

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт прикладной физики Российской академии наук

На правах рукописи

Евтушенко Андрей Александрович

Генерация высотных разрядов в атмосфере и их влияние на баланс малых
газовых составляющих

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

Е.А. Мареев

Нижний Новгород

2013

Оглавление

Введение.....	4
1 Одноточечная модель влияния спрайта на химический состав мезосферы	22
1.1 О спрайтах в атмосфере	22
1.2 Постановка задачи моделирования спрайта.....	26
1.3 Возмущение ионного состава мезосферы	33
1.4 Излучение фотонов и возбужденные состояния азота и кислорода	38
1.5 Нейтральные компоненты мезосферы	44
1.6 Зависимости возмущения концентрации электронов от параметров разряда.....	47
1.7 Исследование характерных коэффициентов разряда.....	50
1.8 Исследование последовательности спрайтов	54
1.9 Исследование вкладов реакций и критерий важности реакций.....	56
1.10 Особенности нульмерного моделирования и основные результаты	59
2 Одномерная модель влияния спрайта/гало на химический состав мезосферы	62
2.1 Постановка задачи одномерного моделирования высотных разрядов	62
2.2 Исследование возмущения параметра θ , концентрации электронов и проводимости мезосферы.....	68
2.3 Исследование возмущения концентраций ионов	72
2.4 Исследование возмущения возбужденных компонент и связанных с ними излучений.....	79
2.5 Исследование влияния гало на химический состав мезосферы.....	86
2.6 Исследование зависимости области спрайта от величины дипольного момента в тропосфере	90
2.7 Особенности самосогласованного моделирования и основные результаты.....	92

3	Одномерная модель электрической структуры стратифицированной области мезомасштабных конвективных систем.....	94
3.1	Мезомасштабные конвективные системы	94
3.2	Механизмы зарядки облачных частиц.....	96
3.3	Базовая модель генерации электрического поля	100
3.4	Результаты моделирования с учетом безындукционного механизма зарядки тающих гидрометеоров	105
3.5	Результаты моделирования с учетом индукционного механизма зарядки тающих гидрометеоров	110
3.6	Моделирование многослойной структуры заряда с учетом поляризации гидрометеоров и капель при прилипанию аэроионов.....	115
3.7	Основные результаты и особенности моделирования электрической структуры ММКС	120
	Заключение	122
	Приложение А. Список химических реакций модели.....	124
	Приложение Б. Значение концентраций химических компонент	136
	Список цитированной литературы	138
	Список работ по теме диссертации	145

Введение

Одним из наиболее значимых направлений геофизической электродинамики, сформировавшихся к началу XXI века, является изучение высотных разрядов в атмосфере. Оказалось, что грозовая активность в тропосфере создает условия для возникновения целого семейства разрядных явлений на высотах средней атмосферы – эльфов, спрайтов, джетов [1], гигантских джетов [2] и гало [3]. Наибольшее количество работ в литературе посвящено спрайтам – объемным разрядам с горизонтальными размерами в несколько десятков километров, которые наблюдаются на высотах от 50 до 90 километров. Это связано, с одной стороны, с чрезвычайно интересной и необычной физикой спрайтов, а с другой – с достаточно высокой частотой их генерации (порядка 10 тыс. вспышек в сутки по земному шару). Возникновение спрайтов напрямую связано с образованием значительного нескомпенсированного заряда в облаке после мощных разрядов облако-земля, обычно положительной полярности. Однако условия и механизмы генерации спрайтов, а также эффекты их воздействия на среднюю атмосферу и глобальную электрическую цепь остаются недостаточно исследованными. Именно этим проблемам и посвящена настоящая диссертация.

В плане исследования условий генерации высотных разрядов основное внимание уделено вопросам электризации и накопления заряда в грозовых облаках. Как показывают наблюдения для генерации высотных разрядов – спрайтов и гало – необходим разряд облако-земля в тропосфере, переносящие значительный электрический заряд, причем при развитии спрайта практически всегда положительной полярности. Особенно сильной молниевой активностью обладают мезомасштабные конвективные системы (ММКС), которые состоят из стратифицированной части с горизонтальными размерами в сотни километров и относительно небольшой конвективной области. Натурные измерения, проводимые в

стратифицированной части ММКС, показывают наличие мощного слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы, который может играть роль «резервуара» заряда для мощных положительных вспышек облако-земля. Предложена модель развития электрической структуры в стратифицированной области ММКС. Показано, что при учете индукционного и безындукционного механизмов зарядки тающих гидрометеоров в окрестности нулевой изотермы за несколько десятков минут, возможно формирование структуры электрического поля, наблюдаемой при натурных измерениях [4].

Оценить влияние высотных разрядов на химический состав мезосферы позволяет представленная в настоящей работе плазмохимическая модель. Модель включает основные нейтральные атомы и молекулы, возбужденные состояния азота и кислорода, ионы, положительные ионы-связки и электроны. Созданный программно-вычислительный комплекс позволяет автоматически генерировать систему дифференциальных уравнений для химических компонент по списку химических реакций, с контролем сохранения массы и зарядов в системе, автоматической проверкой на повторяемость реакций.

Предложена параметризация напряженности электрического поля и температуры электронов во время спрайта и проведено одноточечное моделирование для высот 77 и 85 километров. Показано, что в области спрайта происходит существенное возмущение концентраций положительных и отрицательных ионов, электронов, нейтральных компонент, возбужденных атомов и молекул, сопровождающееся излучением фотонов.

Разработана одномерная плазмохимическая самосогласованная модель воздействия спрайта на состав мезосферы для высот от 60 до 90 километров. Предложена параметризация электрического поля на высотах мезосферы, создаваемого некомпенсированным электрическим зарядом, возникающим в облаке после разряда облако-земля, с учетом сильного

изменения проводимости мезосферы во время спрайта, вследствие резкого увеличения концентрации электронов. Исследована динамика самосогласованного электрического поля, основных отрицательных и положительных ионов, возбужденных атомов и молекул, объемной скорости эмиссии фотонов в зависимости от времени и высоты. Проанализирована зависимость величины области спрайта и максимального значения нормированного электрического поля от дипольного момента нескомпенсированного заряда в тропосфере после молниевой вспышки облако-земля.

Заметим, что при электрических полях недостаточных для развития спрайта на высоте 77-80 километров загорается гало – светящийся диск в мезосфере непосредственно над областью тропосферного разряда при напряженности электрического поля 50-80% от критического [5]. Применение одномерной модели для описания гало позволило изучить динамика возмущения возбужденных состояний атомов и молекул и связанных с ними объемных интенсивностей излучения фотонов в зависимости от времени и высоты. Показано, что возмущения концентраций ионов и электронов во время гало не происходит.

Исследование возмущений состава мезосферы, обусловленных высотными разрядами, кроме фундаментального (поиск дополнительных источников поддержания ионизации нижней ионосферы в ночное время, исследование закономерностей работы глобальной электрической цепи), представляет значительный практический интерес. Так, возмущения ионизации D-слоя влияют на условия распространения волн ОНЧ диапазона. Как показано в ряде работ [6], обусловленные спрайтами возмущения D-слоя приводят к существенным вариациям амплитуды и фазы сигнала на ОНЧ трассах. Сильные возмущения, обусловленные наиболее мощными разрядами, в принципе, могут проявляться при радиопросвечивании ионосферы и влиять на точность геофизических и астрофизических измерений этим методом [7]. Наконец, исследование

динамики основных и возбужденных состояний молекул, атомов и ионов в мезосфере и нижней термосфере очень важно для развития методов дистанционной диагностики состояния этой наиболее труднодоступной для прямых измерений области атмосферы [8].

Основной целью диссертации является исследование условий генерации высотных разрядов (спрайтов, гало) над грозовыми облаками и мезомасштабными конвективными системами, а также эффектов их воздействия на состав средней атмосферы. В соответствии с этой целью в настоящей работе решались следующие конкретные задачи:

1. Определение химических компонент, необходимых для описания химического состава мезосферы, и построение соответствующей системы химических реакций.

2. Создание программно-вычислительного комплекса для автоматического построения системы обыкновенных дифференциальных уравнений по системе химических реакций и моделирования влияния изменяющихся электрического поля и температуры электронов на химический состав.

3. Параметризация электрического поля и температуры электронов для характерных условий возникновения спрайтов, и исследование возмущения положительных и отрицательных ионов, электронов, нейтральных компонент, возбужденных атомов и молекул и связанных с ними излучений для нульмерной модели на высоте инициации спрайта (77 км) и диффузной области разряда (85 км).

4. Параметризация электрического поля на высотах мезосферы, создаваемого некомпенсированными электрическими зарядами после разряда облако-земля в тропосфере.

5. Исследование влияния спрайта и гало на химический состав мезосферы в самосогласованной одномерной модели с учетом изменения проводимости, обусловленного высотным разрядом.

6. Исследование индукционных и безындукционных механизмов зарядки при образовании слоистой структуры электрического заряда в стратифицированной области мезомасштабной конвективной системы.

7. Создание модели для описания процессов разделения зарядов при таянии гидрометеоров в окрестности нулевой изотермы.

Основные результаты работы

1. Разработана и проанализирована нульмерная плазмохимическая модель воздействия спрайта на химический баланс мезосферы. Показано, что во время и после вспышки на высотах переходной и диффузной области спрайта существенно возмущаются концентрации электронов (до $2,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$), положительных и отрицательных ионов, нейтральных компонент (в том числе в возбужденном состоянии). Объемная скорость эмиссии фотонов в первой положительной полосе азота достигает $10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Показано, что при генерации последовательности спрайтов, разделенных временным интервалом 100 с, ряд химических компонент не успевает релаксировать после первого разряда, что приводит к изменению условий развития второго разряда и накоплению отдельных химических компонент (H_5O_2^+ , NO^+).

3. Разработана одномерная плазмохимическая самосогласованная модель воздействия спрайта на состав мезосферы для высот от 60 до 90 км. Показано, что развитие лавинной ионизации начинается на высоте около 78 км, с последующим распространением вверх до 82 км и вниз до 70 км.

4. Установлено, что проводимость мезосферы на стадии инициации спрайта падает почти на два порядка из-за роста частоты столкновений электронов с нейтрами при увеличении температуры, что способствует развитию разряда. По мере формирования лавины электронов проводимость существенно возрастает, что приводит к вытеснению поля и прекращению разряда.

5. Проанализирована зависимость величины области диффузного разряда спрайта от дипольного момента нескомпенсированного заряда в тропосфере. Показано, что спрайт развивается при значениях дипольного момента, превышающих 340 Кл·км. При меньших значениях дипольного момента на высотах 78-80 км формируется гало, не сопровождающееся возмущением концентрации ионов и электронов. Объемная скорость эмиссии фотонов во время гало не превышает $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для первой положительной полосы азота.

6. Разработана модель, описывающая генерацию слоев электрического поля и заряда в стратифицированной области мезомасштабной конвективной системы. Показано, что при учете индукционного и безындукционного механизмов зарядки тающих гидрометеоров в окрестности нулевой изотермы в течение 30 минут формируется структура электрического поля, наблюдаемая в натурных экспериментах для мезомасштабных конвективных систем А и Б типа.

7. Показано, что влияние поляризации ледяных агрегатов и капель воды на прилипание аэроионов приводит к замедлению процессов разделения заряда в грозовом облаке, не изменяя структуру формирующегося электрического поля.

8. Установлено, что максимальная плотность электрического заряда в окрестности нулевой изотермы достигает 4 нКл/м³. С учетом вертикального размера слоя положительного заряда (около 300 м) и горизонтальных размеров стратифицированной области ММКС (тысячи квадратных километров), накопленный заряд может достигать нескольких тысяч кулон, что достаточно для генерации спрайтов.

Научная и практическая ценность. Результаты моделирования высотных разрядов могут использоваться при разработке дистанционных методов зондирования химического состава мезосферы по интенсивности излучения в различных диапазонах длин волн, а также могут быть использованы для оценки возмущения ионизации D слоя, влияющего на

распространение волн ОНЧ диапазона. Результаты моделирования электрической структуры ММКС могут быть использованы для построения моделей краткосрочного прогноза молниевой активности.

Публикации и апробация результатов. Основные результаты диссертации представлялись на Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2006, 2007), Нижегородской конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 2005), на международной конференции “Topical problems of nonlinear wave physics” (Нижний Новгород, 2005, 2008), на ассамблее Международного союза геодезии и геофизики “IUGG – 2007” (Перуджа, 2007), на всероссийской научной школе “Нелинейные волны” (Нижний Новгород, 2006, 2008, 2010, 2012), на всероссийской конференции молодых ученых “Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере” (Нижний Новгород, 2003), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы и электрические процессы” (Москва, 2004, Нижний Новгород, 2005), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы и электрические процессы” (Нижний Новгород, 2007), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы” (Звенигород, 2009, Борок, 2011), на международной конференции по атмосферному электричеству “ICAE – 2007” (Пекин, 2007), “ICAE – 2011” (Рио-де-Жанейро, 2011), на ассамблее союза геомагнетизма и аэрономии “IAGA – 2009” (Сопрон, 2009), на международной конференции динамические дни в Европе “Dynamics Days Europe – 2010” (Бристоль, 2010), на первой летней школе грозовые эффекты в атмосферно-ионосферной системе “TEA-IS 2012” (Малага, 2012), на всероссийской конференции по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012), докладывались на семинарах ИПФ РАН и конкурсах молодых ученых ИПФ РАН и опубликованы в журналах «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (2 статьи), «Известия Вузов. Радиофизика» (1 статья), Journal of Atmospheric research (1 статья), Journal of Atmospheric and

Terrestrial physics (1 статья), в сборнике Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharge (1 статья), 21 тезисах и трудах конференций. Результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем работы 148 страниц, включая 52 рисунка и список литературы из 70 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновывается актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена нульмерная плазмохимическая модель влияния спрайта на состав мезосферы. Создан программно-вычислительный комплекс для изучения влияния внешних воздействий на химический состав мезосферы. Проведено моделирование для высот 77 и 85 км.

В §1.1 даны общие сведения по спрайтам, приведены пространственно-временные характеристики. Описаны современные модели учета влияния спрайтов на химический состав мезосферы.

В §1.2 проводится постановка задачи моделирования и описание разработанного программно-вычислительного комплекса. Всего учитывается 267 химических реакций для 61 химической компоненты: положительные и отрицательные ионы, электроны, нейтралы в основном и возбужденном состояниях. Спрайт моделируется в 3 стадии: доспрайтовая релаксация (10^4 с), вспышка спрайта (от 20 до 200 мкс), послеспрайтовая релаксация (10^4 с). Доспрайтовая релаксация приводит систему в квазистационарное состояние, спрайт создает возмущение химических компонент, послеспрайтовая релаксация позволяет оценить характерные времена релаксации химических компонент.

В §1.3 проведен анализ возмущения концентраций заряженных частиц для высот 77 и 85 км. Возмущение электрического поля во время спрайта задается изменением параметра θ (напряженность электрического поля, нормированная на концентрацию нейтрального газа). Параметр θ за 10 мкс достигает величины 250 Тд на 77 км и 300 Тд на 85 км, что соответствует 1,3 В/см и 0,6 В/см, а T_e возрастает от 200 до 15000 К. После выхода на максимальное значение T_e и θ остаются постоянными в течение 100 мкс (стадия плато). Далее за 10 мкс T_e и θ возвращаются к доспайтовым значениям. Общая продолжительность спрайта – 120 мкс – совпадает со временем возмущения поля и температуры электронов.

В §1.4 рассмотрено возмущение концентраций возбужденных состояний атомарного и молекулярного азота и кислорода. $N_2(A)$, $N_2(B)$, $N_2(C)$ образуются при взаимодействии молекулярного азота с электронами в электрическом поле. $N_2(C)$ быстро переходит в $N_2(B)$ с излучением во второй положительной полосе молекулярного азота $h\nu(2PN_2)$ и его возмущение невелико.

$N_2(B)$ переходит в $N_2(A)$ с излучением в первой положительной полосе молекулярного азота $h\nu(1PN_2)$. Концентрация $N_2(A)$ достигает $2,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, время релаксации 10^{-2} с. Концентрация $N_2(B)$ достигает $6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, время релаксации 10^{-4} с. Релаксация $N_2(A)$ связана с переходом в $O_2(a)$, $O_2(b)$ и тушением при столкновении с нейтральными молекулами. Релаксация $O_2(b)$ в основном происходит при реакции с молекулярным азотом и образованием $O_2(a)$. $O_2(b)$ излучает $h\nu(O_2\text{Atm})$, но гораздо быстрее происходит процесс перехода в $O_2(a)$. Основные стоки для $O_2(a)$ – это реакция с излучением в инфракрасном диапазоне $h\nu(O_2\text{IRAtm})$ и тушение на молекулах кислорода.

В §1.5 исследуется возмущение концентраций нейтральных невозбужденных химических компонент. Основное возмущение концентрации атомарного кислорода происходит после разряда, достигает

максимального значения через 200 с и связано с тушением молекул и атомов в возбужденном состоянии при взаимодействии с нейтралами.

На фоне начальной концентрации $2,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ возмущение от спрайта не превышает 10%, хотя по абсолютной величине сопоставимо с суммарным возмущением концентрации возбужденных компонент. Нарботка NO практически не происходит во время разряда и начинается сразу после него. Основным источником для NO является тушение $\text{N}(^2\text{D})$ на молекулярном кислороде. Возмущение концентрации составляет $4,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, достигается к 10 мс и составляет около 50% от квазистационарного доспайтового значения. При взаимодействии электронной лавины с молекулярным азотом во время разряда образуется значительное возмущение концентрации атомарного азота, достигающее $2,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

В §1.6 рассматривается зависимость величины возмущения концентраций химических компонент от внешних параметров. Продолжительность разряда и амплитуда электрического поля нелинейно влияют на амплитуду возмущения основных химических компонент: при увеличении длительности плато в 3 раза возмущение концентрации электронов увеличивается на 3 порядка.

В §1.7 исследуется временная зависимость характерных для разрядов коэффициентов: частоты ионизации и прилипания, коэффициента λ (отношения суммарной концентрации отрицательных ионов к концентрации электронов). Показано существенное различие динамики разряда на высотах 77 и 85 километров.

В §1.8 исследована последовательность из двух спрайтов, разделенных временным интервалом в 100 секунд, что соответствует экспериментальным данным для особо мощных ММКС [11,12]. Показано, что для части химических компонент возмущения концентрации не успевают полностью релаксировать (e , NO^+ , ионы-связки), поэтому возмущение концентрации

после второго спрайта больше и возможно накопление ряда химических компонент.

В §1.9 предлагается методика для сокращения списка химических реакций вследствие их малой значимости. Показано, что сокращение количества реакций с 267 до 145 приводит к незначительному изменению динамики всех химических компонент и может быть выполнено для ускорения расчетов при дальнейшем развитии модели.

В §1.10 обсуждаются основные особенности и ограничения нульмерного моделирования и приводятся основные результаты.

Во второй главе представлена одномерная самосогласованная модель влияния высотных разрядов – спрайтов и гало – на химический состав мезосферы. Данная модель является развитием нульмерной модели, представленной в первой главе.

В §2.1 проводится постановка задачи одномерного моделирования. Используется система химических реакций для описания состава мезосферы из нульмерной задачи. Электрическое поле вычисляется из уравнения, связывающего протекание тока в молниевом канале в тропосфере с электрическим полем на высотах мезосферы, с учетом изменяющейся во время разряда проводимости. E_{ext} – внешнее электрическое поле, создаваемое нескомпенсированным электрическим зарядом в облаке, находящимся над проводящей поверхностью Земли, вычисляемое в дипольном приближении. E – напряженность электрического поля на высотах мезосферы. Для учета зависимости температуры электронов T_e от напряженности электрического поля использовался свободно распространяемый программный пакет BOLSIG+, решающий уравнение Больцмана [9]. Нескомпенсированный заряд в облаке вычисляется интегрированием силы тока в молниевом канале. Для расчета взяты координаты 38° северной широты, 0° долготы. С увеличением высоты концентрация электронов и проводимость существенно возрастают. Учитывать только галактические космические лучи в качестве источника

ионизации ночной мезосферы недостаточно для корректного моделирования высотных разрядов. Для получения в квазистационарном состоянии профиля проводимости, согласующегося с экспериментальными данными [11], добавляется источник ионизации, экспоненциально растущий с высотой. Задание начальных концентраций компонент производилось с использованием атмосферной климатической модели WACCM, являющейся частью CESM версии 1.1 [12].

В §2.2 обсуждается динамика возмущения концентрации электронов, нормированного электрического поля и проводимости мезосферы при развитии спрайта. Амплитудная характеристика тока $I_0 = 180$ кА, что соответствует максимальному протекающему току 110 кА и максимальному дипольному моменту 740 Кл·км. Показано, что инициация спрайта происходит с задержкой 300 мкс после начала протекания электрического тока в канале молнии. На высотах 75-80 км резко растет θ и достигает максимальных значений от 180 Тд до, практически, 200 Тд и остается на этом уровне несколько сотен микросекунд. После резкого роста концентрации электронов следует быстрое падение θ , связанное с возмущением проводимости. На высотах 70-75 км максимальные значения θ варьируются от 140 до 180 Тд.

