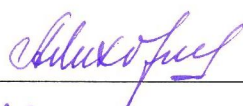


УТВЕРЖДАЮ:

проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет»  
доктор географических наук  
профессор



  
\_\_\_\_\_ А.А. Лиховид  
«26» декабря 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Шаповалова Виталия Александровича «Закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик грозоградовых облаков с учетом взаимодействия термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

**Актуальность темы и ее связь с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.**

До настоящего времени остаются малоизученными многие важные аспекты микрофизических процессов в конвективных облаках, это объясняется сложностью их теоретического анализа и экспериментального исследования. Кроме того, некоторые микрофизические процессы в облаках остаются не понятыми даже на качественном уровне. Недостаточно изучены в грозоградовых облаках механизмы электризации облачных частиц, взаимодействие термодинамических, микрофизических и электрических процессов, влияние электрических параметров облака на процессы осадкообразования. С другой стороны, проблемы разработки научно обоснованных методов активного воздействия на облака и усовершенствования существующих методов, требуют глубокого изучения этих вопросов. Проблема обостряется в связи с изменением климата и увеличением частоты опасных явлений погоды, таких как: смерчи, грозы, град, катастрофические ливни и др.

Таким образом, диссертационная работа Шаповалова В.А., которая направлена на решение задач исследования формирования микроструктурных и электрических параметров грозоградовых облаков на основе численного моделирования с использованием трехмерной модели, является актуальной для физики облаков и активных воздействий на них, и решаемые проблемы имеют важное значение, как для безопасности людей, так и для хозяйственной деятельности.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 335 страниц, включая список литературы из 282 наименований работ.

**Основные научные результаты, полученные автором, заключаются в следующем:**

- Разработана трехмерная численная модель конвективного облака с учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Модель отличается тем, что используется детальная микрофизика, учитываются: накопление зарядов в облаке, напряженность электрического поля, электрическая коагуляция облачных частиц. Разработана методика формирования трехмерных исходных данных при инициализации модели.

- На основе разработанной модели с детальным описанием физических процессов впервые исследовано формирование макро- и микроструктурных, и электрических параметров. Исследованы закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик грозоградовых облаков с учетом взаимодействия физических процессов: определена динамика изменения характеристик грозоградовых облаков на стадии роста и максимального развития, исследованы электрические характеристики мощных конвективных облаков в различные моменты времени и их взаимосвязь с микроструктурными параметрами. Определена пространственная структура объемных электрических зарядов в облаке, трехмерное распределение напряженности электрического поля.

- Получена количественная оценка влияния электрической коагуляции на скорость образования осадков в мощных облаках.

- Исследовано влияние взаимодействия конвективных облаков с атмосферой, обусловленное структурой поля ветра в атмосфере, на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

- С применением разработанной модели исследовано изменение микроструктурных параметров конвективных облаков при засеивании кристаллизующим реагентом. Исследована эффективность АВ на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков.

Сформулированы предложения по оптимизации технологии засева льдообразующими реагентами.

- На основе полной трехмерной модели исследовано распространение искусственных ледяных частиц в облаке при активном воздействии.

- Разработано программно-математическое обеспечение комплексной обработки радиолокационной и грозопеленгационной информации для идентификации опасных явлений погоды, экстраполяции координат их перемещения.

- Разработано программно-математическое обеспечение трехмерной визуализации данных численного моделирования и радиолокационной информации метеорологических радиолокаторов.

**Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций.**

«Определено, что дальнейший прогресс физики конвективных облаков и активных воздействий на них требует решения качественно новых задач, которые заключаются в исследовании облаков в целом, с учетом их эмерджентных свойств. Должны быть проведены исследования взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой, формирование микроструктурных параметров при различных условиях...». Данный вывод обоснован, так как в диссертации было уделено достаточно внимания анализу современного состояния физики облаков и численного моделирования облачных процессов на основе отечественных и зарубежных публикаций. Вывод о роли математического моделирования в исследовании системных свойств облаков понятен, так как только оно позволяет широко варьировать ситуации развития облака.

