрим математическую модель активной среды торнадо. Для описания активной среды в синергетике принято использовать системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа. В качестве модели активной среды в вычислительном эксперименте были использованы уравнения Фитцхью–Нагумо:

$$\frac{dp_1}{dt} = p_1 - \frac{p_1^3}{3} - p_2 + I + D_1 \Delta p_1;$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \varepsilon(a - p_1 + bp_2) + D_2 \Delta p_2,$$

где: p_1, p_2 – переменные активации и переменные, характеризующие затухание и имеющие физический смысл плотности газовой фазы в месте расположения активной среды грозового облака; I, a, b, ε – собственные параметры уравнения Фитцхью–Нагумо: $a = 0,7$; $b = 0,8$; $I = 0,142$; $\varepsilon = 0,003$; D_1, D_2 – коэффициенты диффузии.

Вихревая воронка торнадо в рассматриваемой математической модели возбуждается вогнутыми спиральными автоволнами, переносящими энергию (сокращенно ВСАПЭ). В модели

они представляют собой периодические круговые автоколебательные автоволны во внешней активной среде. За счет связи, обусловленной вязкостью, ВСАПЭ возбуждают вихревые движения воздуха в материнской нейтральной области, представленной при моделировании в первом приближении круговым цилиндром. Так происходит образование воронки торнадо. Для математического описания образования вихревой воронки торнадо используются уравнения Навье–Стокса для описания движения вязкой жидкости и газа. Эти уравнения представляют собой систему из двух дифференциальных уравнений в частных производных: движения и неразрывности. В векторном виде для несжимаемой жидкости уравнения выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nu \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

где $\mathbf{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторное поле скоростей, p – давление, ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа, t – время, ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, \mathbf{f} – векторное поле массовых сил. В уравнения Навье–Стокса до-
бавляют краевые и начальные условия:

$$\mathbf{v}|_{\partial\Omega} = 0, \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0.$$

При численном моделировании производится сшивание решений на границе активной среды – цилиндрической области и внутренней цилиндрической области, где возникает вихревая воронка.

Конкретное решение уравнений можно получить, задав специально подобранные начальные условия или внешние воздействия. Например,

вращающаяся структура может возникнуть при наличии двух или более противоположно направленных ветров, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Начальные условия для возникновения волн, движущихся по кругу, имеют много общего с процессами в активных средах различной природы (том числе в активной среде грозового облака).

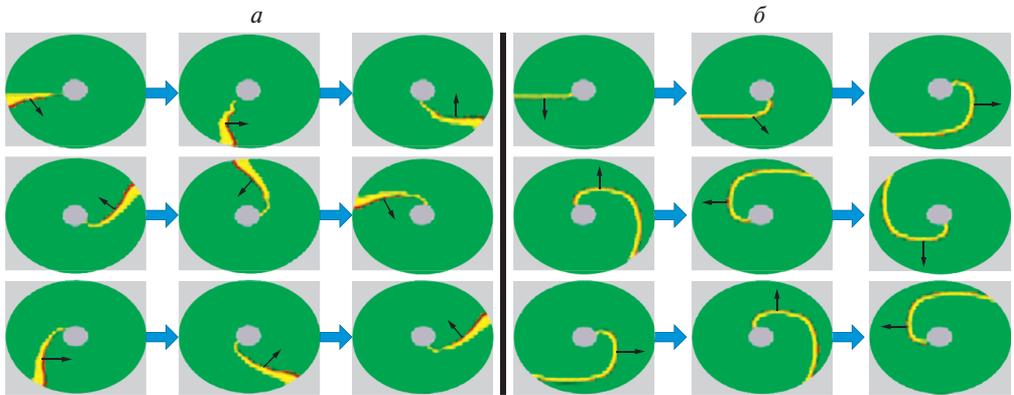
ВОГНУТЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ АВТОВОЛНЫ, ПЕРЕНОСЯЩИЕ ЭНЕРГИЮ

Полагаем, что активная среда грозового облака представляет собой кольцо высотой H_1 , с внутренним диаметром D_2 и наружным – D_1 . Расстояние активной среды грозового облака до земли равно H . Эти допущения делаются для упрощения расчетов ВСАПЭ в активной среде, которые сводятся к двумерному случаю. Формирование ВСАПЭ с использованием моделирования автоволновых процессов в активных средах рассмотрено в работах автора статьи. Образование ВСАПЭ в однородной двумерной области невозможно. Для конкретной реализации

