

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Маслов Сергей Алексеевич

**Роль электромагнитных механизмов
в процессе формирования торнадо**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель – *Натяганов Владимир Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент*

Официальные оппоненты – *Петров Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, лаборатория механики систем, главный научный сотрудник*

Пулинец Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, Институт космических исследований Российской академии наук, отдел космической геофизики, главный научный сотрудник

Тятюшкин Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, лаборатория физико-химической гидродинамики, научный сотрудник

Защита диссертации состоится 20 декабря 2024 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичуринский проспект, д. 1, НИИ Механики МГУ, кинозал.

E-mail: aero.natap@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3136>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.5,
кандидат физико-математических наук

Н.В. Попеленская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно классическому определению [Наливкин Д.В., 1969¹], торнадо (смерч) – интенсивный атмосферный вихрь, на начальной стадии опускающийся из вращающегося грозового облака (торнадо-циклона) в виде воронки с радиусом от десяти до нескольких сотен метров, которая в зрелой стадии, после касания с земной поверхностью, приобретает скорость вращения до 50 – 100 м/с и более. Далее в ходе анализа основных гипотез и моделей торнадо используется это классическое определение.

Высокая скорость потоков и разнообразие факторов торнадогенеза создают трудности экспериментального исследования смерчей. Поэтому теоретическое изучение торнадо, выявление основных причин их формирования и механизмов функционирования является актуальной задачей. Помимо большой скорости потока, в воронке торнадо и вблизи нее нередко наблюдается высокая электрическая активность [Наливкин Д.В.; Ломоносов М.В., 1986²; Vonnegut B., 1960³; Бояревич В.В. и др., 1985⁴]: частые вспышки молний «облако – Земля», разнообразные свечения воронки или ее части и т.д. Однако во многих исследованиях электромагнитные явления, сопутствующие формированию торнадо, не учитываются или считаются второстепенными.

Поэтому является актуальной проблема исследования влияния электромагнитных факторов на формирование воронки торнадо и механизмов интенсификации ее завихренности, а также причин и триггерных механизмов генерации струйных низовых прорывов (downburst) из материнских грозовых облаков. К таким электромагнитным факторам главным образом относятся сильные возмущения атмосферного электрического поля (АЭП) под грозовым облаком, тесно связанные с его зарядовой структурой. В большинстве работ исследуется зрелая стадия торнадо, а начальному этапу формирования его воронки (до касания с подстилающей поверхностью) уделяется мало внимания. Однако на начальной стадии торнадо и низовых прорывов электрогидродинамические (ЭГД) механизмы могут играть основную роль, что показано в настоящей работе.

¹ Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. – М.: Наука, 1969. – 487 с.

² Ломоносов М.В. Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих // В кн. Избранные произведения: в 2 т. – М.: Наука, 1986. – Т. 1: Естественные науки и философия. – С. 163 – 191.

³ Vonnegut B. Electrical theory of tornadoes // J. Geophys. Res. – 1960. – Vol. 65. – No. 1. – P. 203 – 212.

⁴ Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. Электровихревые течения. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.

Степень разработанности темы исследования. В главе 1 диссертации приведен краткий обзор основных работ по изучению торнадо. В большинстве статей и монографий рассматривается зрелая стадия смерча на основе чисто гидродинамических и термогидродинамических подходов, а роль электромагнитных механизмов и характерные черты начальной стадии формирования воронки смерча часто остаются за рамками исследования.

Цель диссертационной работы состоит в теоретическом исследовании влияния различных электромагнитных факторов на процессы образования торнадо и низовых прорывов из материнского грозового облака, а также в изучении возможной взаимосвязи электромагнитных явлений и гидродинамических характеристик формирующейся воронки смерча и струйного низового прорыва. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование механизмов формирования нижнего положительного заряда в изначально дипольном грозовом облаке под влиянием сильных возмущений АЭП под облаком.

2. Построение математической модели, которая описывает ряд характерных черт процесса генерации воронки торнадо (образование воротника и каскада) на основе системы уравнений электрогидродинамики с учетом эффекта гигантской диэлектрической проницаемости (ЭГДП).

3. Исследование явления динамического зависания (левитации) капель воды с поверхностным зарядом двойного слоя в электрическом поле и в каскаде над морской поверхностью под опускающейся воронкой смерча.

4. Теоретическое исследование вертикального движения и усиления завихренности воронки торнадо, формирующейся в нижней части трипольного облака, под действием сильных возмущений АЭП под грозовым облаком.

5. Численное моделирование движения струйного низового прорыва из дипольного облака до контакта с земной поверхностью.

Кроме того, с использованием вейвлет-анализа рассмотрено влияние турбулентности на усиление завихренности в зрелых торнадо и тайфунах (ураганах).

Научная новизна работы.

1. Проведено одно из первых исследований влияния возмущений АЭП на процесс формирования торнадо и низовых прорывов в зависимости от зарядовой структуры материнского грозового облака.

2. Получена новая двухпараметрическая формула, адекватно описывающая величину возмущений АЭП под материнским грозовым облаком, а также

изменение их топологического вида на разных этапах перезарядки облака с дипольного на трипольное.

3. Показано, что дипольная электрическая структура грозового облака создает благоприятные условия для формирования струйных низовых прорывов, а трипольная – для образования воронки торнадо и ее характерных черт типа воротника и каскада.

4. Исследована роль двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности водяных капель в каскаде под опускающейся воронкой смерча на их динамическую левитацию за счет сильных возмущений АЭП.

5. На основе уравнений электрогидродинамики показано, что в зависимости от топологического вида возмущений АЭП под трипольным грозовым облаком формирующаяся воронка может как опускаться к земной поверхности с последующим образованием зрелого торнадо, так и колебательно зависать на некоторой высоте или втягиваться обратно в грозовое облако.

6. Показано, что сильные возмущения АЭП наряду с неоднородным распределением заряда по поперечному сечению воронки обеспечивают существенное усиление завихренности, локализованное именно в стенках смерча. Вклад электрических механизмов при этом может существенно превышать влияние термогидродинамических факторов.

7. В настоящей работе применен вейвлет-анализ к исследованию интенсивных атмосферных вихрей, в том числе реальных торнадо и тайфунов. Показано, что в развитой стадии торнадо турбулентность потока в стенках воронки оказывает влияние на ее завихренность, сравнимое с вкладом от растяжения вихревых линий.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новая двухпараметрическая формула, полученная в диссертации, адекватно описывает изменение величины и топологического вида возмущений напряженности атмосферного электрического поля под грозовым облаком, в том числе при перезарядке облака с дипольного на трипольное.

2. В зависимости от топологического вида возмущений АЭП под трипольным грозовым облаком формирующаяся воронка может как опускаться к земной поверхности с последующим образованием зрелого торнадо, так и колебательно зависать на некоторой высоте, или втягиваться обратно в грозовое облако. Этот эмпирический факт не удавалось ранее обосновать в рамках моделей, не учитывающих электрических факторов торнадогенеза.

3. Под дипольным облаком обычно реализуется неустойчивость Рэля – Тейлора в виде струйного низового прорыва; тогда как рост напряженности АЭП под трипольным грозовым облаком создает благоприятные условия для

образования воронки торнадо и появления ее характерных черт типа воротника и каскада. Наличие тонкого ДЭС на поверхности капель может приводить к их послойной левитации над морской поверхностью в каскаде под опускающейся воронкой смерча.

4. Сильные возмущения АЭП под грозовым облаком наряду с неоднородным распределением заряда стенок воронки являются одной из причин усиления завихренности именно в стенках смерча. Вклад электрических механизмов при этом может в несколько раз превышать влияние термогидродинамических факторов.