В §2.3 приведены результаты моделирования для ионов. На высотах от 69 до 81 км наблюдается значительное возмущение ионов O_2^+ и N_2^+ . Максимальные возмущения наблюдаются на высотах от 74 до 77,5 км для O_2^+ и достигает 600 см^{-3} и более, на высотах от 76 до 78 км для N_2^+ с максимальной величиной около 270 см^{-3} . Оба иона начинают возмущаться на высоте около 80 км, однако время начала различно: для N_2^+ значительный рост начинается после 550 мкс, для O_2^+ через 750 мкс. Различие в максимально наблюдаемых концентрациях определяется быстрыми процессами ионной конверсии, при которых N_2^+ переходит в O_2^+ . С этим же связано время жизни возмущений. Для N_2^+ возмущение сохраняется не более 0,5 мс на всех высотах. Для O_2^+ время релаксации

возмущения зависит от высоты и составляет от 0,7 с на 70 км и порядка 60 с на высоте 80 км.

H_5O_2^+ один из основных ионов на высоте от 70 до 80 км с максимальным возмущением на высотах от 74 до 77,5 км превышающим 500 см^{-3} через несколько десятков секунд после спрайта. H_3O^+ имеет сходную динамику, так как является предшественником H_5O_2^+ . Максимальные возмущения из-за быстрого превращения в следующий ион-связку невелики и составляют около 50 см^{-3} .

Активное возмущение концентрации O_2^- проходит во всей области диффузного разряда. После начала разряда начинается интенсивная наработка O_2^- на высотах от 70 до 75 км, с максимумом 350 см^{-3} на высоте 71 км. Релаксация возмущения происходит достаточно быстро: через 10 с концентрация возвращается к доспрайтовым значениям. Вторая область с большим возмущением концентрации находится на высотах 75–78 км и связана с ионной конверсией O^- с молекулярным кислородом. Долше всего возмущение концентрации O_2^- сохраняется в верхней части спрайта и продолжается около 800 с. O^- образуется во время развития разряда. Основным источником – взаимодействие электронов с молекулами кислорода в электрическом поле. Несмотря на значительную скорость образования, заметного накопления O^- не происходит. Основные стоки связаны с реакцией ионной конверсии с молекулярным кислородом. Релаксация после завершения спрайта происходит очень быстро. К 1 мс не остается возмущения в верхней части спрайта, а к 3 мс в нижней.

В §2.4 приводятся результаты моделирования для возбужденных нейтралов и связанных с ними излучений. Показано, что основное излучение спрайта приходится на первую и вторую положительную полосу молекулярного азота (возбужденное состояние $\text{N}_2(\text{C})$ и $\text{N}_2(\text{B})$ соответственно), что совпадает с экспериментальными данными. Максимальное возмущение концентрации $\text{N}_2(\text{B})$ на высоте 75,5 км

составляет 1478 см^{-3} , а объемная скорость эмиссии фотонов первой положительной полосы превышает $2,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

В §2.5 одномерная самосогласованная модель применена для моделирования гало. Частота генерации гало в мезосфере Земли превышает одно событие в минуту [13]. Для их развития достаточно меньшей чем для спрайтов напряженности квазистатического электрического поля. Полярность разряда в тропосфере не играет существенной роли и гало возникает и после отрицательных разрядов, если переносится существенный заряд. Характерные значения напряженности нормированного электрического поля для гало 80-100 Тд [5]. Вследствие того, что лавина электронов не образуется, заметного возмущения концентрации ионных и нейтральных компонент не наблюдается. Показано что вертикальные размеры области гало составляют несколько километров, с центром на 79 км, что совпадает с экспериментальными данными [3,14].

В §2.6 проведено исследование зависимости величины области спрайта занятой диффузным разрядом в зависимости от дипольного момента, создаваемого нескомпенсированным зарядом в тропосфере при протекании тока в молниевом разряде. Показано, что высота максимального значения нормированного электрического поля практически не зависит от дипольного момента и варьируется от 78,2 до 78,5 км. Рост максимального значения θ в зависимости от тока нелинейный, и при дипольном моменте 1200 Кл·км превышает критическое значение в 1,8 раза.

В §2.7 обсуждаются основные особенности и ограничения одномерного самосогласованного моделирования и приводятся основные результаты.

В третьей главе представлена одномерная модель для описания структуры электрического заряда в окрестности нулевой изотермы для стратифицированной области мезомасштабной конвективной системы. Проведено моделирование образования тонкого слоя положительного

заряда около нулевой изотермы с учетом индукционного и безындукционного механизмов зарядки тающих гидрометеоров.

В §3.1 дается общая характеристика электрической структуры мезомасштабных конвективных систем. Характерной особенностью ММКС является высокая молниевая активность (как правило, в ночное время суток) в течение нескольких часов. Как показали измерения электрического поля непосредственно в грозовых облаках, проведенные на баллонах и самолетах, это связано с наличием долгоживущих (до 6-12 часов) слоев электрического заряда в стратифицированной области [15–19]. Несмотря на сложную аэродинамику и большой горизонтальный масштаб ММКС, на порядок превосходящий размеры обычной грозовой ячейки, распределение вертикальных слоев заряда сохраняет примерно постоянную структуру на протяжении всей стратифицированной области. При этом в большинстве экспериментов проявляется наличие интенсивного тонкого слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы.

В §3.2 рассматриваются процессы электризации в грозовых облаках. Проблемы зарядки облачных частиц традиционно занимают важнейшее место в исследованиях грозового электричества. В литературе рассматривается множество механизмов разделения заряда, обладающих специфической микрофизикой в зависимости от температуры, фазового состава, размеров облачных частиц. Для динамики процесса электризации особенно важнейшую роль играет зависимость величины δq (передаваемый заряд в единичном акте электризации) от напряженности электрического поля. Для индукционного механизма значение δq зависит от величины и направления внешнего электрического поля и связано с поляризацией взаимодействующих частиц. Для безындукционного механизма величина заряда, разделяемого при столкновениях гидрометеоров, не зависит в явном виде от напряженности электрического поля.

Одной из наиболее характерных особенностей стратифицированной области ММКС является наличие интенсивного тонкого слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы, а также более распределенного слоя отрицательного заряда ниже нулевой изотермы. Поэтому естественным является предположение, что при формировании этого слоя положительного заряда основную роль играет электризация при таянии частиц льда. Учитывая, что отрицательный заряд находится ниже нулевой изотермы и распределен в большем диапазоне высот, можно предположить, что крупные тающие гидрометеоры заряжены отрицательно, а мелкие капли воды – положительно [19]. Существующие лабораторные эксперименты не дают ясной и однозначной картины разделения зарядов при таянии ледяных кристаллов [20–23]. В опытах по измерению зарядов на мелких оторвавшихся от тающей частицы каплях воды обнаруживаются заряженные как положительно, так и отрицательно мелкие капли. Физические механизмы, приводящие к разделению зарядов, не вполне ясны. Очевидно, что в реальных условиях на знак отрываемого заряда может существенно влиять электрическое поле, т.е. может реализоваться индукционный механизм вследствие сдувания поляризованного заряда на крупной частице. Возможно также, что определенную роль играет безындукционная зарядка, связанная с различиями в подвижностях ионов OH^- и H^+ , существующих в гидратированном состоянии во льду и воде [20,21].

В §3.3 предлагается система уравнений для описания процесса зарядки в окрестности нулевой изотермы тающих гидрометеоров. Предлагаемая модель основана на системе уравнений квазигидродинамики для основных фракций, участвующих в процессах формирования зарядовых слоев, которая, благодаря большому горизонтальному масштабу описываемой системы, анализируется в одномерном приближении. Ключевую роль при написании этой системы играет параметризации процессов электризации облачных частиц, то есть определение величины

δq для индукционного и безындукционного механизмов разделения зарядов.

Рассматривается поток тающих гидрометеоров с постоянной концентрацией. При прохождении области таяния, лежащей в окрестности нулевой изотермы, от них отрываются и сносятся встречным по отношению к гидрометеору потоком воздуха мелкие капли воды, уносящие электрический заряд. Область таяния определяется функцией таяния $f(z)$, которая параметризует интенсивность процесса разделения зарядов в зависимости от высоты в окрестности нулевой изотермы. Предлагаемая модель включает в себя уравнения непрерывности для плотности заряда тающих гидрометеоров, капель воды, положительных и отрицательных аэроионов и уравнение Пуассона. Дополнительно учитывается зависимость скорости аэроионов от величины электрического поля, зависимость скорости образования аэроионов от высоты и приведены выражения для электрического заряда, отрываемого в единичном акте электризации тающего гидрометеора при учете индукционного и безындукционного механизма разделения заряда.

В §3.4 приводятся результаты моделирования для безындукционного механизма зарядки в окрестности нулевой изотермы. Слои электрического заряда, формирующиеся в окрестности точки реверса, считаются постоянными и задаются с помощью ρ_{Add} . Показано, что при отсутствии процессов генерации в окрестности нулевой изотермы примерно за 300 с электрическая структура приходит к квазистационарному состоянию. Электрическое поле достигает значения 25 кВ/м, при этом напряженность электрического поля у земной поверхности составляет 1 кВ/м и направлена вверх, то есть имеет полярность, противоположную полю хорошей погоды.

Показано, что при учете безындукционной зарядки в окрестности нулевой изотермы формируется структура электрического поля и плотности заряда аналогичная наблюдаемой в экспериментах. Напряженность полей достигает значения 70 кВ/м за $2 \cdot 10^3$ с после начала

процессов электризации. Плотность электрического заряда достигает 3-4 нКл/м³. При задании разнонаправленного профиля скорости у нулевой изотермы удастся получить профиль электрического поля, совпадающий количественно с наблюдаемыми профилями в ММКС типа Б.

В §3.5 приводятся результаты моделирования для индукционного механизма зарядки в окрестности нулевой изотермы. Показано, что возможно формирование наблюдаемой в экспериментах структуры поля, при этом эффективность зарядки сильно зависит от величины и направления скорости движения воздуха.

В §3.6 проведена модернизация базовой системы уравнений для учета влияния поляризации частиц в электрическом поле на интенсивность прилипания аэроионов. Верхние слои зарядов в окрестности точки реверса начинают формироваться одновременно с электризацией у нулевой изотермы. При накоплении значительного электрического заряда на частицах прилипание аэроионов того же знака прекращается, зато частота прилипания аэроионов противоположного знака максимальна, что ведет к релаксации заряда на частицах. Показано, что учет поляризации тающих агрегатов и капель воды приводит к уменьшению интенсивности генерации слоев электрического заряда, однако не ведет к значительному изменению профиля электрического поля и позволяет промоделировать профиль поля, наблюдаемый в ММКС типа А.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1 Одноточечная модель влияния спрайта на химический состав мезосферы

1.1 О спрайтах в атмосфере

Открытие высотных разрядов (спрайтов, эльфов, джетов, гало) привело к возникновению целого ряда новых вопросов перед специалистами по физике и химии атмосферы [3,9–11], среди которых одной из наиболее сложных и практически важных является проблема возможного влияния высотных разрядов на состав средней атмосферы [1,12–21]. В настоящее время основное внимание в литературе по высотным разрядам уделяется спрайтам. Спрайты – это высотные разряды, возникающие в мезосфере и нижней термосфере на высотах от 50 до 90 км и тесно связанные с молниевой активностью. После мощного, практически всегда положительного разряда облако-земля в облаке образуется слой нескомпенсированного заряда над проводящей поверхностью Земли [11,19]. Электрическое поле можно с достаточной степенью точности на высотах мезосферы описывать в дипольном приближении, поскольку горизонтальные размеры области электрического заряда не велики по сравнению с расстоянием до области спрайта. Электрическое поле диполя падает с высотой по степенному закону, а поле, необходимое для пробоя атмосферы, пропорционально плотности нейтральных частиц, спадающей экспоненциально. В ночных условиях на высоте 75-80 км поле диполя становится достаточным для пробоя атмосферы, и происходит инициация спрайта. Основанные на наблюдениях оценки [19] показывают, что после мощных разрядов облако-земля электрическое поле на высотах мезосферы достигает сотен вольт на метр, температура электронов увеличивается до нескольких электрон-вольт на временах порядка десятков микросекунд. При этом температура нейтрального газа практически не изменяется. Далее разряд развивается вверх и вниз. В верхней части спрайта разряд

развивается во всем объеме – это диффузная область спрайта [22]. Верхняя граница спрайта определяется проводимостью мезосферы, которая, начиная с высот мезопаузы (83-85 км), резко возрастает. Поскольку электрическое поле не может проникнуть в область с высокой проводимостью, то верхняя граница спрайтов редко превышает 90 км. Развитие разряда вниз (от области зажигания спрайта) идет путем формирования стримеров, так как среднее поле в этой области ниже пробойного. Некоторые стримеры достигают высоты 50 км.

Отдельного обсуждения заслуживают спрайты, зажигающиеся в дневных условиях. В настоящее время отсутствуют оптические изображения дневных высотных разрядов по причине недостаточной чувствительности фото-видеокамер, используемых для наблюдений. Дневные спрайты детектируются по характерной форме низкочастотных электромагнитных сигналов, приходящих из области с высокой молниевой активностью. Проводимость мезосферы существенно изменяется в течение суток. Ночью проводимость на 1-2 порядка меньше, чем в дневных условиях, и электрическое поле легче проникает на высоты мезосферы. Для достижения пробойных полей и зажигания спрайтов днем необходим существенно больший, чем в ночных условиях, дипольный момент, создаваемый нескомпенсированным зарядом в облаке. Как показано в статье [23] величина дипольного момента для дневных спрайтов составляет несколько тысяч Кл·км. В то же время зафиксировано зажигание спрайта в ночных условиях после слабой вспышки с дипольным моментом 130 Кл·км. В среднем спрайты зажигаются ночью при дипольном моменте 400-800 Кл·км, а максимальный зафиксированный дипольный момент составляет 2000 Кл·км [24]. В данном исследовании изучение дневных спрайтов проводиться не будет, и подробно изучены спрайты в ночных условиях.

Спрайты являются наглядным проявлением разрядных процессов в глобальной электрической цепи. Кроме исследования фундаментальных

процессов поддержания ионизации ночной нижней ионосферы и функционирования глобальной электрической цепи, изучение спрайтов имеет важное прикладное значение. Так, возмущения ионизации D-слоя влияют на условия распространения радиоволн на очень низких частотах, так называемого ОНЧ диапазона. Как показано в работе [6], обусловленные спрайтами возмущения D-слоя мезосферы приводят к существенным вариациям амплитуды и фазы сигнала на ОНЧ трассах. Сильные возмущения, обусловленные наиболее мощными разрядами, в принципе, могут проявляться при радиопросвечивании ионосферы и влиять на точность геофизических и астрофизических измерений этим методом [7]. Эффекты могут быть особенно существенными над мезомасштабными конвективными системами (ММКС), которые характеризуются повышенной молниевой активностью и длительным временем существования (до 10-12 часов), а из-за особенностей электрической структуры ММКС при этом часто генерируются мощные молниевые разряды, переносящие на землю значительный положительный заряд и создающие условия для генерации спрайтов [25]. Наконец, исследование динамики основных и возбужденных состояний молекул, атомов и ионов в мезосфере и нижней термосфере очень важно для развития методов дистанционной диагностики состояния этой наиболее труднодоступной для прямых измерений области атмосферы. Так, в работе [8] предлагается использовать спутниковые оптические измерения спрайтов для оценки возмущений электрического поля и некоторых характеристик реакции тушения возбужденных состояний молекул азота.

Первая достаточно детальная модель для описания химических возмущений мезосферы в области стримеров спрайта была предложена Сентманом в 2008 г. [16]. Учитывалось более 800 химических реакций для 87 компонент и моделировалось влияние разряда на высоте 70 км в ночных условиях на химический состав мезосферы, показано значительное

возмущение состава мезосферы. В работе [20] для высот 63, 68 и 78 км изучена динамика химической системы из 75 компонент и более чем 500 реакций. Детально проанализированы возмущения концентраций возбужденных состояний азота и кислорода и связанными с ними эмиссиями в оптическом, ультрафиолетовом, инфракрасном диапазонах. В работе [26] рассчитано распределение электронов по энергии и уделено особое внимание динамике колебательно возбужденных состояний азота в стримерной части спрайта. В работах [21,27] была предложена плазмохимическая модель диффузной области спрайта и исследованы возмущения химического состава мезосферы при различных по длительности и амплитуде возмущениях электрического поля и температуры электронов.

Данная глава посвящена численному моделированию динамики химического состава ночной мезосферы в области спрайта во время вспышки и после нее. Наряду с динамикой химических компонент, анализируются оптическое и инфракрасное излучение спрайта на основных частотах. В отличие от работ [16,20,28,29], в данной главе рассматривается диффузная часть спрайта на высотах 77 км (область инициации спрайта) и 85 км (диффузная область). На этих высотах существенно отличается ионный состав, плотность атмосферы и величина электрического поля, что влияет на скорость протекания многих химических реакций, входящих в модель, которые зависят от напряженности электрического поля.

1.2 Постановка задачи моделирования спрайта

При решении задачи о возможном воздействии высотных разрядов на химический состав мезосферы с самого начала встает вопрос о создании системы химических реакций, позволяющей описать невозмущенный химический состав мезосферы и детально проанализировать возмущения концентраций химических компонент во время и после развития высотного разряда. Увеличение количества химических реакций, с одной стороны, ведет, до определенного момента, к улучшению детализации происходящих химических процессов. С другой стороны, количество реально важных реакций ограничено, а учет всех возможных реакций приводит лишь к ненужному увеличению времени расчетов и практически не изменяет их результат. Поэтому в работе выбран компромиссный вариант – система химических реакций состоит из 267 химических реакций и описывает 61 химическую компоненту. Полный список химических реакций приведен в Приложении А.

Условно все химические компоненты можно разделить на 4 блока: положительные ионы и ионы-связки, отрицательные ионы и электроны, нейтральные компоненты, возбужденные состояния молекулярного и атомарного азота и кислорода.

Остановимся на описании этих блоков отдельно. Положительные ионы представлены ионами азота, кислорода и их соединений: O^+ , O_2^+ , O_4^+ , N^+ , N_2^+ , N_3^+ , N_4^+ , NO^+ , NO_2^+ , N_2O^+ . Оставшиеся положительные ионы отнесем к ионам связкам: H_3O^+ , $H_5O_2^+$, $H_7O_3^+$, $H_9O_4^+$, $(H_2O)NO^+$, $(H_2O)_2NO^+$, $(H_2O)_3NO^+$, NO^+N_2 , NO^+O_2 , $O_2^+N_2$, H_2O^+ , $O_2^+(H_2O)$, $H_3O^+(OH)$, CO_2NO^+ . Общее количество ионов – 24 штуки. Этот блок хорошо описывает процессы с участием положительных ионов как на самом верху спрайта, где основные ионы O_2^+ , NO^+ , так и область инициации спрайта где основную роль играют O_2^+ и ионы-связки. При развитии высотного

разряда эффективно протекает процесс ионизации молекулярного азота и кислорода. При этом в больших количествах образуются O_2^+ и N_2^+ , которые по цепочке химических реакций приводят к возмущению концентрации других положительных ионов.

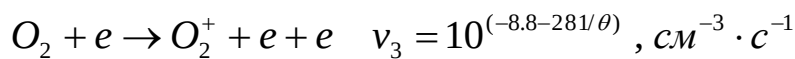
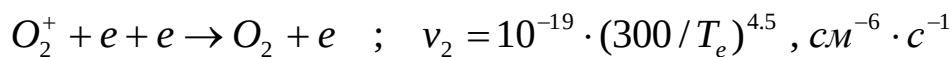
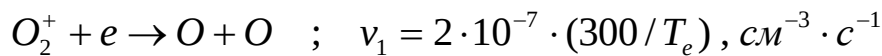
Блок отрицательных ионов и электронов содержит 11 ионов и, соответственно, электроны. Представлены ионы кислорода: O^- , O_2^- , O_3^- , O_4^- ионы азотных соединений: NO^- , N_2O^- , NO_2^- , NO_3^- , ионы соединений углерода и кислорода CO_3^- , CO_4^- , а так же OH^- и электроны. Во время спрайта основное возмущение приходится на O^- . Остальные отрицательные ионы образуются при взаимодействии нейтралов с электронами после разряда.

Блок нейтральных компонент содержит кислород, азот и их соединения: O , O_2 , O_3 , N , N_2 , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O , атомарный и молекулярный водород и соединения водорода с кислородом: H , OH , H_2 , H_2O , HO_2 , H_2O_2 , а так же CO_2 . Всего учтено 16 нейтральных компонент.

