

Губенко Инна Михайловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕКТИВНЫХ
ОБЛАКАХ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Рубинштейн Константин Григорьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Мареев Евгений Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной физики Российской академии наук», Отделение геофизических исследований, руководитель отделения

доктор физико-математических наук, профессор

Аджиев Анатолий Хабасович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», Отдел стихийных явлений, заведующий отделом

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита состоится “__” _____ 201_г. в __ч. на заседании диссертационного совета Д 327.003.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении “Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации” (ФГБУ “Гидрометцентр России”) по адресу: г. Москва, Большой Предтеченский пер., д.11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ “Гидрометцентр России” и на сайте www.meteoinfo.ru.

Автореферат разослан “__” _____ 201_г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук

Е.С. Нестеров

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Изучение гроз – одно из важнейших направлений исследований в области атмосферного электричества, поскольку молниевые разряды представляют наибольшую угрозу человеку, техническим устройствам, инженерным сооружениям, объектам энергетики, летательным аппаратам, сельскому и лесному хозяйству.

Статистика свидетельствует, что, например, на территории США в период между 1995 и 2008 гг. от удара молний погибли 648 человек [39]. На территории Московского региона в июне 2009 г. отмечалась мощная гроза, в результате которой пострадало 62 человека, а ущерб составил около 350 млн. руб. [37]. Опасны для летательных аппаратов поражения молниями внутри облаков [14]. Вполне возможно, что качественный прогноз гроз мог бы заметно снизить потери. Например, по аналогии с другими метеорологическими прогнозами: экономический эффект от использования методических прогнозов весенних заморозков за 2005 г. составил 1604, 8 тыс. руб. [12].

Однако сложность прогноза гроз состоит в том, что к настоящему моменту электрическое поле атмосферы изучено недостаточно полно, поэтому для прогноза гроз применяются косвенные расчетные методы, основанные на оценке степени неустойчивости атмосферы. В подобных методах вертикальная скорость, которая, в сущности, играет определяющую роль в эволюции кучево-дождевых облаков, учитывается лишь косвенно (то есть фактически по количеству скрытого тепла, которое выделяется при конденсации водяного пара) [14]. Кроме того, подобные методики явно не учитывают электрические процессы, происходящие в конвективных облаках, а именно: генерацию зарядов, поляризацию облака и возникновение электрического пробоя (молнии).

На сегодняшний день для оперативного прогноза практическую ценность представляют методы, явно рассчитывающие электрический пробой и использующие прогнозы численных моделей атмосферы. Например, известна методика расчета разности потенциалов между земной поверхностью и облачного слоя на высоте 6 км [3, 25]. Описанный метод основан на предположении, что носителями заряда являются частицы ледяной крупы и льда, массовые доли которых рассчитываются моделью WRF (Weather research and forecast). Известны современные зарубежные работы [21] и [34], где молниевая активность прогнозируется с помощью моделей электризации, которые используют результаты прогнозов модели

WRF-ARW. Моделям, описывающим электрическое поле атмосферы, посвящены работы [4, 13, 26, 27, 35, 36].

Для валидации прогнозов гроз необходима фактическая информация о грозовых очагах. Помимо синоптических данных о грозах существуют мировая и региональные сети грозорегистрации, а также спутники и радары. Однако для использования таких данных необходима разработка предварительных методов оценки их точности, что является актуальной задачей.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются:

1. исследование существующих методов прогноза гроз с помощью индексов неустойчивости атмосферы и их совершенствование;
2. создание численной модели электризации кучево-дождевых облаков, описывающей процессы генерации и разделения зарядов;
3. исследование возможности прогноза гроз с помощью численной модели электризации кучево-дождевых облаков;
4. создание баз данных (БД) наблюдений сетей регистрации гроз и сравнение данных сетей с информацией о грозах сети синоптических станций.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. статистическая оценка качества прогноза гроз на сутки по 26 индексам неустойчивости атмосферы, применяемым для прогноза конвективных явлений, за конвективный сезон 2013 г;
2. разработка нового, более совершенного индекса неустойчивости атмосферы;
3. создание численной модели электризации кучево-дождевых облаков;
4. исследование возможности прогноза гроз с помощью созданной численной модели электризации кучево-дождевых облаков;

5. создание баз данных о наблюдаемых грозах, получаемых по сети синоптических станций, всемирной сети регистрации молний WWLLN (Worldwide Lightning Location Network), сетей ФГБУ “Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова” (ФГБУ “ТГО”) и ФГБУ “Высокогорный геофизический институт” (ФГБУ “ВГИ”), необходимых для проведения сравнения воспроизведенных гроз с наблюдаемыми;

6. сравнение данных сетей регистрации фактических гроз с данными сети синоптических станций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. впервые в ФГБУ “Гидрометцентр России” осуществлена статистическая оценка качества прогноза грозовой активности на сутки за конвективный сезон 2013 г. по 26 индексам неустойчивости атмосферы, широко применяемым в мировой практике для предсказания конвективных явлений погоды;

2. впервые в ФГБУ “Гидрометцентр России” предложен индекс неустойчивости атмосферы, позволяющий получать более высокие оценки качества прогноза гроз;

3. впервые в ФГБУ “Гидрометцентр России” создана численная модель электризации кучево-дождевых облаков, использующая прогнозы гидродинамической мезомасштабной модели;

4. впервые в ФГБУ “Гидрометцентр России” получены статистические оценки качества прогноза гроз за конвективный сезон 2013 г. по созданной модели электризации кучево-дождевых облаков;

5. впервые в ФГБУ “Гидрометцентр России” созданы пополняемые БД о наблюдаемых грозах, получаемых по сетям WWLLN, ФГБУ “ТГО” и ФГБУ “ВГИ”, а также произведено сравнение этих данных с данными сети синоптических станций о грозах.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность полученных результатов и сделанных выводов обоснована сравнением с данными наблюдений и исследованиями других авторов. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в российских журналах, а также представлением их на российских и международных конференциях.

Практическая значимость работы

1. сравнение инструментальных данных грозометрических сетей с данными сети синоптических станций позволяет оценить применимость данных фактической информации о грозах для валидации прогнозов;

2. полученные оценки 26 индексов неустойчивости атмосферы дали масштаб предсказуемости гроз по индексам;

3. индекс неустойчивости атмосферы, учитывающий вертикальную составляющую скорости ветра, позволяет улучшить качество прогноза грозовой активности (значение критерия Пирси-Обухова составляет 0,58).

