

# ТОРНАДО КАК КОЛЛЕКТИВНЫЙ ВТОРИЧНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ $\beta^-$ -РАСПАДЕ ЯДЕР КОРОТКОЖИВУЩИХ $\beta^-$ -АКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Ю.Л. Ратис, И.А. Селезнева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
Институт систем обработки изображений РАН

## Аннотация

В работе дано подробное обоснование гипотезы о радиоизотопной природе торнадо. Разработан математический аппарат для описания так называемого «невидимого торнадо», отвечающего за образование кругов на полях. Разработанный аппарат полностью пригоден и для классического торнадо. Различие состоит только в том, что в классическом торнадо отрицательно заряженная воздушно-капельная смесь вращается вокруг положительно заряженного ядра торнадо, а в «невидимом торнадо» – наоборот.

## Введение

Торнадо относится к числу наиболее грозных атмосферных явлений. Различные аспекты проблемы этого грозного атмосферного явления изучались на протяжении последних столетий. Результаты наблюдательных и теоретических исследований этой проблемы представлены в многочисленных работах (см. например [1-12, 17] и ссылки в них). Ведущие специалисты в области физики атмосферных явлений объединены международным центром торнадо и тайфунов во главе с известным метеорологом Теренсом Миденом ([terence.meaden@torro.org.uk](mailto:terence.meaden@torro.org.uk)).

Однако одной из основных проблем, сопряженных с задачей создания физической теории торнадо, является то, что ни одна из существующих моделей торнадо не объясняет основных его свойств. В частности, во всех перечисленных выше работах (за исключением работы [17]) отсутствуют реальные механизмы подпитки торнадо энергией. Если верить литературным данным, то остается необъяснимым наличие внутри торнадо мощных электрических полей. Ожидает детального анализа свойство самосветимости торнадо, а также тот факт, что от столба торнадо отлетают шаровые молнии. Загадкой для большинства физиков и метеорологов остается и многое другое, в частности, величина всасывающего эффекта торнадо.

Целью настоящей работы является обоснование гипотезы о радиоизотопной природе торнадо и водяных смерчей. Последние замечательны тем, что имеют высоту до 1,5 километров, что соответствует перепаду давлений в 150 атмосфер, и никаким образом не могут быть объяснены наличием градиентов давления и температуры в атмосфере.

## Гипотеза о радиоизотопной природе торнадо

В работах [13-24] была создана радиоизотопная теория шаровой молнии, которая полностью объясняет все ее эмпирические свойства и согласуется как с наблюдательными, так и с экспериментальными данными. В этих работах был открыт и исследован новый тип цепных реакций – цепные субатомные реакции индуцированного  $\beta^-$ -распада в связанное состояние. Для этих реакций характерен энергетический выход, на три-четыре порядка больший, чем для химических реакций, но на три порядка меньший, чем для ядерных реакций. Поэтому все атмосферные процессы, не вписывающиеся в общепринятые представления с точки зрения закона сохранения энергии, следует проверять на участие в них субатомных процессов, а также процессов обычного радиоактивного распада.

В этой связи необходимо отметить, что согласно законам газовой динамики кинетическая энергия, которой обладает газовый поток, равна  $E_k = \int \frac{\rho v^2}{2} dV$ , где  $\rho$  – плотность газа,  $v$  – его скорость, а  $V$  – рассматриваемый объем. Прямая подстановка в это выражение численных значений для небольшого торнадо радиусом  $R \sim 30$  м, высотой  $h \sim 1$  км и имеющего скорость  $v \sim 200$  км/час, приводит к оценке  $E_k \sim 10^9$  Дж. Для сравнения напомним, что обычный утюг мощностью 1 кВт за 3 часа потребляет  $\sim 10^7$  Дж электроэнергии. Как раз столько энергии приходится на «рабочую» часть торнадо – первые 10-20 метров от поверхности Земли, где он и производит все разрушения. Но даже если бы вся энергия газового потока была израсходована на перемещение находящихся на земле предметов, то и тогда бы 1 гигаджоуль соответствовал энергопотреблению 100 утюгов (или 100 стиральных машин) за 3 часа. Очевидно, что сотня утюгов город разрушить не может, а торнадо – разрушает. Налицо видимое нарушение закона сохранения энергии.

Ниже мы обоснуем тот факт, что:

- За энергетику торнадо отвечает  $\beta^-$ -распад ядер радиоактивного фосфора и других короткоживущих  $\beta^-$ -активных изотопов легких химических элементов;
- За образование атмосферного вихря (смерча) отвечает  $\beta^-$ -распад ядер короткоживущих изотопов в непрерывный спектр, который приводит к пространственному разделению электрических зарядов противоположного знака.
- В области глаза торнадо находится большой по величине электрический заряд, вокруг которого вращается столб воздуха или воздушно-капельной

смеси (аэрозоля на основе радиоактивного электролита), имеющий заряд противоположного знака, и содержащий химические соединения короткоживущих  $\beta$ -активных изотопов.

В пользу такой модели распределения заряда говорят следующие аргументы:

1. Столб торнадо практически всегда спускается из огромной черной тучи.

2. Радиоизотопы содержатся в материнском грозовом облаке.

3. Пространственное разделение электрических зарядов происходит при радиоактивном распаде упомянутых изотопов.