Блок возбужденных состояний молекулярного и атомарного азота и кислорода состоит из 9 компонент. Включение всех реакций возбуждения электронно-колебательных уровней частиц в азотно-кислородной смеси электронами плазмы является весьма трудоемкой задачей. Большинство электронных уровней является короткоживущими по отношению к процессам тушения, излучательным переходам и процессам преддиссоциации. Поэтому используется упрощенная схема для описания возбужденных молекул и атомов, в рамках которой рассмотрены только те уровни, которые могут сыграть заметную роль в балансе химических компонент мезосферы. Для молекул N_2 – это уровни $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $a'^1\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$, для молекул O_2 – уровни $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$, для атомарного азота – уровень 2D и для атомарного кислорода – уровни 1D , 1S . В работе для упрощения будем называть возбужденные уровни для молекул по первой букве. Соответственно введем следующие обозначения: $N_2(A)$, $N_2(B)$, $N_2(C)$, $N_2(a)$, $O_2(a)$, $O_2(b)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^2D)$.

Примененный в данной работе подход, с одной стороны, позволяет проводить расчеты быстро, а с другой – позволяет достаточно точно описывать химию положительных и отрицательных ионов, возбужденных атомов и молекул, нейтралов.

Задача построения системы дифференциальных уравнений для концентраций химических компонент по списку химических реакций является трудоемкой. Для примера ниже приведены три реакции и соответствующая им система дифференциальных уравнений.



$$\frac{dN_1}{dt} = v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 - v_3 \cdot N_1 \cdot N_3,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 2 \cdot v_1 \cdot N_4 \cdot N_3,$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -v_1 \cdot N_4 \cdot N_3 - v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 + v_3 \cdot N_1 \cdot N_3,$$

$$\frac{dN_4}{dt} = -v_1 \cdot N_4 \cdot N_3 - v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 + v_3 \cdot N_1 \cdot N_3$$

где $N_1 - O_2$, $N_2 - O$, $N_3 -$ электроны, $N_4 - O_2^+$ – концентрации соответствующих химических компонент.

Количество дифференциальных уравнений определяется количеством учитываемых химических компонент и составляет 61 штуку для полной системы химических реакций. Количество слагаемых в правой части дифференциальных уравнений для конкретной химической компоненты определяется количеством реакций, в которых изменяется ее концентрация. Например, для электронов в правой части дифференциального уравнении более ста слагаемых. Очевидно, что получающаяся система дифференциальных уравнений слишком громоздкая, и привести ее полностью не представляется возможным.

Для удобства работы с системой дифференциальных уравнений при ее создании и редактировании, а также исключения возможности внесения ошибочных членов в правые части уравнений, был разработан программно-вычислительный комплекс. При генерации системы уравнений по списку химических реакций автоматически проверяется сохранения заряда и массы (таким образом, выявляются некорректно записанные химические реакции) и проводится анализ для выявления повторяющихся химических реакций в списке. Получившаяся система уравнений является частью численного кода и автоматически сохраняется в нужный файл. При необходимости добавления или удаления химических реакций достаточно перезапустить программу после внесения соответствующих изменений в файл с реакциями. Программно-вычислительный комплекс автоматически создает новую систему дифференциальных уравнений.

Моделирование возмущения мезосферы при вспышке спрайта состоит из трех временных интервалов. Во время первого этапа продолжительностью 10^4 с просчитывается система реакций без возмущений поля и температуры электронов, для выхода концентраций химических компонент на квазистационарное значение. Вопрос о значении концентраций компонент в условиях ночной мезосферы является открытым. При переходе из дневных условий к ночным существенно изменяется структура источников и стоков для всего химического состава мезосферы: перестает работать целый блок химических реакций, связанных с солнечной активностью (Ly-a, Ly-b, жесткое рентгеновское излучение, УФ-радиация). Основным источником ионизации становятся галактические космические лучи (ГКЛ). Скорость ионизации галактическими космическими лучами зависит от высоты [18]:

$$q_{ГКЛ}(z) = (A + B \cdot \sin^4 \varphi) \cdot n(M), \quad (1.1)$$

где $A=1,74 \cdot 10^{-18} \text{с}^{-1}$, $1,96 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1} \leq B \leq 2,84 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1}$ для условий высокой и низкой солнечной активности, $n(M)$ – концентрация нейтральных компонент на данной высоте. В работе использованы значения $\varphi=45^\circ$, $B=2,5 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1}$. Соответственно, для высот 77 и 85 км скорость ионизации галактическими космическими лучами составляет $q_{\text{ГКЛ}}(75)=4,4 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ и $q_{\text{ГКЛ}}(85)=1,6 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ соответственно. Следует отметить, что ГКЛ напрямую влияют на количество ионов в условиях ночной мезосферы. За первый временной интервал концентрации химических компонент приходят к квазистационарным значениям, характерным для инициации спрайтов в ночных условиях. Начальные концентрации химических компонент в начале взяты из [30], а значения в конце первого этапа приведены в Приложении Б. Конечные данные первого этапа являются начальными для второго этапа расчетов. Если концентрация компонент неизвестна или после первого этапа составляет менее 1 см^{-3} , то ее значение принималось равное нулю. Достаточно большое время первого этапа расчетов определяется недостаточностью экспериментальных данных о профилях концентраций многих химических компонент и дает возможность оценить влияние высотного разряда на химический баланс мезосферы с минимальным влиянием процессов сопровождающих приход системы к квазистационарным значениям концентраций химических компонент.

Второй временной отрезок соответствует непосредственно вспышке спрайта. Вспышка спрайта параметризовалась изменением температуры электронов T_e и нормированного электрического поля θ . Температура нейтралов и электронов указывается в кельвинах (К). Параметр θ – напряженность электрического поля нормированная на концентрацию нейтралов и имеет единицу измерения таунсенд ($1 \text{ Тд} = 10^{-21} \text{В м}^2 = 10^{-17} \text{В} \cdot \text{см}^2$). Начальная температура электронов совпадает с температурой нейтрального газа и составляет 200К. Начальное значение параметра θ

нулевое, т.е. электрическое поле отсутствует. Считается, что температура электронов и электрическое поле растут синхронно и линейно выходят на максимальные значения за 10 мкс после начала спрайта, что соответствует времени установления равновесной температуры электронов – около $1,5 \cdot 10^4$ К [3,21,31]. Параметр θ достигает величины 250 Тд на 77 км и 300 Тд на 85 км, что превышает в 2 и 2,5 раза пробойные поля на этих высотах и соответствует напряженности электрического поля 1,3 В/см на 77 км и 0,6 В/см на 85 км. Электрическое поле нескомпенсированного электрического заряда в тропосфере, образовавшегося после разряда облако-земля, падает с высотой по степенному закону. В то же время плотность атмосферы падает еще быстрее – экспоненциально. Поэтому параметр θ больше на 85 км, хотя напряженность электрического поля существенно выше на 77 км. После выхода на максимальное значение T_e и θ остаются постоянными в течение 100 мкс (стадия плато). Значение длительности плато может варьироваться в зависимости от параметров молниевой вспышки, в частности, от длительности стадии непрерывного тока (см. подробнее в [21]). Далее следует снижение T_e до 200 К и θ до 0 за время 10 мкс. Таким образом, общая продолжительность спрайта, определяемая временем возмущения поля и температуры электронов, составляет 120 мкс.

Возрастание электрического поля (т.е. параметра θ) приводит к увеличению скорости ионизации. Например, скорость химической реакции ионизации молекулы кислорода в электрическом поле $O_2 + e \rightarrow O_2^+ + e + e$, $\nu = 10^{-8,8-281/\theta}$ при заданных максимальных значениях параметра $\theta = 250$ Тд на высоте 75 км, составляет около 10^{-10} см³·с⁻¹. В отсутствие электрического поля реакция не протекает. С другой стороны, повышение температуры электронов замедляет рекомбинацию ионов с электронами. Например, скорость рекомбинации молекулярного иона кислорода $O_2^+ + e + e \rightarrow O_2 + e$, $\nu = 10^{-19} \cdot (300/T_e)^{4,5}$, при температуре электронов $T_e = 1,5 \cdot 10^4$ К, идет в $2,75 \cdot 10^8$ раза медленнее, чем в обычных

условиях мезосферы. Поэтому во время второго интервала происходит интенсивное накопление возмущение положительных ионов и электронов, возбужденных атомов и молекул азота и кислорода.

Третий интервал времени соответствует релаксации системы после вспышки и длится 10^4 секунд. Считается, что температура электронов совпадает с температурой нейтральных газов и равна 200 К, а электрическое поле отсутствует. Концентрации всех химических компонент успевают прийти к квазистационарным значениям.

Следует отметить, что разбиение численного моделирования на три временных интервала, с одной стороны, соответствует физической картине явления, а с другой, позволяет проще организовать численные вычисления. В отличие от первого и третьего этапов, на втором учитывается изменение скоростей химических реакций от изменяющегося параметра θ и температуры электронов, а временной шаг на 6-8 порядков меньше.

1.3 Возмущение ионного состава мезосферы

Ионизация нейтралов в электрическом поле идет весьма интенсивно. На высоте 77 км, характерной для инициации спрайта при максимальном значении параметра $\theta = 250$ Тд, возмущение электронов достигает $2,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 1.1). Вначале разряда концентрация электронов резко возрастает, что связано с образованием лавины электронов в электрическом поле, продолжающейся практически до 120 мкс. Около 80% возмущения концентрации электронов образуются при ионизации молекулярного азота, а оставшиеся 20% электронов образуются при ионизации молекулярного кислорода. После окончания вспышки спрайта (т.е. после 120 мкс) концентрация электронов возрастает посредством реакций ионной конверсии $\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}$ из-за перехода иона O^- в молекулярный ион O_2^- , который в свою очередь, при взаимодействии с молекулой азота теряет электрон по реакции $\text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{e}$. После исчезновения O^- концентрация электронов уменьшается из-за различных реакций рекомбинации с положительными ионами. Время релаксации электронов значительно – через 100 секунд остается около 30% от максимального возмущения. Полностью электроны релаксируют примерно за 10^3 с. Следует заметить, что на фоне медленной рекомбинации электронов происходит достаточно быстрый процесс: прилипание электронов к кислороду с образованием O^- , ионная конверсия в O_2^- , отлипание электронов, но накопления отрицательных ионов не происходит из-за больших скоростей реакций.

Основной источник O_2^+ во время вспышки – это реакция ионизации молекулярного кислорода электронами в электрическом поле $\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{e} + \text{e}$, и реакция ионной конверсии N_2^+ с кислородом $\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}_2$. Причем при развитии разряда вклад в образование O_2^+ от ионизации кислорода постоянно падает, а вклад ионной конверсии N_2^+ растет, вследствие активного роста концентрации N_2^+ при ионизации

молекулярного азота. После вспышки продолжается ионная конверсия N_2^+ в O_2^+ до полного исчезновения первого из них. Концентрация O_2^+ к 1 мс после начала разряда достигает своего максимального значения и практически сравнивается с концентрацией электронов (см. Рис. 1.1). Далее следует плавная релаксация, и в течение 10 с концентрация O_2^+ приходит к начальному значению.

На Рис. 1.2 показана последовательность образования ионов-связок по мере нарастания молекулярной массы (концентрация $H_5O_2^+$ показана на Рис. 1.1 по причине существенно большей амплитуды возмущения). Сначала образуется самый легкий ион-связка H_3O^+ , достигая своего максимального возмущения к 3 с после вспышки спрайта. Основная реакция образования H_3O^+ – это прилипание к гидратированному положительному иону кислорода еще одной молекулы воды с последующим распадом $O_2^+(H_2O) + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH + O_2$. Основным стоком связан с образованием следующего иона-связки – $H_5O_2^+$, являющегося одним из основных ионов на высоте 77 км. Возмущение концентрации $H_5O_2^+$ составляет практически $1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ и сопоставимо с возмущением ионов, образующихся при лавинной ионизации молекулярного азота и кислорода. Максимальное значение концентрации $H_5O_2^+$ достигается через 10 с. Дальнейший рост концентрации ограничивается практически полным отсутствием O_2^+ – исходного иона для всех ионов-связок. Основные стоки ионов $H_5O_2^+$ – рекомбинация с электронами и образование более тяжелых ионов. Возмущение $H_7O_3^+$ к 40 с достигает $1,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Возмущение $H_9O_4^+$ достигает $0,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ к 200 с. На фоне возмущения ионов-связок возмущение NO^+ малозначительно и достигает максимума через 10 с после инициации вспышки (Рис. 1.2).

На высоте 85 км максимальное возмущение параметра θ достигает 300 Тд, что больше чем на 77 км. При этом возмущение концентрации электронов примерно в 2 раза меньше и максимальная концентрация электронов около $1,1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 1.3). Это связано с тем, что

суммарная концентрация нейтралов экспоненциально падает с высотой, соответственно и процесс ионизации идет менее интенсивно. Структура возмущения концентраций электронов, O^- , O_2^+ , N_2^+ такая же, как и на высоте 77 км (Рис. 1.1), но амплитуда возмущений уменьшается примерно в 2 раза и время полной релаксации возмущений концентраций увеличивается практически на порядок.

Основные положительные ионы на высоте 85 км – NO^+ и O_2^+ , а ионы-связки теряют свое значение. Ион NO^+ во время вспышки практически не успевает возмутиться. Основной рост его концентрации происходит из-за реакции ионной конверсии $O_2^+ + NO \rightarrow O_2 + NO^+$. Максимальное возмущение концентрация NO^+ достигает к 80 с и составляет $8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Дальнейший рост ограничивается отсутствием исходного иона O_2^+ . После нескольких сотен секунд после вспышки концентрации электронов и NO^+ практически сравниваются, и проходит медленная релаксация возмущений. Для NO^+ характерен переход в $NO^+ \cdot N_2$, однако время его жизни мало вследствие высокой скорости реакции распада иона-связки на исходные компоненты, и значительного возмущения концентрации не наблюдается.

Гидратированные ионы-связки не характерны для высоты 85 км. Из них только ионы-связки с малой молекулярной массой H_3O^+ и $H_5O_2^+$ имеют заметные возмущения при вспышке спрайта (Рис. 1.4). Максимальное возмущение их концентраций совпадает по времени с возмущением NO^+ . Так же как и на 77 км возмущение $H_5O_2^+$ больше чем у H_3O^+ и составляет 500 см^{-3} . Более тяжелые ионы-связки образуются в крайне низких количествах и на рисунках не отображены.

