

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК 504.38

Коломеец Людмила Ильинична

Исследование взаимосвязи между грозовой  
активностью, температурой и составом  
атмосферы в глобальном и региональном  
масштабах

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н., профессор

С. П. Смышляев

Санкт-Петербург — 2022



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Прогноз особенностей распределения опасных явлений погоды (в частности гроз, шквалов, выпадения града) является важным научным направлением при разработке оптимальной стратегии адаптации инфраструктуры, сельского хозяйства, промышленности к изменяющимся условиям окружающей среды. Однако, при прогнозах конвективных явлений, в особенности грозовых очагов, не всегда в полной мере учитываются возникающие при этом дополнительные эффекты, связанные с наличием в атмосфере обратных связей между конвекцией, молниевой активностью и химическим составом атмосферы. Между тем, влияние электрических свойств атмосферы на ее газовый состав является известным фактом. При этом особую роль играют окислы азота, так как их глобальная продукция в результате молниевой активности весьма разнообразна, а неопределенность ее глобальных оценок варьируется от 1 до 100 ТгN/год. Молниевая продукция окислов азота может способствовать формированию обратных связей с изменением состава атмосферы, ее температуры, частоты и мощности конвективных явлений, ведущих, в свою очередь к образованию грозовых очагов. Возможность возникновения подобных обратных связей свидетельствует об актуальности исследования взаимосвязей между атмосферными электрическими явлениями и процессами, влияющими на изменение состава и температуры атмосферы.

Окислы азота ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) оказывают значительное влияние на содержание озона ( $\text{O}_3$ ), гидроксильных радикалов ( $\text{HO}_x$ ) и других газов атмосферы (Lawrence et al., 1995). В стратосфере окислы азота являются основными разрушителями озона, влияя, тем самым, на ослабление вредной для биосферы части солнечной ультрафиолетовой радиации, а в тропосфере способствуют его образованию в процессе окисления метана и других углеводородов, ухудшая токсичные свойства приземного воздуха. Таким образом, поскольку, с экологической точки зрения, нежелательно как уменьшение содержания стратосферного озона, так и увеличение его концентрации в тропосфере, то молниевое увеличение содержания окислов азота и в тропосфере и в стратосфере может привести к ухудшению экологической ситуации (Коломеец и др., 2014; Смышляев и др., 2010).

Молниевая продукция является одним из основных источников окислов азота в атмосфере, а ее средняя скорость в глобальном масштабе составляет 5 ТгN/год. Молниевая продукция входит в пятерку основных глобальных источников окислов азота, среди которых именно она является единственным неповерхностным источником, поэтому его влияние в большей степени проявляется в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Важно также отметить, что окислы азота являются долгоживущими газами, а это означает, что они продолжают участвовать в азотистых химических циклах не только

непосредственно во время молниевых вспышек, но и еще долгое время после грозовых явлений. Важность гроз с точки зрения дополнительной молниевой продукции окислов азота заставляет учитывать этот источник при моделировании распределения озона и других химически активных газов. Для корректного описания и учета молниевых источников окислов азота ( $LNO_x$ ) в моделях состава атмосферы необходимо задавать пространственное распределение молниевых вспышек, среднюю продукцию  $NO_x$  на одну молниевую вспышку, а также вертикальное распределение  $LNO_x$  в зависимости от степени развития конвективных процессов. Для того, чтобы прогнозировать изменение концентрации озона в верхней тропосфере/нижней стратосфере (далее зона UTLS), где влияние окислов азота на его содержание меняется с положительного на отрицательное, необходимо корректно учитывать вклад молниевой активности в продукцию  $NO_x$ , с учетом обратных связей, возникающих из-за влияния озона на содержание окислов азота, термический режим, циркуляцию и конвективные процессы в атмосфере.

В настоящем исследовании основное внимание уделяется окислам азота молниевых происхождения ( $LNO_x$ ), их влиянию на концентрацию озона в верхней тропосфере и нижней стратосфере, где наблюдаемые в последнее время эффекты изменения содержания озона выражены наиболее ярко, а также эффектам обратного влияния изменений содержания озона на конвективные процессы и молниевую активность. Изменчивость погоды и рост экстремальности климата способствуют перераспределению грозовых облаков, а значит и перераспределению молниевых вспышек, что ведет к изменениям в образовании окислов азота. Учет региональных и глобальных эффектов этих взаимосвязей важен при анализе изменчивости состава атмосферы и ее структуры.

**Актуальность** проблемы учета обратных связей между молниевой активностью, химическими и климатическими процессами определяется важностью корректного учета влияния молниевых источников окислов азота на глобальные и региональные изменения состава и структуры атмосферы. Такая задача выполнима только при комплексном подходе, при котором учитываются прямые и обратные эффекты влияния грозовой активности на состояние атмосферы, с использованием современных методик и параметризаций.

**Целью** диссертационной работы является выявление взаимосвязей между грозовой активностью, составом и структурой атмосферы в глобальном и региональном масштабах.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка подходов к исследованию влияния молниевой активности на состав и структуру тропосферы/нижней стратосферы в глобальном и региональном масштабах с учетом возникающих обратных связей.

2. Выбор моделей и их оптимальная настройка и адаптация для прогноза метеорологических и химических полей в атмосфере с учетом влияния изменчивости ее газового состава на температуру тропосферы и стратосферы и генерирование молниевых вспышек.

3. Проведение численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности к наличию прямых и обратных связей между молниевой активностью, структурой и составом атмосферы в глобальном и региональном масштабах.

4. Исследование различий прямых и обратных связей между молниевыми вспышками и изменениями состава и структуры атмосферы в глобальном и региональном масштабах.

**Методы исследования.** Гидродинамическое моделирование с использованием глобальной химико-климатической модели общей циркуляции/газового состава атмосферы (ХКМ) и региональной модели гидродинамического прогноза погоды/качества воздуха.

1. Прямые эффекты: оценка влияния молниевых эффектов на химический состав атмосферы и температуру.

2. Обратные эффекты: оценка влияния изменения химии атмосферы и температурных полей, связанных с дополнительными источниками окислов азота молниевое происхождения на конвективные процессы и новое распределение/перераспределение грозовой активности.

**Научная новизна.** Впервые анализируются эффекты нелинейных прямых и обратных связей между источниками окислов азота молниевое происхождения, газовым составом, температурой и конвективным состоянием атмосферы в региональном и глобальном масштабах. В ходе проведенной работы были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые разработаны подходы к исследованию влияния молниевой активности на состав и структуру тропосферы/нижней стратосферы в глобальном и региональном масштабах с учетом прямых и обратных связей.

2. Впервые оценено влияние молниевой активности на структуру, состав и конвективные процессы в тропосфере/нижней стратосфере.

3. Получены новые оценки влияния молниевых эффектов на изменение полей температуры в тропосфере/нижней стратосфере в глобальном и региональном масштабах.