4. созданная численная модель электризации кучево-дождевых облаков позволяет прогнозировать параметры атмосферного электрического поля (потенциала, напряженности и плотности объемных зарядов), в том числе, характерные для грозовой активности.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались лично и обсуждались на следующих общероссийских и международных конференциях и семинарах: 17-я международная школа-конференция молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы”, 2013, Нижний Новгород; семинар по изменению климата и изучению внутренних морей Cleamseas, Жирона, Испания, 2014; 16-я научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН “Безопасность и риски атомной энергетики”, Москва, 2015; 19-я международная школа-конференция молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы”, 2015, Туапсе.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах (2 из списка, рекомендованного ВАК), 4 - в трудах конференций.

Личный вклад автора

1. Определяющая роль в работах по созданию баз данных фактической информации о грозах, оценке достоверности сетей регистрации молний, оценке успешности прогноза гроз по 26 индексам неустойчивости атмосферы, разработке и оценке индекса неустойчивости, учитывающего вертикальную составляющую вектора скорости;

2. В серии работ по исследованию схем электризации кучево-дождевых облаков автором проводилась программная реализация индукционной и комплексной схем генерации зарядов, а также оценка полученных электрических характеристик атмосферы с фактическими данными о грозах;
3. Участие в подготовке и написании научных статей, в подготовке и представлении научных докладов в качестве докладчика.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 113 наименований. Общий объем диссертации составляет 130 страниц. Диссертация содержит 14 рисунков и 16 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность Рубинштейну К.Г. за научное руководство, полезные дискуссии, неоценимую помощь и поддержку, сотрудникам лаборатории моделирования общей циркуляции атмосферы и климата (МОЦАиК) Гидрометцентра России Смирновой М.М., Емелиной С.В., Бычковой В.И., Игнатову Р.Ю. за техническую помощь, ценные советы и поддержку в период выполнения работы. Автор благодарит сотрудников Гидрометцентра России Пескова Б.Е. и Желнина А.А., внимательно и критически просмотревших рукопись и сделавших ряд ценных замечаний, учет которых способствовал ее улучшению. Автор благодарен Мельник К.О. и Кругловой Е.Н. за ценные советы, а также Ширяеву М.В. за техническую помощь. Особую благодарность автор выражает Губенко М.Л., Борисовой Т.Л., Борисовой Е.Г., Горбачёву П.А., Ждановой Ю.А., Жуковой О.А., Копейкину В.В., Кирсанову А.А., Лещинскому В.И., Климовым М.А. и А.А., Сурковой З.А., Филимоновой Е.М., Киселевой Ю.В., Кузнецовым А.А. и Д.А., Косторной А.А. и James E. Muir за поддержку, а также Учителю математики Бовшевер Т.И.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования и определены его задачи, обсуждается научная новизна и практическая значимость работы, приводится список опубликованных автором статей и тезисов конференций, содержащих результаты работы.

В **главе 1** описаны основные термо- и электродинамические процессы, происходящие в кучево-дождевых облаках. Первая часть главы посвящена обзору моделей конвекции. Обсуждаются адиабатические модели конвекции, а также модели, учитывающие процессы вовлечения. Во второй части главы диссертации описаны электродинамические процессы, происходящие в конвективных облаках. В частности, приведено описание наиболее изученных механизмов генерации зарядов: безындукционного, индукционного, диффузионного, а также электризации при обзёрнении (механизма Халлета-Моссоба).

В **главе 2** описаны основные источники информации о фактических грозовых очагах: сеть синоптических станций, всемирная сеть регистрации молний WWLLN, региональные сети регистрации молний ФГБУ “ТГО” и ФГБУ “ВГИ”, спутники и метеорологические радиолокаторы. Описание источников также включает в себя технологию регистрации данных о грозах и плотность распределения пунктов наблюдения.

Вторая часть главы посвящена оценке точности данных сетей WWLLN, ФГБУ “ТГО” и ФГБУ “ВГИ” [1, 5, 8, 11, 24] для территории России. Для оценки точности сетей WWLLN, ФГБУ “ТГО” и ФГБУ “ВГИ” использовались данные указанных сетей, а также информация о грозе, полученная на синоптических станциях. Данные о грозе, полученные по данным сети синоптических станций, приняты за истинные значения, а данные исследуемых сетей – за информацию, точность которой необходимо проверить. Молниевые разряды, наблюдавшиеся в течение ± 15 минут и находящиеся в радиусе 10 км друг от друга, считаются за один грозовой очаг. Сопоставление грозовых очагов по наблюдательным сетям произведено с различными допусками: ± 15 , 25, 50, 75 и 100 км. Непосредственная оценка точности сетей включает расчет четырех статистических величин для пяти градаций допуска: достоверности, вероятности ложного диагноза, вероятности обнаружения и вероятности необнаружения гроз. В табл. 1 представлены результаты оценки достоверности сети WWLLN, полученные за период 13 мая – 31 августа 2013 г. по территории Центрального федерального округа (ЦФО) России. Отметим, что количество гроз, зафиксированное сетью синоптических станций, составляет 910, по сети WWLLN - 810. Как видно из табл. 1, приемлемые показатели точности сети отмечены с допуском 50 км и выше.

Расчет указанных четырех показателей точности данных о фактических грозах, получаемых от сети ФГБУ “ТГО”, произведен для Европейской территории России (ЕТР) за период 13 мая – 31 августа 2013 г. Количество гроз, зафиксированное сетью синоптических станций, составляет 3117, по сети ФГБУ “ТГО” – 3166. Оценка точности БД ФГБУ “ТГО”

показывает, что достоверность выше вероятности ложного диагноза при проведении сопоставления с допусками 25, 50, 75 и 100 км: достоверность равна 0,51; 0,73; 0,94 и 0,98 соответственно. Для случая с допуском 15 км достоверность данных сети составляет 0,24.

Таблица 1

Оценка точности Всемирной сети регистрации гроз WWLLN (май-август 2013г., ЦФО)

| Характеристика (в долях единицы) | Допуск, км | | | | |
|---|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Достоверность | 0,16 | 0,36 | 0,65 | 0,77 | 0,82 |
| Вероятность ложного диагноза | 0,84 | 0,64 | 0,35 | 0,23 | 0,18 |
| Вероятность обнаружения гроз | 0,19 | 0,44 | 0,76 | 0,91 | 0,96 |
| Вероятность необнаружения гроз | 0,81 | 0,56 | 0,24 | 0,09 | 0,04 |

Оценка точности данных сети ФГБУ “ВГИ” произведена за период 13 мая – 31 августа 2013 г. для части территории СКФО (Северо-Кавказский федеральный округ) России, ограниченной пунктами грозорегистрации – Кызбурун (Кабардино-Балкарская Республика), Черкесск (Карачаево-Черкесская Республика), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский край) [1]. Число гроз, зафиксированное сетью ФГБУ “ВГИ”, составляет 434, а число гроз, зарегистрированное сетью синоптических станций для указанной области – 428. Оценка точности БД ФГБУ “ВГИ” показывает, что достоверность выше вероятности ложного диагноза при проведении сопоставления с допусками 25, 50, 75 и 100 км: достоверность равна соответственно 0,69; 0,87; 0,93 и 0,96. Для случая с допуском 15 км достоверность данных сети составляет 0,46.