Теоретическая и практическая ценность. Исследованные в настоящей работе электромагнитные факторы и механизмы обеспечивают более глубокое понимание процесса формирования торнадо и низовых прорывов из материнских грозовых облаков, а также возможной взаимосвязи между электромагнитными воздействиями и гидродинамическими характеристиками интенсивных атмосферных вихрей. Полученные в диссертации результаты могут иметь практическое значение в ходе прогнозирования при наземно-космическом мониторинге и численного моделирования смерчей и низовых прорывов, особенно на стадии их формирования.

Методология и методы исследования. Для анализа закономерностей начальной стадии формирования воронки торнадо и струйных низовых прорывов из грозовых облаков используется система уравнений неразрывности и Навье – Стокса или Эйлера с учетом электрической силы в совокупности с уравнениями Максвелла. Основной упор делается на исследование электрических, а не магнитных факторов торнадогенеза. Если в областях хорошей погоды плотность энергии $W_m = B^2/2\mu$ геомагнитного поля на 5 порядков больше плотности $W_e = \epsilon E^2/2$ энергии АЭП, где ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, то под грозовыми облаками, где $E \geq 10^3 E_{\text{атм}}$ ($E_{\text{атм}} \sim 100$ В/м – напряженность АЭП ясной погоды), электрические взаимодействия должны играть ведущую роль, так как плотность электромагнитной энергии $W_{em} = \epsilon E^2/2 + B^2/2\mu$ практически равна электрической составляющей W_e . Поэтому в ходе исследования начальных стадий процессов под грозовыми облаками целесообразно использовать ЭГД-уравнения.

Кроме того, поскольку торнадо формируется из материнского грозового облака, то необходимо учитывать, что задача восстановления распределения зарядов в облаке по измеренным значениям АЭП под ним является геофизически некорректной (обратной) задачей, которая может иметь неединственное решение. Дополнительные трудности вызывает и многомасштабность проблемы

исследования электромагнитных механизмов генерации торнадо: от наноразмера (гидратированные кластерные ионы) и микроразмера (брызги и капли с ДЭС в грозовом облаке и каскаде под опускающейся воронкой смерча) до мезомасштаба (неоднородное распределение заряда в стенках воронки) и макроуровня для всего торнадо-циклона. В ходе решения большинства рассмотренных в диссертации задач используются аналитические и приближенные количественные способы исследования, а численные методы применяются реже.

Процесс образования низового прорыва исследуется с помощью итерационного численного метода, основанного на решении уравнения Лапласа с использованием функции Грина. С целью изучения процесса формирования воронок торнадо применяется линеаризация исходной нелинейной ЭГД-системы и рассматриваются условия, когда малые возмущения скорости потока могут расти за счет электромагнитных факторов. Генерация завихренности в опускающейся воронке смерча за счет сильных возмущений АЭП под грозовым облаком и радиального перепада зарядовой плотности среды по сечению воронки исследуется с использованием метода характерных масштабов. Влияние турбулентности на рост скорости потока в торнадо исследуется на основе уравнений Рейнольдса с разложением характеристик потока на основную среднюю и малую пульсационную составляющие, а для изучения турбулентности в интенсивных атмосферных вихрях типа развитых торнадо или тайфунов применяется методика вейвлет-анализа данных натурных наблюдений.

Достоверность результатов обусловлена использованием стандартных математических методов механики и электродинамики сплошных сред, а также уравнений математической физики. Численные методы, используемые в диссертации для решения внешних краевых задач и вейвлет-анализа экспериментальных данных, были апробированы в исследованиях других авторов. Результаты настоящей диссертационной работы качественно и количественно согласуются с визуальными и экспериментальными данными натурных наблюдений.

Апробация работы. Результаты настоящей диссертации были представлены на следующих школах и конференциях: «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2010, 2015 – 2019); «Современные проблемы прикладной математики, теории управления и математического моделирования» (Воронеж, 2011); «Потоки и структуры в жидкостях» (Владивосток, 2011; Санкт-Петербург, 2013); «Ломоносов» (Москва МГУ, 2022 – 2023); Международной конференции «Современные проблемы математики и механики», посвященной 80-летию В.А. Садовниченко (Москва, МГУ, 2019); «Современные проблемы

электрофизики и электрогидродинамики» (Санкт-Петербург, 2012, 2015, 2019); «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2014); XI – XIII Всероссийские съезды по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015; Уфа, 2019; Санкт-Петербург, 2023); «Волны и вихри в сложных средах» (Калининград, 2015; Москва, 2017); «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (Миасс, 2015); «Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation» (Москва, 2015); «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Туапсе, 2015); XVIII Всероссийская конференция, посвященная 60-летию Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике (Сочи, 2016); Всероссийская конференции молодых ученых-механиков (Сочи, 2017, 2022); «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2018, 2019); «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2019); «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей» (Екатеринбург, 2019, 2023).

Результаты работы были неоднократно доложены и обсуждены на научно-исследовательских семинарах кафедр газовой и волновой динамики, аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; семинаре «Физико-химическая кинетика в газовой динамике» НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова; семинаре по механике сплошных сред под руководством А.Г. Куликовского, В.П. Карликова, О.Э. Мельника и А.Н. Осипцова НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова; семинаре имени А.А. Рухадзе Теоретического отдела ИОФ РАН; Всероссийском междисциплинарном научном семинаре «Механика: эксперимент, моделирование, приложения».

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором. Научный руководитель принимал участие в формулировке постановок задач, верификации и анализе результатов, при этом вклад диссертанта является определяющим. Основные идеи и положения диссертации изложены в 19 научных работах общим объемом 14,91 п.л. Личный вклад автора составляет 8,25 п.л., или 11/20; в работах [2, 4, 11] личный вклад автора равен 1, а в работах [1, 3, 5 – 10, 12 – 19] – 1/2.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертации изложены в 19 печатных изданиях общим объемом 14,91 п.л., 8 из которых (объемом 9,45 п.л.) опубликованы в журналах Web of Science, Scopus и/или RSCI.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 214 страниц, включая 1 таблицу и 51 рисунок. Список литературы содержит 213 наименований.

Содержание работы

Во **введении** дается общая характеристика работы: обосновывается актуальность темы исследования роли электромагнитных факторов в генерации торнадо, описываются цели и задачи, новизна работы и положения, выносимые на защиту, излагается научно-практическая значимость работы и использованные методы исследования.

В первой главе проведен обзор основных гипотез и модельных подходов к исследованию торнадо. **В разделе 1.1** рассмотрены гидро- и термогидродинамические подходы и модели торнадо. В моделях первого типа учитываются скорость, давление, завихренность, иногда вязкость или спиральность; а в подходах второго типа исследуется роль изменения температуры и/или влажности среды. Отмечается, что гипотезы и модели, не учитывающие электромагнитных эффектов, хотя иногда позволяют обосновать некоторые закономерности торнадо, однако не объясняют ряда важных явлений: высокую электрическую активность торнадо; образование каскада капель воды над подстилающей морской поверхностью еще до касания воронки с ней; сильную неоднородность закрутки воронки и ее локализации в тонких стенках, толщина которых может быть на два порядка меньше радиуса самого торнадо. Эти и некоторые другие специфические черты формирования торнадо (типа воротника в нижней части торнадо-циклона) теоретически обоснованы в настоящей диссертации.