4. Впервые продемонстрирована чувствительность конвективной неустойчивости атмосферы к источникам окислов азота молниевое происхождения.

5. Впервые продемонстрирован в глобальном масштабе эффект влияния нелинейных обратных связей на конвективные процессы.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Оценки влияния молниевых эффектов на изменение полей температуры и химического состава атмосферы в тропосфере/нижней стратосфере в глобальном масштабе.

2. Оценки влияния молниевых эффектов на изменение полей температуры и химического состава атмосферы в тропосфере/нижней стратосфере в региональном масштабе.

3. Оценки чувствительности конвективной неустойчивости атмосферы к источникам окислов азота молниевое происхождения в глобальном масштабе.

4. Наличие и проявление обратных эффектов между атмосферным электричеством, продукцией озона и термическим режимом атмосферы в региональном масштабе.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой постановкой задачи, а также современностью и большим объемом используемых данных метеорологических полей давления, температуры, состава атмосферы. Кроме того, полученные результаты не противоречивы существующим представлениям о глобальной электрической цепи и климатологической изменчивости процессов, происходящих в атмосфере.

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту положения основаны на самостоятельно полученных результатах. Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Кроме того, автор подготовил материалы выступлений и публикаций, сформулировал выводы и заключения по работе.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

1. Работа может служить методологической базой для проведения исследования влияния эффектов молниевое происхождения на состав атмосферы в любом районе земного шара.
2. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения сверхкраткосрочных прогнозов конвективного состояния атмосферы.
3. Результаты могут использоваться для диагностики тенденций региональных и глобальных изменений конвективного состояния атмосферы, для принятия управленческих решений в различных областях административной деятельности.

**Апробация работы.** Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2012 гг. по 2016 гг. Тема диссертации включена в план работы кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ.

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались: на сессиях Ученого Совета и межкафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета; на 27 международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана, физика атмосферы» (Москва, 2021) на Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (г.Нальчик, 2021), на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, 2019), на 3-ей Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 2017) на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-

Петербург, 2017); на XXIII Всероссийской школе-конференции молодых ученых. (Борок, 2017); на 2-ой Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 2015); на 2-ой международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата» (Ставрополь, 2015); на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, 2015); на XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – Борок, 2014; на XV International conference on Atmospheric Electricity.– Norman, USA, 2014.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 138 страниц, в том числе 45 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 138 наименований.

*Благодарности:*

Автор выражает глубокую признательность к.ф.-м.н. Т.В. Суходулову за помощь в проведении численных экспериментов по исследованию влияния окислов азота молниевое происхождения в глобальном масштабе, к.ф.-м.н. С.В. Мостаманди за полезные технические консультации.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования взаимосвязей между грозовой активностью, температурой, сформулированы цели и задачи работы, излагается теоретическая новизна и практическая значимость. Определены выносимые на защиту положения и результаты, а также описана структура диссертации.

В разделах **Главы 1** «Современное состояние исследования взаимосвязей между составом и структурой атмосферы и молниевыми вспышками» раскрыта актуальность исследования, дан обзор существующих научных исследований, раскрыто общее состояние темы исследования и имеющиеся на данный момент научные результаты. Здесь же описываются основные параметризации молниевых вспышек, используемые в региональных и глобальных масштабах.

В первом разделе первой главы описывается влияние молниевых вспышек на содержание в атмосфере окислов азота.

Во второй и третьей частях первой главы описываются взаимосвязи между грозовой активностью и составом атмосферы, а также приводятся результаты исследований наличия обратных эффектов между изменениями в составе атмосферы и распределением молниевой активности.

В молниевом канале молекулы кислорода и азота могут распадаться с образованием атомарных кислорода и азота. Их атомы являются химически реактивными и могут образовывать в атмосфере смешанные молекулы окислов азота NO и NO<sub>2</sub>, озона, закиси азота, взаимодействовать с водородными газами

с формированием гидроксильных радикалов  $\text{OH}$  и  $\text{HO}_2$ , перекиси водорода и паров азотной кислоты. Для окислов азота и, прежде всего, окиси  $\text{NO}$  молниевый источник играет существенную роль. Связано это с тем, что, во-первых, окислы азота имеют большее время релаксации после образования в молниевом канале по сравнению с большинством других газов, в результате чего их основная грозовая продукция в атмосфере происходит более интенсивно в результате реакций в «горячем молниевом канале», тогда как для большинства других газов существенным является только их формирование при «холодных разрядах» и в холодной короне «горячих разрядов». Во-вторых, в количественном соотношении молниевая продукция окислов азота может составлять более 10%, а в отдельных ситуациях может стать основным источником в глобальном масштабе.

Меняющееся в результате молниевых вспышек содержание радиационно-активных газов в атмосфере может привести к изменению нагрева и охлаждения в атмосфере за счет поглощения солнечной радиации и переизлучения уходящей длинноволновой радиации. Таким образом, изменение содержания озона, метана и водяного пара, главным образом в результате химических реакций с участием окислов азота грозового происхождения может привести к изменению радиационного баланса в атмосфере, что, в свою очередь, ведет к возмущению общей циркуляции атмосферы. Изменения режима циркуляции атмосферы создают потенциал для нарушения баланса в распределении атмосферных газовых примесей, подверженных атмосферному переносу, а также к изменениям потоков тепла в атмосфере. В результате изменений концентрации окислов азота, озона и других газовых примесей в тропосфере и стратосфере, в свою очередь, могут измениться нагрев и циркуляционный режим.

Изменения концентраций радиационно-активных газов, нагрева и циркуляционных условий могут привести к изменениям температуры атмосферы, которая, в свою очередь, существенно влияет и на скорости химических реакций, и на радиационный баланс атмосферы, и на общую и локальную циркуляцию атмосферы. Таким образом, изменения скорости молниевой продукции окислов азота в атмосфере не только оказывают влияние на изменение химического состава атмосферы, но и оказывают косвенное влияние на изменения климата и создают потенциал для возникновения обратных связей между физическими и химическими процессами в атмосфере, влияющими на ее состав и структуру.

Проведенные ранее модельные исследования показали, что изменения температуры за счет изменения концентраций радиационно-активных газов в результате естественной неопределенности глобальной скорости молниевой продукции окислов азота составляют несколько десятых градуса в среднем за период в несколько десятилетий. Можно выделить, во-первых, устойчивое уменьшение температуры в верхней стратосфере со скоростью около 0.015 градуса на при изменении глобальной молниевой продукции окислов азота на 1  $\text{TgN/год}$ , которое определяет и глобальную тенденцию уменьшения температуры, во-вторых, возрастание температуры нижней стратосферы в

пределах наиболее вероятной глобальной продукции окислов азота при грозовых явлениях (0-20 ТгN/год) до максимума порядка 0.3 градуса, с последующим ее уменьшением при экстремально больших, но в принципе возможных значениях молниевой продукции (30-60 ТгN/год), и, в-третьих, незначительное и слабо меняющееся при возрастании грозовой продукции окислов азота увеличение температуры тропосферы - как нижней, так и верхней. При этом следует отметить, что статистические оценки результатов расчетов показали низкую значимость тропосферных изменений температуры.