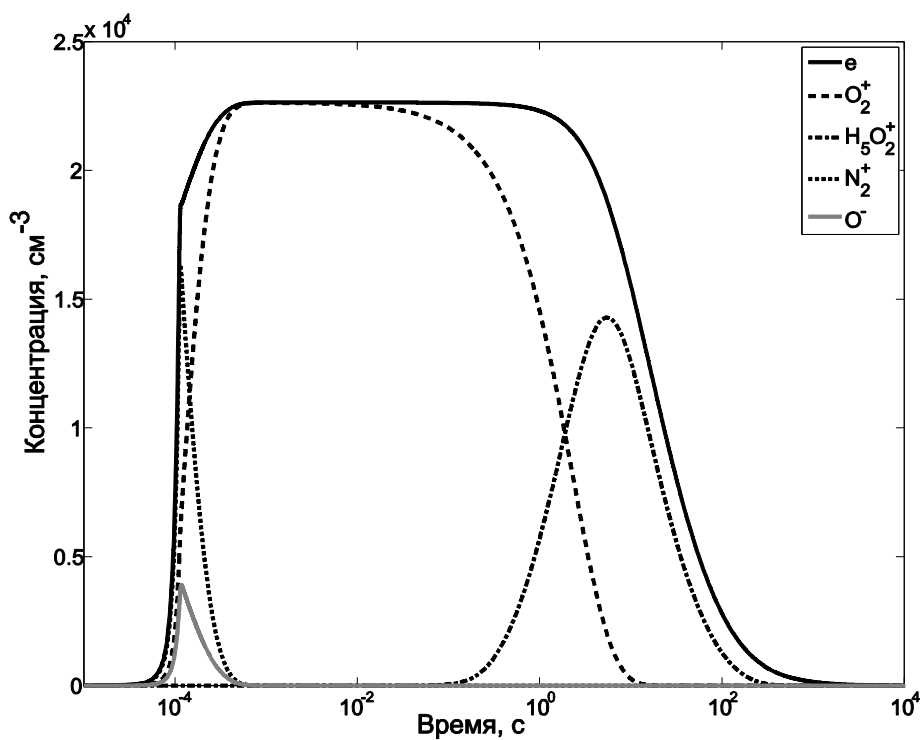


Рис. 1.1 Возмущение концентрации ионов и электронов на высоте 77 км

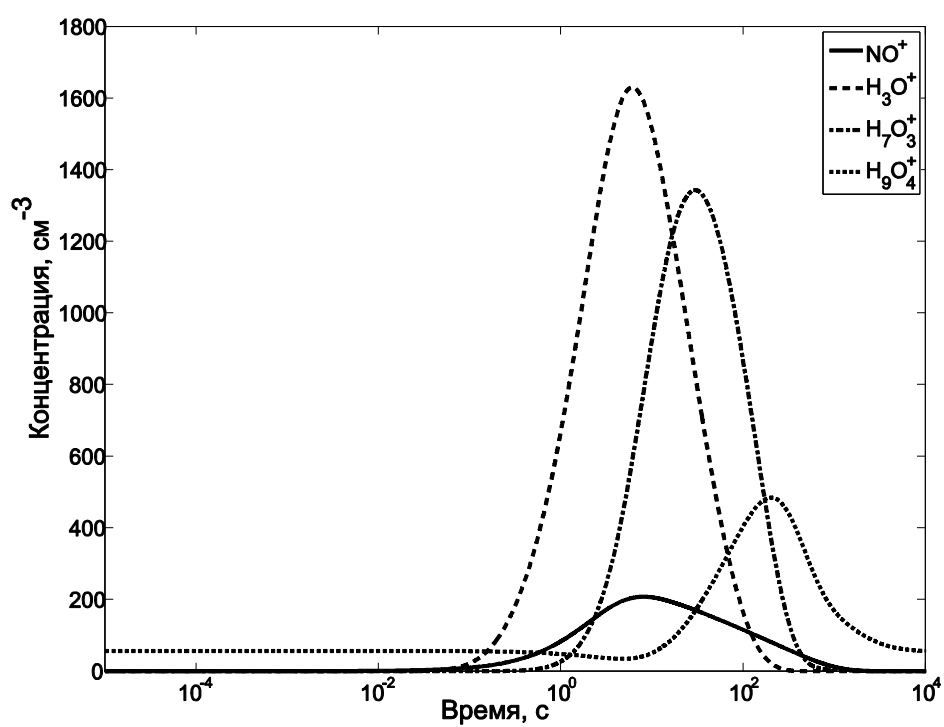


Рис. 1.2 Возмущение концентрации ионов-связок и NO^+ на высоте 77 км

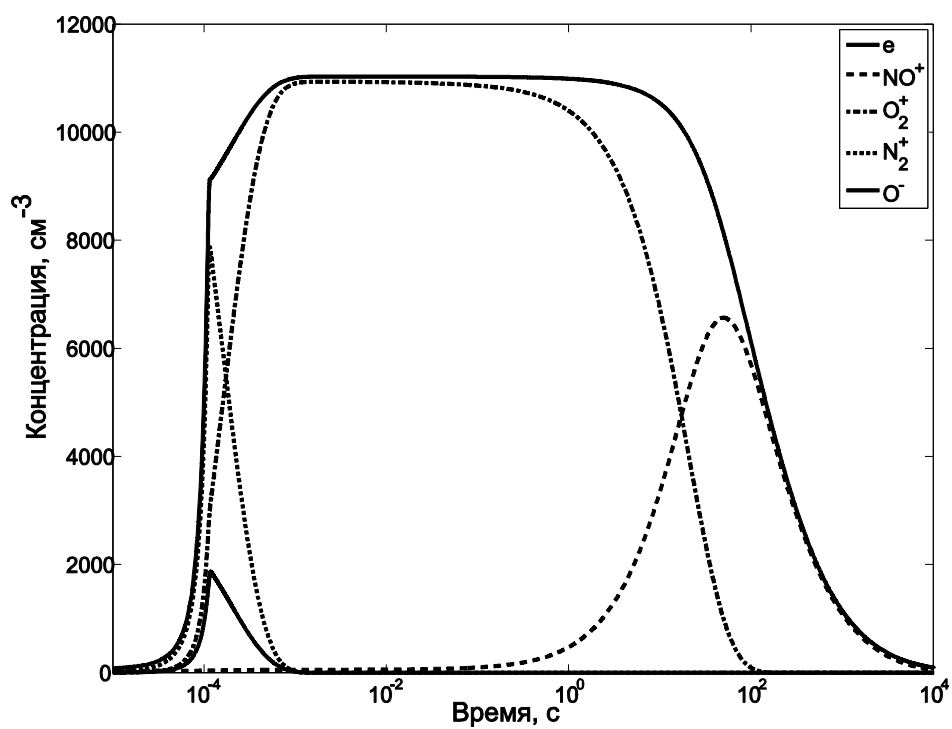


Рис. 1.3 Возмущение концентрации ионов и электронов на высоте 85 км

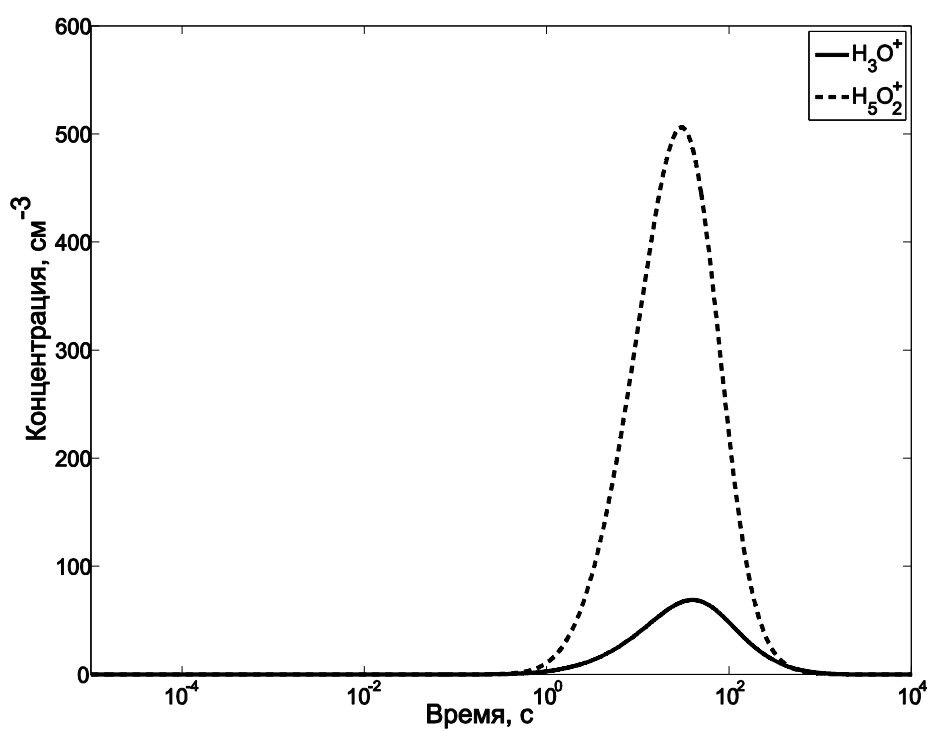


Рис. 1.4 Возмущение концентрации ионов-связок на высоте 85 км

1.4 Излучение фотонов и возбужденные состояния азота и кислорода

При возмущении электрического поля в мезосфере кроме ионизации нейтралов активно идет возбуждение электронно-колебательных уровней частиц в азотно-кислородной смеси. Основное возбужденное состояние кислорода на высотах мезосферы – $O_2(a)$. В дневных условиях концентрация $O_2(a)$ достигает значительных величин – 10^9 - 10^{10} $см^{-3}$, в зависимости от времени суток и солнечной активности. Однако, после захода Солнца источники для него практически полностью исчезают, и концентрация $O_2(a)$ падает более чем на 3 порядка. В начале первого этапа расчетов на высоте 77 км концентрация $O_2(a)$ составляет 10^7 $см^{-3}$, но при выходе на квазистационарное значение за 10^4 секунд падает до $2,2 \cdot 10^5$ $см^{-3}$. Начальные концентрации остальных химических компонент с возбужденными электронно-колебательными уровнями нулевые, так как источники в условиях ночной мезосферы отсутствуют, и за время первого этапа расчетов они успевают полностью релаксировать. Максимальное возмущение концентрации $O_2(a)$ равное $2 \cdot 10^5$ $см^{-3}$ достигается к 10 с (см. Рис. 1.5). После разряда спрайта практически весь $O_2(b)$, имеющий возмущение более чем 10^5 $см^{-3}$, за 10 с переходит в $O_2(a)$ по реакции $O_2(b) + N_2 \rightarrow O_2(a) + N_2$. Заметим, что величина возмущения $O_2(a)$ зависит только от продолжительности спрайта, начального количества электронов и концентрации молекулярного кислорода, и никак не зависит от начальной концентрации. Поэтому отношение возмущения $O_2(a)$ к начальной концентрации меняется в зависимости от времени зажигания спрайта: если в начале ночи оно составляет лишь несколько процентов, то к концу ночи возмущение может быть сопоставимо с начальной концентрацией.

Во время спрайта происходит активное образование возбужденных состояний азота $N_2(A)$, $N_2(B)$, $N_2(C)$ при взаимодействии молекулярного

азота с электронами в электрическом поле (см. Рис. 1.5 и Рис. 1.6). Скорость перехода $N_2(C)$ в $N_2(B)$ с излучением во второй положительной полосе молекулярного азота $h\nu(2PN_2)$ велика (см.Рис. 1.7), и накопления возмущения концентрации не происходит. $N_2(B)$ активно накапливается и к концу вспышки спрайта его концентрация превышает $1,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Основным стоком для $N_2(B)$ является переход в $N_2(A)$ с излучением в первой положительной полосе молекулярного азота $h\nu(1PN_2)$ (см. Рис. 1.7). Концентрация $N_2(A)$ достигает своего максимального значения $5,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ к концу спрайта и является химической компонентой с наибольшим возмущением концентрации среди всех учитываемых возбужденных компонент. Время полной релаксации возмущения $N_2(A)$ около 10 мс. Релаксация $N_2(A)$ в основном связана с образованием $O_2(a)$, $O_2(b)$ при реакции с молекулярным кислородом и тушением при столкновении с нейтральными молекулами.

Возмущение $N(^2D)$ во время вспышки спрайта происходит по реакции диссоциации азота $e + N_2 \rightarrow e + N + N(^2D)$, а после вспышки $N(^2D)$ образуется по реакции $O + N_2(A) \rightarrow NO + N(^2D)$ (Рис. 1.6). Максимального возмущения концентрации $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ достигает к концу спрайта. Время релаксации возмущения $N(^2D)$ 10^{-2} с и совпадает с временем релаксации $N_2(A)$, являющимся его основным источником после спрайта. $O(^1D)$ образуется из молекулярного кислорода в соответствии с реакцией диссоциации $e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1D)$, а после спрайта образуется из $N(^2D)$ по реакции $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$. $O(^1S)$ образуется из молекулярного кислорода по реакции $e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1S)$, после спрайта образуется из $N_2(A)$ по реакции $N_2(A) + O \rightarrow N_2 + O(^1S)$.

Основное излучение спрайта приходится на первую и вторую полосы молекулярного азота. Объемная скорость излучения фотонов в $h\nu(1PN_2)$ лишь немногим более чем в $h\nu(2PN_2)$ и к концу спрайта превышает $10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и минимум на 6 порядков идет более интенсивно, чем в других

диапазонах. Излучение фотонов в первой и второй полосе полностью прекращается к 1 мс после начала спрайта (см. Рис. 1.7).

Основные стоки для $O_2(a)$ – это реакция с излучением в инфракрасном диапазоне $h\nu(O_2IRAtm)$ и тушение на молекулах кислорода. Эти процессы протекают примерно с одинаковой интенсивностью в течение всего времени релаксации. Время излучения фотонов $h\nu(O_2Atm)$ совпадает с временем релаксации $O_2(b)$, являющимся его источником. $O(^1S)$ переходит в $O(^1D)$ с излучением фотонов $h\nu(557nm)$. К концу первой секунды излучение на этой длине волны прекращается.

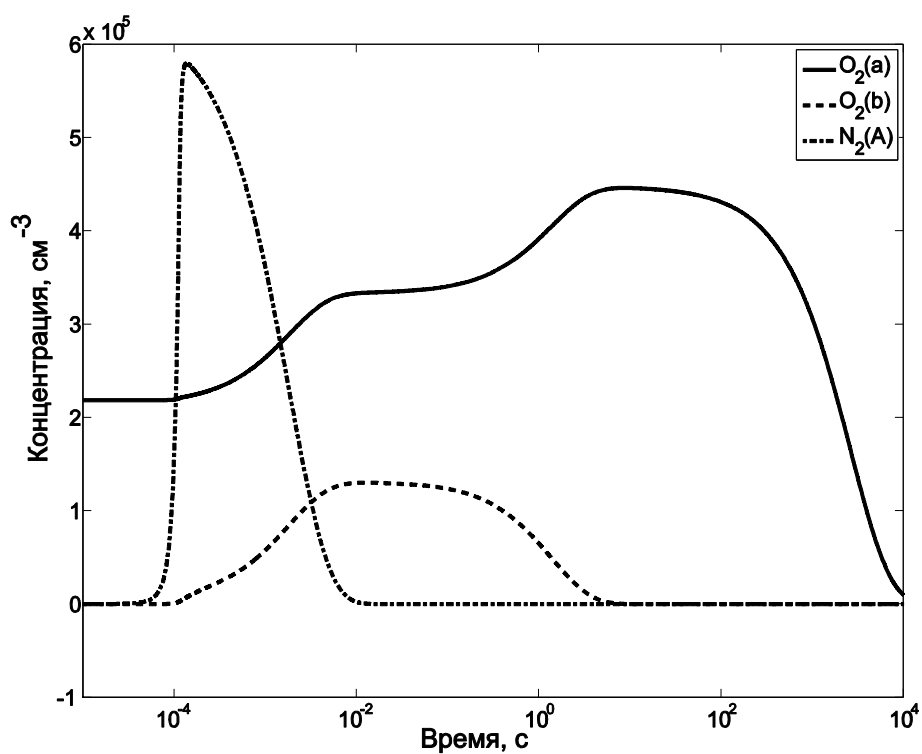


Рис. 1.5 Долгоживущие возмущения концентраций молекул в возбужденном состоянии на высоте 77 км

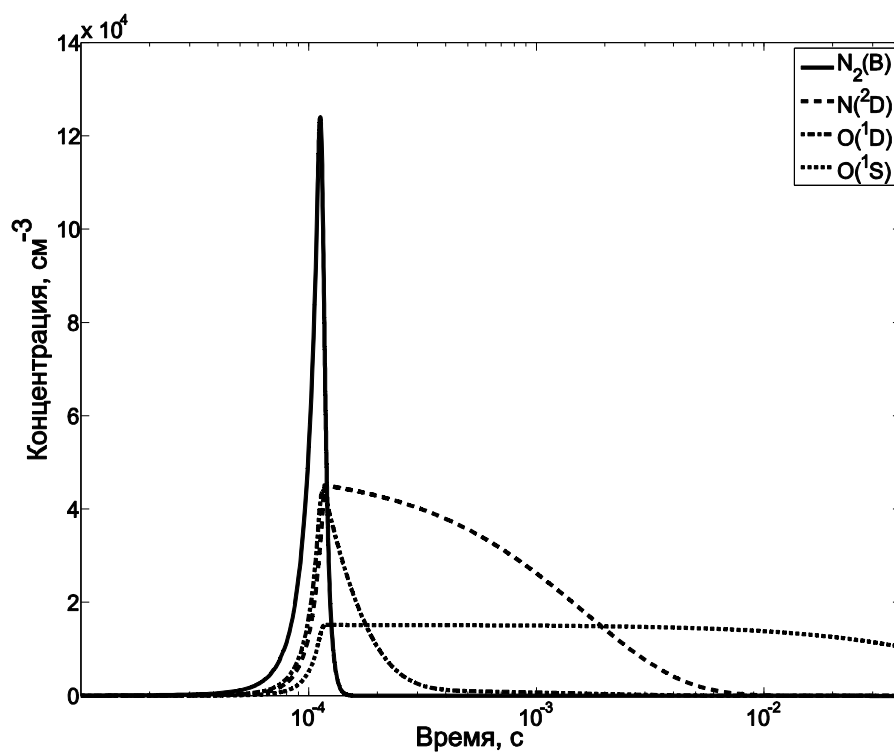


Рис. 1.6 Короткоживущие возмущения концентраций атомов и молекул в возбужденном состоянии на высоте 77 км

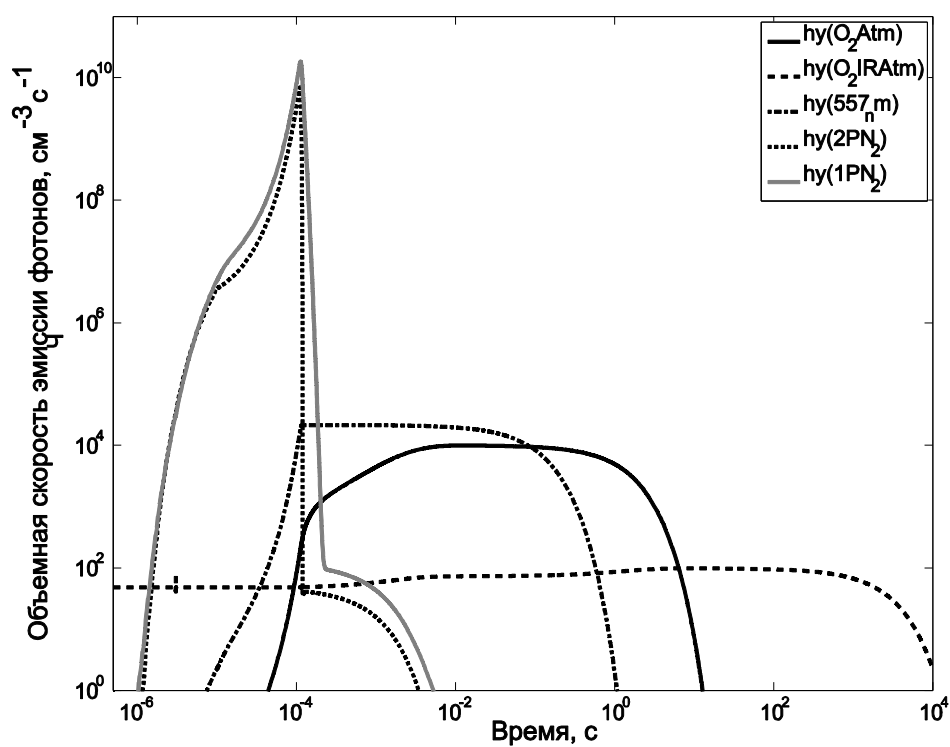


Рис. 1.7 Объемная скорость эмиссии фотонов на высоте 77 км

Временная динамика возмущения химических компонент, находящихся в возбужденном состоянии, практически не отличается на высоте 85 км и 77 км, но амплитуды возмущений отличаются значительно. Релаксация $O_2(a)$ на первом этапе проходит медленнее, поэтому вспышка спрайта начинается при большем значении концентрации – $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, что практически в 1,5 раза больше аналогичной концентрации на 77 км (см. Рис. 1.8). Величина возмущения концентрации $O_2(a)$ $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, что связано с существенно меньшей концентрацией молекулярного кислорода. Для всех остальных компонент, находящихся в возбужденном состоянии амплитуда возмущения концентрации падает в 3 раза по сравнению с возмущением на 77 км. Исключением является $O(^1D)$, возмущение которого $2,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ меньше примерно в два раза (см. Рис. 1.9). Объемная скорость эмиссии фотонов падает аналогично возмущениям концентраций.

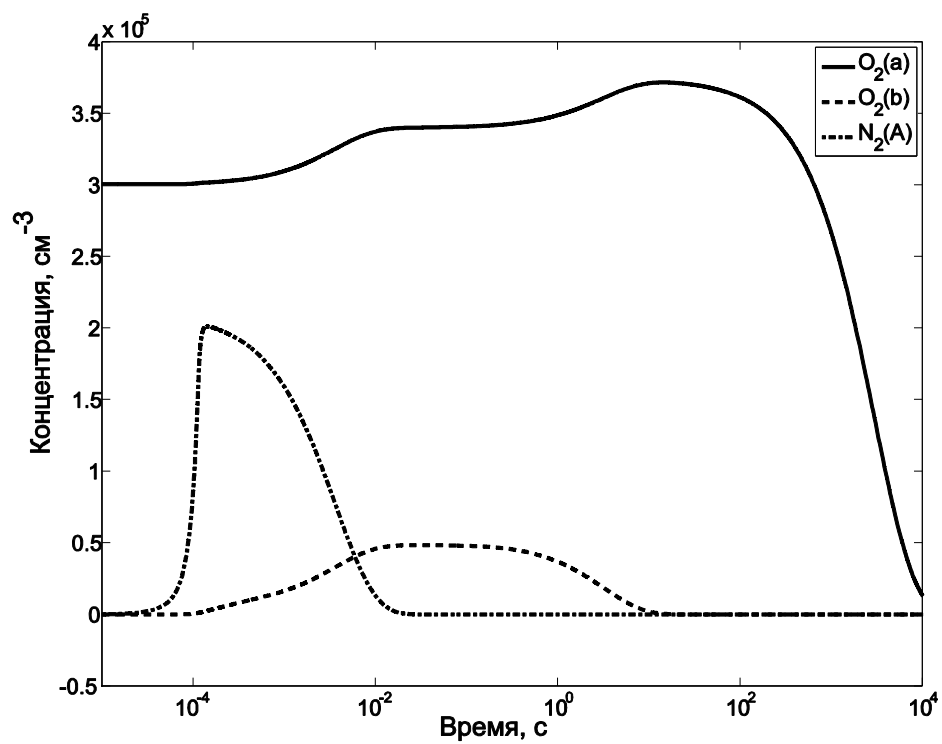


Рис. 1.8 Долгоживущие возмущения концентраций молекул в возбужденном состоянии на высоте 85 км

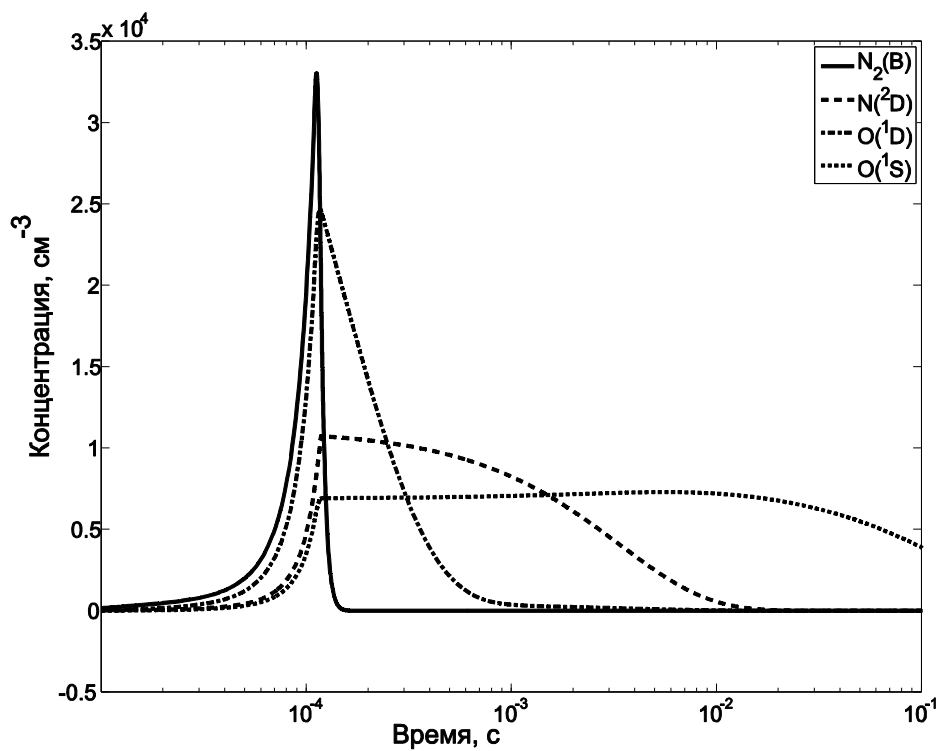


Рис. 1.9 Короткоживущие возмущения концентраций атомов и молекул в возбужденном состоянии на высоте 85 км

1.5 Нейтральные компоненты мезосферы

По сравнению с количеством сильно возмущающихся ионов, атомов и молекул в возбужденном состоянии, количество возмущающихся нейтральных невозбужденных компонент мезосферы не велико. Во время разряда при взаимодействии электронов с молекулярным кислородом происходит не только ионизация и образование молекулярного и атомарного кислорода в возбужденных состояниях, но и образование атомарного кислорода (см. Рис. 1.10). Основное возмущение концентрации O происходит после разряда и связано с тушением молекул и атомов в возбужденном состоянии при взаимодействии с нейтрами. На фоне начальной концентрации $2,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ возмущение от спрайта не превышает 10%, хотя по абсолютной величине сопоставимо с суммарным возмущением концентрации возбужденных компонент.

Другой важной возмущающейся компонентой является NO . Нарботка NO практически не происходит во время разряда и начинается сразу после него. Основным источником для NO является реакция $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$. Рост концентрации NO заканчивается к 10 мс вместе с релаксацией $N(^2D)$. Возмущение концентрации составляет $4,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ и составляет около 50% от квазистационарного доспайтового значения (см. Рис. 1.11).

При взаимодействии электронной лавины с молекулярным азотом во время разряда образуется достаточно большое возмущение атомарного азота, достигающее $2,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 1.12). Возрастание концентрации после окончания разряда, в отличие от NO и O , не происходит и начинается медленная релаксация.