В разделе 1.2 с использованием энергетических оценок из работы [Vonnegut В.] показано, что для генерации потоков с большими скоростями недостаточно учета только термогидродинамических факторов, поэтому для полноценного исследования смерчей необходимо использовать гидроэлектромагнитные гипотезы и модели, что также подчеркивается в [5]. В разделе проведен обзор работ, в которых анализируется влияние магнитных и электрогидродинамических эффектов на динамику торнадо в зрелой стадии, и некоторых статей, где предпринята попытка исследования смерча на начальном этапе формирования из грозового облака. С учетом эмпирического факта, что под мощными грозовыми облаками энергия АЭП более чем на порядок превышает энергию геомагнитного

поля, для исследования начальной стадии процесса генерации торнадо и низовых прорывов в диссертации используется система ЭГД-уравнений [Остроумов Г.А., 1979⁵]

$$\begin{cases} \rho[\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}] = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \rho_e \mathbf{E}, & \partial \rho / \partial t + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \\ p = p(\rho), & \varepsilon_0 \operatorname{div}(\varepsilon_e \mathbf{E}) = \rho_e, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \rho_e \mathbf{u}, \quad \partial \rho_e / \partial t + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{E} = -\nabla \Phi \end{cases} \quad (1)$$

в ее различных приближениях, где $\mathbf{u}$, p – соответственно скорость и давление, ρ , ρ_e – массовая и зарядовая плотности, η – динамическая вязкость, Φ – потенциал электрического поля $\mathbf{E}$, ε_e – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, σ – электропроводность, $\mathbf{j}$ – плотность электрического тока.

Во второй главе проведен анализ роли сильных возмущений АЭП под грозовым облаком с трипольной электрической структурой в процессе генерации торнадо и под дипольным облаком во время формирования низовых прорывов – мощных струйно-нисходящих потоков от грозового облака в сторону подстилающей поверхности. Дипольной называется такая электрическая структура грозового облака, при которой его верхняя часть обычно заряжена положительно, а нижняя – отрицательно. При трипольной структуре в центре нижней части облака появляется область «дополнительного» положительного заряда, причины появления которой вызывали вопросы у многих исследователей, в частности у Р. Фейнмана. В диссертации рассматривается топологический вид возмущений АЭП именно под дипольными и трипольными облаками.

В разделе 2.1 рассмотрена возможность изменения зарядового распределения грозового облака с дипольного (рисунок 1 а) на трипольное (рисунок 1 б). Одной из причин перезарядки облака может являться подъем заряженных микрокапель и кластерных ионов к центру нижней части грозового облака под действием сильных вариаций АЭП. Вдали от облака электрическое поле направлено в сторону земной поверхности ($E_z < 0$) и по модулю приблизительно равно полю «хорошей погоды» $E_{\text{атм}} \sim 100$ В/м. Под грозовым облаком вектор напряженности направлен вверх, в сторону отрицательного заряда (под центром облака АЭП составляет до $10^5 - 10^6$ В/м). Следовательно, производная квадрата напряженности АЭП по расстоянию r до оси грозового облака приобретает большие отрицательные значения, что обеспечивает сбор кластерных ионов и микрокапель к оси z во всем объеме между грозовым облаком и подстилающей поверхностью под действием электрической силы

⁵ Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей: Физические основы электрогидродинамики. – М.: Наука, 1979. – 319 с.

$$\mathbf{F}_r = 2\pi a^3 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_e (\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} \nabla E^2, \quad (2)$$

где E – напряженность АЭП, ε_e и ε_i – относительные диэлектрические проницаемости воздуха и сферической частицы радиуса a соответственно. Под центром облака, где E особенно велико, имеет место также подъем положительных кластерных ионов (подробнее их роль в генерации торнадо описана в Приложении А) под действием вертикальной электрической силы Кулона $\mathbf{F}_z$, что и приводит к формированию «дополнительного» положительного заряда.

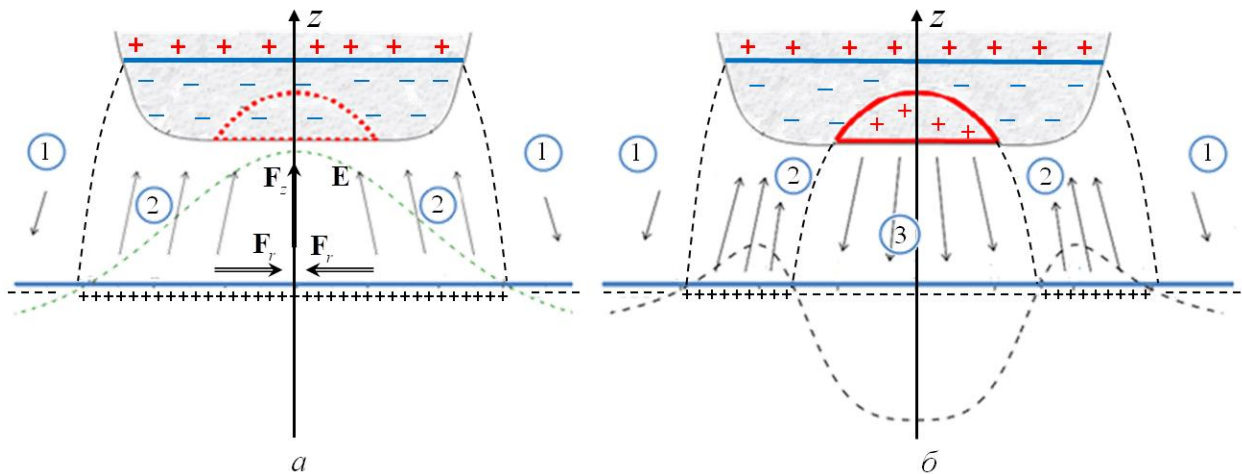


Рисунок 1 – а) Схемы возмущений АЭП под дипольным облаком и генерации трипольной зарядовой структуры (пунктир – область формирования «нижнего» положительного заряда), б) схема возмущений АЭП под трипольным облаком.

Рассмотренный механизм в определенной степени объясняет малый радиус этой области по сравнению с размером всего грозового облака. В литературе выделяют около 20 различных механизмов зарядки и перезарядки облачных капель и появления в грозовом облаке областей заряда разного знака.

Для описания изменения напряженности АЭП под грозовым облаком в процессе его перезарядки в диссертации предложена новая двухпараметрическая формула [3], учитывающая наличие АЭП даже в ясную погоду и возможность его усиления под мощным грозовым облаком на несколько порядков:

$$\tilde{E}_z = \frac{E_z}{E_{\text{атм}}} = \frac{(4\tilde{r})^4 + \beta}{(4\tilde{r})^4 + 1} [N \cdot \exp(-\tilde{r}^2) - 1], \quad (3)$$

где E_z – вертикальная компонента АЭП, $E_{\text{атм}} \sim 100$ В/м – поле ясной погоды, $\tilde{r}$ – безразмерное расстояние до оси облака. Значение параметра N (от нескольких единиц до $10^3 - 10^4$) характеризует рост АЭП под центром грозового облака, а вариации второго параметра β в диапазоне $-1 \leq \beta \leq 1$ отвечают за изменение его зарядовой структуры. Значение $\beta=1$ соответствует дипольному облаку, $0,8 \leq \beta < 1$ –

началу формирования нижнего положительного заряда, при $\beta \leq 0$ поле под центром облака становится направленным вниз, а $\beta = -1$ соответствует полностью сформированному трипольному облаку. На рисунке 2 представлены графики АЭП под грозовым облаком при различных β , построенные по формуле (3).