Наблюдаемое изменение климата влечет за собой изменение температурного режима, циркуляции и газового состава атмосферы, что приводит к изменению устойчивости атмосферы. Причем могут измениться как крупномасштабные факторы, так мелкомасштабные. Молниевые разряды в грозовых облаках являются индикатором интенсивности атмосферной конвекции, которая происходит при условиях неустойчивости атмосферы, возникающих при нагреве пограничного слоя или при взаимодействии воздушных масс с различными свойствами. Следовательно, при изменении температуры могут измениться условия формирования грозовых облаков, их интенсивность и, соответственно, распределение молниевых вспышек вокруг земного шара и влияние, оказываемое ими на газовый состав и температуру атмосферы. Изменение температуры за счет изменения грозовой активности будет приводить к дополнительному изменению условий их образования, и, таким образом, может образовываться обратная связь между молниевой активностью, газовым составом и температурным режимом атмосферы.

Важная роль молниевых источников окислов азота в атмосфере и их влияние на химические процессы, определяющие атмосферный состав привели к тому, что практически все модели химического состава атмосферы учитывают этот вид продукции окислов азота, а химико-климатические модели позволяют изучать и влияние молниевых эффектов на изменения температуры и климата.

В четвертой части первой главы описываются основные генераторы глобальной электрической цепи.

В пятой части первой главы описываются некоторые параметризации конвекции, используемые для описания количества молниевых вспышек в глобальном и региональном масштабах.

Схема параметризации конвекции по методу Тидтке основана на раздельном описании конвективных и крупномасштабных процессов в атмосферном столбе. Основной характеристикой конвективного процесса является поток массы в облачной среде. Конвективные облака в данной схеме составляют единый ансамбль, который может иметь верхнюю границу на любом модельном уровне. При этом предполагается, что площадь горизонтальной ячейки сетки, в которой, кроме других процессов, рассматривается и процесс конвекции, является достаточно большой, чтобы содержать такой ансамбль. Нижняя граница облака всегда соответствует нижнему модельному уровню. Схема Тидтке предусматривает расчет

интенсивности вовлечения воздуха из окружающей среды в облако и интенсивности выброса облачной воздушной массы в окружающую среду.

Параметризация по верхней границе конвективных облаков основывается на работе Прайса и Ринда (Price et al., 1992), которые предложили параметризовать пространственное распределение средней частоты молниевых вспышек как функцию максимальной высоты конвективного облака  $H$ . При этом для гроз над океанами и над континентами использовались различные параметризации:

$$F_c = 3.44 \times 10^{-5} H^{4.9}; F_m = 6.40 \times 10^{-4} H^{1.73} \quad (1)$$

где  $F_c$  и  $F_m$  – частота молниевых вспышек (число вспышек в минуту) для гроз над континентами и над океанами соответственно,  $H$  – высота над землей в км.

Однако высота верхней кромки облака может быть достаточно большой при отсутствии активных восходящих потоков, т.е. высокой молниевой активности. Также пятая степень зависимости делает метод слишком чувствительным к рассчитанным моделью высотам облаков.

Была предложена взаимосвязь между молниевой активностью и конвективными осадками. Были разработаны отношения для расчета интенсивности ОЗ вспышек (облако-земля) (всп/мин) с использованием конвективных осадков (мм/день). Было отмечено, что для данного подхода также необходимо разделение на континентальные и морские грозы. Общее количество вспышек рассчитывается также как и в предыдущем методе, основываясь на толщине холодного облака.

$$F_{CGOcean} = 0.0523 - 0.048CP + 0.00545CP^2 + 0.0000368CP^3 - 0.000000371CP^4 \quad (2)$$

$$F_{CGland} = 0.0375 - 0.0476CP + 0.00541CP^2 + 0.000321CP^3 - 0.00000293CP^4 \quad (3)$$

Схема на базе конвективных осадков чаще показывает более хорошее совпадение со спутниковыми данными, однако у нее тоже есть ряд недостатков, в частности она переоценивает активность внутритропической зоны конвергенции.

Отношение между молниевой активностью и вертикальными потоками формализовано полиномами 4 порядка, которые применяются глобально.

$$F_{CG} = -0.234 + 0.308M - 0.719M^2 + 0.523M^3 - 0.0371M^4 \quad (4)$$

Данный подход в основном лучше описывает вспышки над океанами, чем подход, основанный на высоте облака, однако имеет место переоценка над западной частью Тихого океана и недооценка над центральной и южной Африкой.

На основании экспериментальных данных была предложена параметризация на основе слоя облака между верхушкой и нулевой изотермой, не требующая разделения гроз на морские и континентальные.

$$F = 0.209D^{1.8}_{\text{cold}} \quad (5)$$

Были развиты и другие параметризации, основанные на сочетании учета скрытой теплоты конденсации и высоты облака, доступной конвективной потенциальной энергии (CAPE), отличиях в спектрах CCN ядер в облаках над океаном и над сушей, комбинации вертикальной скорости и толщины облака и другие.

Также в последнее время была разработана методика, позволяющая описывать пространственное и временное распределение вспышек лучше, чем в любом из вышеописанных подходов. Она подразумевает корректировку вычисленной интенсивности вспышек с помощью спутниковых данных.

$$FR = G \times L \times (z_{\text{mmu}} - z_{\text{zmu}_0}) \gamma \quad (6)$$

где  $z_{\text{mmu}}$  – конвективный поток массы, а  $G$  и  $L$  – глобальные и локальные оценки молниевой активности на основании данных NLDN и OTD/LIS. Таким образом достигается соответствие между модельной конвекцией и молниевой активностью.

В разделах **Главы 2** «Основные методы численного исследования эффектов влияния грозовой активности на состав и структуру атмосферы» раскрываются основные инструменты исследования для глобального (первая часть второй главы) и регионального масштабов (вторая часть второй главы).

Для исследования глобальных процессов используется совместная трехмерная химико-климатическая модель (ХКМ), разработанная в Институте вычислительной математики Российской академии наук и Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете. В модели происходит интерактивный обмен расчетных данных модели общей циркуляции атмосферы и модели газового состава атмосферы, что позволяет учитывать взаимодействия фотохимических и динамических процессов в атмосфере на каждом модельном шаге по времени (обратные связи между содержанием радиационно-активных малых газов и атмосферным переносом). Модель имеет 39 вертикальных уровней, охватывающих диапазон от 0 до 90 км, из которых 14 приходится на тропосферу. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамическом блоке модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме, решаются конечно-разностным методом с применением полунявной схемы расчета. Прогностическими переменными в динамическом блоке модели являются скорость ветра, температура, удельная влажность и приземное давление. В химическом блоке модели учитывается изменчивость 74 основных газовых

составляющих, прямо или косвенно влияющих на скорости нагрева атмосферы. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию как озона и влияющих на него газов, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов, как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере.

