

Торнадо, или СМЕРЧ

Кандидат
физико-математических
наук

В.Д.Пудов,
Институт
экспериментальной
метеорологии

Кто не слышал о разрушительных атмосферных вихрях — торнадо! Гигантский «хобот» или тонкая спираль в жаркое летнее время неожиданно опускается из мощных облаков к земной или водной поверхности. Диаметр хобота может меняться от десятков до сотен метров, а скорость вращения воздуха достигает более сотни метров в секунду. В таблице 1 приведена классификация торнадо по их интенсивности.

Таблица

F-шкала, разработанная в 1987 году американским ученым Теодором Фуджитой, служит основой для классификации торнадо

Класс по F-шкале	Скорость ветра, м/с	Ширина следа, м	Средняя длина пути, км	Среднее время «жизни», мин.
F0	19–32	5–15	1,9	2,4
F1	33–50	16–50	4,2	5,2
F2	51–70	51–160	8,7	10,8
F3	71–92	161–508	16,1	20,0
F4	93–116	547–1448	43,8	54,4
F5	117–145	1609–4989	57,1	71,0

Какова разница между интенсивностью F0 и F5? При интенсивности F0 (а это уже сильный шторм по шкале Бофорта) ветер ломает и срывает рекламные щиты или валит некоторые деревья. При F5 торнадо наносит невероятный ущерб. Даже самые прочные дома могут быть разрушены или полностью сметены с лица земли. Автомобили поднимаются в воздух на высоту до 100 м, скручиваются и разламываются металлические опоры линий электропередачи. Такие торнадо могут разрушить город, убить десятки людей и нанести миллиардные убытки. Например, в мае 1999 года по южным и центральным штатам США пронеслось 10 торнадо, которые погубили 53 человека. Из

них только в городе Оклахома 3 мая погибло 35 человек, и было разрушено более 10 тысяч домов. В США такие разрушительные торнадо зарождаются в штатах центральной и южной части страны. Так называемая «аллея торнадо» простирается от побережья Мексиканского залива в штате Техас до запада Айовы, охватывая все центральные штаты страны.

В России смерчи также зарождаются летом, особенно часто — на юге страны и вблизи водоемов. Однако до категорий F4 и F5 они дорастают редко. Один из примеров отечественного торнадо — июньский феномен 1984 года. Смерч, по-

лучивший название «Ивановский», зародился в 15 км южнее города Иваново и зигзагообразно прошел около 100 км. По пути он уничтожил 680 жилых домов, 199 объектов промышленного назначения, 20 школ, турбазу «Луневое» и многое другое. Погибло более 20 человек...

Эту печальную статистику можно продолжить, однако нас больше интересует, откуда берется смерч и как он работает.

Судьба летнего облака

Существует множество интересных гипотез образования катастрофических смерчей или торнадо, тем не

менее среди ученых до сих пор нет единого мнения о физике этого феномена природы. Более того, некоторые идеи прямо противоположны друг другу, поскольку физика явления до конца не ясна, весьма затруднено и математическое моделирование зарождения торнадо. В этой статье мы попытаемся обобщить все, что нам известно о физике формирования смерча, его структуре и «поведении», дополнив это некоторыми новыми идеями. Возможно, они позволят объяснить те моменты в эволюции смерча, которые до сих пор остаются загадкой.

В летнее, теплое время мы часто наблюдаем красиво освещенные солнцем отдельные кучевые облака. Их называют конвективными, потому что они формируются восходящими теплыми и влажными потоками воздуха (конвекцией). Высота этих облаков может достигать более 10 км. И каждое из них представляет собой сложную термо- гидро- электрическую машину. И вот почему.