Глава 3 посвящена анализу качества прогноза грозовой активности на сутки по косвенным расчетным методам с использованием результатов прогноза мезомасштабной численной модели WRF-ARW. В первой части главы описывается конфигурация мезомасштабной модели, прогнозы которой используются в качестве входных данных для индексов неустойчивости, а именно: поля температуры воздуха, точки росы, давления и скорости ветра. В диссертационной работе использовалась версия модели WRF – ARW 3.4.1 с разрешением 18

км по горизонтали и 41 уровнем по вертикали. Конфигурация модели включает следующие параметризации: микрофизика – схема Томпсона [33], длинноволновая и коротковолновая радиация – RRTMG, приземный и пограничный слои – MYNN, почва – Noah [19, 20], конвекция – схема Betts - Miller – Janic [22].

Во второй части главы рассмотрены 26 индексов неустойчивости атмосферы, широко применяемых в мировой практике для прогноза конвективных явлений: представлена формула, пороговые значения, описываемые индексом микрофизические процессы [2].

В третьей части главы представлены результаты статистической оценки качества прогноза гроз на сутки по 26 индексам неустойчивости атмосферы по территории ЦФО для конвективного сезона 2013 г. Сравнение показателей грозоопасности, полученных моделью WRF-ARW, произведено с данными синоптических станций о грозе, а также с информацией сети WWLLN. Оценка включала в себя расчет следующих характеристик успешности прогноза гроз: общую оправдываемость, оправдываемость наличия/отсутствия гроз, предупрежденность наличия/отсутствия гроз, а также критерий Пирси-Обухова [10]. Общее количество прогнозов составляет 8809, количество наблюдавшихся гроз равно 1105. Наибольшие значения общей оправдываемости отмечены у индекса Фатеева А (0,48). Значения общей оправдываемости больше 0,4 отмечены у индексов ТТ (Total Totals, °C) (0,47), Пескова (0,42), VT (Vertical Totals, °C) и СТ (Cross Totals, °C) (0,44-0,47), а также у индексов Вайтинга К и Шоултера SI (0,45). Максимальное значение критерия Пирси-Обухова отмечено у индекса Фатеева А (0,29). Несколько меньшие значения критерия у индексов VT, СТ и ТТ и Пескова (0,22-0,27). При этом по главным показателям для грозы (по ее предупрежденности и оправдываемости наличия) на первом месте индекс Пескова соответственно 0,88 (0,70-0,85 у других) и 0,31 (0,14-0,18 у других).

В четвертой части главы исследовано влияние вертикальной составляющей вектора скорости на процесс эволюции конвективных облаков. Обсуждается возможность использования в качестве предиктора грозоопасности вертикальной составляющей вектора скорости, рассчитываемой в модели [2]. Увеличение грозовых облаков отмечается при средней вертикальной составляющей вектора скорости 0,1 м/с [14]. Это объясняется тем, что наряду со значениями скорости вертикальных потоков $w > 0$ всегда имеются участки, где воздух опускается (часто вблизи боковых границ облака). Нисходящие движения в данном случае имеют компенсационное происхождение [9, 14]. Важно отметить, что осреднение скорости w обычно выполняется по области размером порядка десятков километров [9, 14]. Что касается при-

чин образования восходящих потоков, то согласно результатам теоретических оценок, приведенным в [9], они главным образом определяются количеством скрытого тепла, которое выделяется при конденсации водяного пара. Последнее же увеличивается с повышением температуры вблизи основания облака, чему часто соответствует изобарическая поверхность 850 гПа. Поэтому чем выше температура в этом слое, тем более мощные восходящие потоки могут образоваться. Согласно [14], пороговые значения температуры воздуха и температуры точки росы подоблачного слоя, характерные для начала грозовой деятельности, составляют 7°C. Эти значения типичны для весенне-летнего конвективного сезона для ЦФО. В работе [14] отмечено, что в весенне-летний конвективный сезон над ЕТР мощность кучево-дождевого облака чаще всего достигает изобарической поверхности приблизительно 300 гПа. С учетом вышесказанного, в диссертационной работе предлагается новый индекс неустойчивости атмосферы с учетом вертикальной составляющей вектора скорости Iw (Instability index based on vertical wind component):

$$Iw = 10 \cdot \sum_{300}^{850} w + 0,125 \cdot [t_{850} + \text{ave} (td_{850} ; td2)], \quad (1)$$

где $\sum_{300}^{850} w$ - сумма вертикальных составляющих вектора скорости на изобарических поверхностях 300, 500, 600, 700, 850 гПа, м/с; t_{850} и td_{850} - температура и температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа; $td2$ – температура точки росы на высоте 2 м, °C.

При значении $Iw \geq 3$ прогнозируется гроза, в обратном случае – ее отсутствие.

В табл. 2 представлены результаты оценки прогноза гроз за 13 мая – 31 августа 2013г. по ЦФО по предложенному индексу, а также индексам Пескова, ТТ и Фатеева. Валидация произведена по данным сети синоптических станций и WWLLN.

Оценка качества прогноза гроз по предлагаемому индексу Iw показала, что оправдываемость отсутствия грозы составляет 0,99, оправдываемость наличия равна 0,30, критерий Пирси – Обухова равен 0,58. При этом число случаев, когда прогноз наличия грозы совпал с фактическими грозовыми очагами, равно 960. Число случаев без гроз равно 5546.

Отмечается, что вертикальные движения, полученные в прогнозах модели WRF-ARW, дали основной вклад в высокие показатели успешности прогноза гроз по сравнению с другими испытанными 26 индексами, так как последними w учитывается косвенно.