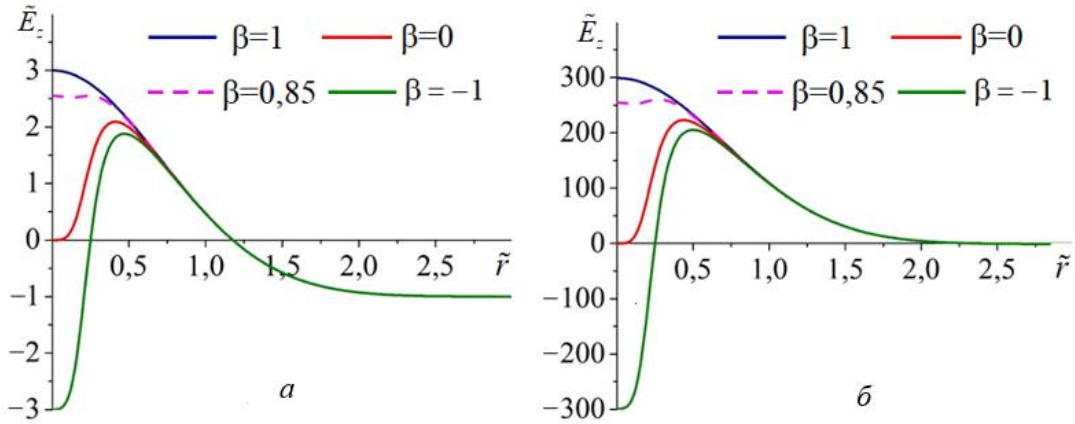


Рисунок 2 – Графики возмущений АЭП под грозовым облаком по формуле (3) для $N=4$ (а) и $N=300$ (б) при разных β .

Видно, что при $N=4$ и $N=300$ числовые значения напряженности различаются на 2 порядка, но топологические виды возмущений АЭП близки. Следовательно, формула (3) хорошо описывает изменение АЭП под грозовыми облаками разной мощности.

Роль возмущений АЭП под материнским грозовым облаком исследуется на основе формулы (3) и упрощенной системы ЭГД-уравнений (1):

$$\begin{cases} \rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u}) = -\nabla p_e + \rho_e \mathbf{E} + \eta \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}, & \text{div } \mathbf{u} = 0, \\ p_e = p - \varepsilon_0 (\varepsilon_{eff} - 1) E^2 / 2, & \varepsilon_0 \text{div}(\varepsilon_{eff} \mathbf{E}) = \rho_e, \quad \mathbf{E} = -\nabla \Phi, \end{cases} \quad (4)$$

где p_e – модифицированное или электрогидродинамическое (ЭГД) давление. Диэлектрическая проницаемость ε_{eff} может принимать большие значения, что обусловлено эффектом гигантской диэлектрической проницаемости (ЭГДП) в грозовом облаке как суспензии мелких водяных капель с тонким ДЭС на их поверхности. Для однородной суспензии капель с объемной концентрацией $c < 0,2$ и радиусом a с ДЭС толщины $d \ll a$ и диэлектрической проницаемостью ε_Σ внутри двойного слоя

$$\varepsilon_{eff} \sim c(\varepsilon_\Sigma - 1) f \frac{a}{d} \gg 1, \quad (5)$$

где f – безразмерное выражение, зависящее от гидродинамических и электрических характеристик капель и окружающей среды. Подробный вывод формулы (5) приведен в [7] и в Приложении Б диссертационной работы.

Из (3) – (5) видно, что усиление напряженности АЭП под грозовым облаком в совокупности с ЭГДП может приводить к падению ЭГД-давления и благоприятствовать началу реализации неустойчивости Рэлея – Тейлора по двум возможным сценариям:

– низовой прорыв тяжелой и заряженной газо-капельной среды дипольного грозового облака к земной поверхности;

– изменение зарядовой структуры облака с дипольной на трипольную с возможным последующим образованием воронок торнадо.

В разделе 2.2 с использованием ЭГД-уравнений (4) проведено численное моделирование движения низового прорыва, формирующегося из центра нижней части дипольного облака, до его контакта с земной поверхностью. Течение вне зоны прорыва считается осесимметричным, стационарным и безвихревым, область прорыва предполагается в форме параболоида вращения, движущегося вертикально вниз с постоянной скоростью, при этом электропроводность границы прорыва считается постоянной.

В собственной системе координат (связанной с областью прорыва) система (4) распадается на две подобные подсистемы, первая из которых решается через гидродинамическую функцию тока, а вторая – через электрическую. Эти подзадачи связаны условием сохранения заряда на границе параболоида, которое выписывается через нормальную производную электрического потенциала и поверхностную дивергенцию от конвективного тока вдоль границы прорыва. В результате численного моделирования получено, что абсолютные значения напряженности поля вблизи прорыва до 6 – 7 раз увеличиваются в сравнении с АЭП под материнским грозовым облаком. Это объясняет высокую электрическую активность вблизи низовых прорывов, в том числе на начальной стадии.

В разделе 2.3 исследована роль возмущений АЭП под грозовым облаком, а также ЭГДП на стадии перезарядки облака с дипольного на трипольное в процессе формирования воронок торнадо. Сильные возмущения АЭП под облаком в совокупности с ЭГДП обеспечивают падение ЭГД-давления $p_e = p - \varepsilon_0 (\varepsilon_{eff} - 1) E^2 / 2$ на определенном расстоянии до оси потока. Именно в области локального понижения p_e должна формироваться воронка торнадо.

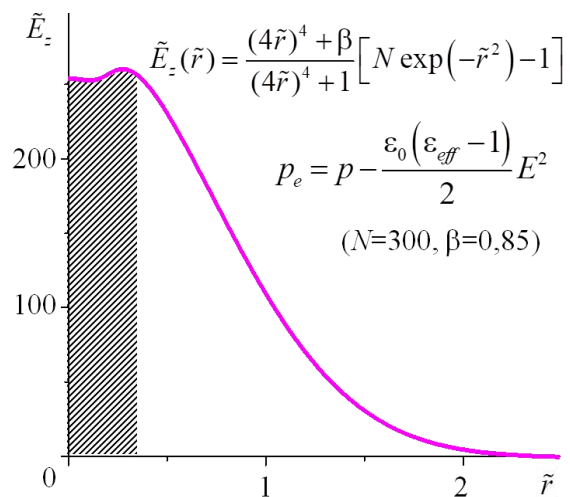
Опусканию воронки могут сопутствовать некоторые специфические черты [Наливкин Д.В.] такие, как «воротник», т.е. выступ квазицилиндрической формы в ее основании, или так называемые «рога дьявола» – две (или более) воронки, образующиеся из углов широкого вращающегося воротника. Появление этих эффектов связано с особым распределением АЭП под грозовым облаком на

разных этапах формирования трипольной структуры. Как видно из формулы (3) и рисунка 3, на начальном этапе ее образования (при $\beta=0,85$) профили АЭП и, соответственно, ЭГД-давления p_e имеют плато вблизи оси z . Форма этого плато соответствует конфигурации воротника (рисунок 3 б), поэтому могут возникать условия для образования последнего [3, 6].