4. Положительный электрический заряд сосредоточен в основном на ионах, образовавшихся в результате  $\beta$ -распада короткоживущих изотопов.

5. В «невидимых» торнадо (в сухом воздухе) макроскопический отрицательный заряд образует облако квазисвободных электронов, а во влажном воздухе электроны захватываются каплями воды.

6. При взаимодействии продуктов радиоактивного распада с молекулами воздуха эффективная передача энергии и импульса происходит только при ион-молекулярных соударениях.

7. При столкновении  $\beta$ -электронов с молекулами воздуха передачи энергии не происходит из-за малости массы электрона (скорость молекул практически не изменяется).

8. Наличие «глаза» торнадо свидетельствует в пользу того, что заряды противоположного знака разнесены в пространстве на значительное расстояние.

9. Электрическое поле, вызывающее закрутку воздушного потока, действует, в основном, на заряженные частицы.

10. «Крутит» только периферическую часть торнадо («хобот»).

Рассмотрим процесс образования торнадо. Предположим, что вблизи поверхности Земли образовалось радиоактивное облако, состоящее из химических соединений короткоживущих  $\beta^-$ -активных изотопов. В силу достаточно высокой радиоактивности внутри рассматриваемого облака некоторая часть газа (смесь воздуха с каплями радиоактивного электролита, аэрозоля или аэрогеля) находится в ионизованном состоянии, и представляет собой низкотемпературную плазму. Внутри облака протекает обычный  $\beta^-$ -распад. Реже возникает цепная субатомная реакция индуцированного  $\beta^-$ -распада в связанном состоянии (шаровая молния). Из-за интенсивного выброса  $\beta^-$ -электронов центральная часть радиоактивного облака (до образования торнадо) имеет положительный заряд, а его периферия имеет отрицательный заряд.

В результате радиоактивного распада в описываемом облаке образуется огромное количество атомов дочерних радионуклидов в возбужденном состоянии. «Встряхивание» электронных оболочек

при  $\beta^-$ -распаде приводит к тому, что описываемое облачко является интенсивным источником мягкого рентгеновского (жесткого ультрафиолетового) излучения, а также электромагнитного излучения в видимом и СВЧ-диапазонах. Перечисленные особенности радиоактивного облака обуславливают некоторые его необычные свойства:

1) такое облако является самосжимающимся;

2) оно является источником ионизирующего излучения;

3) чаще всего летит в направлении повышения концентрации соответствующего радиоизотопа (иногда против ветра), но на его траекторию очень сильно влияет электрическое поле Земли;

4) траектория полета облачка является случайной;

5) в некоторых случаях перемещение зоны свечения слабо связано с переносом вещества.

Если размеры облака велики, а концентрация содержащихся в нем радиоизотопов невысока, то на ионах – продуктах радиоактивного распада происходит конденсация паров воды, а электроны захватываются каплями воды (как правило, кислого электролита). Так начинается процесс формирования огромного грозового облака, служащего заготовкой для торнадо.

Если за счет флуктуаций плотности изотопов и водяных паров в грозовом облаке образуется разрыв (область, в которой влажность крайне низка), то в этом разрыве может сконцентрироваться отрицательный заряд (облако свободных электронов).

Простейшие оценки показывают, что гипотеза о том, что торнадо черпает свою энергию от радиоактивных изотопов, содержащихся в материнском облаке, не противоречит закону сохранения энергии. В самом деле. Наблюдаемые размеры материнского облака, из которого выходит столб торнадо, составляют, как минимум,  $10 \times 10$  км ( $100$  км<sup>2</sup>), а толщина его не менее 1 км. Таким образом, материнское облако имеет объем порядка ( $100$  км<sup>3</sup>). Оценки, выполненные при анализе проблемы шаровой молнии (ШМ), показывают, что для возникновения стационарного электрического разряда в воздухе необходима удельная активность  $\sim 100$  Кюри/литр. Наблюдатели неоднократно отмечали, что от «хобота» торнадо отделяются шаровые молнии. Следовательно, удельная активность материнского облака достаточно высока. Для оценок положим, что она составляет  $\sim 100$  Кюри/м<sup>3</sup>, что на 3 порядка меньше, чем в ШМ. При  $\beta^-$ -распаде 1 ядра (в непрерывный спектр) электрон уносит  $\sim 1$  МэВ энергии, которая, в конечном счете, поглощается молекулами воздуха.

Рассчитаем эффективную мощность материнского грозового облака, перемножая его объем на удельную активность и на среднюю величину полезной энергии, выделяющейся при  $\beta^-$ -распаде одного атомного ядра:

$$N = V \cdot C \cdot \langle \epsilon_{\beta} \rangle \sim 3.7 \cdot 10^{29} \text{ эВ} / \text{с}.$$

Получается, что она составляет более 10 Гигаватт. Это и есть та самая чудовищная мощность торнадо-убийцы, стирающая с лица Земли целые города. В отличие от приведенных выше газодинамических оценок, ядернофизические оценки мощности торнадо полностью согласуются с наблюдательными данными. Однако до сих пор практически нет работ (если не считать статьи [17]), посвященных анализу механизмов «перекачки» внутриядерной энергии на газодинамические степени свободы. В связи с этим возникает проблема разработки радиоизотопной модели торнадо.