Для анализа обратных эффектов в атмосфере, связанных с грозовой активностью, в настоящей работе разрабатывается параметрический подход, в котором грозовая продукция рассчитывается на основе параметров, характеризующих мощность конвективных облаков.

За счет применения этого подхода с помощью глобальных климатических моделей оценивалось поведение гроз в будущем более теплом климате. Все модели единогласно отмечают уменьшение числа конвективных явлений в связи с повышением устойчивости внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) за счет изменения широтного градиента температуры и увеличения содержания водяного пара в верхней тропической атмосфере. Оценки изменения числа грозовых часто расходятся. Некоторые исследователи отмечают тенденцию к увеличению количества молниевых вспышек в среднем на 10% на каждый градус потепления. Дополнительно было показано, что при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  скорость восходящих потоков в конвективных облаках может вырасти на 1 м/с. Также считается, что в некоторых регионах, в частности в США, наиболее мощные грозы будут образовываться на 26% чаще. И в связи с нелинейной зависимостью числа разрядов от мощности конвекции это объясняет тенденцию к увеличению общего числа молниевых разрядов.

При использовании ХКМ с учетом образования окислов азота молниевыми вспышками и влияния этих окислов азота на газовый состав, а затем и на динамику атмосферы, увеличения числа разрядов либо не отмечается, либо даже появляется тенденция к их уменьшению, несмотря на рост повторяемости наиболее мощных гроз. В связи с этим, можно предложить, что это различие в результатах может быть связано с обратной связью.

Стоит отметить, что конвективные процессы являются процессами подсеточного масштаба для ХКМ, поэтому в них возможен лишь упрощенный параметрический учет конвекции, учитывающий, однако, основные свойства конвективного переноса. В ИВМ РАН/РГГМУ ХКМ конвекция рассчитывается в приближении конвективного приспособления. Если температура воздуха на нижнем уровне меньше 287.15К, то, если существуют условия всплытия, проводится согласование температуры и влаги на этих двух уровнях. Таким образом, на основе расчетных вертикальных профилей температуры и влажности рассчитываются измененные профили температуры и влажности, конвективные осадки и высота конвективных облаков (Алексеев и др., 1998).

При расчете количества молниевых вспышек на основе высоты верхней границы облака, оно считалось грозовым, если высота верхней границы облака была выше нижнего  $\sigma$ -уровня слоя, в котором температура достигает  $-22^\circ \text{C}$ .

При этом для учета возможного занижения количества вспышек за счет того, что рассчитываемая в модели высота конвективного облака является средней по ячейке модели, размер которой намного больше размеров отдельного облака, использовался калибровочный коэффициент, позволяющий согласовать расчетные данные с данными измерений ISCCP .

В связи с тем, что молниевые вспышки – явления локальные, глобальных оценок недостаточно для моделирования локальных и региональных процессов (глобальные и региональные эффекты проявляются по-разному в атмосфере и по разному влияют на чувствительность атмосферы). Это связано с подсеточным масштабом анализируемых процессов в атмосфере.

Для изучения особенностей обратных связей между грозовой активностью, содержанием атмосферных газов и полями температуры, используется численная региональная модель *The Weather Research and Forecasting model* (WRF-Chem), версия 3.6 (модель обеспечивает возможность рассчитывать метеорологические, химические и аэрозольные поля от облачного до регионального масштабов). Теория наличия в атмосфере обратных эффектов проверялась для региона бассейна Черного моря, где в силу физико-географических условий неустойчивое состояние атмосферы приводит к мощным конвективным движениям, а следовательно и активной грозовой активности.

В качестве параметризации конвекции используется схема потока массы Kain-Fritsch. Метод массового потока является общим и довольно мощным решением вихревых задач в механике жидкости и газа, в частности, для конвективных процессов, где большая часть обмена теплом и влагой осуществляется за счет восходящих и нисходящих потоков на относительно больших расстояниях.

Для расчета молниевой продукции окислов азота в каждом узле модельной сетки используется параметризация Price и Rind (PR92, PR94) для нейтральной стратификации (Price et al., 1994), основанная на следующих предположениях и уравнениях:

$$f_c(z_{top}) = 3.44 \times 10^{-5} z_{top}^{4.9} \quad (10)$$

где:  $f_c$  – частота континентальных молниевых вспышек  
 $z_{top}$  – высота верхней границы грозового облака (вертикальная скорость потоков  $> 15$  м/с, радиолокационная отражаемость  $> 20$  dBz)

$$Z = 0.021d^4 - 0.648d^3 + 7.49d + 63.09 \quad (11)$$

где:  $Z$  – отношение числа вспышек внутри облака (IC) к числу вспышек облако-земля (CG);  
 $d$  – разность между высотой облака и высотой нижнего уровня начала формирования ледяных кристаллов в облаке.

Для учета эффекта «подсеточности» молниевых процессов относительно пространственной сетки модели вводится «коэффициент  $C$ », который рассчитывается как:

$$C = 0.97241 \exp(0.048203R) \quad (12)$$

где:  $R$  – площадь модельной сетки (не зависит от широты, долготы или времени года).

Основной задачей данной параметризации является прогноз временного и пространственного распределения отдельных грозовых вспышек без использования дополнительной сложной электрической схемы (Pickering et al., 1998). Вертикальное распределение количества молниевых вспышек соответствует Гауссовому распределению в диапазоне температур от  $-15$  до  $-45^\circ\text{C}$ .

Предполагается, что количество окислов азота, генерируемых молниями ( $LNO_x$ ) зависит от длины молнии и от давления (Price et al., 1997).

$$nNO(p) = a + bP \quad (13)$$

где:  $nNO$  – количество молекул  $NO$ ;  
 $a = 0.34 \times 10^{21}$ ,  $b = 1.30 \times 10^{16}$ ; – зависящие от средней длины молнии коэффициенты;  
 $P$  – давление.

Хочется отметить, что коэффициенты  $a$  и  $b$  могут варьировать в значительных пределах ( $1 - 13 \times 10^{21}$  молекул  $NO \text{ m}^{-1}$  за одну вспышку), что подтверждается экспериментальными и лабораторными исследованиями (Wang et al., 1988).

Описанная выше параметризация  $LNO_x$  включена в WRF-Chem с некоторыми упрощениями и/или дополнениями. Для расчетов в данной работе использовалось предположение о том, что отношение  $IC:CG$  принимается равным 1.74, что позволяет, зная общее количество молекул  $NO_x$ , генерируемых суммой всех молний, рассчитать количество молекул окислов азота отдельно для  $IC$  и  $CG$ -вспышек ( $nNO(CG) = 10 nNO(IC)$ ).