Возмущение других нейтральных компонент весьма незначительно и подробно не рассматривается.

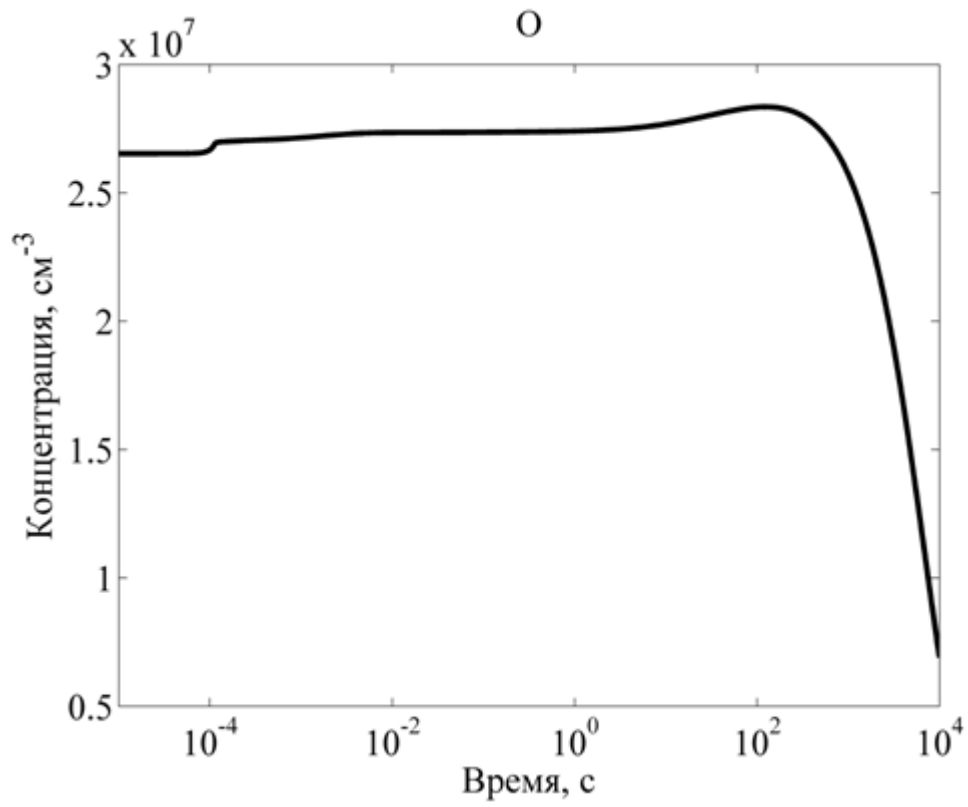


Рис. 1.10 Возмущение концентрации O

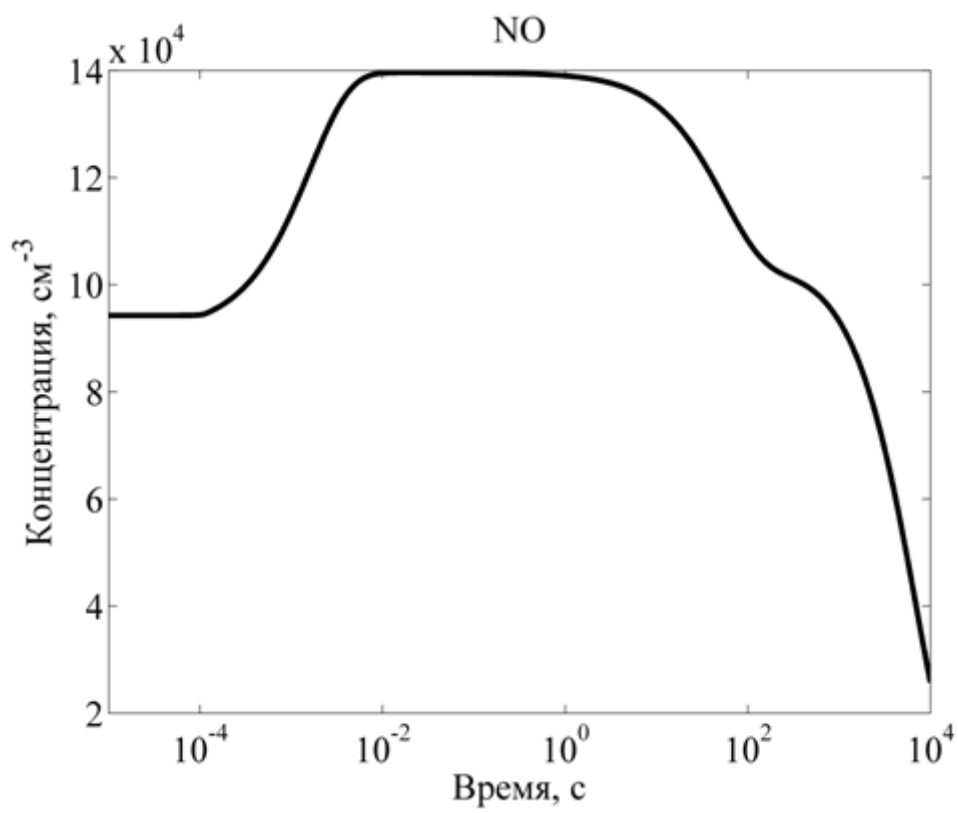


Рис. 1.11 Возмущение концентрации NO

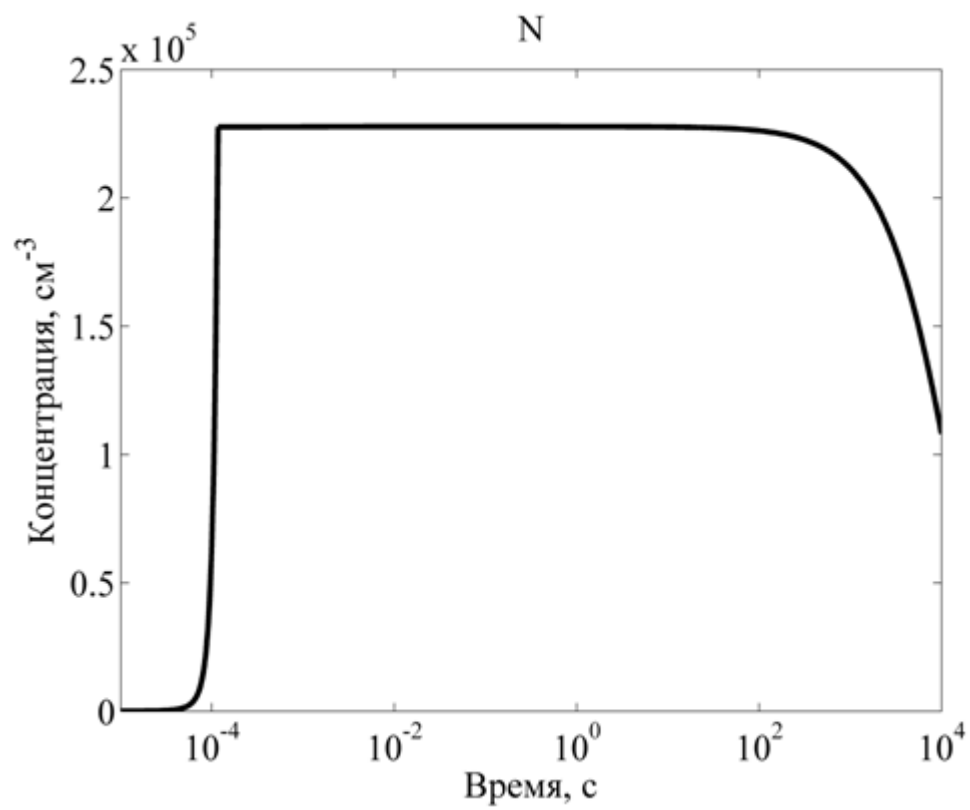


Рис. 1.12 Возмущение концентрации N

1.6 Зависимости возмущения концентрации электронов от параметров разряда

Во время вспышки скорость образования электронов, определяемая в первую очередь параметром θ , возрастает, а скорость рекомбинации, определяемая температурой электронов, падает. Поэтому увеличение продолжительности вспышки и напряженности электрического поля приводит к существенному изменению возмущения химических компонент, что и показано на примере электронов для ночных условий на высоте 77 км.

На Рис. 1.13 приведена динамика возмущения концентраций электронов при различной длительности плато поля и температуры. При расчетах максимальное $\theta = 200$ Тд, что в 1,56 раза больше критического поля. Время роста и падения θ и T_e одинаково и равно 10 мкс. Температура электронов возмущается синхронно, достигая максимального значения во время плато $1,5 \cdot 10^4$ К. При изменении времени разряда, ярко проявляется нелинейность системы: увеличение времени с 100 до 400 мкс приводит к изменению амплитуды возмущения электронов на 4 порядка. В зависимости от величины возмущения сильно меняется характерное время релаксации: чем больше возмущение, тем быстрее идет релаксация.

На Рис. 1.14 представлена зависимость возмущения концентрации электронов от амплитуды электрического поля. За 10 мкс происходит рост поля и далее падение за 10 мкс к доспайтовым значениям. Плато напряженности электрического поля отсутствует. Данная зависимость поля от времени характерна для стримерной части спрайтов. Система показывает большую нелинейность: при возрастании θ от 250 до 700 Тд концентрация электронов увеличивается на 2 порядка.

При длительности плато поля 400 мкс возмущение концентрации электронов превышает 10^6 см⁻³. Структура возмущения концентрации ионов остается прежней, а концентрации O_2^+ и N_2^+ сопоставимы с

концентрацией электронов. Наряду с этим появляются значительные возмущения концентрации практически всех положительных и отрицательных ионов, не рассмотренных в параграфе 1.3, однако время их релаксации очень мало. Стоит заметить, что рассмотрение столь больших и длинных возмущений электрического поля в рамках не самосогласованной постановки задачи не совсем корректно. При таких возмущениях сильно меняется проводимость мезосферы, и электрическое поле вытесняется из области разряда, что будет рассмотрено в Главе 2.

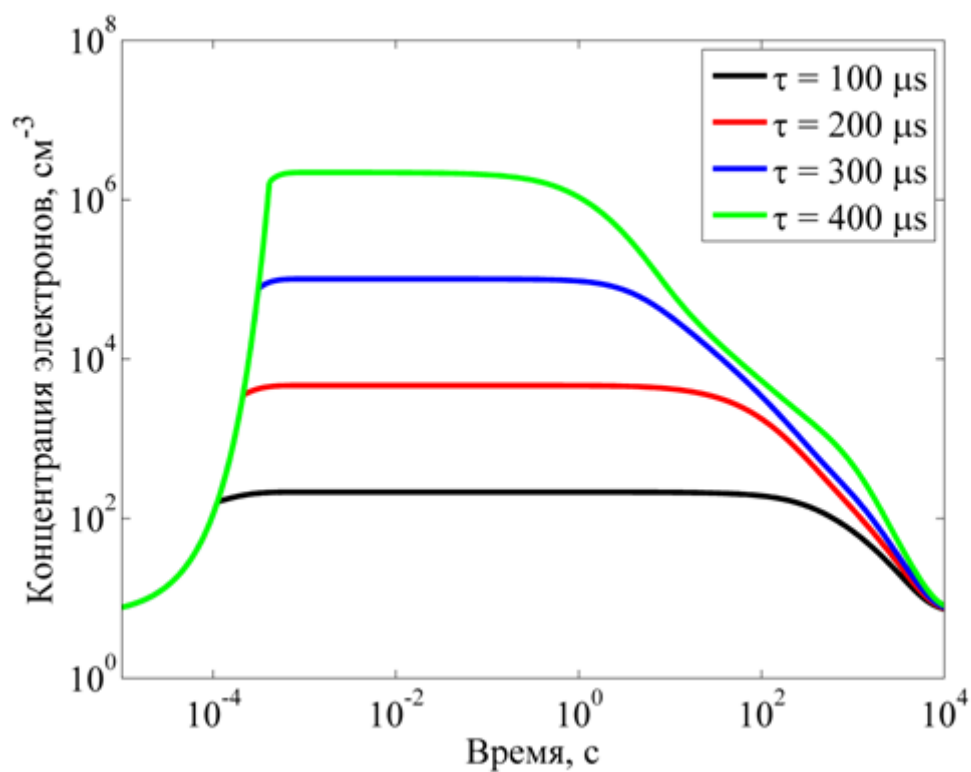


Рис. 1.13 Зависимость возмущения концентрации электронов от длительности плато электрического поля

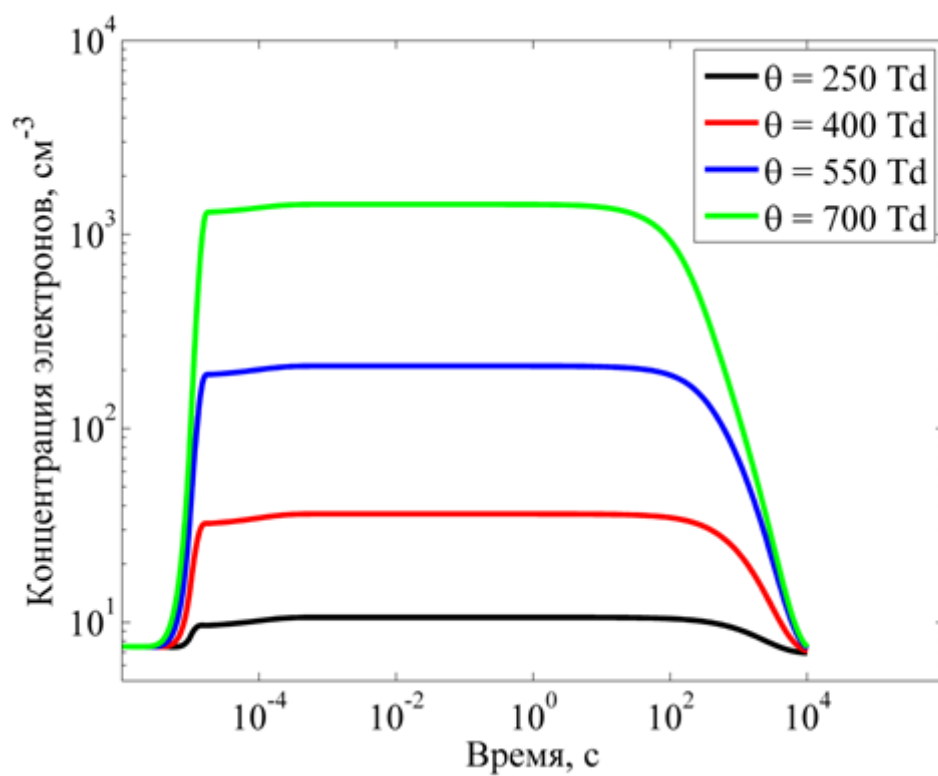


Рис. 1.14 Зависимость возмущения концентрации электронов от амплитуды параметра θ

1.7 Исследование характерных коэффициентов разряда

Важным параметром для мезосферы является параметр $\lambda = [X^-]/[N_e]$, где X^- суммарная концентрация отрицательных ионов, а N_e концентрация электронов. Отрицательные ионы не характерны для высоты 85 км и практически весь отрицательный заряд в невозмущенных условиях находится на свободных электронах, и значение параметра λ стремится к нулю. Во время разряда происходит увеличение параметра λ до 0.2 (см. Рис. 1.15) в основном из-за увеличения концентрации O^- . После спрайта отрицательные ионы быстро рекомбинируют или теряют электрон при реакциях отлипания, и параметр λ возвращается к доспайтовым значениям за 1мс. На высоте 77 км в невозмущенных условиях ночной мезосферы $\lambda=6,7$ (см. Рис. 1.16). В начале вспышки параметр λ незначительно возрастает из-за увеличения концентрации O^- . Далее следует резкое падение до значения $\lambda=0,2$, связанное с развитием лавинного пробоя для электронов и резкого роста их концентрации, а затем - падение практически до 0, связанное с быстрой релаксацией O^- . Возвращение параметра λ к доспайтовым величинам идет крайне медленно вследствие длительного времени релаксации положительных ионов-связок и электронов (см. Рис. 1.1 и Рис. 1.2).

Для понимания процесса развития разряда интересно исследовать динамику прилипания и ионизации для электронов, т.е. их источников и стоков. Дифференциальное уравнение для концентрации электронов можно представить в виде

$$\frac{dN_e}{dt} = (\nu_i - \nu_a) \cdot N_e, \quad (1.2)$$

где ν_i, ν_a – частота ионизации и прилипания соответственно. После первого этапа расчетов концентрация электронов квазистационарная и $\nu_i = \nu_a$. Вначале развития разряда прилипание доминирует над ионизацией

(см. Рис. 1.17 и Рис. 1.18), что приводит к росту концентрации O^- . Ко времени 5,5 мкс для 77 км и 5 мкс для 85 км частоты прилипания и ионизации сравниваются, а далее начинается лавинный разряд. Различие по времени достижения равенства частот связано с более высоким значением параметра $\theta = 300$ Тд во время плато, а, следовательно, и темпа роста, принятом при моделировании разряда на 85 км. По мере развития разряда продолжается рост обеих частот, но разница между частотой ионизации и частотой рекомбинации все больше увеличивается и достигает величины $7,5 \text{ с}^{-1}$ для 77 км и $4,5 \text{ с}^{-1}$ для 85 км, оставаясь практически постоянной во время плато поля, длящегося 100 мкс (см. Рис. 1.17 и Рис. 1.18). При релаксации электрического поля и температуры электронов разница между частотами уменьшается, но частота ионизации превышает частоту прилипания и после разряда, что связано с отлипанием электронов от отрицательных ионов, в основном от O^- .