Атмосфера Земли весьма устойчива к различного рода возмущениям, что связано с падением плотности воздуха при увеличении высоты. Однако при определенных условиях, если, например, сильно прогрета поверхность земли или воды, возникают восходящие движения теплого влажного воздуха (влажный воздух легче сухого). Когда влажный воздух достигает так называемого уровня конденсации, водяной пар, находящийся в нем, конденсируется. Для средних широт высоту уровня конденсации можно грубо оценить с помощью простой формулы: $H = 22(100 - f\%)$, где H — уровень кон-

1
Так выглядит торнадо категории F4.





денсации в метрах, а $f\%$ — относительная влажность воздуха. При этом образуются капли воды и выделяется большое количество теплоты (2,5 кДж тепловой энергии с каждого грамма пара), которая повышает температуру воздуха и делает его еще более легким. Возникает ускоренное движение вверх. При конденсации начинает формироваться кучевое облако. В силу неразрывности потока в облако поступает все большее количество влажного воздуха. Процесс ускоряется, облако быстро увеличивается. Поднимающиеся вверх капли воды и остатки несконденсированного пара достигают уровня, на котором температура окружающего воздуха становится отрицательной. Капельки воды замерзают, а остатки переохлажденного пара сублимируют, то есть замерзают, минуя стадию конденсации. При замерзании и сублимации вновь выделяется тепло (так, при сублимации каждый грамм пара выделяет более 2,8 кДж).

При фазовых переходах образуются электрические заряды, а мощная турбулентность внутри облака их усиливает. Напряженность электрического поля внутри облака достигает 10^5 В/м и более (заметим, что при напряженности 10^6 В/м уже образуются молнии). Кристаллики льда — проще говоря, снежинки — приобретают положительный заряд. Плотность количества электричества может достигать 50 нК/м³ и более, пишет доктор физико-математических наук Л. Т. Матвеев в своем «Курсе общей метеорологии».

Поскольку влажный воздух продолжает прибывать, и облако, и отдельные кристаллы льда продолжают расти. Чересчур выросшие снежинки под действием силы тяжести начинают падать, причем восходящий воздух вытесняет их на край облака. При падении часть снежинок слипаются, образуя весьма крупные и тяжелые массы льда. Достигая положительных температур воздуха, снежинки и слипшиеся массы льда тают (при этом они поглощают столько же тепла, сколько выделили при замерзании), а образующиеся капли воды приобретают отрицательный электрический заряд. Часть мелких капель при падении коагулируют, то есть сливаются в более крупные, и в виде дождя выпадают на землю, а не растаявшие массы льда вы-

падают в виде града. Оставшиеся мелкие капли вновь вовлекаются в вертикальный подъем. Процесс образования облака продолжается до тех пор, пока приток влаги превышает количество осадков и (или) пока облако не будет разрушено ветром или грозowymi разрядами накопленного электричества.

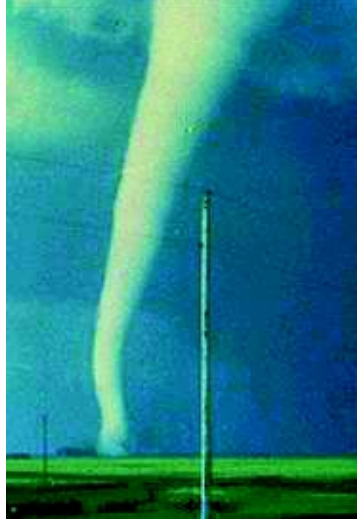
Многочисленные исследования грозовых облаков с помощью самолетов и локаторов позволили установить обобщенную схему электрической структуры грозового облака. В верхней его части преобладают положительные заряды, связанные с отдельными льдинками. В нижней части на каплях воды сосредоточены в основном отрицательные электрические заряды. Примерно так формируется отдельное конвективное облако. При этом необходимо подчеркнуть, что температура и влажность внутри облака выше температуры и влажности окружающего его воздуха, то есть внутриоблачное атмосферное давление меньше. Но из отдельного, даже очень мощного кучевого облака исключительно редко формируется смерч. Тем не менее нам приходилось видеть с борта научных судов, как в тропиках над океаном из отдельных конвективных облаков образовывались смерчи. Они опускались до поверхности океана и достаточно быстро исчезали. Время их жизни не превышало 10–15 минут.

