

ТРИГГЕРНЫЙ ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗОВЫХ ПРОРЫВОВ И ТОРНАДО

В.Л. Натяганов¹, С.А. Маслов^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

tenzor-home@yandex.ru

Аннотация. Анализируются триггерные факторы электромагнитной природы в начальных процессах генерации струйных низовых прорывов и торнадо из грозовых облаков. Показано, что основную роль при этом играют сильные возмущения атмосферного электрического поля и эффект гигантской диэлектрической проницаемости суспензии заряженных капель с двойным электрическим слоем на их поверхности. Предложена двухпараметрическая формула, описывающая перезарядку дипольного облака в трипольное, на основе которой обоснованы и некоторые характерные черты воронки торнадо (воротник, каскад, закрутка, электрическая активность).

Введение

В последние годы опубликован ряд работ разных авторов, в которых наблюдается возврат на современном уровне знаний к развитию [1] забытой электрической гипотезы М.В. Ломоносова (1753 г.) о природе торнадо (тромба, смерча или тифона [2] в переводе с греческого). Длительное время (начиная от А. Пуанкаре) развиваемые гидро- и термогидродинамические подходы не привели к успеху в обосновании многих характерных черт [2] торнадо: наличие футляра и воротника в основании воронки; каскада пыли или брызг, поднимающегося навстречу опускающемуся торцу воронки; наблюдаемой сильной электрической активности внутри, вне и даже еще до образования воронки в виде пульсирующего генератора Джонса [2].

Обычно время существования торнадо делят на стадии: начальную, когда внизу вращающегося грозового облака или торнадо-циклона (ТЦ) начинает расти воронка; зрелую и самую разрушительную, когда воронка достигает подстилающей поверхности; и заключительную, когда сила торнадо постепенно слабеет и воронка втягивается обратно в ТЦ или рвется на части и рассеивается в воздухе.

Большинство работ по торнадо с учетом важной роли электромагнитных (ЭМ) взаимодействий посвящено зрелой стадии, а соответствующие модели основаны на уравнениях магнитной гидродинамики в разных приближениях [3], в том числе на теории электровихревых течений (ЭВТ) [4], когда учитывается ЭМ-взаимодействие протекающих электрических токов с собственным магнитным полем. Обзор ранее предложенных ЭМ-моделей торнадо содержится в [5], а здесь подчеркнем, что необоснованными физически являются чисто плазменные модели со свободными электронами, которые в атмосфере даже при разряде молний [6] мгновенно прилипают к молекулам кислорода и гидратированным ионам.

Под мощными грозовыми облаками, где возмущения атмосферного электрического поля (АЭП) могут достигать значений $E \geq 10^3 E_0$ и более ($E_0 \sim 100$ В/м - напряженность АЭП хорошей погоды), электрическая энергия ЭМ поля Земли становится больше магнитной. Поэтому в [1] было начато исследование влияния сильных возмущений АЭП на формирование воронки из ТЦ, а в [7-10] эти исследования на основе уравнений электрогидродинамики (ЭГД) были продолжены для торнадо и низовых прорывов – downburst по терминологии Фуджиты [11].

Влияние триггерных факторов электромагнитной природы на генерацию низовых прорывов и торнадо

В докладе проводится сравнительный анализ влияния различных ЭМ факторов на генерацию низовых прорывов или воронок торнадо из грозовых облаков. К таким триггерным факторам относятся величина и топологический вид сильных возмущений АЭП под дипольным или трипольным грозовым облаком, эффект гигантской диэлектрической проницаемости (ЭГДП) суспензии капель с поверхностным зарядом тонкого двойного электрического слоя (ДЭС) на их поверхности, возникающее ЭВТ при перезарядке дипольного облака в трипольное, генерация и топология магнитного поля при различных видах закрутки ТЦ, сильные парамагнитные свойства молекул кислорода и диамагнетизм азота (как основных составляющих атмосферного воздуха), роль водяных паров и кластерных ионов с 3-5 налипшими молекулами воды.

Существенным шагом для анализа ЭГД процессов под грозовыми облаками стала двухпараметрическая формула, впервые предложенная в [8]:

$$\tilde{E}(\tilde{r}) = \frac{E_z(\tilde{r})}{E_0} = \frac{(4\tilde{r})^4 + \beta}{(4\tilde{r})^4 + 1} \left[N \cdot \exp(-\tilde{r}^2) - 1 \right] \quad (1)$$

и описывающая в единицах безразмерного \tilde{r} расстояния до оси воронки величину и динамику топологических изменений АЭП в процессе перезарядки дипольного облака в трипольное, а также ряд характерных явлений (воротник, рога дьявола, каскад), сопутствующих образованию воронки торнадо. Ранее обычно использовалась шестипараметрическая формула из [12] с физически неоправданным предположением о сферических областях

распределений зарядов в трипольном облаке. Подчеркнем, что из дипольного облака обычно реализуются струйные низовые прорывы [11], следы воздействий которых на подстилающую поверхность теоретически рассмотрены в [13]; а из трипольного облака обычно возникают торнадо. Подробности будут приведены в докладе (см. также [7-10]).