Часто ЭГДП проявляется не только внизу центральной части грозового облака, но и (обычно сильнее и визуально нагляднее за счет образования каскада) вблизи подстилающей морской поверхности под центром облака, где возмущения АЭП наиболее значительные, а концентрация микрокапель достаточно высокая за счет брызгообразования из-за столкновения и обрушения поверхностных волн. В этой области падает ЭГД-давление за счет высоких значений E и ε_{eff} в (4), а при определенных β (например, при $\beta=-1$) радиальная компонента электрической силы $F_r \sim \nabla E^2$, задаваемой формулой (2), принимает большие отрицательные значения (рисунок 4 а), а вертикальная электрическая сила может приводить к образованию каскада [1, 8] из брызг и пены над неустойчивым холмом приподнятой воды (рисунок 4 б),двигающимся вслед за облаком.



а



б

Рисунок 3 – а) воротник (отмечен кружком) в основании воронки смерча в г. Пула, Хорватия, 2013 г.; б) график возмущений АЭП по формуле (3) при $N=300$ и $\beta=0,85$; область возможного формирования воротника заштрихована.

Иногда каскад формируется задолго до касания воронки смерча с подстилающей поверхностью, что было известно еще М.В. Ломоносову (на рисунке 4 б красные границы областей наложены на черно-белый рисунок М.В. Ломоносова) и А. Пуанкаре[Пуанкаре А., 2000⁶], в [1] представлена простейшая модель этого явления без учета ЭГДП, а в [8] – с учетом этого эффекта. Для более

⁶ Пуанкаре А. Теория вихрей. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 160 с.

крупных капель с ДЭС, помимо силы (2), необходимо учесть возможность их левитации в сильном электрическом поле.

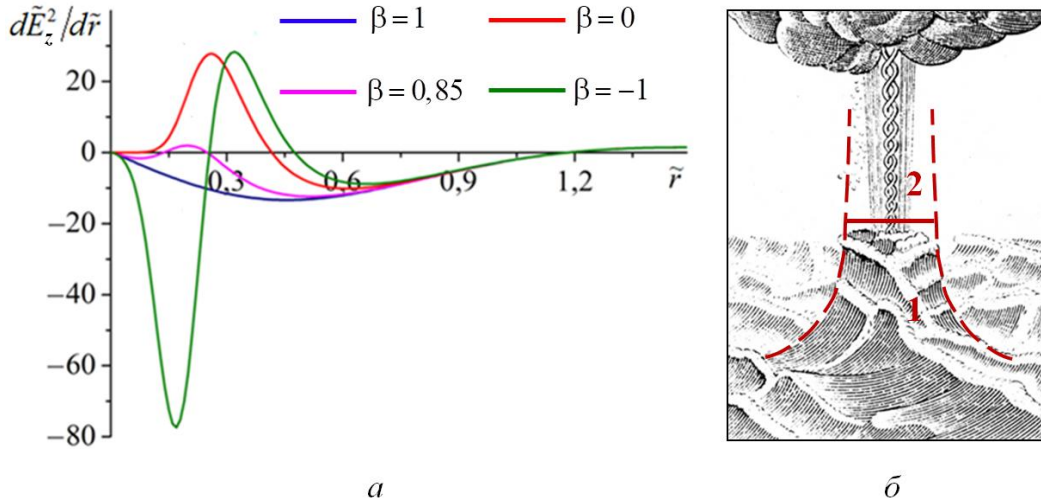


Рисунок 4 – а) График $d\tilde{E}_z^2/d\tilde{r}$ под грозовым облаком при разных β в соответствии с профилями АЭП на рисунке 2; б) схема формирования каскада навстречу опускающейся воронке смерча: 1 – область гетерогенной среды из капель воды и пены, 2 – верхняя квазицилиндрическая зона каскада.

В разделе 2.4 аналитически решена задача о левитации сферической капли с поверхностным зарядом тонкого ДЭС в вертикальном электрическом поле, напряженность которого находится через определяющие характеристики внешней среды и жидкости внутри капли. В приближении Стокса системы уравнений вне (величины без штриха) и внутри сферической капли радиуса a (штрихованные величины) и граничные условия в сферической системе координат (R, θ, φ) с началом в центре капли записываются в виде

$$\begin{aligned}
 R > a: \quad & \nabla p = \eta \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}, \quad \text{div} \mathbf{u} = 0, \quad \Delta \Phi = 0; \\
 R < a: \quad & \nabla p' = \eta' \Delta \mathbf{u}' + \rho' \mathbf{g}, \quad \text{div} \mathbf{u}' = 0, \quad \Delta \Phi' = 0; \\
 R = a: \quad & u_R = u'_R = 0, \quad u_\theta = u'_\theta, \quad \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial R} - \text{div}_\Sigma (q \mathbf{u}_\tau) = 0, \quad \sigma' \frac{\partial \Phi'}{\partial R} - \text{div}_\Sigma (q \mathbf{u}'_\tau) = 0, \quad (6) \\
 & p'_{R\theta} - p_{R\theta} = \frac{q}{a} \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial \theta}, \quad p'_{RR} - p_{RR} = -\frac{2\gamma(\{\Phi\})}{a}, \quad \gamma(\{\Phi\}) = \gamma_0 + q\{\Phi\}, \quad \{\Phi\} = \Phi' - \Phi; \\
 R \rightarrow 0: \quad & |\nabla \Phi'|, |\mathbf{u}'|, |\nabla p'| < \infty; \quad R \rightarrow \infty: \quad \mathbf{u} \rightarrow 0, \quad p = p_\infty - \rho g R \cos \theta, \quad \mathbf{E} = -\nabla \Phi = E_0 \mathbf{k};
 \end{aligned}$$

где η – динамическая вязкость, $p_{R\theta}$ и p_{RR} – компоненты тензора вязких напряжений, $\mathbf{g}$ – ускорение силы тяжести, Φ – потенциал электрического поля $\mathbf{E}$ ($E_0 = \text{const}$), σ – электропроводность, $q < 0$ – плотность заряда внешней обкладки ДЭС, $\gamma(\{\Phi\})$ – поверхностное натяжение капли, зависящее от $q = \text{const}$ и скачка $\{\Phi\}$ электрического потенциала поперек тонкого ДЭС, $\text{div}_\Sigma (q \mathbf{u}_\tau)$ – поверхностная

дивергенция конвективного поверхностного тока [Левич В.Г., 1959⁷], $\mathbf{u}_\tau = \mathbf{u}_\theta$ – касательная скорость.

Для решения задачи левитации (6) используются функции тока вида

$$\Psi(R, \theta) = aD \left(\frac{R}{a} - \frac{a}{R} \right) \sin^2 \theta, \quad \Psi'(R, \theta) = aD \left(\frac{R^4}{a^4} - \frac{R^2}{a^2} \right) \sin^2 \theta, \quad (7)$$

где $D = \text{const}$, а течение внутри капли представляет собой сферический вихрь Хилла, который является точным решением не только уравнений Стокса, но и уравнений Эйлера для идеальной жидкости. В этом случае вертикальная сила сопротивления, действующая на сферическую частицу со стороны внешней среды, равна

$$F_z = \int_{R=a} (p_{RR} \cos \theta - p_{R\theta} \sin \theta) dS = -8\pi\eta D, \quad (8)$$

а скорость в сферических координатах выражается через функции тока как

$$u_R = \frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}, \quad u_\theta = -\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial R}, \quad u'_R = \frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial \Psi'}{\partial \theta}, \quad u'_\theta = -\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial \Psi'}{\partial R}.$$

Из вида граничных условий при $R=a$ и $R \rightarrow \infty$ следует решение для скачка $\{\Phi\}$ потенциала электрического поля вне и внутри капли:

$$\{\Phi\} = \left(\frac{3E_0 a}{2} - \frac{2Dq}{\sigma a} \right) \cos \theta + (C' - C), \quad |C' - C| \gg \left| \frac{3E_0 a}{2} - \frac{2Dq}{\sigma a} \right|,$$