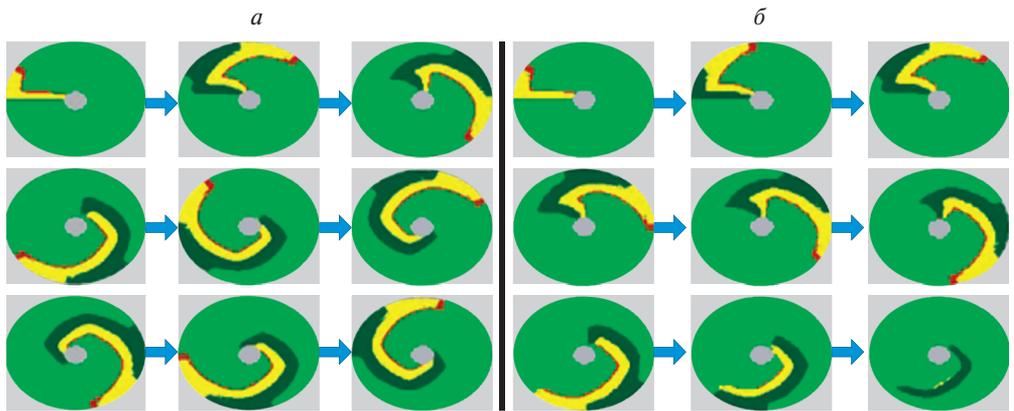
ВСАПЭ применялась неоднородная круговая область, разбитая на кольца. В качестве активной среды для генерации ВСАПЭ была использована система из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных

в частных производных, а именно уравнения Фитцхью–Нагумо. Эти уравнения наиболее подходят для концептуального исследования спиральных автоволн. Параметры уравнения Фитцхью–Нагумо в каждом кольце подбирались таким образом,

В качестве активной среды для генерации ВСАПЭ была использована система из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных – уравнения Фитцхью–Нагумо



Вогнутая автоволна в модели Фитцхью–Нагумо (а). Для сравнения: выпуклая автоволна в однородной круговой области, распространяющаяся из центра области (б). (По данным автора статьи)



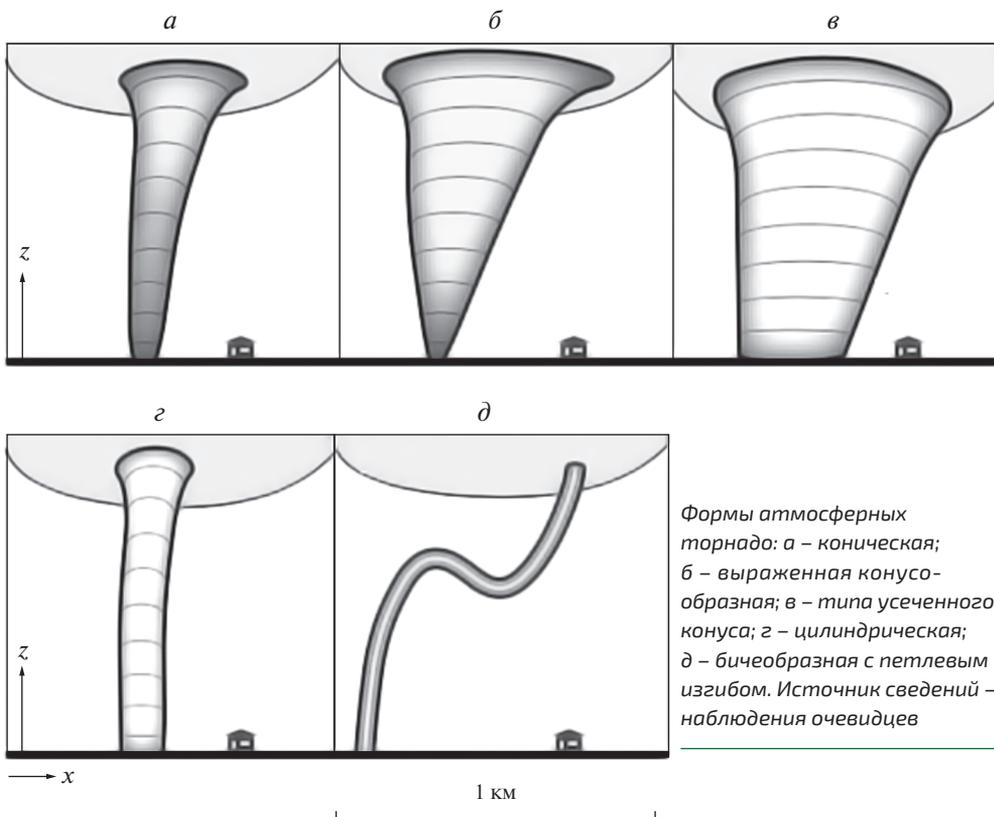
Результаты вычислительного моделирования вогнутой спиральной автоволны, описываемой уравнениями Фитцхью–Нагумо и переносящей энергию в активной среде: а – использованы связи не только с ближайшими соседями, но и с дальними – тремя ближайшими; б – случай расположения активной среды по краю области (внутри – среда невозбудимая, поэтому возбуждение возникает и затухает с краю). (По данным автора статьи)