Важным триггерным фактором формирования прорывов или торнадо, а также каскада брызг над морской поверхностью еще до ее касания с опускающейся воронкой торнадо, является ЭГДП суспензии капель с тонким ДЭС. С учетом формулы (1) при $N > 10^3 - 10^4$ и на основе системы уравнений ЭГД [8,10]

$$\begin{cases} \rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u}) = -\nabla p_e + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho_e \mathbf{E}, & \text{div } \mathbf{u} = 0, \\ p_e = p - \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E^2 / 2, & \text{div}(\varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}) = \rho_e, \quad \text{rot } \mathbf{E} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

можно показать, что ЭГД давление p_e под центром грозового облака резко падает за счет ЭГДП.

Этот неожиданный, но физически важный эффект можно теоретически обосновать на основе электромагнитного обобщения задачи Левича [14] об электрокапиллярном движении хорошо проводящей капли в другой жидкости при наличии на ее поверхности ДЭС и однородного электрического поля вдали. Это обобщение [15] учитывает дополнительную генерацию ЭВТ [4] внутри (к сферическому вихрю Хилла добавляется тороидальный вихрь Тейлора) и вне (на однородный поток накладывается деформационный) капли с тонким ДЭС, который при этом превращается в тройной электромагнитный слой (ТЭМС) – новую векторную физико-математическую структуру [15].

Переход к суспензии основан на анализе полученного в классе обобщенных функций решения для одной капли и последующего осреднения по ансамблю возможных конфигураций с помощью бинарной $g(R)$ коррелятивной функции, что обозначено угловыми скобками $\langle \dots \rangle$. В итоге во внешней области получается система ЭГД уравнений [10, 16]

$$\begin{cases} \text{div} \langle \mathbf{u} \rangle = -3cA_2 \left[\frac{dg}{dR} + g(2)\delta(R-2) \right] u_e \cos \theta, \\ \text{rot rot} \langle \mathbf{u} \rangle + \nabla \langle p \rangle = 6cA_1 g(R) \mathbf{u}_e, \\ \Delta \langle \Phi \rangle = 3c\gamma \left[\frac{dg}{dR} + g(2)\delta(R-2) \right] \cos \theta, \end{cases} \quad (3)$$

к которой надо добавить уравнения для центральной (пробной) капли и получить решение с соответствующими граничными условиями в трех областях: при $0 < R < 1$ внутри пробной капли, при $1 < R < 2$ в промежуточном слое и при $R > 2$ во внешней области для эффективной среды, где находятся центры других капель.

Подобная процедура для системы (3) применялась в [16] для расчета скорости осаждения и эффективной электропроводности σ_e однородной суспензии с ДЭС. Однако формальной заменой в формуле Максвелла [17] проводимостей (внутри капли, для обтекающей жидкости и для фиктивной среды при $R > 2$) на соответствующие диэлектрические проницаемости нельзя получить обоснование ЭГДП суспензии капель с ДЭС на их поверхности.

Для этого необходимо при расчете среднееобъемной электрической индукции исходить из формулы $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \{ \varepsilon_1 \mathbf{E} + (\varepsilon_1 - 1) [\mathbf{u} \times \mathbf{B}] \}$ и аккуратно учесть при осреднении поверхностную Σ -фазу в виде тонкого ТЭМС с взаимно ортогональными конвективными токами и магнитными полями. В результате основным по порядку величины членом в эффективной диэлектрической проницаемости ε_e суспензии капель с ДЭС будет выражение [10]

$$\varepsilon_e \approx \varepsilon_0 \frac{c(\varepsilon_\Sigma - 1) \overline{[\mathbf{u}_\Sigma \times \mathbf{B}_\Sigma]}}{\nabla \langle \Phi_* \rangle - c \nabla \langle \Phi \rangle + c \nabla \langle \Phi' \rangle} \sim \varepsilon_0 (\varepsilon_\Sigma - 1) c q u_0 u_1 \frac{a}{d} \gg 1$$

за счет большого параметра a/d именно для тонкого ДЭС: $d \ll a$, где a – радиус капли, d – толщина ДЭС, q – плотность его поверхностного заряда, u_0 и u_1 – характерные величины скоростей электрокапиллярного дрейфа и ЭВТ соответственно на поверхности одиночной капли [14, 15], $c \leq 0,2$ – объемная концентрация капель (в грозовом облаке или над морской поверхностью), ε_Σ – относительная диэлектрическая проницаемость поляризованной среды внутри ДЭС; $\langle \Phi' \rangle$, $\langle \Phi \rangle$ и $\langle \Phi_* \rangle$ – электрические потенциалы внутри капли, промежуточного слоя и во внешней эффективной среде соответственно, $\overline{\nabla \langle \Phi \rangle}$ и $\overline{[\mathbf{u}_\Sigma \times \mathbf{B}_\Sigma]}$ – средние значения указанных величин по объемам единичного шара и тонкого сферического слоя, соответствующего ТЭМС.