где разность $C' - C$ задает электростатический скачок $\{\Phi\}$ потенциала поперек ДЭС без учета конвективных токов вдоль его обкладок. Из этой формулы с учетом (7) – (8) и граничных условий на $\{p_{R\theta}\}$ получены выражение для коэффициента D и условие левитации капли [8] с поверхностным ДЭС:

$$D = \frac{3E_0 q a^2}{4(3\eta' + 3\eta + q^2 / \sigma)}, \quad qE_0 = \frac{2a(\rho - \rho')g(3\eta' + 3\eta + q^2 / \sigma)}{9\eta}, \quad (9)$$

откуда для внешней обкладки ДЭС при $q < 0$ следуют предельные частные случаи и некоторые предварительные выводы:

- если $qE_0 = 0 \Leftrightarrow q = 0$ (нет ДЭС) или $E_0 = 0$, то $\rho = \rho'$, а если $qE_0 \neq 0$, то $\rho < \rho'$;
- если $\eta \rightarrow 0$ (капля в проводящем газе), то $E_0 \rightarrow \infty$ как $1/\eta$;
- для левитации более крупных капель необходимо более сильное поле.

Из условия на скачке для $\{p_{RR}\}$ при $R=a$ можно получить давление в центре капли $p'_0 = p_\infty + 2\gamma_0 / a + q(C' - C) / a$, где последний член отвечает за электрострикционное давление.

⁷ Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 700 с.

В реальных условиях при сильных внешних электрических полях капля не всегда будет иметь сферическую форму, поскольку возможно сжатие капли вдоль ее экватора (при $\theta=\pi/2$) за счет взаимодействия меридионального конвективного тока внутренней обкладки подвижного ДЭС с зажатым внутри него азимутальным магнитным полем. Капля с ДЭС вытягивается вдоль поля E_0 и теряет сферическую форму, что способствует ее ЭГД-разрыву на две капли радиуса $a_1 \approx a / \sqrt[3]{2}$ и несколько брызг. Этот тип разрыва может повторяться несколько раз и приводить к послойной левитации капель, что важно учитывать при анализе ЭГД-механизмов образования каскада над морской поверхностью [1, 7, 8].

Если приближенно считать, что каскад имеет форму половины однополостного гиперболоида, широкая часть которого (область 1 на рисунке 4 б) примыкает к морской поверхности, вытянутая квазицилиндрическая часть (область 2 на рисунке 4 б) практически доходит до торца опускающейся воронки торнадо, а гетерогенную среду внутри этого цилиндра рассматривать как стратифицированную жидкость, то можно воспользоваться результатами статьи [Габов С.А. и др., 1987⁸]. В этой работе рассматривался полубесконечный вертикальный столб стратифицированной вдоль оси z жидкости, где была найдена предельная амплитуда волн, групповая скорость которых направлена снизу вверх, т.е. происходит закачка вибрационной энергии в полубесконечный столб от колеблющегося дна. В модели каскада таким «генератором» вибрационной энергии является его нижняя часть, примыкающая к морской поверхности в виде неустойчивого холма с обрушением возникающих на нем волн, которые вызывают интенсивное капле- и брызгообразование.

В разделе 2.5 показано, что в зависимости от конфигурации АЭП под трипольным вращающимся грозовым облаком (торнадо-циклоном) воронка торнадо может опускаться к земной поверхности, зависать на некоторой высоте или обратно втягиваться в грозовое облако. При осесимметричном течении невязкой и несжимаемой облачной среды уравнения системы (4) в цилиндрических координатах записываются в виде

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\varphi^2}{r} \right) &= -\frac{\partial p_e}{\partial r}, \quad \frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{u_r u_\varphi}{r} = 0, \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= -\rho g - \frac{\partial p_e}{\partial z} + \rho_e E_z, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

⁸ Габов С.А., Оразов Б.Б., Свешников А.Г. О нестационарных колебаниях вертикального столба стратифицированной жидкости и их стабилизации // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 295. – № 5. – С. 1041–1045.

Предполагается, что в начальный момент времени $t=0$ поле скоростей в торнадо-циклоне из-за воздействия силы Кориолиса или других факторов уже имеет вид

$$\mathbf{u}(r, z, t)|_{t=0} = \mathbf{u}_0(r), \quad u_{0r} = u_{0z} = 0, \quad u_{0\varphi} = U(r) = \frac{\Gamma}{r} \cdot [1 - \exp(-\alpha^2 r^2)], \quad (11)$$

где Γ , $\alpha = \text{const}$, $\alpha \sim 1/L$, $L \sim 10$ км – характерный горизонтальный масштаб грозового облака. В качестве граничных условий ставим $u_r|_{r=0} = u_\varphi|_{r=0} = 0$ (осевая симметрия) и $u_r|_{r \rightarrow \infty} = u_\varphi|_{r \rightarrow \infty} = 0$ (невозмущенность потока на удалении от оси). Считаем, что электрическое поле E_z удовлетворяет формуле (3) и характерный масштаб изменения напряженности АЭП имеет порядок L .

Также предполагается, что гидродинамические факторы (например, сила Кориолиса) вносят малую стационарную поправку $\mathbf{v}_1(r, z)$ к полю скоростей (11), а наличие АЭП под грозовым облаком – малую нестационарную поправку $\mathbf{v}(r, z, t)$. Тогда решение уравнений (10) можно искать в виде

$$\mathbf{u}(r, z, t) = \mathbf{u}_0 + \mathbf{v}_1(r, z) + \mathbf{v}(r, z, t), \quad |\mathbf{v}_1(r, z)|/U(r) \ll 1, \quad |\mathbf{v}(r, z, t)|/U(r) \ll 1. \quad (12)$$

В ходе исследования нестационарных возмущений предполагается, что

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad E_z \sim E_{\text{атм}} N \beta. \quad (13)$$

Далее уравнения (10) с учетом (11) – (13) приводятся к безразмерному виду и линеаризуются вблизи поля скоростей $\mathbf{u}(r, z, t)|_{t=0} = \mathbf{u}_0(r)$:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} - 2 \frac{U v_\varphi}{r} = 0, \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = \tilde{E} N \beta, \quad \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \left(\frac{dU}{dr} + \frac{U}{r} \right) = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

где $\tilde{E} = (\rho_e E_{\text{атм}}) / (\rho \Gamma^2 \alpha^3)$. Тогда $\mathbf{v}(r, z, t)$ удовлетворяет выражениям

$$v_r = 0, \quad v_\varphi = 0, \quad v_z = \tilde{E} N \beta t \quad \text{или} \quad v_r = 0, \quad v_\varphi = 0, \quad \rho v_z = \rho_e E_{\text{атм}} N \beta t \quad (15)$$

в безразмерном и размерном виде. Из (14) – (15) и проведенных в диссертации и работе [4] оценок следует, что возможны случаи как опускания воронки с формированием зрелого торнадо ($\beta < 0$), так и ее колебательного зависания ($\beta \approx 0$) или обратного втягивания ($\beta > 0$) в облако.

В третьей главе рассмотрены электромагнитные факторы усиления завихренности в воронке торнадо, формирующейся из нижней части торнадо-циклона. Показано, что радиальный перепад зарядовой плотности воронки может обеспечивать локализацию завихренности в ее тонких стенках, толщина d которых часто на 1 – 2 порядка меньше радиуса R воронки.