На описательном уровне предлагаемая в настоящей работе модель явления выглядит следующим образом. На начальной стадии процесса в грозовом облаке образуется зародыш торнадо. Кулоновское взаимодействие притягивает положительно заряженные частицы, к отрицательно заряженным частицам. Однако наличие тангенциальной составляющей скорости приводит к закручиванию газового потока. За счет центробежных эффектов в центральной зоне торнадо создается разрежение. В результате «воздуховорот» затягивает воздушно-капельную смесь из грозового облака внутрь столба торнадо. Так образуется смерч. При этом потери энергии, которая тратится на преодоление сил трения и на перемещение предметов, захваченных воздушным потоком, компенсируются за счет энергии  $\beta$ -распада. Само же вихревое движение воздушного потока, имеющее малый радиус вращения, обусловлено электростатическим взаимодействием. Причем радиус торнадо однозначно связан с концентрацией нейтронноизбыточных радиоизотопов, поскольку именно их  $\beta$ -распад обеспечивает «подпитку» торнадо электрическим зарядом и энергией.

#### Математическая модель торнадо

Построим математическую модель «невидимого» торнадо. Модель «классического» торнадо отличается только сменой знака заряда. Будем считать, что присутствующие в торнадо положительные ионы, образовавшиеся при  $\beta$ -распаде короткоживущих изотопов, «вморожены» в газовый поток, а столкновениями электронов с молекулами воздуха в нулевом приближении можно пренебречь.

Система уравнений газовой динамики в совокупности с уравнением состояния газа имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) &= 0, \\ \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] &= \\ &= \rho \vec{g} - \nabla p + \text{Div} \mathfrak{C}' + \rho_e^+ \vec{E} + \vec{j}^+ \times \vec{B}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{v^2}{2} + e \right) \right] &= \\ &= -\nabla \left[ \rho \vec{v} \left( \frac{v^2}{2} + w \right) - \vec{v} \mathfrak{C}' - \kappa \cdot \nabla T \right] + q_{\text{eff}}. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $\vec{v}$  – его скорость,  $p$  – давление,  $e$  – плотность внутренней энергии,  $w = e + p/\rho$  – плотность энтальпии,  $\mathfrak{C}'$  – вязкий тензор напряжений,  $T$  – температура газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\mu$  – молярная масса газа,  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $\rho_e^+$  – плотность положительного электрического заряда,  $\vec{j}^+$  – ионная (конвекционная) компонента плотности электрического тока,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля,  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля,  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения.

В уравнении (1) присутствует  $q_{\text{eff}}$  – плотность мощности источников внутренней энергии, подпитывающих газовый поток:

$$\begin{aligned} q_{\text{eff}} &= \rho \vec{g} \vec{v} + \left\langle \sigma_{\beta}^{-1} j_{\beta}^2 \right\rangle_{\epsilon_{\beta}} + \\ &+ \vec{j}_{\beta} \vec{E} + \sigma E^2 + \left( \rho_e^+ \vec{E} + \vec{j}^+ \times \vec{B} \right) \vec{v}, \end{aligned} \quad (2)$$

причем  $\vec{j}_{\beta}$  – плотность  $\beta$ -тока,  $\sigma_{\beta}^{-1}$  – эффективное удельное сопротивление воздуха для  $\beta$ -электронов,  $\sigma$  – эффективная проводимость воздуха для токов, создаваемых электронами проводимости. Треугольные скобки  $\left\langle \sigma_{\beta}^{-1} j_{\beta}^2 \right\rangle_{\epsilon_{\beta}}$  означают, что усреднение ведется по энергиям  $\beta$ -частиц. Газовый поток приходит в движение из-за того, что в него «вморожены» электрические заряды, движущиеся под действием электрического и магнитного полей. Система уравнений Максвелла имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\rho_e$  – плотность электрического заряда, а  $\vec{j}$  – плотность электрического тока.

В соответствии с гипотезой о том, что ионы-продукты  $\beta$ -распада «вморожены» в воздушный поток, постулируем, что

$$\vec{j} = \vec{j}_{\beta} + \sigma \left( \vec{E} + [(\vec{v}_e) \times \vec{B}] \right) + \rho_e^+ \vec{v}. \quad (4)$$

Таким образом, полная плотность электрического тока складывается из плотности конвекционного ионного тока  $\rho_e^+ \vec{v}$ , из плотности  $\beta$ -тока  $\vec{j}_{\beta}$  и плотности электронного тока проводимости  $\vec{j}_e$ :

$$\vec{j}_e = \sigma \left( \vec{E} + [(\vec{v}_e) \times \vec{B}] \right), \quad (5)$$

где  $\langle \vec{v}_e \rangle$  – средняя скорость электронов проводимости в воздухе.

Система уравнений Максвелла (3) должна быть дополнена системой материальных уравнений:

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \\ B = \mu_0 \mu \vec{H} \end{cases} \quad (6)$$

Используемое приближение, вообще говоря, не является ни самосогласованным, ни внутренне непротиворечивым. Но, как будет видно из дальнейшего, для качественного анализа явления и для порядковых оценок, оно вполне пригодно.