Таблица 2

Сравнительная оценка показателей успешности прогноза гроз на сутки (в долях единицы) по индексам неустойчивости по ЦФО

| Показатель успешности (доли единицы) | Индекс | | | |
|---|-------------------|----------------------|----------------|--|
| | Пескова (Pesk) | Total totals (TT) | Фатеева (A) | с учетом вертикальной оставляющей вектора скорости I_v |
| Общая оправдываемость | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,74 |
| Оправдываемость наличия | 0,31 | 0,17 | 0,18 | 0,30 |
| Оправдываемость отсутствия | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,99 |
| Предупрежденность наличия | 0,88 | 0,87 | 0,86 | 0,87 |
| Предупрежденность отсутствия | 0,35 | 0,39 | 0,43 | 0,71 |
| Критерий Пирси – Обухова | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,58 |

В главе 4 исследованы электродинамические процессы в атмосфере, в частности особое внимание уделено изучению влияния различных механизмов генерации электрических

зарядов, возникающих в конвективном облаке, на процессы инициирования молний. В главе обсуждается применение модели электризации кучево-дождевых облаков для прогноза гроз на сутки, использующей результаты прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW. В первой части главы представлено физико-математическое описание используемых в модели схем генерации зарядов (безындукционной, индукционной и комплексной), уравнений расчета общей плотности объемного заряда, потенциала и напряженности, принято пробойное значение напряженности электрического поля в $2,2 \cdot 10^5$ В/м, связанного с началом молниевой активности [26, 27, 34-36]. В частности, при исследовании безындукционного механизма заряжения частиц рассматривается взаимодействие твердых гидрометеоров (ледяные кристаллы+ледяная крупа, частицы снега+ледяная крупа) [35]. Попарным взаимодействием между другими гидрометеорами пренебрегаем ввиду малости заряда, генерируемого вследствие их соударения/слипания [36]. Уравнение безындукционной генерации зарядов при взаимодействии частиц типа 1 и 2 выглядит следующим образом [4, 9, 34]:

$$S = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\pi}{4} \delta q_{1,2} (1 - E_{1,2}) |V_1 - V_2| \times (D_1 + D_2)^2 n_1(D_1) n_2(D_2) dD_1 dD_2, \quad (2)$$

где S – источники и стоки объемного заряда, Кл·м⁻³·с⁻¹; $\delta q_{1,2}$ – заряд, получаемый частицами за одно соударение, Кл; $E_{1,2}$ – коэффициент соударения частиц; $V_{1,2}$ – скорость гравитационного оседания гидрометеоров, м/с; $D_{1,2}$ – диаметры соударяющихся частиц, м.

При рассмотрении индукционного механизма заряжения учитывается взаимодействие жидких гидрометеоров с твердыми частицами, а именно частиц ледяной крупы с облачными каплями. Это объясняется тем, что индукционное заряжение между твердыми частицами, а также между жидкими гидрометеорами в облаке вносит незначительный вклад в процессы электризации ввиду малости заряда между частицами из-за их кратковременного взаимодействия [23, 30]. Уравнение индукционной генерации зарядов при взаимодействии ледяной крупы с облачными каплями [29, 36]:

$$S = \left(\frac{\pi}{4}\right) E_{1,2} E_r D_1^2 V_1 n_2 \alpha \cdot \left[\left(\frac{\pi^3}{2}\right) D_1^2 \varepsilon E_z \cos \theta - \left(\frac{\pi^2}{6}\right) \delta q_g \frac{D_2^2}{D_1^2} \right], \quad (3)$$

где E_r – вероятность столкновения облачных капель; $D_{1,2}$ – диаметр частиц ледяной крупы и облачных капель соответственно, м; V_1 – скорость гравитационного оседания частиц ледяной крупы, м/с; n_2 – концентрация облачных частиц; α – доля облачных капель, столкно-

вание которых произошло по касательной траектории; ε – диэлектрическая проницаемость воздуха; $\cos\theta$ – косинус угла, определяющего местоположение облачной капли относительно частицы ледяной крупы; E_z – вертикальная компонента напряженности внешнего электрического поля, кВ/м; δq_g – заряд, получаемый частицами ледяной крупы за одно соударение, Кл.

Значения $\cos\theta=0,84$, $\alpha=0,022$ и $E_r=0,1$ [16, 28, 29, 36].

Электрический потенциал описывается с помощью уравнения Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_t}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где φ – потенциал АЭП, В; ρ_t – общая плотность объемного заряда, Кл/м³; $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Общая плотность объемного заряда ρ_t рассчитывается как сумма плотностей объемных зарядов для каждого из типов частиц [26, 27, 35, 36]. Плотность объемного заряда описывается дифференциальным уравнением [26, 27, 35, 36]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial (\rho \tilde{w})}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + S, \quad (5)$$

где \tilde{w} – эффективная скорость частицы, м/с; ν – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с.

Уравнение (5) решается методом прогонки.

Напряженность электрического поля описывается как [36]:

$$E = -\frac{d\varphi}{dz}, \quad (6)$$

где E – напряженность АЭП, кВ/м; φ – потенциал АЭП, В.

Пробойное значение напряженности, достаточное для инициирования молнии, было установлено $2,2 \cdot 10^5$ В/м [27].

В диссертационной работе исследован комплексный механизм генерации зарядов, объединяющий индукционную и безындукционную генерацию зарядов. Диффузионным за-

ряжением пренебрегаем ввиду того, что, несмотря на высокое содержание легких ионов в кучево-дождевых облаках, их вклад в объемные заряды небольшой, так как разность между концентрациями положительных и отрицательных ионов также невелика [6, 15]. Механизм Халлета-Моссона не моделируется в данном исследовании, поскольку он является значимым в случае, если концентрация кристаллов льда превышает концентрацию облачных капель в несколько десятков раз (таких случаев при эксперименте не отмечено) [4, 17, 31, 38].

Во второй части исследовались процессы разделения электрических зарядов в конвективном облаке. Проанализированы профили характеристик поля атмосферы (минимум, максимум, среднее напряженности и общего объемного заряда по пространству и времени) в тех случаях, когда “модельная” грозовая активность совпала с фактическими грозовыми очагами. В качестве фактических грозовых очагов были отобраны случаи грозовой деятельности по территории ЦФО России за 13 мая - 31 августа 2013 г по синоптической сети и всемирной сети регистрации молний WWLLN. Суммарное число фактических грозовых очагов составляет 1105, общее число прогнозов равно 8809. Число гроз, спрогнозированных моделью электризации на безындукционном, индукционном и комплексном механизмах генерации зарядов и совпавших с данными наблюдений, соответственно равно 781, 528 и 682.

На рис. 1 а,б,в и рис. 2 а,б,в представлены профили напряженности электрического поля атмосферы и плотностей объемных зарядов, полученные при применении безындукционного, индукционного и комплексного механизмов генерации зарядов соответственно. При исследовании процессов разделения зарядов в конвективном облаке отмечено, что полученные по модели электризации профили напряженности имеют структуру с преобладанием положительного заряда в верхней части облака, отрицательного – в середине и положительного – в его нижней части. В соответствии с рис. 1 и 2 установленные средние пробойные значения напряженности атмосферного электрического поля (АЭП) (220 кВ/м [27]) достигаются при использовании безындукционного и комплексного механизмов генерации зарядов в срединной части облака. В верхней части облака (~300 гПа) максимальное значение напряженности составляет 226 кВ/м, чему соответствует значение общего объемного заряда $11,3 \text{ нКл/м}^3$ (рис. 1а и 2а) при применении модели электризации с безындукционным механизмом генерации зарядов. В отрицательно заряженной толще облака минимальное значение общего объемного заряда между безындукционно заряженными частицами составляет $-17,5 \text{ нКл/м}^3$ на изобарической поверхности ~450 гПа. На этой поверхности минимальное значение напряженности равно -350 кВ/м. Максимальное значение напряженности положительно заряженной верхней части облака для комплексной схемы генерации зарядов составляет 230