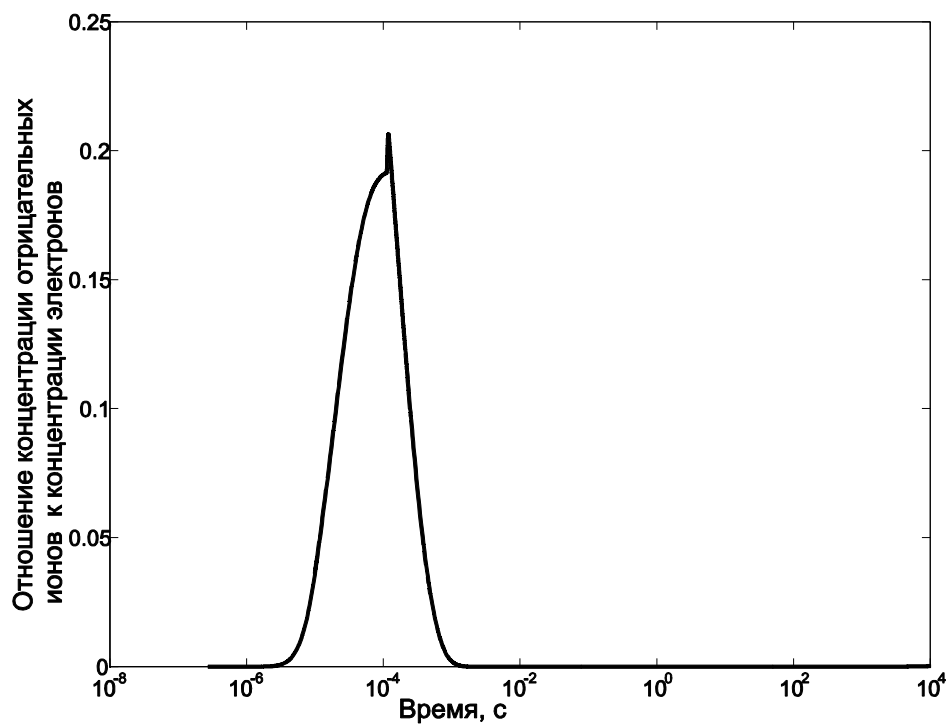


Рис. 1.15 Динамика параметра λ для высоты 85 км

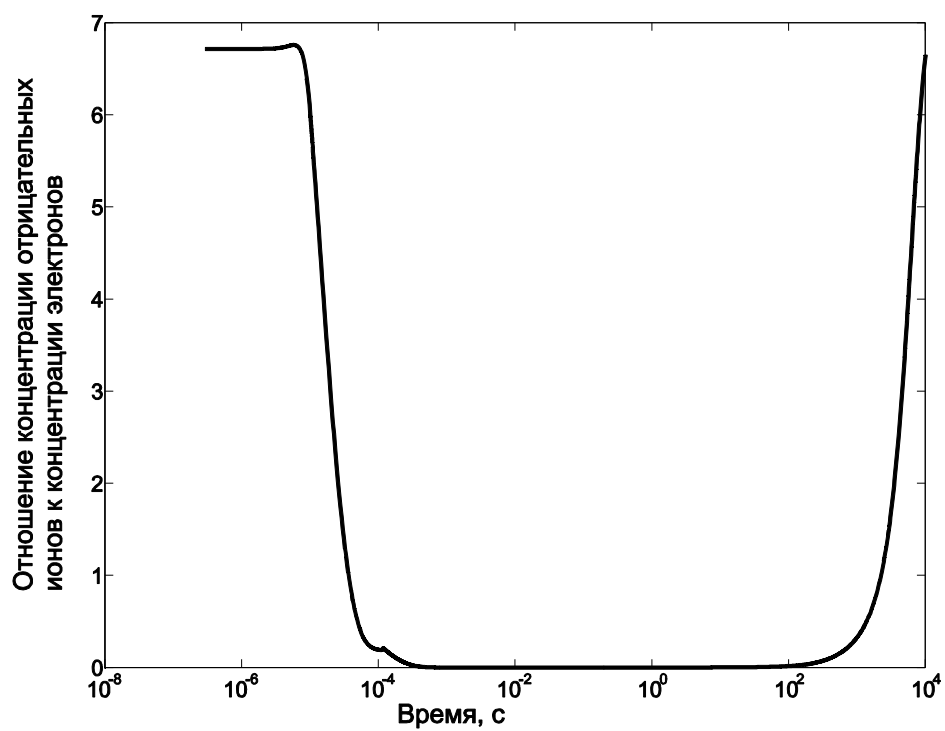


Рис. 1.16 Динамика параметра λ для высоты 77 км

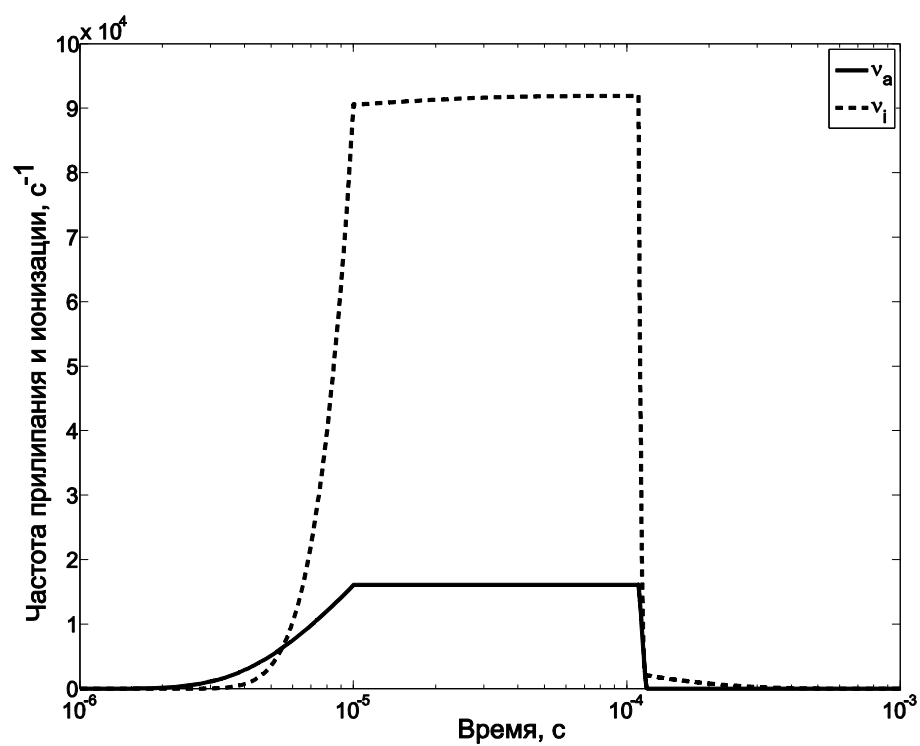


Рис. 1.17 Зависимость частоты ионизации и прилипания для высоты 77 км

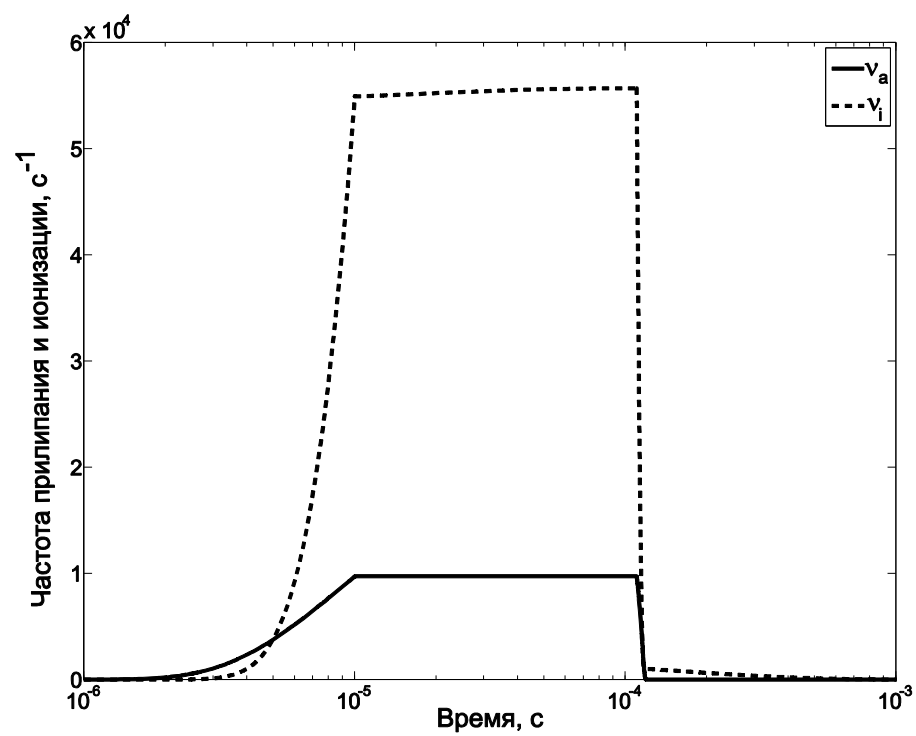


Рис. 1.18 Зависимость частоты ионизации и прилипания для высоты 85 км

1.8 Исследование последовательности спрайтов

Статистика спутниковых наблюдений показывает, что вспышки спрайтов не так редки, как считалось ранее: зафиксированы случаи, когда частота спрайтов достигает нескольких событий в минуту [11,12]. Поэтому был рассмотрен вопрос о последовательности из двух спрайтов, разделенных временным интервалом в 100 с. Каждый из спрайтов моделируется возмущением поля и температуры электронов в течение 70 мкс (10 мкс рост θ до 200 Тд и T_e до $1,5 \cdot 10^4$ К, стадия плато 50 мкс, далее падение параметров за 10 мкс). Моделирование проводилось для ночных условий на высоте 85 км.

Концентрация электронов не успевает полностью релаксировать к началу второго спрайта (см. Рис. 1.19), и, следовательно, ионизация молекулярного азота и кислорода проходит существенно более интенсивно, чем во время первого разряда: возмущение концентрации электронов достигает $3,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, что практически в 4 раза превышает возмущение от первого спрайта. Однако относительное увеличение концентрации и для первого, и для второго спрайта примерно одинаково.

Концентрация O_2^+ успевает полностью релаксировать к началу второго спрайта, но возмущение после второго спрайта значительно выше. Начальная концентрация O_2^+ не оказывает влияния на возмущение концентрации, определяемое только начальной концентрацией электронов и концентрацией нейтральных компонент.

Ионы NO^+ и $H_5O_2^+$ практически не возмущаются во время разряда: они образуются и накапливаются по цепочке реакций, начальным ионом для которой является O_2^+ . $H_5O_2^+$ образуется после спрайта длительное время и возмущение достигает максимального значения через 50 с. До второго спрайта концентрация $H_5O_2^+$ практически не убывает. После второго разряда концентрация $H_5O_2^+$ возрастает до 500 см^{-3} , что в 4 раза больше чем во время первого. Следует отметить, что релаксация после

второго спрайта идет значительно активнее и через 100 с концентрация уменьшается на 200 см^{-3} . Динамика NO^+ практически повторяет поведение H_5O_2^+ , а максимальное возмущение после второго спрайта достигает 10^4 см^{-3} .

Таким образом, можно говорить о возможности накопления возмущений некоторых химических компонент с большим временем релаксации при последовательности из нескольких спрайтов. Главная причина более высоких возмущений концентраций ионов после второго спрайта – существенно более высокая концентрация электронов, приводящая к увеличению интенсивности ионизации нейтральных компонент во время разряда.

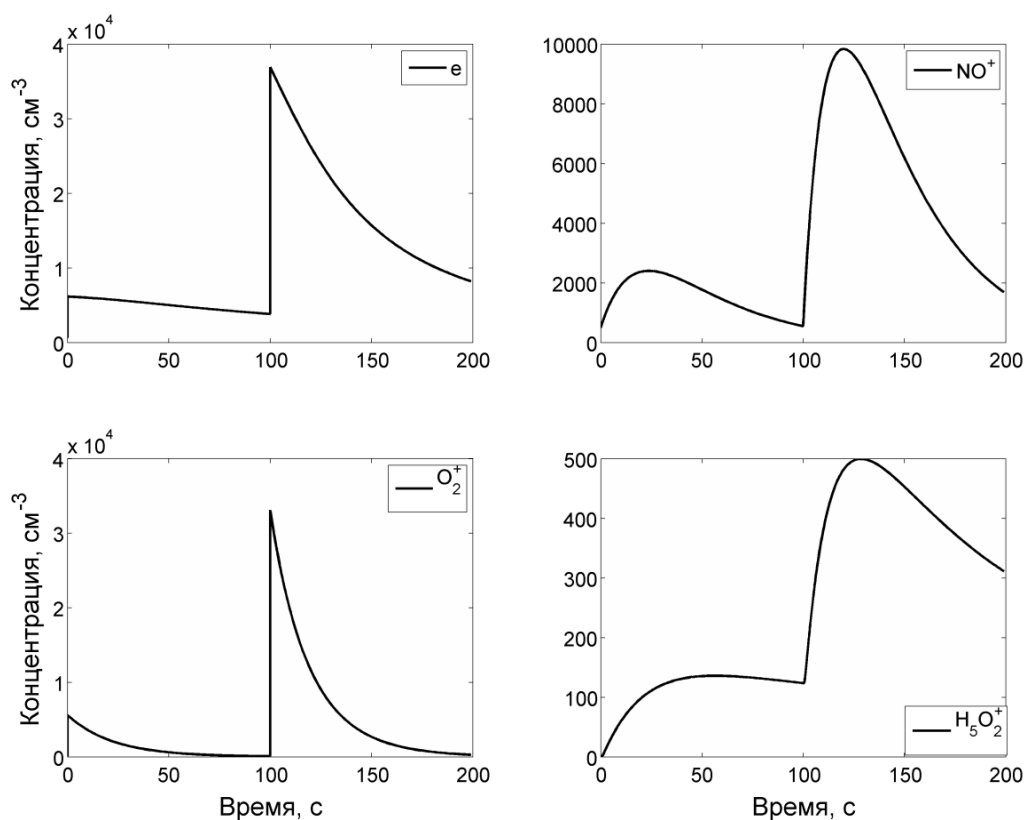


Рис. 1.19 Возмущение концентрации ионов и электронов при последовательности спрайтов

1.9 Исследование вкладов реакций и критерий важности реакций

При исследовании возмущения химической системы неизбежно встает вопрос о выделении наиболее важных источников и стоков для конкретной химической компоненты. В разработанном программно-вычислительном комплексе в автоматическом режиме выводятся зависимости относительных вкладов химических реакций. На Рис. 1.20 приведен анализ стоков и источников для электронов. При проведении расчетов строится матрица вкладов реакций в изменение химических компонент на каждом временном отсчете. Электроны входят в более чем сто химических реакций системы, поэтому необходимо выбрать только самые важные: хотя бы во время одного отсчета относительный вклад конкретной реакции превышает 5% от суммарных стоков или источников. При данном подходе для электронов остаются лишь 6 главных реакций. До 3 мкс вклад от ионизации молекулярного азота и кислорода растет практически синхронно. К 10 мкс, когда электрическое поле выходит на плато, вклад от ионизации азота существенно повышается и превышает 80%, а вклад от ионизации кислорода падает и становится менее 20%. Основной сток электронов во время разряда идет через прилипание к молекулярному кислороду и образованию O^- . После спрайта основным источником электронов становится отлипание от O_2^- , а главный сток реакция с озоном с образованием O_2^- .

После проведения исследования основных источников и стоков встает вопрос о возможности сокращения системы химических реакций: для электронов важными оказались лишь 6 из 100. Это действительно можно сделать, но с определенными ограничениями. Главное на что надо обратить внимание – это наличие замкнутых циклов реакций. После вспышки происходит постоянное образование O_2^- с последующим отлипанием электрона. Накопления O_2^- не происходит вследствие малого времени жизни, а на фоне его образования могут потеряться реакции

рекомбинации электронов с положительными ионами, которые и являются главным стоком для электронов. В свою очередь, для положительных ионов рекомбинация с электронами является одним из основных стоков. Поэтому перед сокращением системы химических реакций необходимо провести анализ для всех компонент, и если реакция является важной хотя бы для одной компоненты, ее необходимо оставить. Такое исследование было проведено и показало, что при избрании порога важности реакции в 5 %, возможно из 261 реакции оставить для рассмотрения только 145. При этом относительное изменение амплитуд возмущений у всех химических компонент не будет превышать нескольких процентов. Применение данного сокращения списка реакций дает небольшое ускорение расчетов и может стать необходимостью при расчете трехмерной модели спрайта. Следует заметить, что на скорость расчетов существенно больше влияет количество дифференциальных уравнений, а не количество слагаемых в правой части уравнений. Поэтому для существенного ускорения работы следует положить концентрации слабо возмущающихся химических компонент постоянными и дифференциальные уравнения для них исключить. Но на данном этапе скорость расчетов высокая и такой необходимости нет. В то же время список необходимых реакций корректируется при изменении параметров разряда из-за изменения относительного вклада реакций, поэтому упрощение системы следует применять с большой осторожностью. С другой стороны, возможность исключения из рассмотрения практически половины реакций из списка и потерей точности моделирования при этом в несколько процентов можно рассматривать как свидетельство «полноты» системы и отсутствия необходимости ее дальнейшего увеличения для данного списка химических компонент.

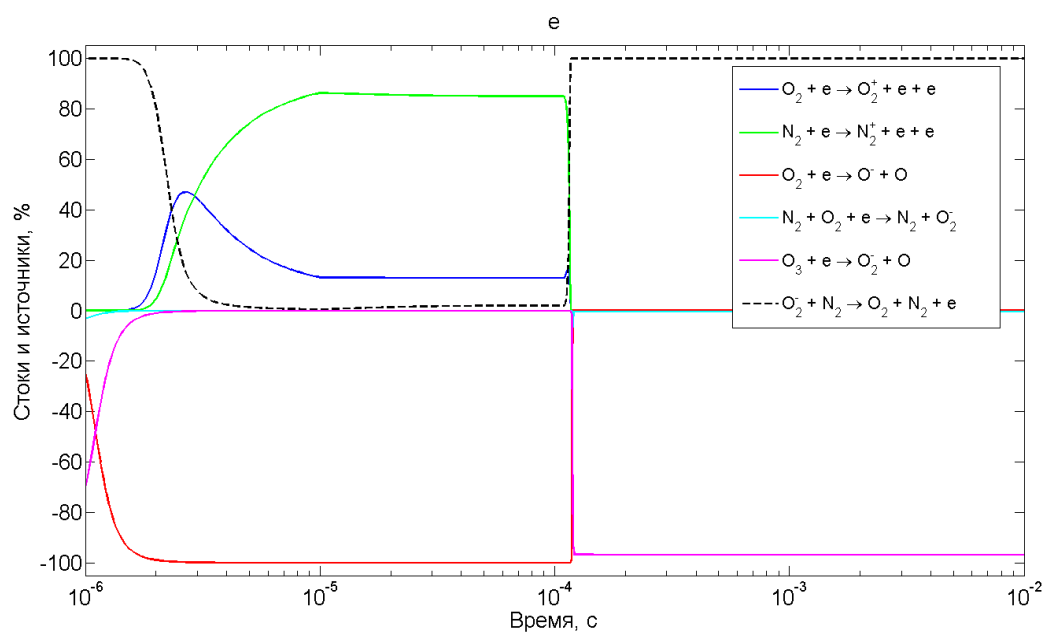


Рис. 1.20 Относительные вклады важнейших реакций для электронов

1.10 Особенности нульмерного моделирования и основные результаты

Одноточечное моделирование влияния возмущения электрического поля и температуры электронов на химический состав мезосферы является первым и необходимым этапом для построения более подробной (одномерной или многомерной) модели влияния спрайтов и других видов высотных разрядов на мезосферу. Применение данного подхода позволило получить следующие основные результаты:

1. Построена система химических реакций и определен состав химических компонент, необходимых для описания химического состава мезосферы.

2. Создан программно-вычислительный комплекс для автоматического построения системы обыкновенных дифференциальных уравнений для системы химических реакций и моделирования влияния возмущающихся электрического поля и температуры электронов на химический состав.

3. При генерации системы уравнений по списку химических реакций автоматически проверяется сохранения заряда и массы (таким образом, выявляются некорректно записанные химические реакции) и проводится анализ для выявления повторяющихся химических реакций в списке.

3. Разработана параметризация возмущения электрического поля и температуры электронов для характерных условий возникновения спрайтов.

4. Проведено исследование возмущения положительных и отрицательных ионов, электронов, нейтральных компонент, возбужденных атомов и молекул и связанных с ними излучений для высот 77 и 85 км.

5. Проведено исследование возмущения состава мезосферы в зависимости от параметров разряда. Изучена динамика характерных

коэффициентов разряда. Промоделирована последовательность двух спрайтов, разделенных временным интервалом.

6. Разработан инструмент для изучения «важности» химических реакций для конкретной химической компоненты. Предложен способ ускорения расчетов при незначительном уменьшении точности.

Наряду с этими значительными результатами существует ряд ограничений и необходимых дополнений, не учтенных в нульмерном моделировании.

1. Во время вспышки спрайта происходит существенное изменение концентрации ионов и электронов в области разряда (до нескольких порядков по сравнению с невозмущенными условиями ночной мезосферы). Это приводит к существенному увеличению проводимости во время разряда, которая в свою очередь должна уменьшать электрическое поле. То есть необходимо решать самосогласованную задачу. Особенно это касается моделирования со значительным временем плато электрического поля.

2. Необходимо учесть увеличение частоты столкновений электронов по мере возрастания их температуры, приводящее к уменьшению проводимости, что может быть особенно важно при инициации разряда [32].

3. Возмущение электрического поля и температуры связаны и существенно корректней задавать возмущение электрического поля от времени, а температуру электронов рассчитывать, используя, например, свободнораспространяемую программу Bolsig+ [33].

4. Необходимо связать возмущения электрического поля в мезосфере с процессами, протекающими во время молниевых разрядов в тропосфере. И даже при применении, например, дипольного приближения для нескомпенсированного заряда, возникающего после разряда облако-земля, возможно получить лишь «среднее» поле, позволяющее моделировать диффузную и переходную области спрайта. При этом стримерная часть

разряда остается за рамками исследования и требуется разработка параметризации структуры электрического поля стримеров на высотах от 50-70 км, что само по себе является отдельной и весьма трудоемкой задачей.

Практически все из перечисленных недостатков нульмерного моделирования будут сняты при построении одномерной самосогласованной модели спрайта, описываемой в Главе 2.

2 Одномерная модель влияния спрайта/гало на химический состав мезосферы

2.1 Постановка задачи одномерного моделирования высотных разрядов

Данная глава является развитием нульмерной модели воздействия спрайта на химический состав мезосферы, предложенной в предыдущей главе. Химическая модель мезосферы для высот от 60 до 90 км не изменилась и состоит из 267 реакций для 61 химической компоненты (см. Приложение А и Приложение Б). Часть программно-вычислительного комплекса для построения системы дифференциальных уравнений осталась прежней, при этом часть, отвечающая за расчеты непосредственно влияния возмущения поля и температуры электронов, была существенно переработана с целью снятия большей части ограничений одноточечного моделирования.

Электрическое поле на высотах мезосферы определяется из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\sigma E}{\varepsilon_0} = \frac{\partial E_{ext}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

где E_{ext} – внешнее электрическое поле, вычисляемое в дипольном приближении, создаваемое нескомпенсированным электрическим зарядом в облаке, находящимся над проводящей поверхностью Земли, E – напряженность электрического поля на высоте мезосферы, непосредственно входящая в скорость химических реакций через параметр θ . Проводимость мезосферы σ определяется из соотношения:

$$\sigma = \frac{e^2 N_e}{m_e \nu_e(T_e)}, \quad (2.2)$$

где N_e – концентрация электронов, m_e – масса электрона, e – значение заряда электрона по модулю, $\nu_e(T_e)$ – частота столкновения электронов, определяемая из соотношения:

$$\nu_e(T_e) = 1.84 \cdot 10^9 \cdot (N_m / 10^{17}) \cdot (T_e / 1000)^{5/6}, \quad (2.3)$$

где N_m – концентрация нейтральных компонент. Таким образом, температура электронов влияет на напряженность электрического поля. Для учета зависимости температуры электронов от напряженности электрического поля использовался свободно распространяемый программный пакет BOLSIG+, решающий уравнение Больцмана [34].