Условие квазистационарности торнадо имеет вид

$$\langle (\vec{j}_\beta + \vec{j}_e)_r \rangle = 0, \quad (7)$$

то есть, среднее значение суммы радиальных компонент  $\beta$ -тока и тока проводимости равно нулю. Только в этом случае распределение электрического заряда в пространстве является квазистационарным, поскольку изменение величины  $\rho_e$  во времени будет определяться конвекционным током, создаваемым ионами.

Рассчитаем параметры стационарного вихря, за крутку которого отвечает электростатическое взаимодействие. Для этого предположим, что влияние конвекционных токов на структуру вихревого течения невелико. То есть выполняется условие  $|\vec{E}| \gg |\vec{v} \times \vec{B}|$ . Наличие магнитного поля, создаваемого ионным (конвекционным) током сказывается, в основном, на стационарном распределении электрического заряда. Именно магнитное поле кругового тока удерживает значительное количество электронов в глазу торнадо. Именно наличие магнитной ловушки отвечает за существенную асимметрию пространственного распределения электрического заряда.

С учетом сделанных замечаний и предположений система уравнений, приближенно описывающая стационарное движение воздуха в «хоботе» торнадо, примет вид:

$$\begin{cases} \text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \\ \rho(\vec{v} \nabla) \vec{v} = \rho_e^+ \vec{E}, \\ \nabla \left[ \rho \vec{v} \left( \frac{v^2}{2} + w \right) \right] = \eta q_{eff}, \\ q_{eff} = \langle \sigma_\beta^{-1} j_\beta^2 \rangle_{\epsilon_c} + \vec{j}_\beta \vec{E} + \sigma E^2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\eta$  – КПД внутренних источников энергии.

Система уравнений Максвелла, описывающая стационарные электрические и магнитные поля в торнадо, также упрощается:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = \rho_e^+ \vec{v} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \end{cases} \quad (9)$$

В общем виде система уравнений электромагнитной газодинамики может быть исследована только численными методами. Однако для обоснования гипотезы об электростатической природе закрутки атмосферного вихря малого радиуса вращения (торнадо) достаточно качественного анализа в сформулированном выше приближении стационарного процесса.

Рассмотрим стационарный вихрь газа, в котором распределен электрический заряд. Опуская в системе (8) уравнения, несущественные на данном этапе рассмотрения, и воспользовавшись цилиндрической симметрией задачи, представим систему уравнений газовой динамики в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = \frac{\rho_e^+(r, z)}{\rho(r, z)} E_r, \\ v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_\phi}{r} = 0, \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\rho_e^+(r, z)}{\rho(r, z)} E_z, \\ v_r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2} + w \right) + v_z \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2} + w \right) = \\ = \eta \frac{q_{eff}}{\rho}. \end{cases} \quad (10)$$

Система уравнений (10) все еще достаточно сложна для решения аналитическими методами. А для обоснования радиоизотопной модели торнадо крайне желательно иметь пусть и не очень точные, но удобные для анализа соотношения, позволяющие делать порядковые оценки наблюдаемых параметров вихревого воздушного потока. В связи с этим логично воспользоваться приближением «длинного торнадо», в котором имеет место не только цилиндрическая симметрия относительно оси вращения, но и инвариантность по отношению к сдвигам вдоль оси симметрии.

#### Приближение

##### «бесконечно длинного торнадо»

Если имеет место инвариантность системы по отношению к сдвигам вдоль оси  $z$ , система уравнений газовой динамики (10) становится еще проще:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r)}{\partial r} = 0 \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\phi^2}{r} = \frac{\bar{\rho}_e^+(r)}{\bar{\rho}(r)} E_r \\ v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_r v_\phi}{r} = 0 \\ \rho v_r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2} + w \right) = \eta q_{eff} \end{cases} \quad (11)$$

где  $\bar{\rho}_e^+(r) \equiv \langle \rho_e^+(r, z) \rangle_z$  – усредненная по  $z$  пространственная плотность положительных электрических зарядов, а  $\bar{\rho}(r) \equiv \langle \rho(r, z) \rangle_z$  – усредненная по  $z$  плотность воздуха.

Данная система уравнений, вообще говоря, внутренне противоречива, поскольку из уравнения непрерывности следует, что  $r v_r = A \cdot r^{-1}$ . В свою очередь, из требования регулярности решения вытекает, что  $A = 0$ . Это возможно, лишь если  $\eta = 0$ , то есть когда вся внутренняя энергия газа, сосредоточенная на ядерных степенях свободы радиоизотопов, увлекаемых воздушным потоком, расходуется на компенсацию потерь кинетической энергии этого потока, обусловленных силами трения. Судя по внешним проявлениям, это условие выполняется для торнадо с достаточной высокой степенью точности.

В этом случае система уравнений (11) принимает вид:

$$\frac{v_\varphi^2}{r} = -\frac{\bar{\rho}_e^+(r)}{\bar{\rho}(r)} E_r. \quad (12)$$

Приближение «бесконечно длинного торнадо» весьма далеко от реальности. Однако оно удобно тем, что многие оценки в этом приближении выполняются элементарно.