Жизнь торнадо

Все сказанное выше — всего лишь предлюдия к истории о том, как формируется мощный смерч — торнадо. Давно известно, что при столкновении северных холодных воздушных масс с южным, теплым и влажным воздухом образуются шквалистые и даже ураганные ветры. Холодный, сухой воздух, накатываясь на теплый и влажный фронт, создает ту самую неустойчивость, о которой шла речь выше. В области фронта возникают мощные турбулентные вихри различных масштабов. В электростатическом поле, образованном разными воздушными массами, движение заряженных частиц (водяных капель, разного рода примесей и пылинок) в турбулентных вихрях генерирует магнитное поле. Его ротор напряженности, в соответствии с законом Максвелла, пропорционален

скорости изменения электрического поля. В зависимости от объемного распределения электрических зарядов в облачной системе напряженность магнитного поля становится больше в тех или иных турбулентных вихрях, усиливая и стабилизируя их. При этом будут усиливаться и развиваться вихри различного масштаба, ориентированные как горизонтально, так и вертикально. Из всего многообразия вихрей начинают развиваться те, в которых скорость воздуха (частиц) имеет составляющую по нормали к плоскости вращения вихря. В этих случаях возникает спиральность, позволяющая вихрю захватывать все новые объемы воздушного пространства с заряженными частицами. В поле спиральности начинает работать электромагнитное динамо, которое порождает силу, направленную по касательной к вращению вихря — именно она стабилизирует и усиливает вихрь. Возникает положительная обратная связь между интенсивностью вихря и индуцированным магнитным полем. По-видимому, не случайно в США в годы активного Солнца, когда магнитное поле Земли испытывает сильные возмущения, количество торнадо возрастает до 1200. (В обычные годы наблюдается в среднем около 900 торнадо.)

Осадки в виде дождя или снега захватываются горизонтальными вихрями. Под действием центробежных и электромагнитных сил они распределяются по краям главного вихря. Тот увеличивается в диаметре, а давление внутри него падает. На периферии образуется настоящая стенка, состоящая главным образом из воды, заряженной отрицательно. Силы электрического взаимодействия между водной стенкой и верхней частью положительно заряженного облака стремятся противодействовать силе тяжести, но в какой-то момент она перетягивает, и вихрь прогибается вниз, образуя воронку (фото 2). При этом удельная плотность стенки уменьшается, и по закону сохранения момента увеличивается скорость ее вращения. Центробежные силы вновь стремятся расширить воронку. Это ведет к уплотнению стенки вихря и к дальнейшему падению давления в его центре. Удельная плотность стенки может достигать, по разным источникам, от 7–10 до



50 кг/м³ (что в десятки раз больше плотности воздуха) при толщине всего в 3–5 метров. А скорость вращения бывает огромной (см. табл.)! Формируется так называемый хобот торнадо. Это конический или цилиндрический вихрь диаметром в несколько десятков, иногда сотен метров с плотными стенками, внутри которого давление существенно ниже (0,5–0,6 атмосферы), чем за его пределами.

Высота такой гибкой, как у пылесоса, трубы (фото 3) может достигать десяти и более километров, то есть вихрь может пронизывать «материнское» облако. При этом за счет тепла конденсации и тепла, выделяемого при замерзании капель, температура воздуха внутри вихря существенно выше температуры во вне. Поэтому снизу в него устремляется окружающий воздух, как в вытяжную трубу. Только масштабы другие — мощь торнадо несоизмерима с трубой в котельной. В верхние слои холодного сухого воздуха поступает все больше теплого и влажного воздуха — тем самым увеличивая приток энергии в торнадо и соответственно количество осадков и электрический заряд в облачной системе. По свидетельствам очевидцев, внутри воронки постоянно сверкает молнии.