Зависимость силы тока в канале молнии от времени задается выражением:

$$I(t) = I_0 \cdot \frac{(t/\tau_1)^2 \cdot e^{-t/\tau_2}}{1 + (t/\tau_1)^2}, \quad (2.5)$$

где I_0 – параметр, определяющий амплитуду силы тока и заряд, протекающий в молниевом канале. Следует отметить, что I_0 не совпадает по величине с максимальным током в канале молнии, а превышает ее примерно в 1,6 раза. Характерные времена $\tau_1=70$ мкс и $\tau_2=500$ мкс [13], причем продолжительность протекания тока в канале и перенесенный заряд определяется в основном величиной τ_2 . Нескомпенсированный заряд в облаке вычисляется интегрированием силы тока в молниевом канале.

Важным вопросом при постановке задачи о моделировании высотных разрядов в ночное время является определение зависимости скорости ионизации нейтральных молекул (в первую очередь кислорода и азота) от высоты. Проводимость мезосферы в значительной степени определяет создающиеся электрические поля во время высотных разрядов в мезосфере и, предположительно, влияет на инициацию разряда. Ночью источники ионизации, связанные с солнечной активностью (*Ly-a*, *Ly-b*, жесткое рентгеновское излучение, УФ-радиация), прекращают свою работу и однозначно остаются лишь галактические космические лучи

(ГКЛ). Скорость ионизации галактическими космическими лучами можно рассчитать по формуле:

$$q_{ГКЛ}(z) = (A + B \cdot \sin^4 \varphi) \cdot N_m, \quad (2.6)$$

где $A=1,74 \cdot 10^{-18} \text{с}^{-1}$, $1,96 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1} \leq B \leq 2,84 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1}$ для условий высокой и низкой солнечной активности [18]. Для расчетов взяты значения $\varphi=38^\circ$, $B=2,5 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1}$.

Именно скорость ионизации в первую очередь определяет концентрацию электронов, а, следовательно, и проводимость мезосферы. Учет только ГКЛ позволяет получить соответствие между наблюдаемыми величинами проводимости и рассчитываемыми по формуле (6) до высот не выше 70-75 км. Как следует из наблюдений [35], с ростом высоты идет существенное увеличение концентрации электронов и проводимости (см. Рис. 2.1 и Рис. 2.2). А учет только ГКЛ дает уменьшение проводимости с высотой, вследствие падения общей концентрации частиц. Для корректного моделирования высотных разрядов необходимо учесть в модели рост проводимости с высотой: именно из-за резкого роста проводимости существует верхняя граница спрайта, так как в область с высокой проводимостью электрическое поле, создаваемое распределением зарядов после разряда облако-земля, не проникает. Соответственно разряд спрайта не распространяется выше 90 км. Если бы рост проводимости не ограничивал развитие спрайта, то разряд распространялся бы практически неограниченно вверх из-за падения концентрации нейтральных частиц, а, следовательно, и уменьшения значения критического поля пробоя. Для задания проводимости согласующейся с наблюдаемым профилем, необходимо внести дополнительный источник ионизации, экспоненциально растущий с высотой. В рамках данного моделирования не будем останавливаться на исследовании причин роста ионизации с высотой и добавим дополнительный источник ионизации $q_{\text{доп}}=7 \cdot 10^{-20} \cdot e^{(z-65)/2}$, который вместе с $q_{ГКЛ}$ обеспечивает профили

концентрации электронов и проводимости в невозмущенном состоянии мезосферы такие же, как и наблюдаемые в экспериментах [35] (см. Рис. 2.3 и Рис. 2.4).

Моделирование проводилось, как и в нульмерной модели, в три этапа: выход системы на квазистационарное значение, высотный разряд, релаксация. Задание начальных концентраций химических компонент производилось с использованием атмосферной климатической модели WACCM, являющейся частью CESM версии 1.1 [36] Для расчета брались координаты 38° северной широты, 0° долготы. Точное задание большого количества химических компонент позволяет сократить время первого этапа расчетов до 100 с.

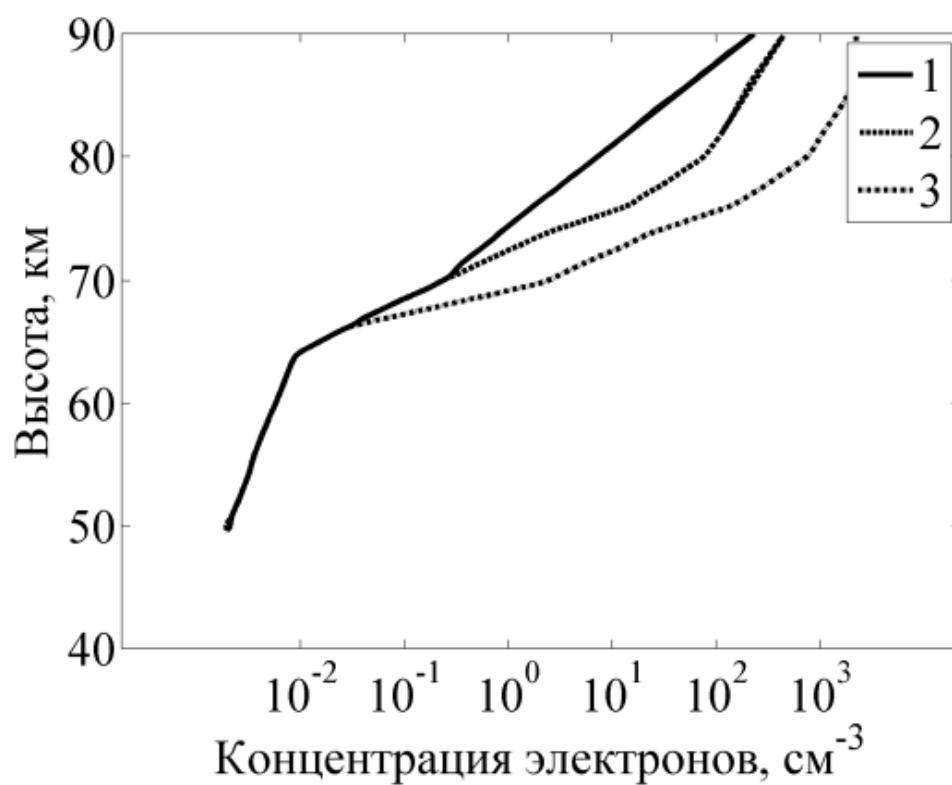


Рис. 2.1 Профиль концентрации электронов в ночной мезосфере [35]

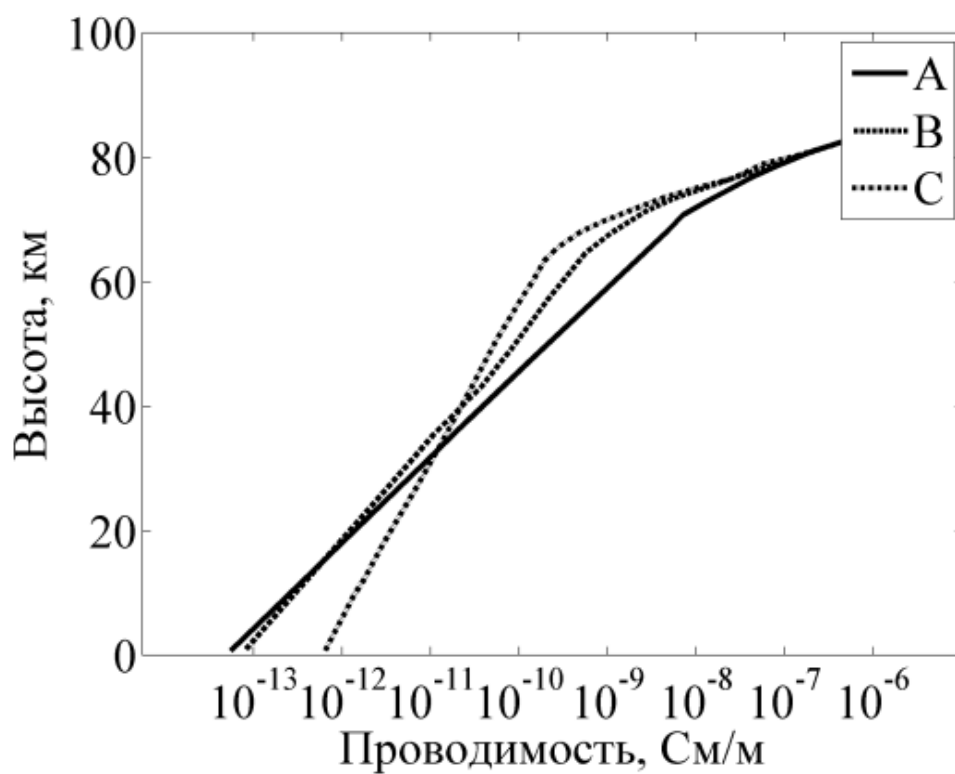


Рис. 2.2 Профиль проводимости для ночной мезосферы [35]

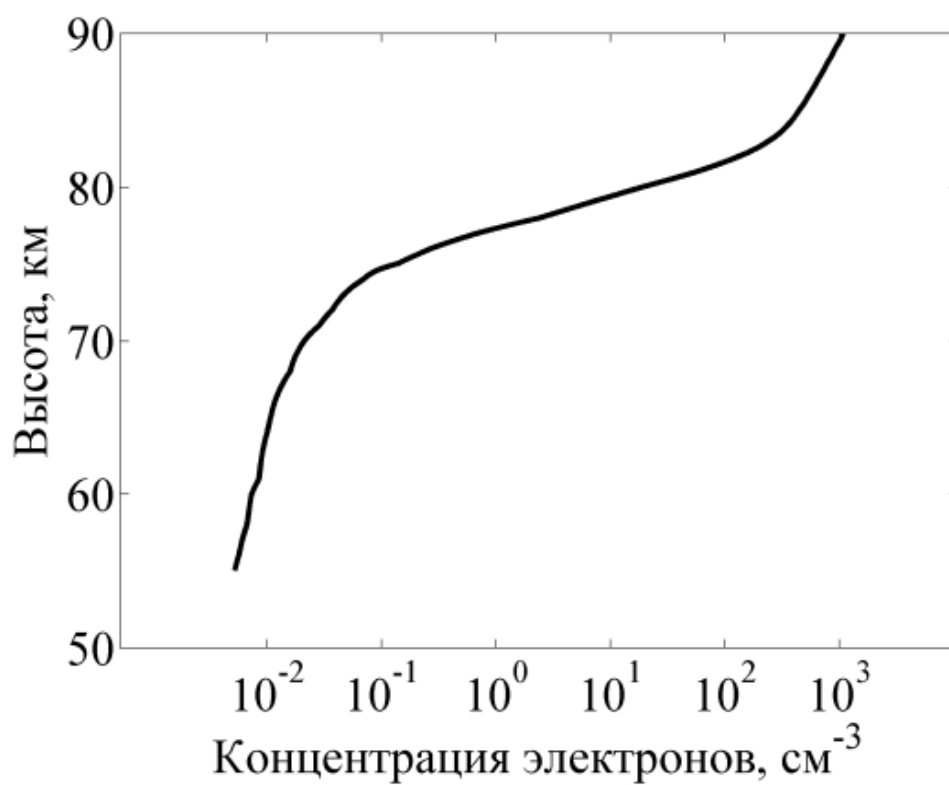


Рис. 2.3 Профиль концентрации электронов с учетом дополнительного источника ионизации

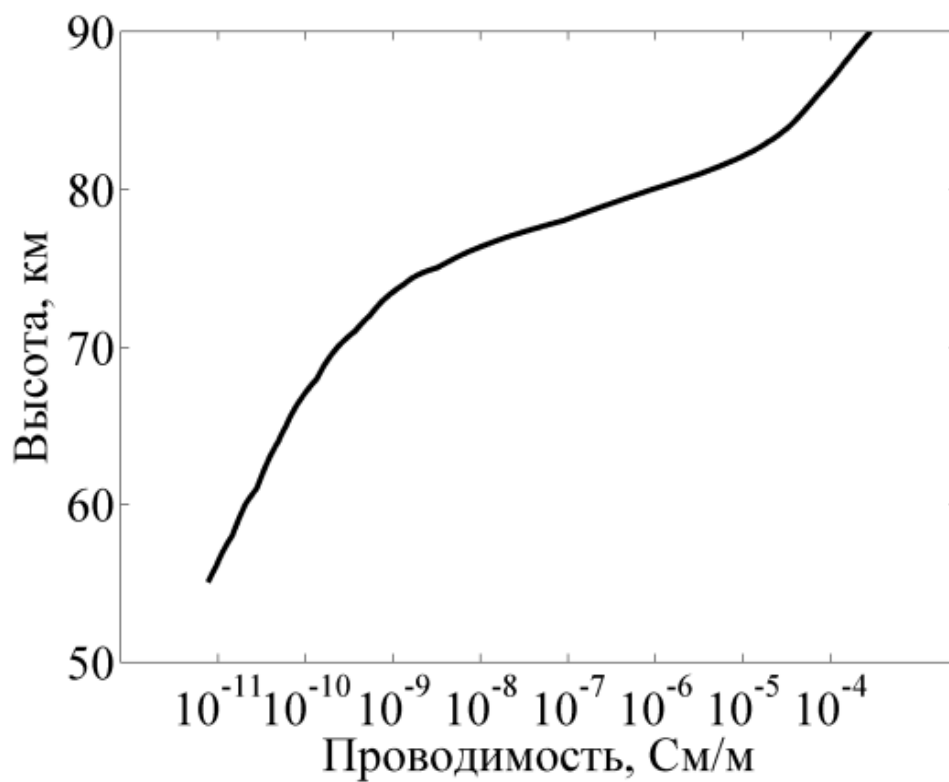


Рис. 2.4 Профиль проводимости с учетом дополнительного источника ионизации

2.2 Исследование возмущения параметра θ , концентрации электронов и проводимости мезосферы

Для расчетов влияния спрайта на химический баланс мезосферы в уравнение (1.5) подставим значение амплитудной характеристики для тока $I_0 = 180$ кА. Это соответствует максимальному протекающему току 110 кА к 150 мкс после начала разряда и дипольному моменту 740 Кл·км, который является типичным для ночных спрайтов [24]. Время протекания тока в молниевом канале около 2 мс.

Зависимость нормированного электрического поля θ от времени и высоты показана на Рис. 2.5. С ростом протекшего заряда в молниевом канале происходит постепенное увеличение дипольного момента. Примерно через 0,5 мс нормированное поле на высоте 79 км достигает пробойного уровня 128 Тд, и создаются условия для образования лавины электронов. Далее θ продолжает резко расти и на высотах 75-80 км достигает максимальных значений от 180 до, практически, 200 Тд и остается на этом уровне несколько сотен микросекунд. После резкого роста поля следует быстрое падение, связанное с ростом концентрации электронов, а, следовательно, и проводимости (см. Рис. 2.6). На высоте 70-75 км максимальные значения θ варьируются от 140 до 180 Тд. Максимальное достигаемое значение $\theta = 197$ Тд на высоте 78,2 км, при этом максимальное возмущение концентрации электронов 480 см^{-3} наблюдается на высоте 76,5 км (см. Рис. 2.6). То есть разница по высоте составляет 1,7 км и связана с различием в концентрации нейтралов. Ниже высоты 69 км величина θ не достигает критического значения, соответственно разряд не развивается, и возмущения концентрации электронов не происходит. Верхняя граница развития спрайта около 81 км, а выше существенно увеличивается проводимость, и электрическое поле практически не проникает. Следует заметить, что распространение разряда вниз от области инициации происходит с временной задержкой, что

приводит к тому, что максимальные концентрации электронов достигаются внизу спрайта позже на несколько мс, чем в верхней части.

Важной особенностью развития разряда на высотах мезосферы является уменьшение проводимости в начальный момент развития спрайта (см. Рис. 2.7). Падение проводимости начинается сразу после начала протекания тока в молниевом канале и проникновением поля нескомпенсированного заряда на высотах мезосферы. Температура электронов возрастает, что ведет к увеличению частоты столкновений, а концентрация электронов не возрастает, так как напряженность электрического поля не сразу достигает пробойного значения. Падение проводимости составляет практически 2 порядка и может быть особо важно при моделировании дневных спрайтов. Рост проводимости начинается с образованием лавины электронов и резкого увеличения их концентрации. Уступ в росте проводимости связан с завершением разряда и дальнейшем отлипанием электронов от отрицательных ионов. Релаксация проводимости связана с динамикой концентрации электронов: чем выше высота, тем больше характерное время.

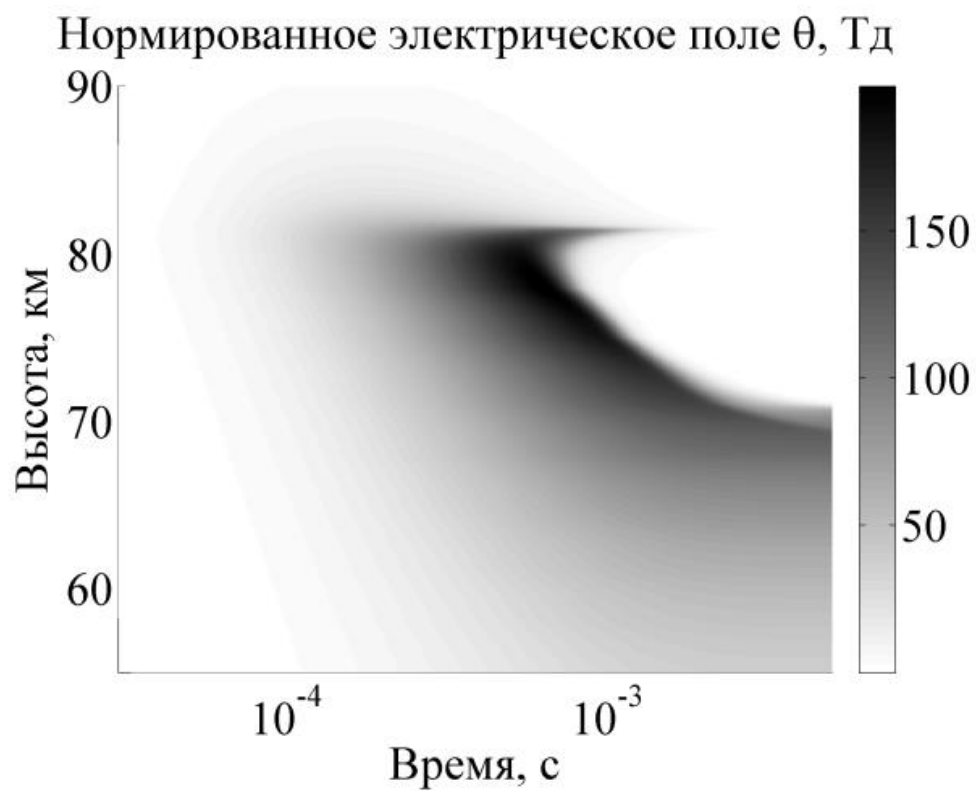
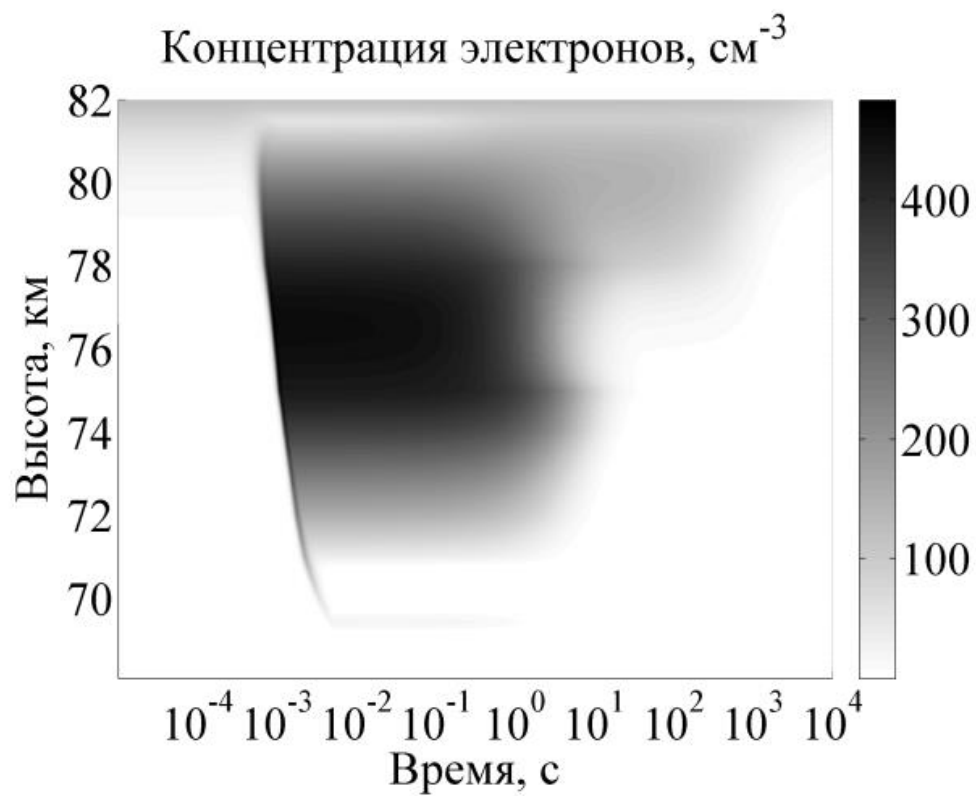
Рис. 2.5 Динамика возмущения параметра θ 