При отсутствии зависимости плотности заряда от координаты  $z$  азимутальная и вертикальная компоненты электрического поля зануляются ( $E_\varphi = E_z = 0$ ), а компоненту  $E_r$  проще всего вычислить по теореме Гаусса:

$$E_r = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0 r} \int_0^r \bar{\rho}_e(\xi) \xi d\xi. \quad (13)$$

Таким образом, мы получаем общее выражение для азимутальной составляющей скорости вихревого потока

$$\bar{v}_\varphi^2 = -\frac{\bar{\rho}_e^+(r)}{\bar{\rho}(r)} \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \int_0^r \bar{\rho}_e(\xi) \xi d\xi. \quad (14)$$

Из этого соотношения немедленно следуют два фундаментальных вывода:

1. Поскольку ионы-продукты  $\beta$ -распада радиоизотопов находятся только в «хоботе» торнадо, постольку наличие «глаза» торнадо связано с тем, что в зоне затишья воздушного потока ( $v_\varphi = 0$ ) положительный заряд отсутствует ( $\bar{\rho}_e^+(r) = 0$ ).

2. У торнадо имеется резкая внешняя граница.

Последнее утверждение вытекает из того, что в силу закона сохранения заряда выполняется условие

$$\iiint_V \rho_e(\vec{r}) d\vec{r} = 0, \quad (15)$$

и в соответствии с этим радиальная компонента электрического поля  $E_r$  является знакопеременной. Распределение  $\beta$ -электронов по направлениям вы-

лета изотропно. Однако в «глазу» торнадо имеется магнитная ловушка, создаваемая конвекционным током. Поэтому распределение электрического заряда по радиусу сильно неравномерно. В предельном случае высокой проводимости воздуха внутри торнадо расположен отрицательный заряд, удерживаемый магнитным полем, «хобот» торнадо заряжен положительно, а за его внешней границей находится небольшой по величине отрицательный заряд, наличием которого мы пренебрегаем.

С учетом вышесказанного соотношение (14) становится противоречивым приблизительно на внешней границе распределения положительного заряда  $\bar{\rho}_e^+(r)$ , поскольку при  $r > r_0$  и  $v_\varphi^2 \leq 0$ , где  $r_0$  – корень уравнения

$$\int_0^r \bar{\rho}_e(\xi) \xi d\xi = 0. \quad (16)$$

В реальности картина воздушного течения несколько сложнее, и внешняя часть положительно заряженного столба торнадо вовлекается в движение силами трения; кроме того, в соотношении (14) опущены члены, обусловленные наличием вертикальной и радиальной составляющих скорости. Но сам эффект наличия резкой внешней границы торнадо обусловлен знакопеременностью радиальной компоненты электрического поля.

#### Приближение «торнадо конечной длины»

Для того чтобы оценить влияние конечной длины торнадо на характер воздушного течения, исследуем простейший случай линейного по  $z$  распределения заряда

$$\rho_e(r, z) = \bar{\rho}_e(r) [1 + \alpha(z - h/2)]. \quad (17)$$

Основанием для выбора линейной зависимости плотности заряда от высоты служит факт относительно равномерного выгорания «горючего» торнадо по мере удаления от материнской тучи, обусловленный постоянством скорости распада радиоактивных изотопов, за счет которого и происходит пространственное разделение электрических зарядов. В качестве дополнительного условия, позволяющего доопределить зависимость плотности электрического заряда от высоты, мы постулировали, что на полувывоте торнадо радиальная зависимость плотности заряда совпадает со средней плотностью заряда

$$\rho_e(r, h/2) = \bar{\rho}_e(r) \quad (18)$$

Для дальнейшего анализа нам необходимо определить зависимость  $E_z$ . Для этого воспользуемся основным уравнением электростатики:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rD_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial D_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho_e(r, z), \quad (19)$$

причем учтем, что в силу цилиндрической симметрии задачи  $D_\varphi = 0$ , а величина  $D_r$  дается соотношением (13), откуда мы получаем выражение для  $E_z$

$$E_z = \frac{\alpha \bar{\rho}_e(r)}{2\epsilon\epsilon_0} (z^2 - hz + h^2/4), \quad (20)$$

причем при определении константы интегрирования мы воспользовались условием того, что «электрический центр тяжести» торнадо находится на его полувывоте:  $E_z(r, h/2) = 0$ . Это условие соответствует тому, что в столб торнадо электрические силы втягивают и предметы с поверхности земли, и радиоактивную воздушно-капельную смесь из материнской тучи.

Отметим, что соотношение (20) дает относительно большую погрешность для величины электрического поля торнадо, но позволяет оценить вертикальную составляющую скорости воздушного потока. Дальнейшие оценки будем проводить в приближении несжимаемой жидкости, причем будем полагать, что плотность газа постоянна:  $\rho = const$ .

Кроме того, постулируем, что плотность заряда медленно меняется от основания столба торнадо до материнской тучи ( $\alpha h \ll 1$ ). Это условие позволяет считать, что все величины в задаче слабо зависят от  $z$ . Поэтому можно использовать адиабатическое приближение. В этом приближении

$$v_\varphi^2 = \bar{v}_\varphi^2 [1 + \alpha(z - h/2)]^2 \quad (21)$$

причем,  $\bar{v}_\varphi$  – азимутальная составляющая скорости газового потока на полувывоте торнадо.