«Впервые разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным учетом термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов...». Данный вывод является обоснованным, так как разработанная модель отличается от существующих наличием функций распределения по массам: капель, ледяных частиц и осколков замерзания, количество классов частиц составляет 61 для капель и 75 – для кристаллов, что позволяет учитывать физику облачных частиц различных размеров. Для описания микрофизических процессов используются кинетические уравнения, также учитываются замерзание капель и аккреция капель с кристаллами. Модель позволяет исследовать электрические характеристики облака и электрическую коагуляцию. Это очень важное отличие данной модели. Модель прошла необходимые тестовые проверки и сравнение с параметрами, наблюдаемыми в полевых экспериментах.

«С применением математического моделирования впервые

исследованы новые важные аспекты механизма образования электрического заряда и поля в облаках с учетом взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов...». Этот вывод обоснован, так как автором при численном моделировании проанализирован с применением программы 3D визуализации весь доступный в модели набор параметров облаков. Одни и те же параметры рассмотрены в различные моменты времени, определена динамика их изменения со временем. В диссертации получены количественные значения искомых параметров, их трехмерное распределение в облаке и окружающей атмосфере.

«Впервые реализована трехмерная численная модель конвективного облака, в которой коэффициент коагуляции частиц различных размеров изменяется в зависимости от напряженности электростатического поля облака. С помощью модели проведена количественная оценка влияния электрических процессов на формирование осадков...». Из содержания работы следует, что вывод обоснован, т.к. в трехмерной модели впервые учтено изменение коэффициентов коагуляции облачных частиц в зависимости от напряженности поля и зарядов, не как скалярного параметра, а во всем пространстве облака.

«В работе теоретически подтверждена концепция о существовании положительной обратной связи между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля, которая заключается во взаимном влиянии их друг на друга». Обоснованность вывода подтверждается проведенными расчетами с учетом и без учета влияния электрических сил на скорость образования осадков.

«По результатам моделирования получено, что на стадии максимального развития конвективного облака за счет электрической коагуляции происходит наиболее интенсивный рост жидких и твердых осадков. В частности, образование градовых частиц происходит за 6-8 мин...». Наличие в модели большого числа классов ледяных частиц, включая градины, позволило автору оценить это время. Вывод основан на результатах численных экспериментов.

«Начато изучение образования и развития конвективных облаков с учетом их системных свойств...». Выводы по данному пункту обоснованы, т.к. автор грамотно использовал искусственно заданные характеристики ветра в атмосфере, и рассмотрел развитие модельного облака в искусственных ситуациях, что позволило оценить влияние ветра на формирование макро- и микроструктурных характеристик. Выводы по этому пункту сделаны в рамках результатов численных экспериментов.

«Проводилось численное исследование формирования полей различных характеристик конвективных облаков, в частности, коэффициента

турбулентной диффузии и радиолокационной отражаемости...». Вывод является обоснованным, поскольку с помощью графических программных средств проведено исследование водности, ледности, спектров частиц, радиолокационной отражаемости и других параметров. Также оценены их количественные значения на разных стадиях развития.

«Теоретически исследовано изменение интенсивности и количества осадков из конвективных облаков теплого периода от следующих параметров: от места внесения кристаллизующего реагента, от концентрации искусственных частиц, от геометрии области засева...». Разработанная автором численная модель, которая включает классы облачных частиц от микронных, до миллиметровых, и сантиметровых градин, вполне позволяет просчитать на модели результаты АВ на облако реагентами, и дать рекомендации по параметрам источника искусственных частиц. Выводы действительны в рамках применимости модели. Аналогично, выводы по результатам моделирования АВ на градовые облака, также можно считать обоснованными. Физическую интерпретацию результатов моделирования считаем аргументированной.

«Проведено исследование распространения искусственных ледяных кристаллов в облаке при активном воздействии...». Выводы по этому пункту обоснованы, т.к. расчеты проведены именно в рамках полной модели, а не на каких-то упрощенных моделях, типа турбулентной диффузии частиц в среде с заданными свойствами.

«Впервые в нашей стране разработано адаптированное для исследования параметров конвективного облака программно-математическое обеспечение трехмерной визуализации расчетных данных...». Проанализировать такой объем расчетных данных было бы невозможно без такой программы. Она была создана именно под анализ структуры конвективных облаков. Вывод обеспечен подтверждением прав на программное обеспечение.

«С непосредственным участием автора диссертации разработано программно-математическое обеспечение «ГИМЕТ-2010», которое предназначено для анализа и отображения данных российского доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С...». Программа устанавливается на ДМРЛ-С по всей стране, и зарегистрирована на авторов, в числе которых – соискатель.