Для проверки гипотезы о значимости обратных связей между молниевой активностью, газовым составом и температурой атмосферы был выбран регион побережья Черного моря. Выбор области моделирования объясняется физико-географическими особенностями побережья Черного моря. Летом особенности циркуляции и радиации приводят к ярко выраженной грозовой активности.



Рис. 1 – Область моделирования региональных эффектов

В разделах **Главы 3** «Глобальные эффекты взаимосвязей между грозовой активностью, составом атмосферы и температурой» представлены результаты исследования влияния грозowych вспышек на атмосферу в глобальном масштабе.

Окислы азота являются долгоживущими газами, а это означает, что они продолжают участвовать в азотистых химических циклах не только непосредственно во время молниевых вспышек, но и еще долгое время после грозowych явлений.

Меняющееся в результате молниевых вспышек содержание радиационно-активных газов в атмосфере может привести к изменению нагрева и охлаждения в атмосфере за счет поглощения солнечной радиации и переизлучения уходящей длинноволновой радиации. Таким образом, изменение содержания озона, метана и водяного пара, главным образом в результате химических реакций с участием окислов азота грозowego происхождения может привести к изменению радиационного баланса в атмосфере, что, в свою очередь, ведет к возмущению общей циркуляции атмосферы. Изменения режима циркуляции атмосферы создают потенциал для нарушения баланса в распределении атмосферных газовых примесей, подверженных атмосферному переносу, а также к изменениям потоков тепла в атмосфере. В результате изменений концентрации окислов азота, озона и других газовых примесей в тропосфере и стратосфере, в свою очередь, могут измениться нагрев и циркуляционный режим.

Изменения концентраций радиационно-активных газов, нагрева и циркуляционных условий могут привести к изменениям температуры атмосферы, которая, в свою очередь, существенно влияет и на скорости химических реакций, и на радиационный баланс атмосферы, и на общую и локальную циркуляцию атмосферы. Таким образом, изменения скорости молниевой продукции окислов азота в атмосфере не только оказывают влияние на изменение химического состава атмосферы, но и оказывают косвенное

влияние на изменения климата и создают потенциал для возникновения обратных связей между физическими и химическими процессами в атмосфере, влияющими на ее состав и структуру.

В первой части третьей главы продемонстрированы результаты моделирования окислов азота молниевое происхождения.

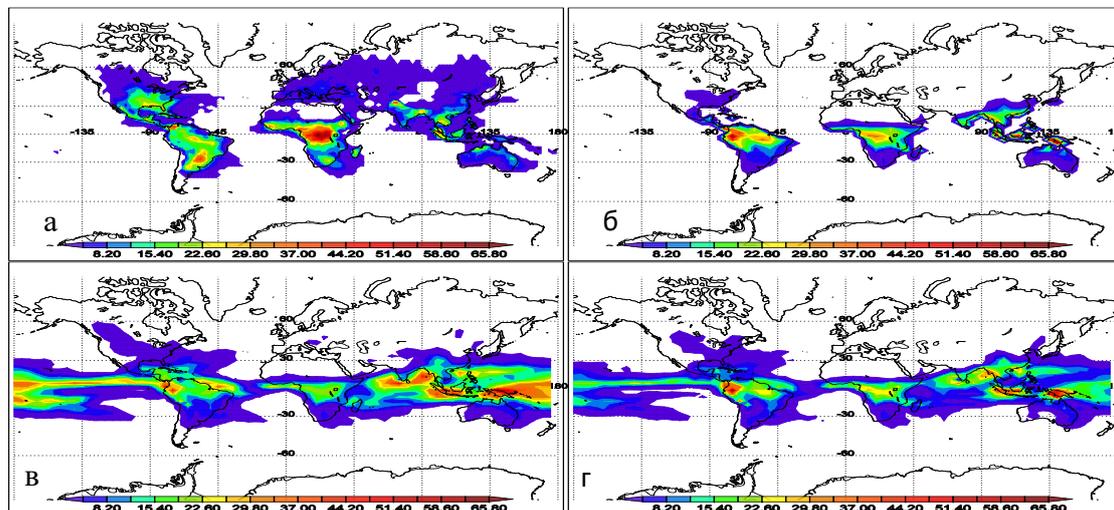


Рис.3 – Средняя частота молниеобразования (количество вспышек/км<sup>2</sup>/с): спутниковые данные (а), результаты моделирования с параметризацией на основе высоты верхней границы облака (б), на основе толщины слоя холодного облака (в), на основе конвективных осадков (г)

Хорошая сходимость результатов численных экспериментов, основанных на параметризации высоты верхней границы облака с данными спутников создает потенциал для использования этой параметризации при расчете вклада молниевой продукции окислов азота в атмосферу.

Во второй части третьей главы рассматриваются аспекты чувствительности атмосферы к изменениям продукции окислов азота, в третьей части третьей главы демонстрируется наличие обратных связей между изменениями состава атмосферы и молниевой активностью.

Для оценки влияния вариации распределения  $LNO_x$  на атмосферу с моделью были проведены расчеты для каждого случая на 25 лет с 1979 по 2003 гг. Данный период брался, во-первых, потому что он совпадает с выбранным для эксперимента АМИП-2, что позволило определить граничные условия для динамических характеристик модели, во-вторых, в связи с тем, что граничные условия поверхностных выбросов атмосферных газов для этого периода определены в сценариях ВМО-2006, а в-третьих, из-за того, что валидация используемой ХКМ проводилась для этого периода времени, что позволило провести исследование на фоне проверенного хорошего соответствия результатов моделирования и измерений. Расчеты проводились без учета обратной связи, с фиксированными значениями выбросов на уровне 1979 года. Выполненные расчеты показали высокую чувствительность атмосферы к

молниевому источнику окислов азота. Показано, что изменения в концентрации  $\text{NO}_x$  вследствие вариации горизонтального и вертикального распределения  $\text{LNO}_x$  могут достигать 50% в тропосфере и до 15% в нижней стратосфере, что приводит к изменению содержания озона на несколько процентов на высотах максимума его содержания и до 5% в тропосфере и верхней стратосфере. Изменения концентрации гидроксильного радикала  $\text{OH}$  достигали 20%, что может сказаться на окислительной способности атмосферы.

Изменение поля озона влечет за собой изменение нагрева и охлаждения, вследствие чего меняются потоки тепла и массы, которые, в конечном счете, приводят к изменению температуры. Вариации температуры в среднем за период отмечаются до  $0,5\text{ }^\circ\text{C}$  в стратосфере и до  $0,2\text{ }^\circ\text{C}$  в тропосфере. Атмосфера наиболее чувствительна к  $\text{LNO}_x$  в полярных областях стратосферы, а именно в полярных областях наблюдаются тревожные изменения в концентрации озона, называемые озоновыми дырами. Стоит отметить, что приведенные выше оценки являются средними за период 25 лет, а в отдельные годы, наблюдаемые изменения могут достигать гораздо больших значений.

Были исследованы не только прямые эффекты  $\text{LNO}_x$  на атмосферу, но и обратные эффекты.