Из системы уравнений газовой динамики следует, что радиальная и вертикальная компоненты скорости воздушного потока связаны соотношением

$$v_r = -a(r, z)v_z, \quad (22)$$

где

$$a(r, z) \equiv \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \left[ \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \right]^{-1}. \quad (23)$$

Из системы уравнений (10) также видно, что в рамках сделанных предположений  $z$ -компонента уравнения Навье-Стокса имеет вид

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\rho_e^+(r, z)}{\rho} E_z. \quad (24)$$

С учетом уравнения непрерывности для цилиндрически симметричного течения несжимаемой жидкости мы получаем следующее выражение для вертикальной компоненты скорости:

$$v_z^2 = \left[ \frac{\partial (ra(r, z))}{r \partial r} \right]^{-1} \frac{\rho_e^+(r, z)}{\rho} E_z. \quad (25)$$

Соотношения (21)-(25) дают решение поставленной задачи. Они позволяют оценивать параметры газового потока в столбе торнадо.

Для дальнейшего исследования свойств вихревого потока нам необходимо рассчитать функцию  $a(r, z)$ , определяемую соотношением (23). Для этого воспользуемся тем, что

$$v_\varphi = \bar{v}_\varphi [1 + \alpha(z - h/2)]. \quad (26)$$

Строго говоря, для того, чтобы найти  $a(r, z)$  как функцию радиуса, необходимо знать закон распределения электрического заряда в пространстве. Однако для порядковых оценок основных параметров торнадо годятся грубые приближения. Воспользуемся тем фактом, что нас интересуют максимальные значения параметров воздушного потока. В силу этого для порядковых оценок годится простейшее приближение для  $a(r, z)$ :

$$a(r, z) \approx \frac{\alpha r}{1 + \alpha(z - h/2)}. \quad (27)$$

Подставляя (27) в (25), мы приходим к соотношению

$$v_z \approx \frac{\bar{\rho}_e^+(r)(h/2 - z)}{2\sqrt{\epsilon\epsilon_0\rho}} [1 + \alpha(z - h/2)]. \quad (28)$$

Для того чтобы рассчитать радиальную компоненту скорости торнадо, воспользуемся формулой (22). В итоге получаем:

$$v_r \approx -\alpha r \frac{\bar{\rho}_e^+(r)(h/2 - z)}{2\sqrt{\epsilon\epsilon_0\rho}}. \quad (29)$$

Приведенные выше соотношения дают общее решение задачи о нахождении поля скоростей в столбе торнадо. Однако возможности практически безмодельного анализа явления на этом не исчерпываются. Дело в том, что в процессе вывода формул мы нигде не использовали предположений о явном виде пространственного распределения электрического заряда в столбе и «глазе» торнадо.

Прделаем ряд преобразований, не делая каких-либо специальных допущений о явном виде зависимости плотности электрического заряда от координат. Очевидно, что абсолютная величина линейной плотности отрицательного электрического заряда  $q_{twist}$  ( $q_{twist} > 0$ ), сосредоточенного во внутренней области торнадо ( $r \leq r_{in}$ ,  $\bar{\rho}_e(r_{in}) = 0$ ), дается интегралом от плотности заряда по объему «глаза»

$$q_{twist} = -2\pi \int_0^{r_{in}} \bar{\rho}_e(\xi) \xi d\xi. \quad (30)$$

В соответствии с этим формула (14) может быть переписана следующим образом:

$$\bar{v}_\varphi^2 = \frac{\bar{\rho}_e^+(r) [q_{twist} - q_+(r)]}{2\pi\epsilon\epsilon_0\rho}, \quad (31)$$

где функция  $q_+(r)$  имеет смысл средней линейной плотности положительного заряда, сосредоточенного в столбе торнадо.

$$q_+(r) \equiv 2\pi \int_{r_m}^r \bar{\rho}_e(\xi) \xi d\xi. \quad (32)$$

Из последнего соотношения ясно видно, что в рамках используемых приближений азимутальная скорость вихревого течения вообще не зависит от конкретного вида распределения отрицательного заряда в «глазу» торнадо. Именно это обстоятельство определяет высокую устойчивость торнадо по отношению к внешним возмущениям.

Оценим величину максимальной азимутальной скорости газового потока в столбе торнадо. Положение максимума этой компоненты скорости, находится из условия

$$\frac{d\bar{v}_\varphi^2}{dr} = \frac{d}{dr} \left[ \frac{\bar{\rho}_e^+(r)(q_{twist} - q_+(r))}{2\pi\epsilon\epsilon_0\rho} \right] = 0. \quad (33)$$

Таким образом, выражение для максимальной азимутальной скорости газового потока в торнадо имеет вид (31) при  $r = r_m$ , где  $r_m$  - корень уравнения (33).

Возвращаясь к соотношению (13), заметим, что при  $r > r_m$  имеет место очевидное соотношение

$$E_r = -\frac{q_{twist} - q_+(r)}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}. \quad (34)$$

Это соотношение позволяет производить проверку расчетов на самосогласованность и на соответствие наблюдательным данным. В самом деле, из (31) и (34) следует, что

$$\bar{v}_\varphi^2(r_m) = -\frac{\bar{\rho}_e^+(r_m)}{\rho} r_m E_r(r_m). \quad (35)$$

Для торнадо большого радиуса и малой толщины в окрестности  $r = r_m$

$$\begin{aligned} \frac{dE_r}{dr} &= \frac{d}{dr} \frac{q_{twist} - q_+(r)}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \sim \\ &\sim -\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \frac{dq_+(r)}{dr} = -\frac{\bar{\rho}_e^+(r)}{\epsilon\epsilon_0} \sim -\frac{E_r}{\zeta\delta}, \end{aligned} \quad (36)$$

где  $\zeta$  – безразмерный коэффициент, который для большинства «разумных» функций лежит в пределах  $0,1 < \zeta < 1$ . Именно поэтому

$$|\bar{v}_\varphi(r_m)| \approx \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\rho} \cdot \frac{r_m}{\zeta\delta}} \cdot |E_r(r_m)|. \quad (37)$$

Выражение (37) замечательно тем, что в него входят величины, хорошо известные из данных по наблюдениям за торнадо и водяными смерчами.