«Разработано программно-математическое обеспечение приема и комплексного анализа радиолокационной и гронопеленгационной информации...». По этому пункту также, из диссертации все очевидно, вывод обоснован.

Таким образом, результаты диссертационной работы отличаются

новизной, полученные выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

**Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов.**

Полученные в работе результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение для физики облаков и активных воздействий на них, и могут быть использованы в дальнейших исследованиях. В частности, разработанная трехмерная математическая модель облака может использоваться для изучения эмерджентных свойств облаков и для разработки научно обоснованных методов активного воздействия на градовые процессы, и на конвективные облака с целью искусственного регулирования осадков. Результаты исследований активного воздействия на градовые облака применяются специалистами противоголовых служб для уточнения места внесения реагента.

Результаты исследований гидротермодинамических, микрофизических и электрических характеристик облаков могут быть использованы при планировании полевых экспериментов. Полученные результаты по формированию электрических характеристик конвективных облаков представляют интерес в теоретическом плане для усовершенствования знаний по электричеству облаков, а также для разработки методов управления электрическим состоянием этих облаков.

Материалы исследований соискателя по физике облаков и по электричеству облаков использованы в учебном процессе в нескольких вузах соответствующего профиля. В диссертации имеются данные о внедрении результатов исследований.

Считаем целесообразным продолжить работу по исследованию микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках с помощью математического моделирования, взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой. Это направление пока еще находится только на начальной стадии своего развития. С помощью усовершенствованных моделей должны исследоваться вопросы облако- и осадкообразования в зависимости от аэрозольного состава атмосферы.

**Полнота отражения результатов диссертации в опубликованных работах.**

Результаты диссертационной работы опубликованы достаточно полно в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и прошли апробацию на конференциях различных уровней.

Основные результаты работы опубликованы в 114 работах, в том числе 28 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 9 работ в изданиях SCOPUS и Web of Science, 3 монографии, 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

## Соответствие автореферата содержанию диссертации

Автореферат и публикации автора в полной мере отражают материалы диссертации, ее наиболее существенные положения и выводы.

### Замечания по диссертационной работе:

1. При формулировке научных положений, выносимых на защиту, необходимо излагать конкретные установленные закономерности, а не ограничиваться общими фразами.

2. На странице 30 используется устаревший термин «количество движения» вместо современного «импульс». На стр. 62 используется устаревший термин «диэлектрическая постоянная вакуума» вместо современного «электрическая постоянная». А также используется устаревший термин «удельная влажность» вместо «массовой доли водяного пара».

3. На странице 34 и далее не удачное употребление термина «восходящих токов», вместо «восходящих потоков», тем более, что в грозовых облаках есть электрические токи.

4. Формула (1.2) на стр. 39 записана в системе СГС, а не СИ.

5. В уравнениях движения (2.1) не учтена  $y$ -составляющая силы Кориолиса.

6. Не понятно, почему утверждается, что в формулах (2.1)  $\pi'$  – это безразмерное давление, в то время как эта величина равна  $\frac{p'}{\rho}$  и по размерности совпадает с квадратом скорости. Автор делает ссылку на известную монографию Е.Л. Коган, И.П. Мазин и др., но и там это не понятно. Ведь и в монографии может быть опечатка. Но из формул определенно следует, что  $\pi'$  – размерная величина.

7. На рисунке 3.5. приведено обтекание облака фоновым ветром. Как происходит взаимодействие облака и структуры ветра? Не является ли это единым механизмом?

8. На стр. 109 утверждается, что «На стадии максимального развития облака ( $t=40$  мин.) максимальная концентрация ледяных частиц имеет место по горизонтали в центре облака ( $x = 20$  км), а по вертикали на уровне  $z = 7,5$  км. В максимуме концентрация равна около  $600 \text{ см}^{-3}$ , водность равна около  $10 \text{ г м}^{-3}$ .». Вопрос, каков средний размер ледяных частиц и капель?

9. На стр. 122 на рисунках 3.14 и 3.15 приведено распределение потенциала и напряженности электрического поля. Рассчитывалось ли поле только лишь по наличию объемного заряда или учитывалось также поле нейтральных, но поляризованных в электрическом поле капель?

10. Так как диссертация посвящена моделированию, в частности,

электрических процессов в облаках, то интересно было бы узнать, как влияет активное воздействие на электрическое состояние облака?

