

**Отзыв научного руководителя,  
кандидата физико-математических наук, доцента  
Натяганова Владимира Леонидовича  
на диссертационную работу Маслова Сергея Алексеевича по теме  
«Роль электромагнитных механизмов в процессе формирования торнадо»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук  
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Все годы обучения в аспирантуре и работы на механико-математическом факультете МГУ Маслова С.А. отличают научная любознательность, трудолюбие и целеустремленность.

В представленной работе на основе уравнений электрогидродинамики исследуется актуальная проблема формирования из нижней части материнского грозового облака воронки торнадо (смерча) до ее касания с подстилающей морской поверхностью или сушей. Следует подчеркнуть, что этой проблемой занимались многие известные ученые, начиная от М.В. Ломоносова, который первым выдвинул гипотезу об электрической природе смерча, и французского энциклопедиста в области физико-математических наук А. Пуанкаре, который в конце XIX века предложил первую гидродинамическую модель торнадо. Однако вместо возвышения в виде холма над морской поверхностью под опускающейся воронкой А. Пуанкаре получил впадину и отметил, что это не соответствует натурным наблюдениям.

Позднее разными исследователями было предложено множество различных моделей торнадо, особенно в развитой и самой разрушительной стадии, когда воронка уже достигает подстилающей поверхности. Краткий обзор этих работ представлен в первой главе «Основные гипотезы и модели торнадо» диссертационной работы С.А. Маслова, где на энергетическом уровне обосновано использование уравнений электрогидродинамики на начальной стадии формирования воронки торнадо. Тогда как в развитой стадии (после замыкания «атмосферного конденсатора»: низ грозового облака – подстилающая поверхность) нужно использовать уже уравнения магнитной гидродинамики, в том числе на основе теории электровихревых течений с учетом взаимодействия сильных токов в стенках воронки с собственным магнитным полем.

Во второй главе исследовалась роль зарядовой структуры грозовых облаков в процессах формирования воронок торнадо или струйных низовых прорывов заряженной газо-капельной среды облака. В этой главе получена принципиально новая двухпараметрическая формула, адекватно описывающая

возмущения атмосферного электрического поля (АЭП) под грозовым облаком в процессе его перезарядки из дипольного (низ облака заряжен отрицательно, верх – положительно) в трипольное, когда в центре нижней части облака возникает зона дополнительного положительного заряда, под которой реализуется двойной реверс направления АЭП.

Один из параметров этой формулы характеризует величину, а другой – топологический вид возмущений АЭП под грозовым облаком. Тогда как в мировой геофизической литературе отдельно использовались достаточно схематичные четырехпараметрическая формула для дипольного облака и шестипараметрическая формула (3 шаровых заряда и 3 уровня высоты их центров) для трипольного облака.

На основе этой новой двухпараметрической формулы и малоизвестного эффекта гигантской диэлектрической проницаемости в суспензии сферических капель с поверхностным зарядом тонкого двойного электрического слоя (обоснованию этого парадоксального эффекта посвящено Приложение Б в диссертационной работе С.А. Маслова) теоретически показано, что дипольная структура заряда грозового облака способствует реализации неустойчивости Рэля – Тейлора в виде струйного низового прорыва (downburst по англоязычной терминологии); а трипольная структура создает благоприятные условия для образования воронки торнадо и ее специфических черт: «воротника» в основании воронки у нижнего края грозового облака и «каскада» на морской поверхности под ее торцом.

Для теоретического обоснования каскада – своеобразного столба из капель, пены и брызг, поднимающегося навстречу опускающейся воронки торнадо, в разделе 2.4 диссертационной работы аналитически решена новая задача о динамической левитации проводящей капли с поверхностным зарядом двойного электрического слоя в вертикальном электрическом поле при учете силы тяжести.

В заключении второй главы с использованием двухпараметрической формулы возмущений АЭП и следствия из теоремы Праудмена теоретически показано, что формирующаяся воронка из вращающегося трипольного грозового облака (так называемого торнадо-циклона) может как опускаться к подстилающей поверхности, так и колебательно зависать на некоторой высоте или втягиваться обратно в облако. Эти эмпирические факты не удавалось теоретически обосновать в рамках чисто гидродинамических или термогидродинамических моделей торнадо без учета важной роли электрических факторов.