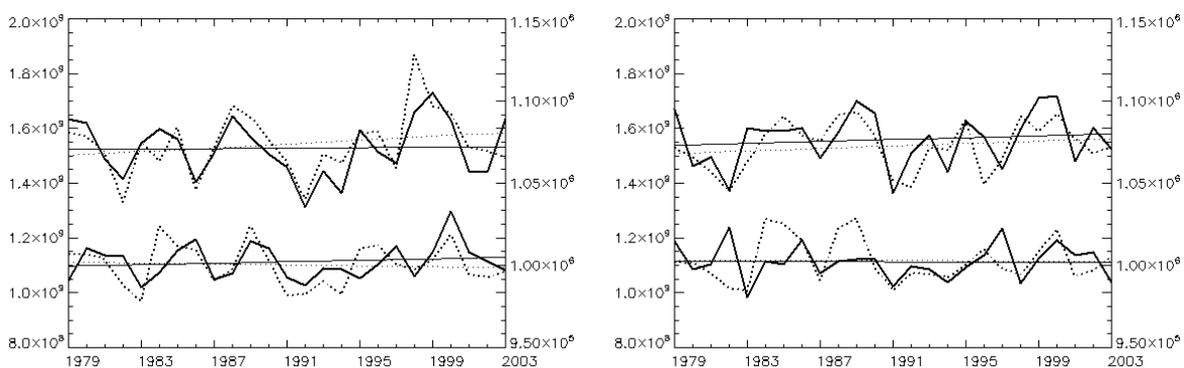


Рис. 4 – Верхние кривые - изменение общего среднемесячного количества молниевых вспышек, нижние – изменение общего количества грозовых облаков. Сплошной линией – результаты моделирования без обратной связи, пунктирной – с обратной связью. Справа – с учетом предположения, что среднеширотные вспышки продуктивнее экваториальных, слева – без учета.

В **Главе 4** «Региональные эффекты взаимосвязей между грозовой активностью, составом атмосферы и температурой» представлены результаты исследования влияния грозовых вспышек на атмосферу в региональном масштабе на примере побережья Черного моря. Для изучения влияния молниевой активности все численные эксперименты проводились для двух режимов: 1) эксперименты без учета дополнительного источника  $\text{LNO}_x$ , 2) эксперименты с использованием дополнительного источника  $\text{LNO}_x$ , с учетом прямых и обратных связей. Такой подход позволяет понять влияние глубокой конвекции на изменение состава атмосферы в верхней тропосфере/нижней стратосфере. Более эффективно было

бы анализировать каждое конвективное явление отдельно, но это затрудняется спецификой моделирования, которое не может воссоздать в идентичной мере интенсивность, точное время и местоположение каждого конвективного явления. К тому же, в терминах настоящего исследования, анализ каждого отдельного конвективного явления не требуется, потому что химические особенности верхней тропосферы характеризуются осредненными временными масштабами многих индивидуальных явлений (в настоящем исследовании используется временной интервал в 3 дня).

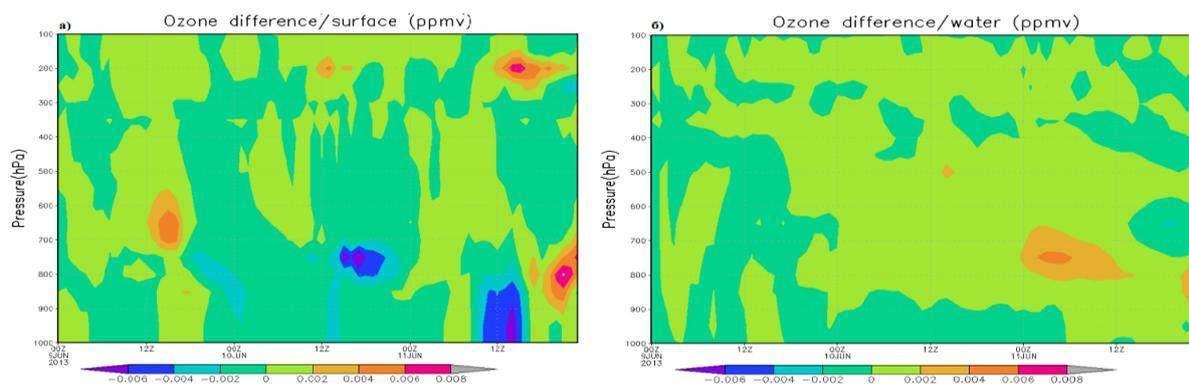


Рис.5 – Разность вертикального распределения WRF-Chem  $O_3$  (ppmv) с учетом и без учета LNOx 09-12.06.2013 (континентальная зона (а) (:42<sup>0</sup>с.ш, 24<sup>0</sup>в.д.), морская зона (б): 42<sup>0</sup>с.ш., 40<sup>0</sup> в.д.).

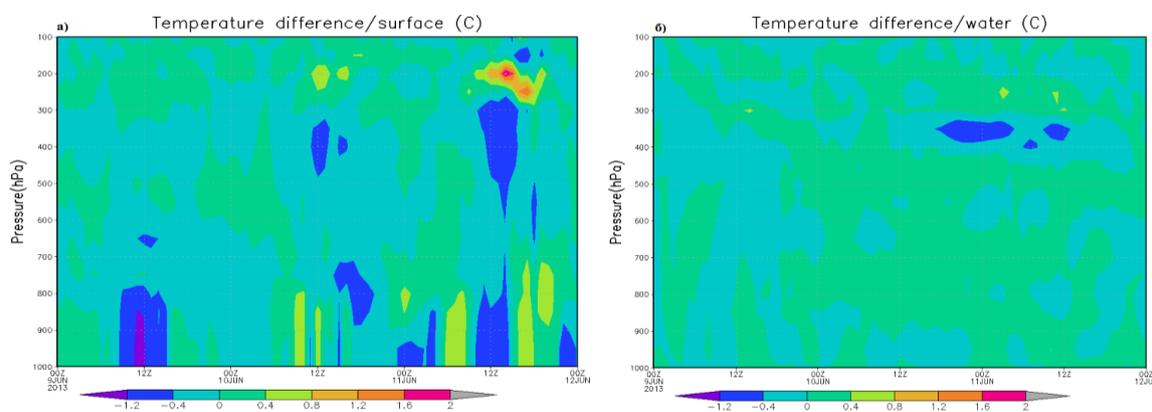


Рис. 6 – Разность вертикального распределения WRF-Chem температуры воздуха ( $^{\circ}C$ ) с учетом и без учета LNOx 09-12.06.2013 (континентальная зона (а) (:42<sup>0</sup>с.ш, 24<sup>0</sup>в.д.), морская зона (б): 42<sup>0</sup>с.ш., 40<sup>0</sup> в.д.).

Для решения поставленной задачи были рассчитаны вертикальные профили окислов азота, характерные для региона Черного моря. Учитывая географические особенности области моделирования, анализ проводился отдельно для суши и для водной поверхности.