Работает положительная обратная связь. Вертикальная скорость воздуха внутри трубы может достичь скорости звука! Таким образом — под действием центробежных, электрических, гравитационных сил и сил градиента давления — формируется торнадо. Его дальнейшее поведение зависит от множества факторов.

Прежде всего, вероятно, от напряженности электрического поля поверхности Земли. Известно, что наличие теллурических токов в верхних слоях Земли создает различные по величине и знаку потенциалы на ее поверхности. При этом известно также, что плотность объемных теллурических токов зависит от проводимости поверхности. Поэтому у берегов водоемов, где проводимость резко возрастает за счет влаги, возрастают и электрические потенциалы. Причем эти потенциалы в основном несут положительный заряд. Однако вдали от водоемов,

на поверхности суши, где проводимость на несколько порядков меньше, чем у влажной почвы, может формироваться и отрицательный потенциал.

Таким образом, бывают участки поверхности Земли как с положительным, так и с отрицательным потенциалом. Знаком потенциала определяется и поведение торнадо. К участкам с положительным потенциалом хобот торнадо притягивается и достигает поверхности — это поверхность водоемов и влажной земли. Вот почему путь торнадо часто пролегает вдоль водоемов или прямо над ними. На суше, где потенциал отрицательный, хобот торнадо втягивается; проходя над такими участками, торнадо почти не наносит ущерба.

Силы торнадо

При формировании торнадо первостепенную роль играют силы тяжести и силы электрического взаимодействия между верхней, положительно заряженной частью облачной системы и первоначальным вихрем, содержащим много отрицательно заряженной воды. Например, при радиусе первоначального турбулентного вихря 2 километра и высоте облачной системы 10 километров суммарное (разнополярное) количество электричества составит 6,3 Кулона. Это примерно в пять раз меньше, чем заряд, разряжаемый одной молнией за 0,2 с. Сила электростатического взаимодействия при средней напряженности электрического поля в облаке 5·10⁶ Вольт на метр составит 3,15·10⁷ Ньютона. Этого достаточно, чтобы удерживать в формирующемся вихре более трех тысяч тонн воды. И лишь когда эта масса за счет все новых поступлений из облачной системы будет превышена, сила тяжести начнет вытягивать вихрь вниз и формировать хобот торнадо.

Торнадо, хобот которого достиг земной поверхности, опасен для сооружений, прежде всего из-за механического удара, низкого давления и больших вертикальных скоростей внутри его

хобота. Так, при давлении внутри хобота, равном половине атмосферного, изнутри на стены домов, которые накроет торнадо, будет действовать давление 5·10⁴ Н/м², то есть на каждый квадратный метр их поверхности давит сила в 5 тонн. Под действием такой силы любое закрытое помещение может взорваться изнутри.

При ударе о преграду хобота торнадо импульс силы пропорционален квадрату скорости массы стенки воронки торнадо 5 метров и ее плотности 10 кг/м³, скорости вращения стенки 140 м/с и скорости перемещения торнадо 10 м/с давление на неподвижную преграду составит около 2·10⁵ Н/м², то есть каждый квадратный метр поверхности преграды получит удар в 20 тонн и продолжительностью в полсекунды. Это очень внушительный импульс силы!