чтобы обеспечить необходимую для образования вогнутой автоволны скорость их распространения. Эта скорость должна убывать по мере уменьшения наружного и внутреннего диаметров кольца.

Приведем результаты вычислительного эксперимента по созданию ВСАПЭ в кольцеобразной неоднородной активной среде с помощью уравнений Фитцхью–Нагумо. Коэффициенты

диффузии были выбраны для кольцевых областей таким образом, что скорость распространения автоволны убывала от периферии к центру.

Для получения различных скоростей распространения автоволны в широком диапазоне можно использовать связи не только с ближайшими соседями, но и с дальними. Регулирование скорости распространения автоволны осуществляется за счет изменения



коэффициентов связи с тремя ближайшими соседями. Получены результаты вычислительного моделирования по созданию вогнутой спиральной автоволны.

ФОРМЫ И СВОЙСТВА ВОЗДУШНЫХ ТОРНАДО

Из рассмотрения свойств приведенной выше модели торнадо следует возможность существования большого разнообразия форм атмосферных смерчей. Форма торнадо в значительной мере определяется диаметром активной образующей области (изначальной области в предположении ее круговой формы), ее толщиной по вертикали и круговой скоростью вращения на окружности срыва вихревого воздушного потока. На образование фор-

мы торнадо оказывают влияние и другие параметры, которые мы не будем рассматривать. Отметим здесь лишь количество влаги в материнской области и температуру.

Торнадо – это часть грозового облака, которая быстро вращается вокруг вертикальной оси за счет образования ВСАПЭ. Сначала вращение видно только в самом облаке, затем часть его распространяется вниз в виде вихревой воронки, которая образуется от вращения ВСАПЭ, а затем постепенно удлиняется, уходит вниз и встречается с поверхностью земли уже в виде громадного столба – “хобота”, имеющего внутри сильное разрежение. Формы вращения активной среды, где реализуются автоколебательные движения типа вогнутых волн, запечатлены на фотографиях торнадо, сделанных очевидцами.



Виды вращательного автоколебательного движения типа ВСАПЭ в грозном облаке: а – начальная стадия вращательного движения активной среды; б – активная среда, создающая вихревую воронку торнадо большого диаметра; в, г – вращение активной среды, создающее вихревую воронку конусообразной и колоннообразной форм. Источник сведений – наблюдения очевидцев

Дадим объяснение некоторых свойств торнадо на основе использования предлагаемой математической модели.

Энергетические свойства торнадо. В модели энергия торнадо черпается из энергии активной среды, в которой возникают ВСАПЭ. Территориально это активная среда, окружающая основание торнадо, источник ее энергии – материнское облако. Насыщенность энергией обусловлена конденсацией паровой смеси, из которой состоят облака. При конденсации паровой смеси выделяется огромное количество энергии. Расчеты показывают, что эта энергия составляет величину, сравнимую с энергией, которая выделяется при взрыве атомной бомбы, – в 10 кт.

Свойства движения торнадо. К одним из загадочных свойств описываемого

явления относится “прыгающий” характер торнадо – он движется как скачущий футбольный мяч. Как утверждают очевидцы, смерч может “перескочить” через какой-то участок движения, оставив его в полном покое и сохранности, и совсем рядом с грохотом обрушиться на соседний участок, нанеся ему огромный ущерб. Согласно рассмотренной модели, торнадо – это устойчивая, обладающая определенной механической прочностью структура. Ввиду своих больших размеров она способна начать перемещаться даже от небольших возмущений внешней окружающей среды и поэтому может вести себя как прыгающий футбольный мяч. Как механическую прочную структуру ее можно также сравнить с морским судном, плывущим по волнам: корабль

колеблется, колышется в вертикальной и горизонтальной плоскостях; точно так же “колышется” торнадо.

Проникающие свойства. Другая непонятная особенность торнадо – пробивание более мягкими предметами относительно твердых (соломинка проходит сквозь доски, щепки протыкают ствол дерева, доска проходит сквозь стену дома) – получает объяснение в рамках принятой модели.