Для проверки оценок на внутреннюю согласованность воспользуемся наблюдательными данными. При этом учтем, что столб торнадо содержит некоторое количество водяных капель ( $\epsilon_{H_2O} = 81$ ), величина  $\rho \sim 1,5$  кг/м<sup>3</sup> (для воздуха без капель воды и песчинок  $\rho \approx 1$  кг/м<sup>3</sup>);  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Фм<sup>-1</sup>. Пола-

гая что  $\frac{r_m}{\zeta\delta} \sim 10^3$ , а эффективная диэлектрическая проницаемость воздушно-капельной смеси  $\epsilon_{eff} \sim 50$ , мы приходим к тому, что

$$\begin{aligned} |\bar{v}_\varphi(r_m)| &\sim \\ &\sim \sqrt{\frac{50 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}}{1,5}} \cdot 10^3 \cdot |E_r(r_m)| \sim \\ &\sim 5 \cdot 10^{-4} \cdot |E_r(r_m)| \end{aligned} \quad (38)$$

Согласно имеющимся данным напряженность электрического поля в торнадо достигает величины  $10^4 \div 10^5$  В/м. Поскольку в выражении (38) фигурируют экстремальные значения физических величин, постольку в него следует подставить значение  $|E_r(r_m)| \sim 10^5$  В/м. Тогда, в полном соответствии с наблюдательными данными получаем оценку:

$$|\bar{v}_\varphi(r_m)| \sim 50 \text{ м/с}, \quad (39)$$

то есть приблизительно 200 км/час. Таким образом, радиоизотопная модель не только отвечает на вопрос о том, откуда берется колоссальная энергия торнадо, но и дает правильные количественные соотношения для компонент вектора его скорости.

### Резюме

Резюмируем вышесказанное следующим образом.

1. Энергетические оценки показывают, что радиоактивный распад короткоживущих изотопов способен обеспечить торнадо необходимым запасом энергии. Радиоизотопный механизм образования торнадо подтверждается тем, что его наблюдаемая мощность (оцененная по уровню разрушений) совпадает по порядку величины с соответствующими теоретическими оценками. Никакой газодинамический механизм не способен обеспечить торнадо наблюдаемым запасом энергии.
2. Отсюда следует, что торнадо по своей физической природе аналогичен шаровой молнии. Эта гипотеза подтверждается многочисленными наблюдениями того, что от столба торнадо отделялись шаровые молнии. Данный факт является дополнительным подтверждением того, что источником энергии торнадо является  $\beta$ -распад радиофосфора и других короткоживущих  $\beta$ -активных изотопов.

3. За закрутку и всасывающий эффект газового потока отвечает электростатическое взаимодействие. Электростатическое взаимодействие различных частей закрученного газового потока возникает за счет того, что при  $\beta$ -распаде в непрерывный спектр ядер радиоизотопов происходит пространственное разделение электрических зарядов.

4. Устойчивость торнадо обеспечивается за счет двух факторов. Во-первых, заряды в «глазу» торнадо удерживаются в магнитной ловушке, создаваемой круговым конвекционным током. Во-вторых, основные свойства торнадо не зависят от конкретно-

го вида распределения электрического заряда, расположенного вблизи оси вращения торнадо.

5. Оценки энерговыделения в торнадо и скоростей воздушного потока подтверждают нарисованную картину явления как качественно, так и количественно.

6. Наличие внутри торнадо магнитного поля вполне согласуется с многочисленными наблюдениями полетов внутри особо мощных торнадо тяжелых металлических предметов (например, автомобилей). Согласно имеющимся наблюдательным данным внутри торнадо нередко останавливаются часы. Эти факты также свидетельствуют в пользу радиоизотопной теории торнадо.

7. Зафиксированы случаи офтальмии, т.е. ультрафиолетового ожога сетчатки глаза у людей, побывавших внутри торнадо. Поскольку мощные потоки ультрафиолета образуются при  $\beta$ -распаде весовых количеств короткоживущих изотопов, постольку воздействие торнадо на зрение наблюдателей также говорит о правильности гипотезы о его изотопной природе.

### *Заключение*

В настоящей работе описаны основные механизмы закрутки воздушного потока в торнадо. Необычные свойства этого атмосферного явления есть следствие того, что оно представляет собой вторичный коллективный эффект при  $\beta$ -распаде. Именно наличием огромного количества энергии, запасенной в короткоживущих радиоизотопах, захваченных материнской тучей, из которой спускается хобот торнадо, грозный смерч отличается от низкоскоростного вихревого воздушного течения.