11. В заключении выводы и результаты диссертации необходимо было сформулировать более фундаментально, с акцентом на установленные новые знания о физике облаков.

12. Встречаются опечатки: стр. 44, 88, 108, 140, 148, 151, 244.

#### **Замечания к автореферату:**

1. В уравнениях движения (1) и (3) не учтена  $y$ -составляющая силы Кориолиса.

2. В уравнениях движения не учтен зональный перенос (ведущий поток), хотя в главе 3 говорится об обтекании облака горизонтальным ветром и о трехмерной структуре ветра.

3. При каком значении напряженности электрического поля происходит пробой?

Указанные замечания не являются принципиальными и не затрагивают основных выводов диссертационной работы.

#### **Заключение.**

Диссертация представляет собой структурно стройное, завершенное исследование. Поставленные цели и достигнутые результаты соответствуют друг другу. Тема диссертации полностью соответствует специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

Содержание работы изложено в логически последовательной форме. Стиль изложения в целом четкий и ясный. Диссертация написана единолично, оформлена в соответствии с существующими требованиями.

В диссертационной работе соискателем разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в физике облаков, в частности:

- Автором показано, что дальнейший прогресс физики конвективных облаков и активных воздействий на них требует решения качественно новых задач, которые заключаются в исследовании облаков в целом, с учетом их эмерджентных свойств;

- Впервые разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным учетом термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов. В модели учитывается через коэффициенты коагуляции влияние электрических процессов на образование осадков. При инициализации модели применяется трехмерное начальное распределение полей термодинамических параметров в домене. Следует отметить, что разработанная модель в части учета электрической коагуляции превышает зарубежные аналоги;

- Автором начато изучение физики конвективных облаков с учетом их



системных свойств, исследовано влияние взаимодействия конвективных облаков с атмосферой, обусловленное структурой поля ветра в атмосфере, на формирование их макро- и микроструктурных характеристик. Определено, как структура поля ветра в атмосфере влияет на формирование области локализации водности и ледности в облаке и на образование осадков. В работе исследована положительная обратная связь между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля, эти два процесса взаимно влияют друг на друга.

- Исследовано влияние активного воздействия кристаллизующим реагентом на мощные конвективные облака. Показано, что микроструктура облака может сильно изменяться при появлении искусственных кристалликов в области, содержащей переохлажденные капли в большом количестве. Определены характеристики источника искусственных кристаллов, который может предотвратить образование крупных градин в облаке;

- Разработано программно-математическое обеспечение приема и анализа радиолокационной информации российского доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С и программное обеспечение комплексного анализа радиолокационной и гронопеленгационной информации.

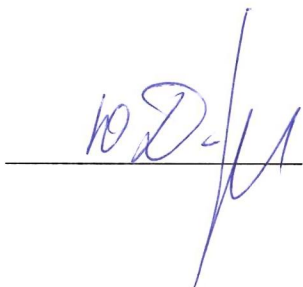
Считаем, что диссертационная работа Виталия Александровича Шаповалова «Закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик грозоградовых облаков с учетом взаимодействия термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов», выполнена на высоком научном уровне, полностью отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

Отзыв составил профессор кафедры общей и теоретической физики Института математики и естественных наук ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» доктор физико-математических наук, профессор Закинян Роберт Гургенович.

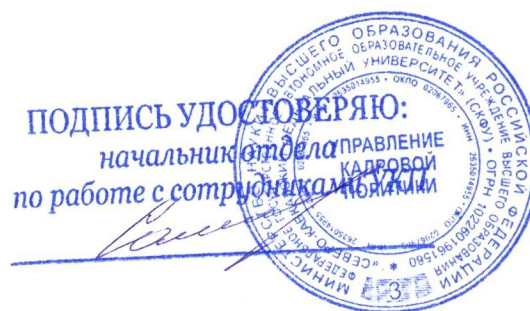
Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры общей и теоретической физики Института математики и естественных наук 19.12.2019 г., протокол № 8.

Присутствовало на заседании 15 чел. В обсуждении приняли участие: 10 чел.

Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.



Ю.И. Диканский,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой общей  
и теоретической физики Института  
математики и естественных наук



Диканский Юрий Иванович  
доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей и  
теоретической физики ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный  
университет»  
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1  
e-mail: dikansky@mail.ru  
тел. 8 (905) 498-82-06