Огромная скорость движения потоков воздуха дает смерчу возможность совершать многие из аномальных действий. Потоки воздуха придают предметам околосветовую скорость. Как известно, в этом случае даже мягкая свеча может “проткнуть” доску, не сломавшись.

В связи с этим представляет интерес эксперимент, который демонстрировали студентам в некоторых европейских учебных заведениях. Он заключался в том, что из ружья выстреливали стеариновой свечой в доску толщиной 1 см. К изумлению зрителей мягкий снаряд легко проходил сквозь древесину. Секрет успеха объясняется скоростью прохождения свечи, не оставляющей времени для ее изгиба и деформации. Поэтому воздействие урагана всегда опасно для жизни, так как куски летящих предметов (даже фрагментов соломы, мелких камней) могут глубоко проникать в тело.

Приведем еще несколько необычных свойств торнадо. Ураганный ветер может “вбирать в себя” воду и ее обитателей, обрушивая затем дождь “из рыб и лягушек”. В первой половине прошлого века в США торнадо “поднял” и “швырнул” прочь локомотив с вагонами, общий вес которых достигал 83 т.

Предсказать возникновение торнадо невозможно, однако они никогда не возникают в солнечную

безоблачную погоду. В среднем по суше торнадо “передвигается” со скоростью около 50 км/ч, но однажды в США смерч, “прошедший” по трем штатам, за 3 ч преодолел 350 км, то есть он “двигался” со скоростью около 120 км/ч. Самые мощные торнадо чаще всего состоят из нескольких второстепенных смерчей, вращающихся вокруг главного. В результате сильных пожаров может возникать такое ужасающее явление, как огненный смерч: температура в центре смерча достигает 1000 °С, и его невозможно потушить, пока в этой зоне не сгорит все, что может гореть.

СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ТОРНАДО

Для людей, которые живут в зоне возникновения торнадо и подвергаются их разрушительному действию, главным практическим результатом был бы найденный способ предотвращения или уничтожения смерчей. Поскольку материальным и энергетическим “источником” торнадо служит грозовое облако, то его уничтожение предотвратило бы и возникновение торнадо. Обработка смерчевого облака подходящим реагентом, вызывающим конденсацию влаги

Выстреливаемый из ружья мягкий снаряд из стеарина легко проходит через деревянную доску толщиной 1 см. Рисунок заимствован из интернета



и выпадение дождя, обеспечило бы достижение цели. Однако потребность в обработке больших объемов облаков – потенциальных родоначальников торнадо – может оказаться существенным недостатком предлагаемого способа.

Из рассмотренного описания видно, что воронка смерча, через которую осуществляется передача энергии грозового облака, – самая “нагруженная” часть торнадо. Разрушение воронки приведет к ликвидации крутящего момента, а следовательно, и к остановке и исчезновению вихря. Для доставки топлива и взрывчатого вещества в устье воронки можно воспользоваться

транспортирующей способностью смерча: он сам “всосет” и “поднимет” нужное вещество – нам достаточно осуществить дистанционное воспламенение или взрыв. К сожалению, в настоящее время эффективные методы борьбы с торнадо практически не реализованы.

Список рекомендуемой литературы:

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури, смерчи. М.: Наука, 1969.
2. *Наливкин Д.В.* Смерчи. М.: Наука, 1984.
3. *Меркулов В.И.* Гидродинамика знакомая и незнакомая. М.: Наука, 1989.
4. *Мучник В.М.* Физика грозы. Л.: Гидрометеоздат, 1974.

Южные ночи

ЕЖЕГОДНЫЙ СЛЕТ ЛЮБИТЕЛЕЙ АСТРОНОМИИ

ЛЕТНИЙ ЗАЕЗД

20 июня – 13 июля

ОСЕННИЙ ЗАЕЗД

13 сентября – 5 октября

ПРОЖИВАНИЕ НА ТЕРРИТОРИЯХ КрАО

Знакомство с небом, семинары, основы астрономии, практика в астрофотографии, экскурсии по телескопам КрАО, наблюдения в телескопы, а также теплое море, дружный коллектив, незабываемый отдых!

Персеиды
в КрАО

4 – 11 августа

Встречайте главный звездопад года в знаменитой обсерватории и в отличной компании!

www.astrofest.ru

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ОТДЫХ В КРЫМУ



Реклама

Астрофест
астрономические мероприятия

www.astro-nochi.ru

тел. +7 (915) 142-4867