кВ/м (~ 300 гПа). На этом же уровне значение общего объемного заряда равно $11,8 \text{ нКл/м}^3$ (рис.1в и 2в). При применении индукционного механизма генерации зарядов (рис.1б и рис. 2б) показатели характеристик АЭП таковы: максимальное положительное значение напряженности составляет 231 кВ/м в верхней части облака, чему соответствует плотность заряда $11,5 \text{ нКл/м}^3$. В нижней части облака, где преобладают отрицательные заряды, минимальное значение напряженности составляет -282 кВ/м , а минимальное значение равно $-14,1 \text{ нКл/м}^3$. В целом распределение зарядов соответствует результатам, представленным в работах [3, 7, 18, 32]. Значения плотностей объемных зарядов и напряженности электрического поля не противоречат результатам, представленным в [27, 36].

В третьей части главы представлены оценки качества прогноза гроз на сутки по модели электризации. Сравнение прогнозов гроз по модели электризации произведено по территории ЦФО России за 13 мая - 31 августа 2013 г. Суммарное число фактических грозовых очагов, зафиксированных сетью синоптических станций и сетью WWLLN, составляет 1105. Оценка качества прогнозов произведена как отдельно для дневных, ночных гроз, а также всех грозовых очагов за сутки. Так как рассматриваемая область ЦФО объединена одним часовым поясом, за дневные грозы были приняты грозовые очаги, отмеченные в 6, 9, 12, 15, 18 чч, а за ночные – 0, 3, 21 чч. Всего зафиксировано 419 ночных гроз и 686 дневных. Фактические данные о грозах были сравнены с прогнозами молниевой активности по модели электризации и индексу неустойчивости, учитывающему вертикальную составляющую вектора скорости Π_w . Рассматривалось три версии модели электризации, основанные на различных механизмах генерации зарядов – индукционном, безындукционном и комплексном.

Следующий этап включал в себя расчет характеристик оправдываемости прогноза гроз: общую оправдываемость, оправдываемость наличия (отсутствия) гроз, предупрежденность наличия (отсутствия) гроз, а также критерий Пирси-Обухова. Значения характеристик оправдываемости прогноза гроз приводятся в табл. 3. Полученные оценки качества прогноза гроз на сутки, как по модели электризации, так и по индексу Π_w показали высокие показатели оправдываемости отсутствия гроз (0,91-0,99). Что касается предупрежденности наличия гроз, то у индекса Π_w наибольший показатель, равный 0,87 (случай с суточными грозами). Критерий Пирси-Обухова равен 0,58. При исследовании успешности прогноза гроз на сутки по модели электризации с тремя различными механизмами генерации зарядов лучшие показатели были отмечены у безындукционного механизма генерации зарядов: максимальное значение критерия Пирси-Обухова равно 0,51; наилучшие показатели предупрежденности наличия составляет 0,72. Таким образом, безындукционный заряд, генерируемый вследствие со-

ударения частиц ледяной крупы и снега, а также ледяной крупы и частиц льда, оказался выше индукционного заряда, генерируемого при взаимодействии ледяной крупы и облачных капель. Исследование влияния трех механизмов генерации зарядов показало, что безындукционное заряджение гидрометеоров вносит более существенный вклад в процессы инициирования молниевых разрядов.

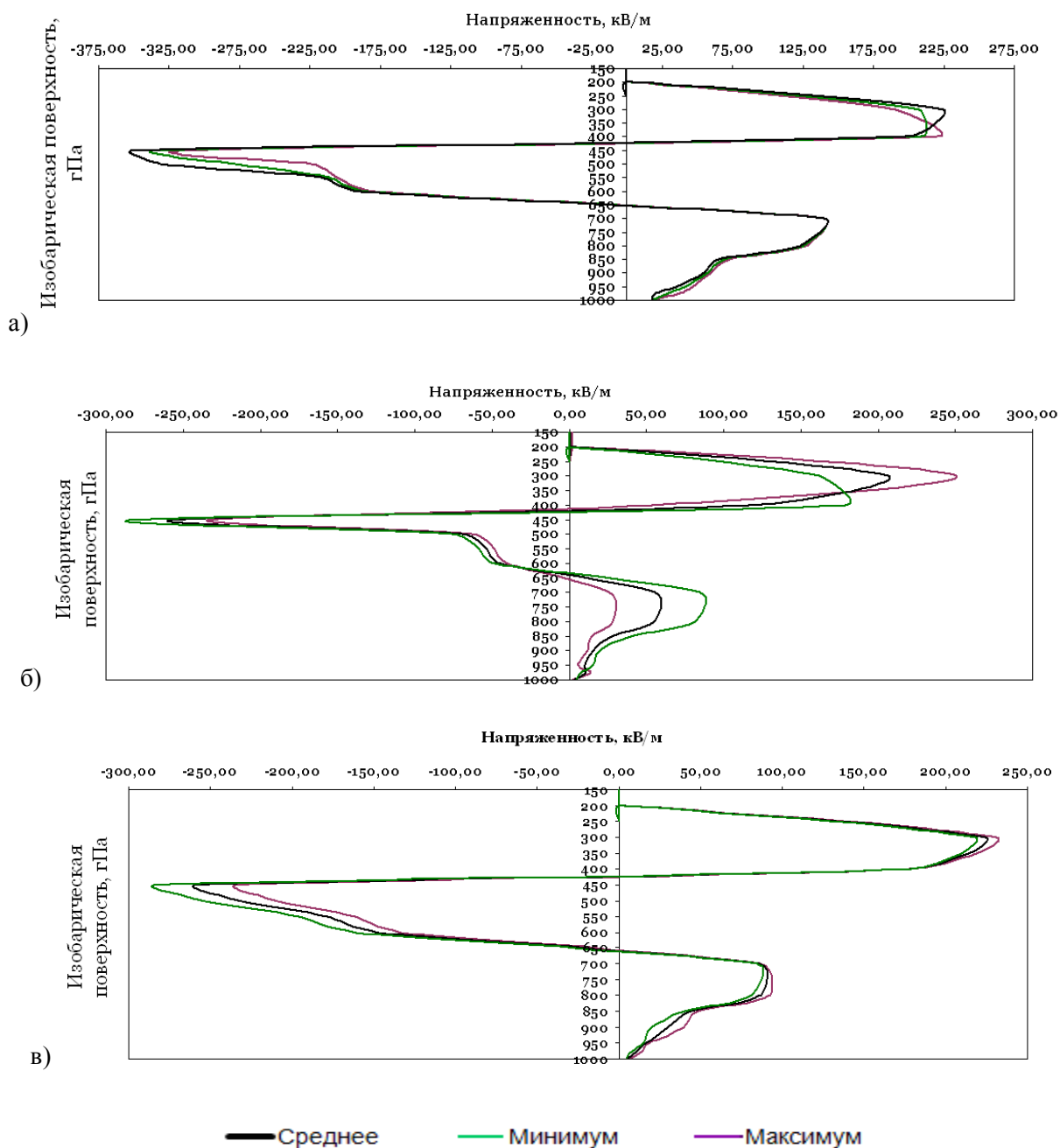


Рис. 1. Вертикальные профили напряженности электрического поля атмосферы, полученные по модели электризации кучево-дождевых облаков с различными механизмами генерации зарядов