Приведенные результаты расчетов демонстрируют и доказывают прямое влияние молниевой активности на состав атмосферы. Это влияние нелинейно, не поверхностно и не привязано к какой-то определенной точке пространства.

Исходя из этих соображений, возникает потребность оценить и обратные связи, которые представлены на рис. 7. Все атмосферные колебания, вызванные молниевой активностью, вызывают, в свою очередь, изменения в распределении и развитии гроз. Чтобы оценить, как может измениться пространственное распределение грозовой активности, используются различные критерии конвекции, дающие вероятностный прогноз возникновения конвекции (и связанных с этим процессом появление гроз, шквалов и града).

Как показывают расчеты, проявление обратных связей в большей степени влияют на неустойчивую атмосферу, в тех районах, где она устойчива, обратные связи хоть и проявляются (так как окислы азота – это долгоживущие газы), но их роль не значительна.

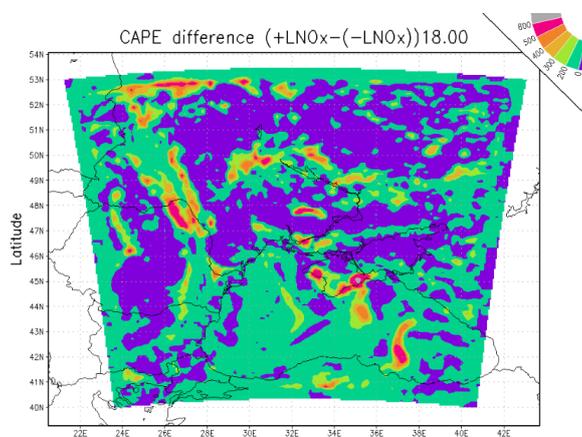


Рис.7 – Разность между значениями CAPE (Дж/кг) с учетом (+LNO<sub>x</sub>) и без учета (-LNO<sub>x</sub>) дополнительного источника окислов азота молниевое происхождения, 9.06.13, 18.00 ВСВ.

Учет в гидродинамическом моделировании обратных связей влияет на численный прогноз радиолокационной отражаемости (*Max\_dBz\_10cm*). Как было продемонстрировано, основные очаги наличия крупных гидрометеоров воспроизводятся одинаково, но при учете обратных связей становится возможным не только обнаруживать основные очаги, но и воспроизводить их более детально, что способствует повышению качества прогноза опасных конвективных явлений.

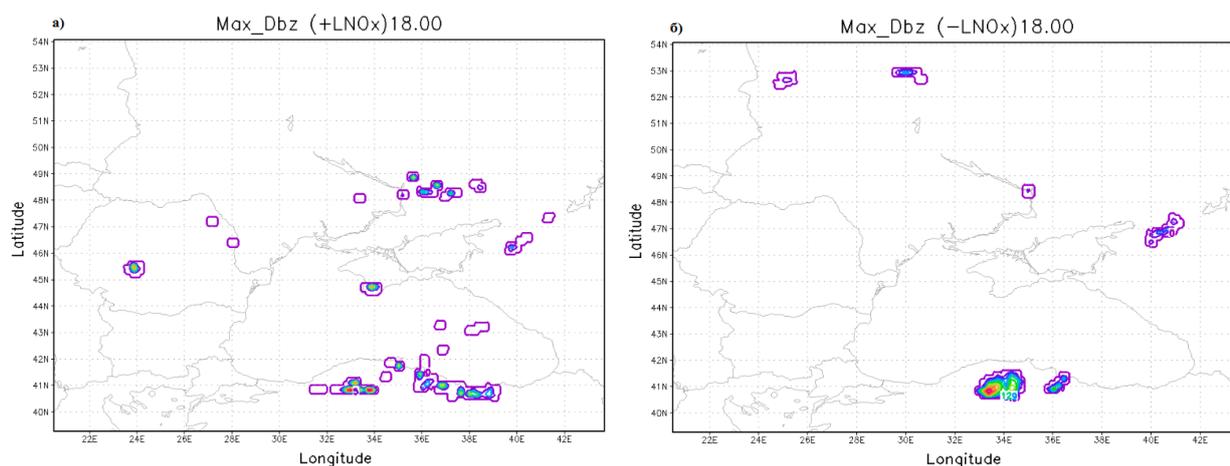


Рис. 8 – Модельный прогноз максимальной отражаемости 9.06.2013 (WRF Max\_dBz\_10cm) с учетом (а) и без учета обратных связей (б).

**В заключении** приводятся основные результаты проведенного в ходе диссертационного исследования.

- Численные эксперименты на глобальном уровне показали высокую чувствительность атмосферы к молниевому источнику окислов азота. Изменения в концентрации окислов азота вследствие горизонтального и вертикального перераспределения их молниевой продукции может достигать 50% в тропосфере и до 15% в нижней стратосфере, что приводит к изменению содержания озона до 5% в тропосфере и верхней стратосфере. Изменения концентрации гидроксильного радикала ОН могут достигать при этом 20%, что может сказаться на очистительной способности атмосферы. Вариации температуры в среднем за исследуемый период достигают до 0,5°C в стратосфере и до 0,2°C в тропосфере. Атмосфера наиболее чувствительна к окислам азота молниевое происхождения в полярных областях стратосферы.

- Выявлены обратные взаимосвязи регионального масштаба между атмосферным электричеством, продукцией озона и термическим режимом атмосферы, влияющие на краткосрочный прогноз радиолокационной отражаемости и индексов конвективной неустойчивости атмосферы. Было выявлено, что при учете прямых и обратных эффектов основные очаги гидрометеоров моделируются более корректно, что, в свою очередь, влияет на прогноз вероятности молниеобразования.

- В глобальном масштабе наблюдается незначительный положительный тренд увеличения количества молниевых вспышек и количества грозовых облаков при учете обратных эффектов между количеством молниевых вспышек, содержанием атмосферных газов, ее температурой и конвективными явлениями. При этом данные обратные эффекты способствуют появлению отрицательной обратной связи в изменении температуры, что связано с изменениями в конвективном и химическом состоянии атмосферы.

- Возникающие обратные связи между молниевыми вспышками, газовым составом, температурой атмосферы и конвективными явлениями вносят существенные изменения в количество образующихся грозовых облаков и межгодовую изменчивость молниевой активности, с чем, в свою очередь,

связаны изменения газового состава и температурного режима атмосферы. В отдельные годы и в отдельных областях модельные расчеты показывают изменения количества молниевых вспышек более чем в два раза. В некоторых случаях при уменьшении глобального количества гроз, частота молниеобразования наоборот возрастает, что говорит о росте интенсивности грозových явлений.

-В региональном масштабе обнаружена положительная обратная связь между потенциальной энергией неустойчивости и грозowymi явлениями, проявляющаяся в увеличении значения индекса CAPE при учете дополнительного источника окислов азота молниевого происхождения. При этом суточное максимальное увеличение индекса CAPE приходится в среднем на 18-19 ч., что соответствует максимальным значениям напряженности электрического поля атмосферы.