В третьей главе диссертационной работы исследуются возможные механизмы усиления завихренности в целом торнадо-циклоне и в

формирующейся из него воронке торнадо в ее начальной стадии – до касания с подстилающей поверхностью. Подчеркивается, что начало образования воронки из центральной части торнадо-циклона обусловлено эффектом реализации неустойчивости Рэля – Тейлора: для этого необходима нейтрализация интегральных электрических сил взаимодействия между разноименно заряженными областями в торнадо-циклоне. Однако именно эти дальнедействующие кулоновские силы обеспечивают дополнительную устойчивость всего торнадо-циклона и задерживают реализацию чисто гидродинамической неустойчивости Рэля – Тейлора.

Особое внимание уделяется средней квазицилиндрической части растущей воронки, для которой проведен сравнительный анализ влияния на завихренность различных сил: центробежной, Кориолиса, плавучести и сил электромагнитной природы.

На конкретных примерах показано, что электромагнитные механизмы в ряде случаев играют основную роль. Определенную сложность при этом вызывает многомасштабность рассмотренных электромагнитных факторов: от наноразмеров гидратированных кластерных ионов (роль которых проанализирована в Приложении А, в том числе для образования двойного электрического слоя на микрокаплях грозового облака) до микромасштаба всего торнадо-циклона.

В разделах 3.2 – 3.3 диссертационной работы проводится сравнительный анализ влияния электрических и термогидродинамических сил плавучести в приближении Обербека – Буссинеска на усиление соответственно первичной (вертикальной) и вторичной (азимутальной) завихренности в воронке торнадо. Показано, что электрический и термогидродинамический механизмы усиливают первичную завихренность, тогда как электрические факторы препятствуют генерации вторичной завихренности термогидродинамическими механизмами, т.е. сильные вариации атмосферного электрического поля ослабляют эффект всасывания воздушных масс в газо-капельную среду воронки торнадо в ее начальной стадии формирования из торнадо-циклона. Это может вызывать внутри ядра смерча нисходящий поток еще на этапе формирования воронки, который иногда наблюдается и в развитой стадии торнадо, вызывая эффект придавливания почвы и растительности, как и низовой прорыв.

В разделе 3.4 диссертационной работы методом вейвлет-анализа проведено исследование влияния турбулентных пульсаций на генерацию завихренности и эволюцию давления на подстилающей земной поверхности для двух тайфунов и двух торнадо в развитой стадии. При этом использовалась интересная, но малоизвестная турбо-электрогидродинамическая аналогия

между уравнениями гидродинамики для турбулентного течения и системой уравнений типа Максвелла в электродинамике с замыкающим соотношением в виде закона Ома.

Результаты диссертации опубликованы в 19 печатных изданиях, 8 из которых опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и/или RSCI.

По результатам диссертации было сделано более 30 докладов на всероссийских и международных научных конференциях.

Содержание диссертации и наиболее важные результаты обсуждались на научных семинарах:

- Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015, 2017, 2019, 2021, 2022 гг.;
- Семинар «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020 г.;
- Научно-исследовательский семинар кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022 г.;
- Семинар имени А.А. Рухадзе теоретического отдела ИОФ РАН, 2022 г.;
- Семинар 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, 2023 г.;
- Всероссийский междисциплинарный научный семинар «Механика: эксперимент, моделирование, приложения», 2023 г.

Диссертационная работа Маслова Сергея Алексеевича «Роль электромагнитных механизмов в процессе формирования торнадо» выполнена на высоком научном уровне и имеет характер законченного научного исследования. Она соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Диссертация «Роль электромагнитных механизмов в процессе формирования торнадо» Маслова Сергея Алексеевича может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Натяганов Владимир Леонидович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета, и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук (по специальности 01.02.05),  
доцент кафедры газовой и волновой динамики  
механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
(119991, Ленинские горы, д. 1, телефон +7(495)939-37-54

Натяганов В.Л.

«17» апреля 2024 г.

Подпись удостоверяю

Декан механико-математического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Член-корр. РАН, профессор

Шафаревич А.И.

«17» апреля 2024 г.