В разделе 3.1 исследовано влияние сильных возмущений АЭП под трипольным вращающимся грозовым облаком на распределение заряда в

формирующейся из центра его нижней части воронке торнадо. Если начало образования воронки связано с реализацией неустойчивости типа Рэлея – Тейлора (холодная, тяжелая и заряженная газо-капельная среда облака располагается выше сравнительно теплых нижних слоев атмосферы), то по мере опускания воронки все большую роль играют электростатические силы ее взаимодействия с подстилающей поверхностью. Эти силы могут приводить к ускорению опускания воронки, а также своеобразному распределению зарядов в ней: ядро заряжено положительно, а стенки – отрицательно. Это может способствовать протеканию радиального электрического тока $\mathbf{j} = j_r \mathbf{e}_r$, взаимодействие которого с вертикальной составляющей геомагнитного поля $\mathbf{B} = B_z \mathbf{e}_z$ приводит к появлению азимутальной магнитной силы $\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = -j_r B_z \mathbf{e}_\varphi$ и усилению завихренности воронки [1] по формуле

$$\omega_z(t) = \omega_0 + \frac{1}{r^2} \int_0^t \gamma(t) dt = \omega_0 + \frac{\langle \gamma \rangle t}{r^2}, \quad (16)$$

где ω_0 – начальная завихренность в торнадо-циклоне, $\gamma(t) = -j_r(t)B_z(t)$, а угловые скобки обозначают осреднение по времени.

Магнитное поле Земли в совокупности с радиальным электрическим током важно учитывать при исследовании генерации завихренности воронки наряду с силой Кориолиса, влияние которой на масштабах порядка радиуса воронки весьма мало и не всегда является основной причиной интенсификации завихренности грозового облака и формирующейся воронки. В работе [Абрамов В.А., 1998⁹] описывается, как в сентябре 1997 г. при изначально ясном небе перед серией торнадо вблизи Владивостока формирование и усиление закрутки возникшего под действием восходящих смерч-вихрей дегазационной природы облака длилось около 10 минут, что невозможно благодаря одной лишь кориолисовой силе.

Магнитный механизм, описанный в этом разделе, в дополнение к силе Кориолиса ускоряет циклоническую закрутку воронки. При трипольной структуре заряда облака ядро формирующейся воронки заряжено положительно, стенки – отрицательно, поэтому $j_r > 0$. Тогда из (16) следует, что $\gamma(t)$ положительно в северном полушарии, где $B_z < 0$, и отрицательно в южном ($B_z > 0$).

В разделе 3.2 исследуется усиление первичной (вертикальной) завихренности ω_z под влиянием плавучести и сильных возмущений АЭП. В ЭГД-приближении и предположении линейной зависимости плавучести от разности $T' = T - T_0$ температур внешнего воздуха T и воронки T_0 (приближение Обербека – Буссинеска) уравнения движения имеют вид

⁹ Абрамов В.А. Смерчи над Владивостоком // Вестник ДВО РАН, 1998. – № 2. – С. 3 – 22.

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p_e - \rho b T' \left(\mathbf{g} + \frac{u_\phi^2}{r^2} \mathbf{r} \right) + \rho_e \mathbf{E}, \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho_e}{\varepsilon \varepsilon_0}, \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \end{cases} \quad (17)$$

где $-\rho b T'(\mathbf{g} + u_\phi^2 \mathbf{r} / r^2)$ – сила плавучести, $b \sim 1/T$ – температурный коэффициент расширения среды. Путем взятия ротора от первого уравнения можно получить уравнение для завихренности, анализ которого в проекции на ось z показывает, что в стенках воронки ω_z растет со временем как

$$\frac{\omega_z(t)}{\omega_z(0)} \sim \exp(\lambda t^2), \quad \lambda = \frac{R}{2h} \left(\frac{bgT'}{d} + \frac{1}{\rho \delta} \Delta \rho_e E_z \right), \quad (18)$$

где $\delta \ll d$ – толщина слоя в стенках воронки, в котором плотность заряда меняет знак. При этом основную роль в эволюции завихренности играют электрические механизмы. Оценки в диссертации показывают, что влияние заряда воронки на рост ее завихренности становится сильно заметным уже на 20 – 30 секундах с момента начала опускания (время формирования зрелого торнадо обычно составляет $10^2 - 10^3$ с). Следовательно, результат (18) объясняет рост завихренности воронки еще в начальной стадии ее формирования.

В разделе 3.3 показано, что сильные вариации АЭП под грозовым облаком могут оказывать влияние на азимутальную (вторичную) завихренность ω_ϕ , рост которой соответствует усилению всасывания в воронку торнадо, а убывание – ослаблению притока воздушной массы. Изменение ω_ϕ исследуется с помощью уравнения (17), анализ которого показывает, что сильные вариации АЭП под грозовым облаком ослабляют всасывание воздушных масс в воронку торнадо.

В разделе 3.4 исследованы механизмы генерации завихренности в зрелом торнадо за счет атмосферной турбулентности на основе уравнений неразрывности и движения (с разложением характеристик на средние и пульсационные составляющие). Если средние характеристики среды претерпевают малые возмущения относительно равномерного потока, а турбулентность однородна и изотропна, то линеаризованные уравнения турбулентного течения аналогичны системе уравнений Максвелла в СГС [Трошкин О.В., 1989¹⁰] с замыкающим соотношением типа закона Ома. С использованием этой аналогии и применением вейвлет-анализа натурных данных для реальных торнадо показано, что вклад турбулентности в завихренность среднего потока для смерчей может составлять

¹⁰ Трошкин О.В. О распространении малых возмущений в идеальной турбулентной среде // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 307. – № 5. – С. 1072 – 1076.

до 25% от влияния растяжения вихревых линий, т.е. в ходе исследования развитой стадии торнадо важно учитывать роль турбулентных пульсаций.

В заключении подведены итоги исследований, проведенных в диссертационной работе:

1. Показана необходимость учета совокупной роли сильных возмущений АЭП под грозовым облаком и возможного эффекта гигантской диэлектрической проницаемости на понижение ЭГД-давления под облаком и формирование торнадо и низовых прорывов.

2. На основе решения системы уравнений электрогидродинамики показано, что повышение напряженности АЭП под грозовым облаком создает благоприятные условия для генерации низового прорыва из дипольного грозового облака и воронок торнадо из трипольного.

3. В зависимости от топологического вида возмущений АЭП под трипольным грозовым облаком формирующаяся из него воронка может как опускаться к земной поверхности с последующим образованием торнадо, так и колебательно зависать на некоторой высоте или втягиваться обратно в облако.

4. В зависимости от стадии формирования трипольной структуры грозового облака соответствующая конфигурация возмущений АЭП способствует возможному образованию воротника в основании воронки торнадо или каскада над подстилающей поверхностью под ее торцом. Наличие тонкого двойного слоя на поверхности водяных капель в каскаде также дополнительно способствует их послойному зависанию в каскаде над морской поверхностью.

5. Сильные возмущения АЭП наряду с неоднородным распределением заряда в стенках воронки являются одной из причин усиления завихренности именно в стенках смерча. Вклад электрических механизмов при этом может превышать влияние термогидродинамических факторов.

В Приложении А изложены основные сведения о гидратированных кластерных ионах вида $(\text{H}_3\text{O})^+(\text{H}_2\text{O})_m$ и $(\text{OH})^-(\text{H}_2\text{O})_n$. Подчеркивается, что наличие этих ионов в атмосфере оказывает влияние на формирование ДЭС у облачных микрокапель, а также играет важную роль в формировании торнадо. Об этом свидетельствуют эмпирические факты сверхбыстрой генерации торнадо-циклонов восходящими вихрями дегазационной природы при изначально ясной погоде, как в сентябре 1997 г. в Амурском заливе вблизи Владивостока.