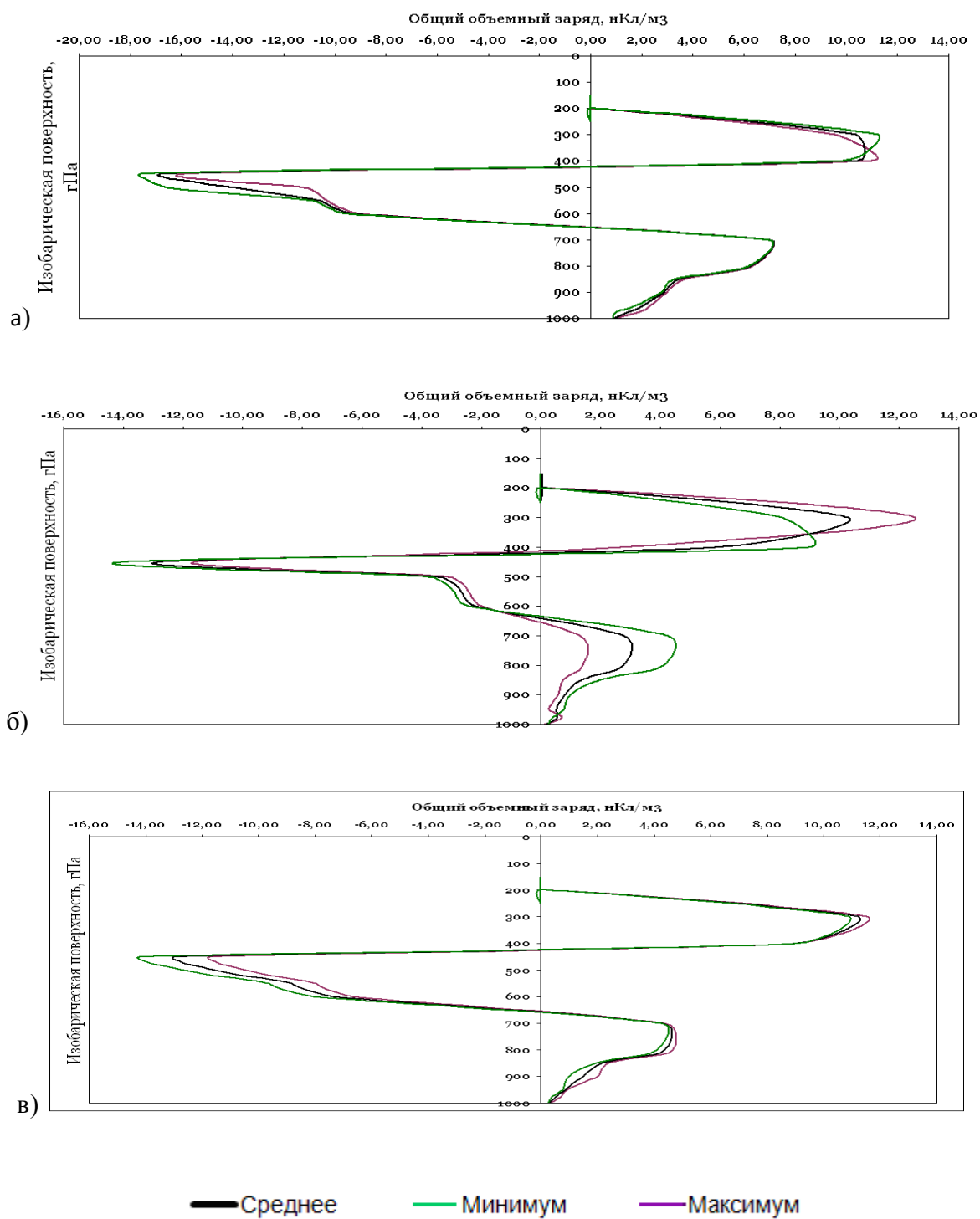


Рис. 2. Вертикальные профили плотности объемных зарядов, полученных по модели электризации кучево-дождевых облаков с различными механизмами генерации зарядов

На рис. 3 представлен пример прогноза гроз по индексу Π_w и модели электризации (безындукционная схема генерации зарядов) на 15 августа 2012 г. для 6 ч. UTC (рис.3а) и 15

ч. UTC (рис.3б) по ЕТР. Желтой заливкой показан прогноз наличия гроз по индексу Π_w , серой заливкой – прогноз отсутствия. Изолиниями показаны прогностические поля напряженности электрического поля по модели электризации. Специальным значком обозначены фактические грозы. Зелеными эллипсами показаны фактические грозовые очаги, совпавшие с прогнозом наличия гроз по индексу и по модели электризации; синими – по индексу Π_w ; красными – пропуск явления по индексу и по модели электризации. Из рис. 3а видно, что качество прогноза гроз по индексу Π_w выше – предсказано 6 фактических грозовых очагов, модель электризации показывает значения напряженности электрического поля ниже пороговых для молниевой активности – 100-200 кВ/м. На рис. 3б все грозовые очаги спрогнозированы как индексом Π_w , так и моделью электризации (значения напряженности варьируются от 200 до 400 кВ/м).