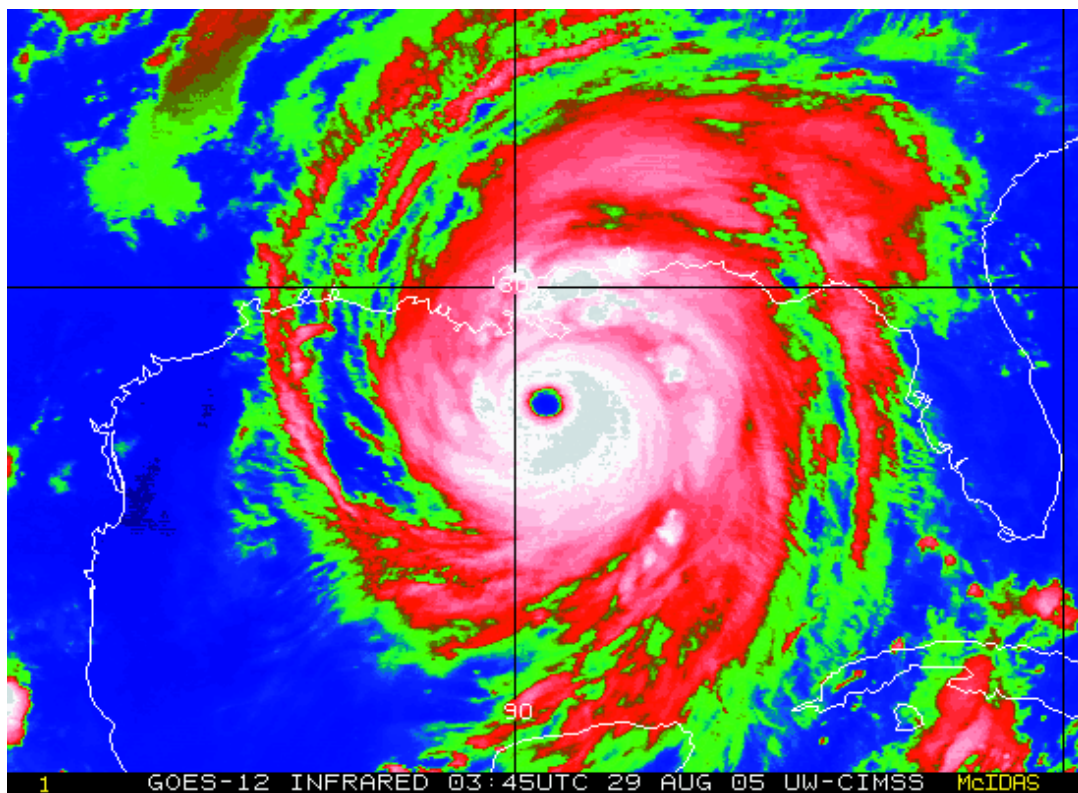
Внутри воронки, как мы уже знаем, вертикальная скорость может достигать нескольких сот метров в секунду. Такой воздушный поток способен поднимать весьма тяжелые предметы, но это зависит от площади сечения того или иного объекта. Известен случай, когда торнадо поднял целый вагон со 117 пассажирами — это около 80 тонн.

Следующая опасность торнадо — ливни. Их интенсивность бывает настолько велика, что они вымывают каналы глубиной до 1,5 метров! В США такие ливни называют лопнувшими облаками. Потоки воды сметают все на своем пути.

И пожалуй, последняя из невзгод, которые приносит торнадо, — это град. Так, с Ивановским смерчем 1984 года выпал град размером с грецкий орех. Известны случаи, когда масса градин достигала 1 кг!

Что еще можно прочитать о смерчах:

1. Кушин В. В., Смерч. М.: Энергоатомиздат. 1993.
2. Гришаев А.А., Некоторые вопросы физики циклонов и торнадо, 2002; см. по адресу: <http://newfiz.narod.ru>.
3. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1984.



Инфракрасный снимок урагана «Катрин» перед выходом его на сушу (<http://www.cimss.ssec.wisc.edu>). Хорошо виден «глаз» урагана диаметром около 100 километров. Пройдя полуостров Флорида и выйдя на перегретые воды Мексиканского залива 26 августа, ураган начал резко усиливаться. 28 августа он достиг пятой, последней стадии по классификации интенсивности ураганов. Давление в его центре упало до 902 миллибар (заметим, что нормальное атмосферное давление составляет 1010–1012 миллибар). Скорость ветра превысила 60 метров в секунду!