В Приложении Б исследована возможность эффекта гигантской диэлектрической проницаемости суспензии проводящих капель [6, 7] с тонким ДЭС в менее проводящей несущей среде. Наличие этого эффекта обеспечивается

электрокапиллярным дрейфом (ЭКД) капель. В результате ЭКД разноименно заряженные обкладки ДЭС приходят в движение и возникают конвективные поверхностные антипараллельные токи, а их взаимодействие с собственным магнитным полем обеспечивает появление электровихревого течения. Из решения уравнений для ЭКД однородной суспензии капель концентрации $c < 0,2$ с тонким ДЭС толщины $d \ll a$ (a – радиус капли) получено, что диэлектрическая проницаемость суспензии пропорциональна поверхностной плотности заряда обкладок ДЭС, произведению скоростей ЭКД, электровихревого течения и отношению $a/d \gg 1$. Поэтому в суспензиях капель с тонким ДЭС возможен эффект гигантской диэлектрической проницаемости.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и/или RSCI

1. Натяганов В.Л., Маслов С.А. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 4. Электромагнитные механизмы формирования торнадоподобного смерча // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. – 2014. – № 2. – С. 31–37. (Перевод: Natyaganov V.L., Maslov S.A. Electromagnetic mechanisms of forming a tornado-like whirlwind // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2014. – Vol. 69. – № 2. P. 29–34. – DOI: 10.3103/S0027133014020010) (Scopus, Q4, Impact Factor SJR – 0,2) (0,8 п.л. / авторский вклад 0,4 п.л.)
2. Маслов С.А. Электрические механизмы усиления завихренности в воронке торнадо // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. – 2015. – № 6. – С. 54–58. (Перевод: Maslov S.A. Electric mechanisms of vorticity amplification in the funnel of a tornado // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2015. – Vol. 70. – № 6. P. 149–152. – DOI: 10.3103/S0027133015060035) (Scopus, Q4, Impact Factor SJR – 0,2) (0,46 п.л.)
3. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Влияние зарядовой структуры грозовых облаков на формирование торнадоподобных вихрей // Прикладная физика. – 2015. – № 6. – С. 16 – 20. (RSCI, импакт-фактор РИНЦ – 0,456) (0,58 п.л. /авторский вклад 0,29 п.л.)
4. Маслов С.А. Влияние атмосферного электрического поля под грозовым облаком на формирование воронки торнадо // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. – 2017. – № 1. – С. 57 – 61. (Перевод: Maslov S.A. Effect of the atmospheric electric field under a thundercloud on tornado funnel formation // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2017. – Vol. 72. – № 1. – P. 23–27. – DOI: 10.3103/S0027133017010058) (Scopus, Q4, Impact Factor SJR – 0,2) (0,69 п.л.)

5. Синкевич О.А., Маслов С.А., Гусейн-заде Н.Г. Электрические разряды и их роль в генерации вихрей // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – № 2. – С. 203 – 226. (Перевод: Sinkevich O.A., Maslov S.A., Gusein-zade N.G. Role of electric discharges in the generation of atmospheric vortices // Plasma Physics Reports. – 2017. – Vol. 43. – № 2. – P. 232 – 252. – DOI: 10.1134/S1063780X17020131) (WoS, Q2, Impact Factor JCR – 1,1) (2,77 п.л. / авторский вклад 1,39 п.л.)
6. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Роль эффекта гигантской диэлектрической проницаемости в процессе генерации торнадо // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2019. – Т. 20. – № 2. – DOI: 10.33257/PhChGD.20.2.828. (RSCI, импакт-фактор РИНЦ – 0,569) (0,92 п.л. / авторский вклад 0,46 п.л.)
7. Maslov S., Natyaganov V. Role of electromagnetic mechanisms in downburst and tornado formation // Proc. 4th International Scientific School for young scientists “Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes”, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences / Ed. by V.I. Karev, D. Klimov, K. Pokazeev. – Springer Nature Switzerland AG. 2019. – P. 344–358. – DOI: 10.1007/978-3-030-11533-3_34 (Scopus, Impact Factor SJR 0,19) (1,73 п.л. / авторский вклад 0,87 п.л.)
8. Maslov S.A., Natyaganov V.L. On the effect of giant dielectric permittivity in the process of tornado generation and accompanying phenomena // Fluid Dynamics. – 2023. – Vol. 58. – № 3. – P. 497 – 509. – DOI: 10.1134/S0015462823600177 (WoS, Q3, Impact Factor JCR – 0,9) (1,5 п.л. / авторский вклад 0,75 п.л.)

Другие научные труды

9. Maslov S.A., Natyaganov V.L. Lomonosov and electrical nature of tornado: natural facts, arguments, models and results // Сборник докладов Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях: Физика геосфер». – М.: МАКС ПРЕСС, 2012. – С. 74–79 (0,58 п.л. / авторский вклад 0,29 п.л.).
10. Натяганов В.Л., Маслов С.А., Маслов А.К. Электрическая гипотеза Ломоносова о природе торнадо и восходящие смерч-вихри // X Международная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». – СПб: СОЛО, 2012. – С. 73–75 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
11. Maslov S.A. The influence of tripole thundercloud charge structure on secondary circulation in tornadoes // Proc. Int. Conf. “Fluxes and Structures in Fluids, Saint-Petersburg”. – Moscow, 2013. – P. 206–209 (0,35 п.л.).
12. Natyaganov V.L., Maslov S.A., Sytov V.E. The effect of thundercloud electric structure on tornado and downburst formation // XI Международная конференция

- «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики». – СПб: ИД «Петроградский», 2015. – С. 85–88 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
13. Натяганов В.Л., Маслов С.А., Киселева С.В., Сытов В.Э. Влияние электромагнитных факторов на формирование и динамику мощных атмосферных вихрей // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. – С. 2739-2741 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
14. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Обратные задачи идентификации роли электромагнитных факторов в процессах формирования торнадо // Современные проблемы математики и механики. Материалы Международной конференции, посвященной 80-летию академика В.А. Садовниченко. – М.: МАКС Пресс, 2019. – Т. 2. – С. 754 – 757 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
15. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Электрогидродинамические механизмы формирования торнадо и низовых прорывов из грозовых облаков // Сб. докл. XII Международной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики». – СПб., 2019. – С. 74 – 77 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
16. Натяганов В.Л., Маслов С.А. Триггерный характер электромагнитных взаимодействий в процессах формирования низовых прорывов и торнадо // Труды XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, т. 4. – Уфа, 2019. – С. 72–74 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).
17. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Сравнительный анализ влияния триггерных факторов электромагнитной природы на формирование низовых прорывов и торнадо // Материалы V Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. – С. 413 – 421 (1,04 п.л. / авторский вклад 0,52 п.л.).
18. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Триггерные механизмы быстрой генерации и подпитки торнадо-циклона // Динамические процессы в геосферах. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 101 – 109 (1,04 п.л. / авторский вклад 0,52 п.л.).
19. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Электрогидродинамические механизмы формирования каскада под опускающейся воронкой торнадо // Сб. тезисов докл. XIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике (в 4 томах). Том 4. – СПб: Изд-во Санкт-Петербургского политех. университета Петра Великого, 2023. – С. 694–696 (0,35 п.л. / авторский вклад 0,18 п.л.).