Следует отметить, что в физике плазмы известны объекты, движущиеся с очень большой (более 1000 км/час) скоростью. Эффект этот характерен для плазмидов, в которых заметная часть энергии запасена на внутренних степенях свободы. Такие плазмиды могут двигаться очень быстро за счет нелинейной диффузии. Возможно, что аналогичные механизмы увеличения скорости движения воздушного потока работают и в торнадо.

### *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE).

Авторы выражают особую благодарность ректорату Самарского государственного аэрокосмического университета, а также Фонду содействия экономическому развитию СГАУ (Фонду Лукачева) за финансовую поддержку.

Авторы благодарят В.А. Соифера, Н.Л. Казанского, В.И. Фурмана, И.П. Завершинского, В.С. Казакевича, В.В. Ленивкина, Л.В. Туманова за многочис-

ленные стимулирующие дискуссии, в результате которых на свет появилась эта работа.

### *Литература*

1. Brooks E. M. The tornado-cyclone // *Weatherwise*, 1949. V. 2. №2. P. 32-33
2. Chandruda C., Mehta R. D. Weir A. D. and Bradschaw P. *J. Fluid Mech.* 85, 693, (1978)
3. Church C.R., Snow J.T., Baker G.L., Agee E.M. Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: a laboratory investigation// *J. Atmos. Sci.* 36. 1755-1776 (1979)
4. Duane J.E. The hurricane of Florida. *Bull. Amer. Met. Soc.* 1935. V. 16. C. 238-139
5. Faye H. *Nouvelle etude sur les tempetes, cyclones, trombes ou tornado* Paris, 1897, 142p
6. Finley J.P. Report on the tornado of May 29 and 30, 1879 in Kansas, Nebraska // *Prof. Paper of the signal Service*, N 4, 1881. 116 p.
7. Flora S.D. Tornadoes of the United States. Oklahoma, 1953. 194 p.
8. Fujita T. A detailed analysis of the Fargo tornadoes of June 1957 // *Res. Pap., Weather Bur. Unit. Stat.*, 1960. No 42. 67 p.
9. Glaser A.H. The structure of tornado vortex according to observation data // *Cumulus Dynamics Proceedings of the First Conference on Cumulus Convection*, Portsmouth. 19-22 May, 1959.
10. Hall R. S. Inside a Texas tornado // *Watherwise*. 1951. V. 4. №3. P. 54-57
11. Hardin J.C. The velocity field induced by a helical vortex filament // *Phys. Fluid.* November 1982. V. 25(11).
12. Hayes M.W. The tornado of October 9, 1913 at Lebanon, Kansas, *Monthly Weather Rev.* v.1913, p.1528
13. Ratis Yu.L. Ball lightning as macroscopic quantum phenomenon // *Universidad Politecnica de Valencia, Editorial UPV, Ref. 2005. 2538, 112 p.*
14. Ратис Ю.Л. Модель шаровой молнии с учетом процессов диффузии и переноса // *Естествознание. Экономика. Управление. Сб. науч. трудов. Вып. 4. СГАУ, ИСОИ РАН, Самара, 2003. С. 3-8.*
15. Ратис Ю.Л. Experimentum crucis для выяснения физической природы шаровой молнии // *Естествознание. Экономика. Управление. Специальный выпуск. Самара, СГАУ, 2003. С. 24.*
16. Ратис Ю.Л. Оценка критических параметров паров радиофосфора  $^{32}_{15}P$  и  $^{33}_{15}P$  // *Естествознание. Экономика. Управление. Сб. науч. трудов. Спец. выпуск. Самара, СГАУ, 2003. С. 17.*
17. Ратис Ю.Л. Торнадо как коллективный вторичный эффект при бета-распаде ядер радиофосфора // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. Материалы Второй летней школы молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений, Изд-во СГАУ, Самара, 2004. С. 9.*
18. Ратис Ю.Л. Тунгусский феномен как результат субатомной реакции // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, Материалы Второй летней школы молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений, Изд-во СГАУ, Самара, 2004, 3 с.*
19. Ратис Ю.Л. Формирование облаков паров радиофосфора и нелинейная диффузия // *Естествознание. Экономика. Управление. Сб. науч. трудов. СГАУ, ИСОИ РАН, Самара, 2003. Вып.4. С. 9-15.*



20. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое квантовое явление // Самара, Изд-во СНЦ РАН, 2004, 132 с.
21. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое проявление  $\beta$ -распада ядер радиоактивного фосфора в связанное состояние // Естественные науки. Экономика. Управление. Сб. науч. трудов. Спец. выпуск. Самара, СГАУ, 2003. С. 4.
22. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое проявление  $\beta$ -распада ядер радиоактивного фосфора в связанное состояние // Компьютерная оптика, Самара – Москва. Вып. 25. 2003. С.5-10
23. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое проявление  $\beta$ -распада ядер радиоактивного фосфора в связанное состояние // Препринт ОИЯИ, Р4-2004-67, Дубна, 2004. 16 с.
24. Ратис Ю.Л. Шаровая молния как макроскопическое проявление  $\beta$ -распада ядер радиоактивного фосфора в связанное состояние // Письма в ЭЧАЯ №6 (129), С. 64, ОИЯИ, Дубна, 2005, Ratis Yu.L., Physics of Particles and Nuclei, 2005. V. 2. No. 6. P. 374-383.