ЭГДП проявляется внизу центральной части грозового облака при его перезарядке с дипольного на трипольное и, особенно явно, на подстилающей морской поверхности с обилием микрокапель, взвешенных в воздухе за счет брызгообразования из-за столкновения и обрушения поверхностных волн [10]. В последнем случае под центром облака у морской поверхности падает ЭГД давление p_e из формул системы (2), в результате чего образуется неустойчивый холм приподнятой воды,двигающийся вслед за облаком. Об этом

факте знал еще М.В. Ломоносов, отмечал А. Пуанкаре и писал Д.В. Наливкин [2], а в [1] представлена простейшая модель этого явления без учета ЭГДП.

Если из дипольного облака не реализовался низовой прорыв [8], то в процессе его перезарядки в трипольное облако генерируется тороидальное ЭВТ и горизонтальная закрутка в растущей области дополнительного положительного заряда; а тогда ЭДГП за счет падения p_e приводит к проседанию этой области в виде аналога вращающегося столба Тейлора [8] с возможным образованием воротника и воронки торнадо, а также реализацией аномальной “вертолетной посадки” [2, 10] на подстилающую поверхность всего ТЦ без образования воронки.

При противоположных направлениях закрутки положительно заряженного нижнего центра ТЦ и его отрицательной периферии, что отмечалось в [2] и было зафиксировано у серийных смерчей 20.09.1997 г. в Амурском заливе вблизи Владивостока, возникающие кольцевые токи генерируют магнитное поле. В результате ТЦ работает как природный соленоид, в центральную зону которого втягивается парамагнитный кислород, а диамагнитный азот выталкивается на периферию. Подобная сепарация основных газов атмосферы может приводить к перераспределению их молекул под центром ТЦ со стандартного распределения $m_O/4 + 3m_N/4$ до $m_O/2 + m_N/2$, где $m_O = 32$ а.е.м. и $m_N = 28$ а.е.м. - атомные массы молекул кислорода и азота. Такая сепарация также способствует формированию воротника и воронки торнадо.

Заключение

Анализ влияния других триггерных факторов электромагнитной природы на генерацию струйных низовых прорывов и торнадо из грозовых облаков показывает, что по сравнению с возмущениями АЭП и ЭГДП они играют вспомогательную или ослабляющую роль в зависимости от конкретных условий типа возможной сепарации парамагнитного кислорода и диамагнитного азота при разно- или однонаправленной закрутке в центре и на периферии торнадо-циклона, который работает (но с разным КПД) как природный генератор магнитного поля.

Литература

1. В.Л. Натяганов, С.А. Маслов // Вестн. Моск. ун-та. 2014. Матем. Механ. № 2. С. 31–37.
2. Д.В. Наливкин. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487с.
3. С.А. Арсеньев, Н.К. Шелковников // Вестн. Моск. ун-та. 2012. Физ. Астрон. № 3. С. 51-55.
4. Электровихревые течения / Под. ред. Э.В. Щербинина. Рига: Зинатне, 1985. 315с.
5. О.А. Синкевич, С.А. Маслов, Н.Г. Гусейн-заде // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 2. С. 203-226.
6. Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320с.
7. С.А. Маслов // Вестн. Моск. ун-та. 2015. Матем. Механ. № 6. С. 54–58.
8. С.А. Маслов, В.Л. Натяганов // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 16–20.
9. С.А. Маслов // Вестн. Моск. ун-та. 2017. Матем. Механ. № 1. С. 57–61.
10. S. Maslov, V. Natyaganov // Springer Nature Switzerland AG. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11533-3_34.
11. T.T. Fujita // J. Atmosph. Sci. 1981. V. 38. № 8. P. 1511–1534.
12. V.A. Rakov, M.A. Uman. Lightning: Physics and Effects. New York: Cambridge University Press, 2003. 687p.
13. В.М. Гендугов, В.Л. Натяганов, А.А. Чайка // ДАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 481–484.
14. В.Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГФМЛ, 1959. 700с.
15. В.Л. Натяганов // ДАН. 2001. Т. 381. № 1. С. 50–52.
16. В.Л. Натяганов, И.В. Орешина // Коллоидный журнал. 2000. Т. 62. № 1. С. 90–100.
17. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. Т. 8. 624с.