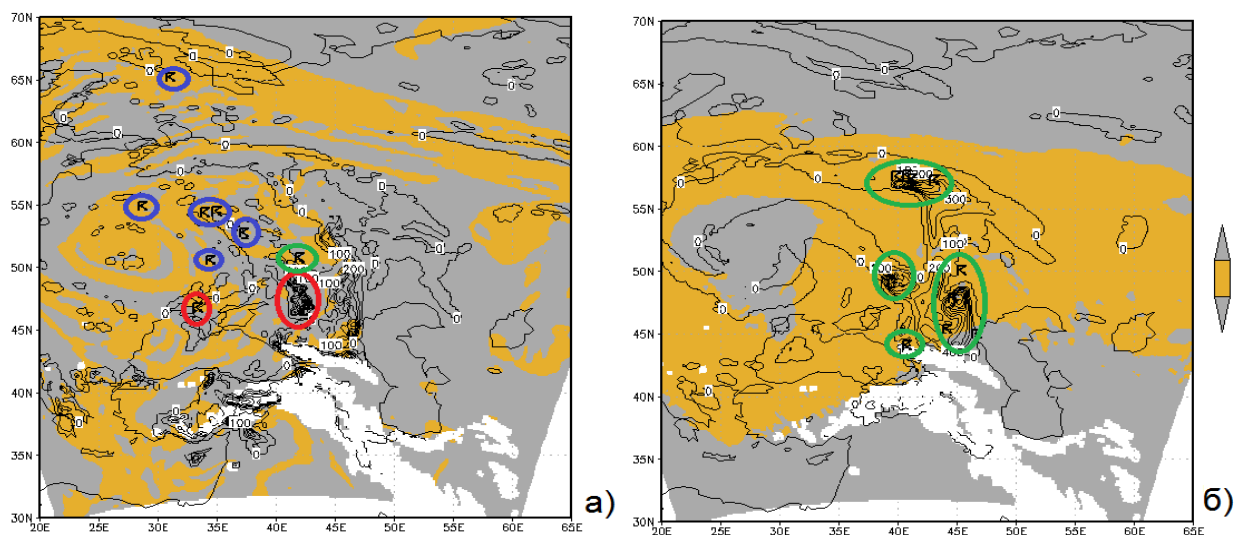


Рис. 3. Пример прогноза гроз по индексу Π_w и модели электризации для ЕТР

на 6 и 15 ч 15 августа 2012 г.

В **заключении** приводятся основные результаты работы и сформулированы выводы, полученные в диссертационной работе.

Таблица 3

*Сравнительная оценка показателей успешности прогноза гроз на сутки (д.е.) по модели
электризации по ЦФО*

| Характеристика оправдываемости прогнозов, д.е. | Метод прогноза | | | | | | | | | | | |
|--|--|------|------|--------------|------|------|-------------|------|------|----------------------------|------|------|
| | Модель электризации, основанная на различных механизмах генерации зарядов | | | | | | | | | Индекс неустойчи- вости | | |
| | Безындукционный | | | Индукционный | | | Комплексный | | | Iw | | |
| | Дн. | Нч. | Сут. | Дн. | Нч. | Сут. | Дн. | Нч. | Сут. | Дн. | Нч. | Сут. |
| Общая оправдываемость | 0,78 | 0,79 | 0,79 | 0,77 | 0,70 | 0,74 | 0,79 | 0,75 | 0,70 | 0,73 | 0,74 | 0,74 |
| Оправдываемость наличия | 0,32 | 0,34 | 0,33 | 0,26 | 0,22 | 0,44 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,29 | 0,30 | 0,30 |
| Оправдываемость отсутствия | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,97 | 0,97 | 0,99 |
| Предупрежденность наличия | 0,72 | 0,71 | 0,71 | 0,46 | 0,51 | 0,48 | 0,63 | 0,60 | 0,62 | 0,86 | 0,85 | 0,87 |
| Предупрежденность отсутствия | 0,78 | 0,80 | 0,79 | 0,81 | 0,73 | 0,77 | 0,81 | 0,77 | 0,72 | 0,71 | 0,72 | 0,71 |
| Критерий Пирси - Обухова | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,28 | 0,24 | 0,39 | 0,44 | 0,37 | 0,33 | 0,57 | 0,57 | 0,58 |

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Статистическая оценка качества прогноза гроз на сутки по 26 индексам неустойчивости атмосферы, широко используемых в мировой практике для прогноза грозовой активности. Значения индексов неустойчивости рассчитаны по прогнозам гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW (Weather research and forecast). Показано, что критерий Пирси-Обухова не превышал 0,29 (доли единицы); общая оправдываемость не превышала 0,48. Наибольшую успешность показали индексы неустойчивости, оценивающие степень неустойчивости в слое 850-300 гПа (Фатеева, VT, CT, TT и Пескова).

2. Статистическая оценка качества прогноза гроз на сутки по предлагаемому индексу неустойчивости атмосферы показала, что оправдываемость отсутствия грозы составляет 0,99, оправдываемость наличия равна 0,30, критерий Пирси – Обухова равен 0,58 по территории ЦФО за конвективный сезон 2013 г.

3. Система оценки достоверности инструментальных данных фактической информации о грозовой активности. Оценка достоверности инструментальных данных фактической информации о грозовой активности WWLLN, ФГБУ “ТГО” и ФГБУ “ВГИ” произведена за период 13 мая – 31 августа 2013 г. Оценка точности показала, что достоверность данных измерений сети WWLLN выше вероятности ложного диагноза при проведении сопоставления с допусками 50, 75 и 100 км. Показатели достоверности соответственно равны 0,65, 0,77 и 0,82. Оценки проведены во время конвективного сезона (май-август) 2013 г. по территории ЦФО России. Оценка точности БД ФГБУ “ТГО” показывает, что достоверность выше вероятности ложного диагноза при проведении сопоставления с допусками 25, 50, 75 и 100 км: достоверность равна 0,51; 0,73; 0,94 и 0,98 соответственно. Для случая с допуском 15 км достоверность данных сети составляет 0,24. Оценка произведена для ЕТР. Оценка точности БД ФГБУ “ВГИ” для части СКФО России показывает, что достоверность выше вероятности ложного диагноза при проведении сопоставления с допусками 25, 50, 75 и 100 км: достоверность равна соответственно 0,69; 0,87; 0,93 и 0,96. Для случая с допуском 15 км достоверность данных сети составляет 0,46.

4. Созданная модель электризации кучево-дождевых облаков на основе прогнозов численной мезомасштабной модели, которая позволяет прогнозировать характеристики АЭП.

5. Оценка качества прогноза гроз на сутки по предлагаемой модели электризации кучево-дождевых облаков. В результате сравнения “модельных” гроз с фактическими молниевыми очагами было установлено, что оправдываемость прогноза гроз на сутки по модели электризации, основанной на безындукционном механизме генерации заряда, выше по сравнению с версиями модели, основанной на индукционном и комплексном механизмах генерации электрических зарядов. Оценка качества прогноза гроз на сутки по ЦФО за период 13 мая – 31 августа 2013 г. показала, что оправдываемость отсутствия гроз равна 0,95, предугаданность наличия грозных очагов не превышала 0,72, значение критерия Пирси-Обухова не превышает 0,51.