Используемые подходы исследования и полученные выводы (с некоторыми корректировками и модификациями) применимы для районов, как с ярко-выраженной молниевой активностью, так и в районах с более устойчивыми условиями состояния атмосферы.

**Основные публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 5 публикаций в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований:**

1. Коломеец Л.И., Смышляев С.П. Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2014. Вып.37. С.177-190.

2. Коломеец Л.И., Смышляев С.П. Прямые и обратные эффекты между грозовой активностью, температурой и составом атмосферы в региональном масштабе: чувствительные тесты с WRF-Chem // Труды главной Геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2017. Вып. 585. С. 187-211.

3. С. Ю. Гаврилова, Т. А. Иванова, Л. В. Луцько, А. Е. Ерохина, А. Н. Махоткин, Л. И. Коломеец, А. Ф. Садыкова. О состоянии и функционировании автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2017 году // Труды главной Геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2018. Вып. 588 С. 86-109.

4. L.Kolomeets and S.P. Smyshlyaev Feedbacks between lightning activity, temperature and composition of the atmosphere /IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044049 doi:10.1088/1757-899X/698/4/044049

5. L.Kolomeets, S.P. Smyshlyaev Regional and global lightning activity effect on the composition and properties of the upper troposphere/lower stratosphere/Proceedings Volume 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics; 1191671 (2021) <https://doi.org/10.1117/12.2604068> Event: 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2021, Moscow, Russian Federation

### **Публикации в других изданиях:**

6. Л.И. Коломеец, Д.С. Старых, А.Б. Степанова. Опыт использования радиолокационных данных при исследовании микроклиматических условий Валаамского архипелага / ВСЕРОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (г.Нальчик, 8-10 сентября 2021г)

7. L.I. Kolomeets, A.Y. Elizarova Temporal variability of the characteristics of the heat balance of the Astrakhan region / L.I. Kolomeets, A.Y. Elizarova // INTERNATIONAL SYMPOSIUM «ATMOSPHERIC RADIATION and DYNAMICS» (ISARD – 2019) – Saint-Petersburg, 2019. – P.235

8. Коломеец Л.И. Моделирование прямых и обратных эффектов между грозовой активностью, температурой и составом атмосферы в региональном масштабе. / Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев // Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» – Борок, 2017. – С. 84.

9. Коломеец Л.И. Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы / Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика». – Санкт-Петербург, 2017. – С.248 – 250.

10. Коломеец Л.И. Модельное исследование взаимосвязей между грозовой активностью и составом атмосферы/ Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев // XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – Борок, 2017. – С.72 – 73.

11. Коломеец Л.И., Смышляев С.П. Моделирование эффектов молниевой продукции окислов азота с помощью химико-климатической модели высокого разрешения // The way of science, 1(11), Волгоград, 165 – 175, 2015.

12. Kolomeets, L., Smyshlyaev, S., Sukhodulov, T.: Evaluating of the feedbacks between lightning activity and atmospheric composition changes for mesoscale numerical model simulations, the way of Science, 8, Volgograd, 215 – 221, 2014.

13. Коломеец Л.И. Моделирование обратных связей между грозовой активностью, составом атмосферы и изменением погоды и климата. / Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев // Вторая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» – Борок, 2015. – С. 80.

14. Коломеец Л.И. Моделирование обратных связей между грозовой активностью, составом атмосферы и региональным климатом / Л.И. Коломеец, С.П. Смышляев // Вторая международная научная конференция с элементами

научной школы « Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2015. – С. 167 – 170.

15. Коломеец Л.И. Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы / Л.И.Коломеец, С.П.Смышляев // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика». – Санкт-Петербург, 2015. – С.305 – 306.

16. Коломеец Л.И. Модельное исследование взаимосвязей между грозовой активностью и составом атмосферы/ Л.И.Коломеец, С.П.Смышляев, Т.Суходулов // Международная школа-конференция молодых ученых. – Москва – Кисловодск, 2014. – С.250 – 250.

17. Коломеец Л.И. Модельное исследование взаимосвязей между грозовой активностью и составом атмосферы/ Л.И.Коломеец, С.П.Смышляев, Т.Суходулов // XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – Борок, 2014. – С.56 – 57.

18.Kolomeets L.I. A model study of the feedbacks between lightning activity and atmospheric temperature and composition changes / L.I. Kolomeets, S.P.Smyshlyayev // XV International conference on Atmospheric Electricity.– Norman, USA, 2014.

19.Kolomeets L.I. Simulation of urban emissions impact on air quality in Saint-Petersburg / L.I. Kolomeets, S.P.Smyshlyayev // XVI Conference Global Emissions Initiative. – Boulder, USA, 2014.

20.Коломеец Л.И. Моделирование электрической структуры тропосферы в условиях хорошей погоды / Л.И.Коломеец, Л.В.Кашлева // XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – Нижний Новгород, 2013.– С.40.

21.Коломеец Л.И. Сезонная и суточная изменчивость атмосферно-электрических параметров в зависимости от особенностей подстилающей поверхности / Л.И.Коломеец, Л.В.Кашлева // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 131.

22. Коломеец Л.И. Суточное и годовое изменение параметров атмосферного электричества в зависимости от широты и долготы / Л.И.Коломеец, В.В.Черевань, А.К.Монзикова, Л.В.Кашлева // XV Всероссийская школа – конференция молодых ученых. – Борок, 2011. – С.80.

### **Список использованных источников**

Алексеев В. А., Володин Е. М., Галин В. Я., Дымников В. П., Лыкосов В. Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН.-Препринт ИВМ РАН, No. 2086-B98, 1998, 180 с.

Коломеец Л.И., Смышляев С.П. Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2014. Вып.37. С.177-190.

Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 487–504

Lawrence, B. V. ; Adeola, O. ; Rogler, J. C., 1995. Nutrient digestibility and growth performance of pigs fed pearl millet as a replacement for corn. *J. Anim. Sci.*, 73: 2026-2032

Pickering K., Wang E.Y., Tao W.K. et al. Vertical distribution of lightning NO<sub>x</sub> for use in regional and global chemical transport models // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. №D23. P. 31203–31216. Price C., and D. Rind, Modeling global lightning distributions in a general circulation model, *Mon. Weather Rev.*, 122, 1930–1939, 1994.

Price C., Penner J., Prather M. NO<sub>x</sub> from lightning, 2, Constraints from the global atmospheric electric circuit // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D5. P. 5943–5951.

Wang, Y. W. DeSilva, G.C. Goldenbaum, and R. R. Dickerson (1988), Nitric oxide production by simulated lightning: Dependence on current, energy, and pressure, *J. Geophys. Res.*, 103 (D15), 19, 149 – 19, 159, doi:10.1029/98JD01356