«Катрин» — разрушительница

ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Торнадо порой служат спутниками значительно более мощных атмосферных катастроф — ураганов. Так, ураган «Эльма», прошедший в октябре этого года по Мексике и Флориде, породил несколько торнадо, один из которых слегка повредил космодром на мысе Канаверал. А последняя из крупных катастроф — вызванное ураганом «Катрин» затопление Нового Орлеана в сентябре 2005 года. А через пару недель там же, в Мексиканском заливе, бушевала «Рита». Такие мощные ураганы в Атлантике наблюдаются исключительно редко. До «Катрин» и «Риты» за последние 65 лет на побережье США вышли только два урагана пятой категории. Это «Камилла» (1969) и «Эндрю» (1992).

Почему же эти монстры, как амазонские питоны, периодически вползают из Атлантики именно в Мексиканский залив? Главная причина беснования ураганов в заливе — сильное загрязнение поверхности воды различными поверхностно-активными веществами. В первую очередь, конечно, нефтяной пленкой: в Мексиканском заливе много действующих нефтяных вышек. Во вторую,

самая полноводная река США — Миссисипи — впадает в Мексиканский залив. А она собирает поверхностно-активную грязь (различные стиральные порошки, мыла и другие химические вещества) практически со всей страны. Они загрязняют поверхностные воды этой почти замкнутой акватории. А ведь мыльная или нефтяная пленка толщиной всего в 20–30 А, уменьшают испарение на 20 и более процентов. Дело в том, что они гасят капиллярное волнение (рябь). Уменьшается площадь воды, контактирующей с атмосферой, и снижаются потоки тепла и влаги от вод залива в атмосферу. Тепло накапливается. Воды Мексиканского залива перегреваются: глубина верхнего квазиоднородного слоя превышает 100 метров при температуре около 30°C! Аналогичные акватории есть и в Тихом океане — так называемое «гнездо» тайфунов в северо-западной части Тихого океана (Филиппинское море), и на востоке — вблизи берегов Калифорнии. Однако в этих акваториях аномальное теплосодержание вод определяется не только загрязнением, но и их динамикой (течениями).

Что же касается главной жертвы «Катрины», Нового Орлеана, то здесь большую роль сыграло низкое давление в центре вихря. Город расположен отнюдь не на берегу Мексиканского залива, а в 60 км от него, на реке Миссисипи. Несколько десятков километров дамб защищают Новый Орлеан от вод близлежащего озера Понтчартрейн. Как пишет американская печать, сквозь бреши в разрушенных дамбах из этого озера ринулась вода и затопила город. Но в таком случае уровень затопления не должен был превышать двух метров, а он достигал 6–8 метров. Есть все основания полагать, что город затопили воды Миссисипи. И вот почему. Прямо на устье Миссисипи вышел «глаз» «Катрин», который двигался на север, фактически вдоль реки. А в «глазе» урагана уровень поверхности воды поднят на столько, на сколько меньше давление атмосферы в нем по сравнению с окружением. Это разница более чем в 110 миллибар! То есть в «глазе» урагана, диаметр которого почти сто километров, уровень воды на метр и более превышает окружающую водную

поверхность. И такой водяной горб заблокировал течение почти цунами. Получилось одиночную волну двигал «глаз» урагана. Расход воды в Миссисипи составляет 19 000 кубических метров в секунду. Легко подсчитать, что за 6–8 часов движения урагана вверх по течению реки воды Миссисипи зальют площадь в 100 квадратных километров высотой от 4,1 до 5,5 метров. Вот основная причина затопления города. Примерно так же ветер нагоняет воду в Финский залив и, далее, в Неву, после чего случаются наводнения Санкт-Петербурга. Конечно, осадки и прорывы дамб ухудшили участь Нового Орлеана. Но именно подобное маловероятное совпадение перечисленных выше событий утопило этот красивый и крупный город. К сожалению, пока наука не может предложить надежных методов защиты от подобных природных явлений. Человеку есть над чем поломать голову в поисках противодействия с такими явлениями природы или хотя бы их заблаговременного и точного прогноза.

В. Д. Пудов