Библиография

1. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. - Метеорология и гидрология, 2013, № 1, с. 5-11.
2. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности. - Метеорология и гидрология, 2014, № 5, с. 40-53.
3. Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Расчет электрического поля и индекса грозовой активности в моделях прогноза погоды. – Изв. физики РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, том 51, № 2, с. 210–217.
4. Довгальук Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. – Изд. "Моби Дик".- Санкт-Петербург, 2013, вып. 2, 220 с.
5. Дружин Г.И. Антенны и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн. / Учебное пособие. – КамчатГТУ, Петропавловск – Камчатский, 2003, 56 с.
6. Ивлев Л.С., Довгальук Ю.А., Физика атмосферных аэрозольных систем. – Изд. СПбГУ, Санкт-Петербург, 1999, 194 с.
7. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи. – Успехи физических наук, 2010, № 5, т. 180, с. 527-534.
8. Мельников А.Н., Санников Д.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И. Организация приемной станции месторасположения гроз на Камчатке и задачи, решаемые при вступлении во Всемирную сеть станций, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Партунка, Камчатский край, 2008, 16 с.
9. Мучник В.М. Физика грозы. – Л., Гидрометеиздат, 1974, 352 с.
10. Руководящий документ. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов РД 52.27.284-91. – Москва, Комитет Гидрометеорологии при Кабинете Министров СССР, 1991, 149 с.
11. Снегуров А.В., Снегуров В.С. Экспериментальная грозопеленгационная система, 2012, Труды ГГО, вып. 567, с. 188-200.
12. Фокичева А.А. Примеры оценки экономического эффекта прогноза весенних заморозков // Сборник методик по расчету экономического эффекта. – Обнинск, 2008, 90 с.
13. Шаповалов А.В. Моделирование эволюции конвективных облаков с учетом электрических процессов, Математическое моделирование, том 15, №4, 2003, с. 65–76.

14. Шметер С. М. Физика конвективных облаков. – Л., Гидрометеиздат, 1972, 232 с.
15. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. – Л., Гидрометеиздат, 1964, 403 с.
16. Aufdermauer A.N., Johnson D.A., Charge separation due to riming in a electric field, Q.J.R., Meteor. Soc., vol. 98, 1972, pp. 369-382.
17. aufm Kampe H. J., and Weickman, H. K. The effectiveness of natural and artificial aerosols as freezing nuclei. - J. Meteor., 1951, vol. 8, pp. 283–288.
18. Bateman M.G., Marshall T.C., Stolzenburg M., Rust W.D. Precipitation charge and size measurements inside a New Mexico mountain thunderstorm. - J. Geophys. Res., 1999, vol. 104. N D8, pp. 9643–9653.
19. Charba J. P. Operational system for predicting thunderstorms two to six hours in advance. – NOAA Technical Memo. NWS TDL - 64, 1977, 24 p.
20. Ek M. B., Mitchell K. E., Lin Y., et al. Implementation of NOAA land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model. - J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. D22, 8851; doi: 10.1029/2002JD003296.
21. Fierro, A. O., Mansell E. R., Ziegler C. L., and MacGorman D. R. Explicit electrification and lightning forecast implemented within the WRF-ARW model, 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 2014, Norman, Oklahoma, USA, O-04-05.
22. Janjic Z. I. The step–mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. - Mon. Wea. Rev., 1994, vol. 122, pp. 927–945.
23. Jennings S.G. Electric charging of water drops in polarizing electric fields. - J. Electrostat., 1975, vol.1, pp. 15-25.
24. Lay E. H. Investigating Lightning-to-Ionosphere Energy Coupling Based on VLF Lightning Propagation Characterization. - Seattle, Washington State, USA, University of Washington, 2008, p. 52.
25. Lynn B., Yair Y. Prediction of lightning flash density with the WRF model.-Adv. Geosci., 2010, vol. 23. pp. 11–16.
26. MacGorman D. R., Straka J. M., Ziegler C. L. A Lightning Parameterization for Numerical Cloud Models. – J. Appl. Meteor., 2001, vol. 40, pp. 459–478.
27. Mansel E. R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., and Straka J. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. – J. Geophys. Res., 2005, vol. 110, pp.12-20.

28. Mason J. The generation of electric charges in fields in thunderstorms. - Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1988, vol. 415, N 1849, pp. 303-315.
29. Moore, C.B. Rebound limits on charge separation by falling precipitation. – J. Geophys. Res., 1975, vol. 80, pp.2658-2662.
30. Sartor J.D. Induction charging of clouds. - J. Atmos. Sci., 1981, vol. 38, pp. 218-220.
31. Saunders C. Charge separation mechanisms in clouds. In planetary atmospheric electricity. - New York: Springer, 2008. pp. 335–353.
32. Stolzenburg M., Marshall T.C. Charged precipitation and electric field in two thunderstorms. - J. Geophys. Res., 1998. vol. 103. N D16. pp. 19777–19790.
33. Thompson, G., R. M. Rasmussen, and K. Manning, 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I, pp.74-86
34. Zhao, P., Y. Yin, H. Xiao (2015), The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study, Atmospheric Research, 153, 376-391, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.09.011.
35. Ziegler C. L., Peter S. R., MacGorman D.R. Relations of kinematics, microphysics and electrification in an isolated mountain thunderstorm.– J. Atmos. Sci., 1986, vol. 43, pp. 2098–2115.
36. Ziegler C., D. MacGorman, J. D. and Ray P. A model evaluation of Noninductive graupel-ice charging in the early electrization of a mountain thunderstorm. – J. Geophys. Res., 1991, vol. 96, № D7, pp. 12833-12855.
37. <http://www.garant.ru/news/18172/>.
38. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Hallett-mossop_process.
39. <http://www.sunsentinelmediakit.com/images/file/Sun%20Sentinel%20Media%20Kit.pdf>.

Список опубликованных работ по теме диссертации

В журналах из перечня ВАК:

1. **Губенко И.М.**, Рубинштейн К.Г., Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF – ARW. - Метеорология и гидрология, 2015, № 1, с. 27-37.
2. **Губенко И. М.**, Рубинштейн К. Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности. - Метеорология и гидрология, 2014, № 5, с. 40-53.

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

1. **Губенко И.М.**, Рубинштейн К.Г., Сравнительная оценка методов прогноза гроз для территории Центрального федерального округа РФ. – Сборник трудов XIX Международной школы-конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы САТЭП-2015”, 2015, с.109, Туапсе.
2. **Губенко И.М.**, Рубинштейн К.Г., Применение модели электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности. – Сборник трудов XVI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН “Безопасность и риски атомной энергетики”, 2015, сс. 64-67, Москва.
3. **Inna M. Gubenko**, Konstantin G. Rubinstein, Analysis of thunderstorm forecast for in-shore districts, Abstracts of Climseas workshop, 26 – 27 of June, 2014, University of Girona, Spain.
4. **Губенко И.М.**, Рубинштейн К.Г. Пример расчета грозовой активности над европейской территорией. Труды школы – конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы”, с.30, 23 – 25 сентября, 2013г, Нижний Новгород.