Рис. 2.6 Динамика возмущения концентрации электронов

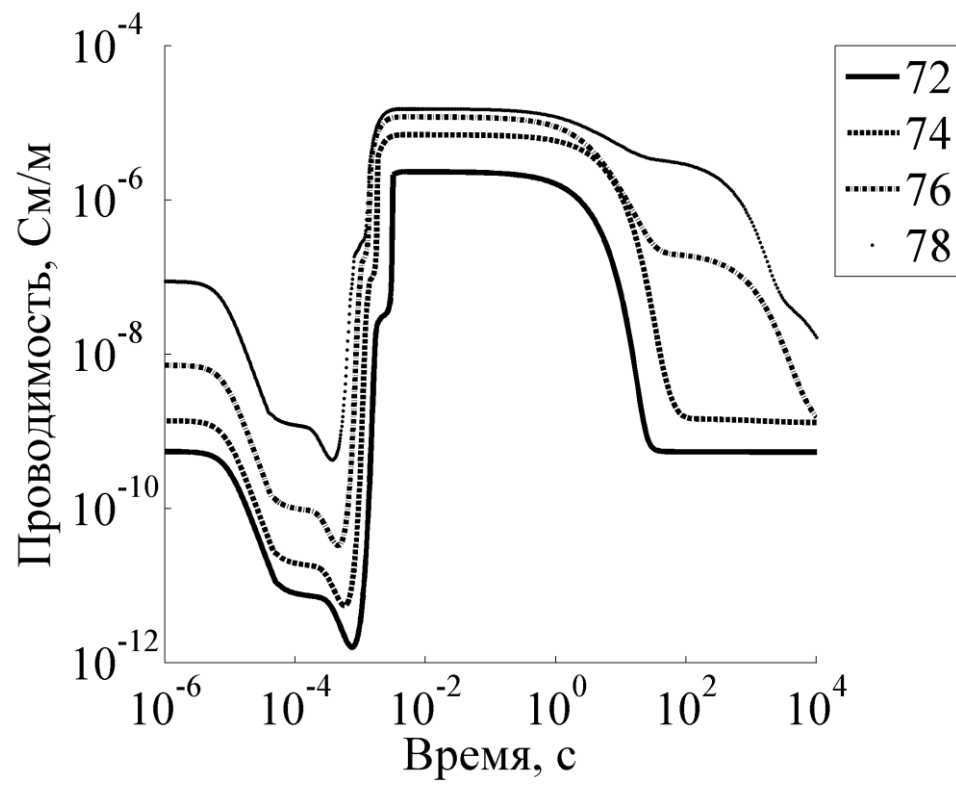


Рис. 2.7 Динамика возмущения проводимости на высоте 72,74,76,78 км

2.3 Исследование возмущения концентраций ионов

Во время развития спрайта создаются условия для активной ионизации нейтральных компонент. Самые большие концентрации из нейтральных компонент имеют молекулярные кислород и азот. Возмущение соответствующих им ионов O_2^+ и N_2^+ самое значительное во время спрайта и наблюдается на высотах от 69 до 81 км, что совпадает с высотами где параметр θ превышает критическое значение 128 Тд (см. Рис. 2.8 и Рис. 2.9). Максимальные возмущения ионов O_2^+ и N_2^+ наблюдаются на высоте около 76,5 км и достигают 620 см^{-3} и 270 см^{-3} соответственно, что совпадает с высотой максимального возмущения электронов (см. Рис. 2.6). Начало роста возмущения концентрации ионов происходит с задержкой от начала протекания тока в молниевом канале в тропосфере, так как необходимо время для переноса электрического заряда и достижения в мезосфере пробойных полей. Высота начала возмущения концентрации для обоих ионов около 80 км, а время различно: для N_2^+ значительный рост начинается после 550 мкс, для O_2^+ через 750 мкс. Возмущение концентраций ионов доходит к нижней части спрайта через 5 мс и 3 мс соответственно. Такое поведение во времени связано с несколько большей скоростью ионизации азота и тем, что концентрация азота в 4 раза больше, чем кислорода. Следовательно, возмущение концентрации ионов азота начинается раньше, чем иона кислорода. Различие в максимально наблюдаемых концентрациях определяется быстрыми процессами ионной конверсии, при которых N_2^+ переходит в O_2^+ , что так же определяет время жизни возмущений. Возмущение N_2^+ сохраняется не более нескольких миллисекунд в зависимости от высоты: чем ниже, тем меньше время релаксации возмущения. Для O_2^+ время релаксации зависит от высоты и составляет 0,7 с на высоте 70 км и порядка 60 с на 80 км, что связано с изменением концентрации нейтральных компонент. O_2^+ является начальным ионом практически для всех

учитываемых ионов-связок. Скорость ионной конверсии сильно зависит от концентрации нейтралов: на высоте 70 км она в 4 раза больше, чем на 80 км и время жизни O_2^+ существенно меньше.

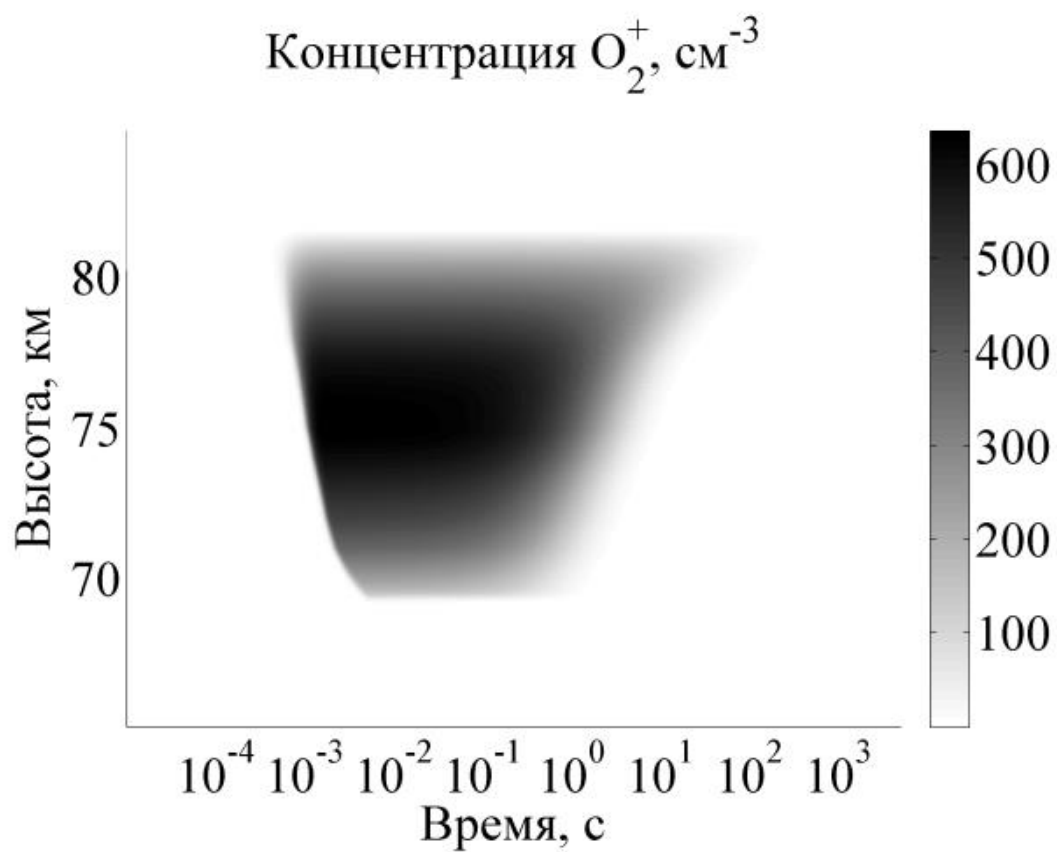
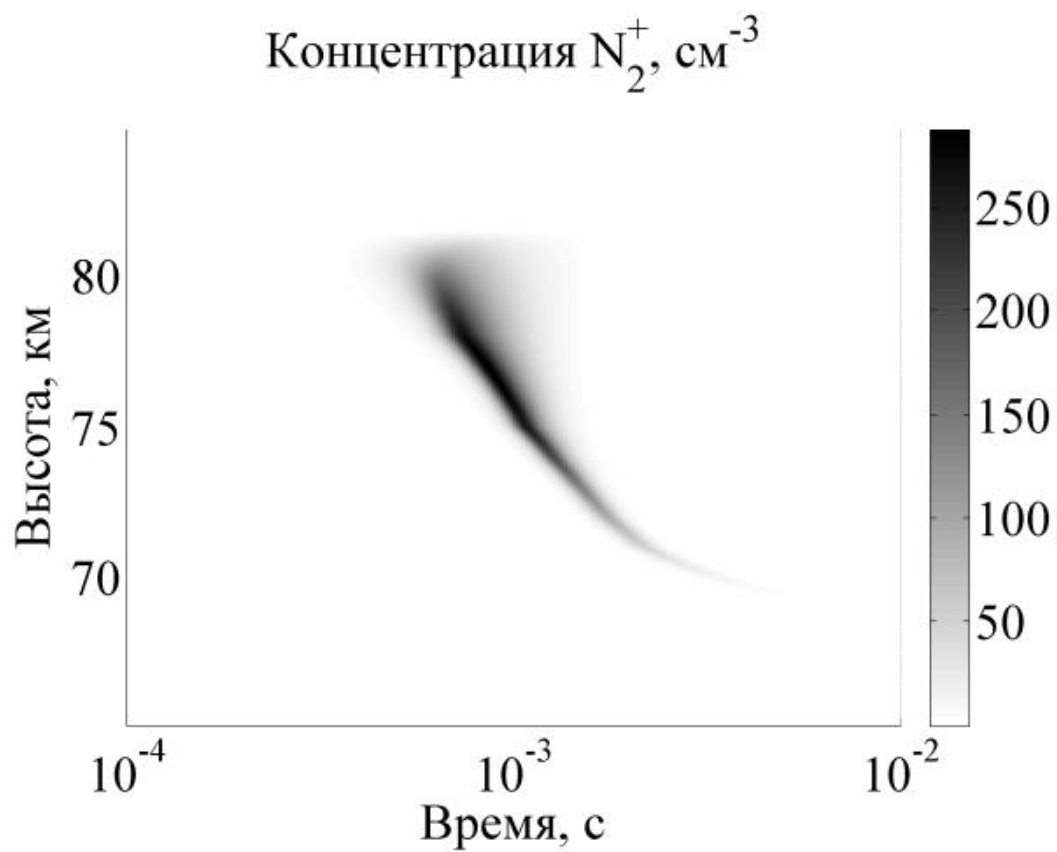
Важным промежуточным ионом в процессе ионной конверсии O_2^+ в ионы-связки является O_4^+ , который начинает возмущаться в нижней части спрайта примерно через 10 мс после начала молниевых разрядов в тропосфере (см. Рис. 2.10). Через 1 с на высоте 75 км достигает максимального значения концентрации 85 см^{-3} . Через 25 с на высоте 80 км релаксирует полностью к доспрайтовым значениям, а на высоте 70 км процесс релаксации существенно быстрее и заканчивается через 1 с. Возмущения $H_3O^+(OH)$ и $O_2^+(H_2O)$ по форме практически полностью повторяют возмущение O_4^+ , так как являются следующими промежуточными продуктами в цепочке образования основных ионов-связок. Времена релаксации не меняются, а максимальные значения равны 90 см^{-3} и 70 см^{-3} соответственно.

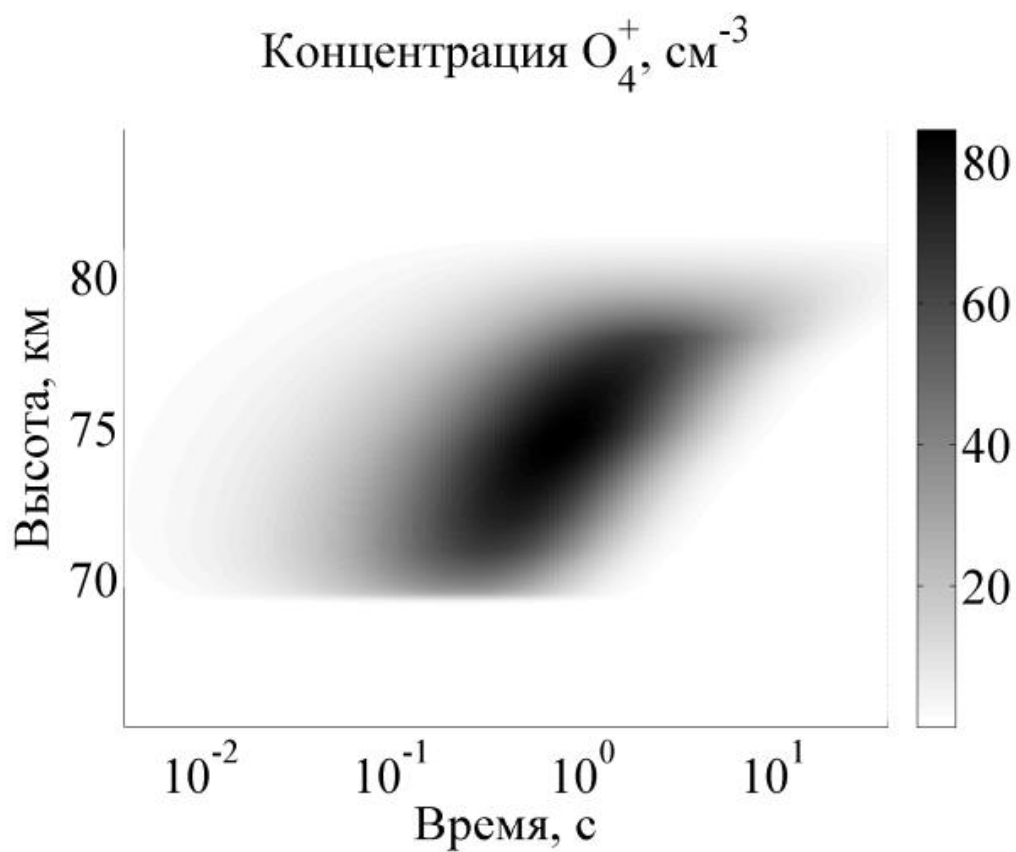
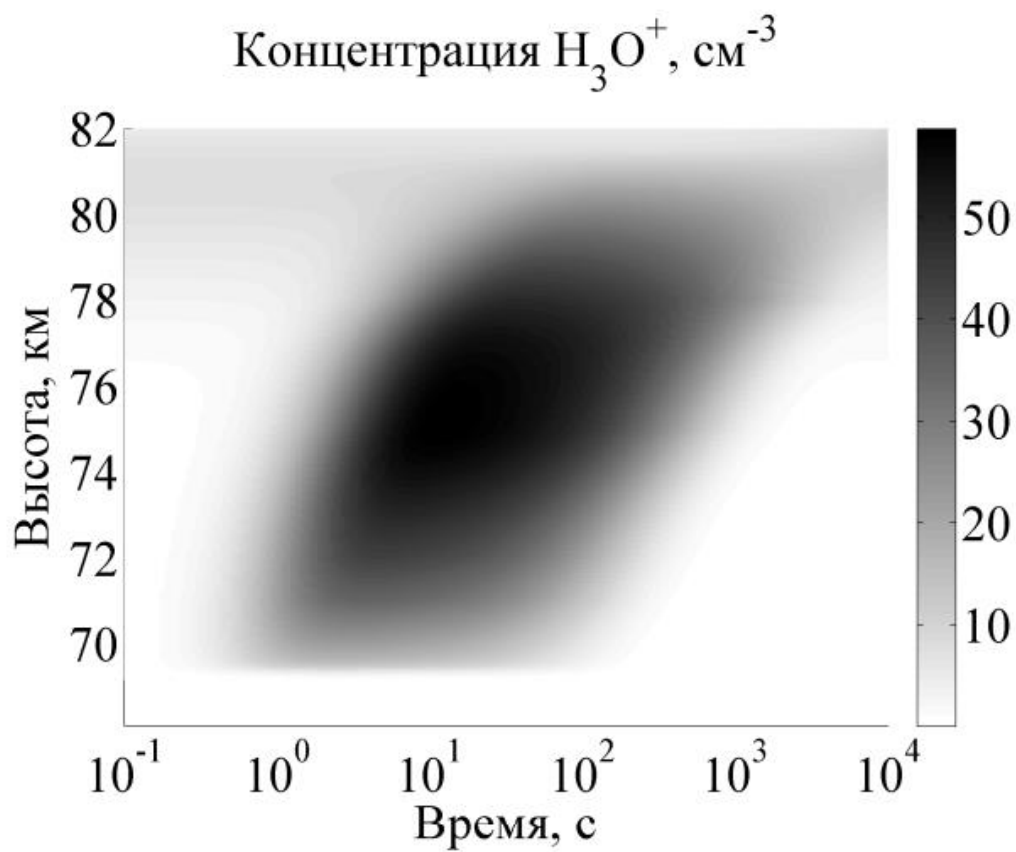
Ион-связка $H_5O_2^+$ имеет самое большое возмущение. Это также один из основных ионов на высоте от 70 до 80 км. Максимальные возмущения наблюдаются на высотах от 74 до 77,5 км и превышают 500 см^{-3} через несколько десятков секунд после спрайта (см. Рис. 2.12). H_3O^+ имеет сходную динамику, так как является предшественником $H_5O_2^+$. Из-за быстрого перехода в следующий ион-связку максимальное возмущение концентрации H_3O^+ лишь незначительно превышает 50 см^{-3} (см. Рис. 2.11).

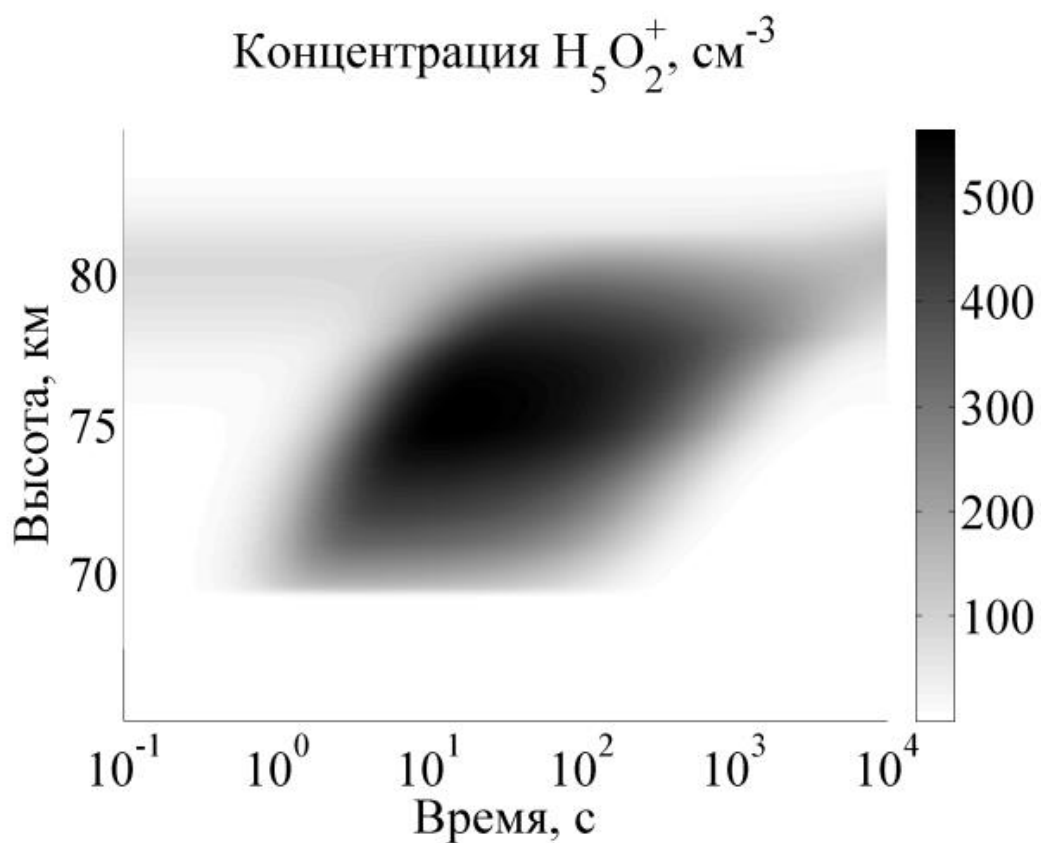
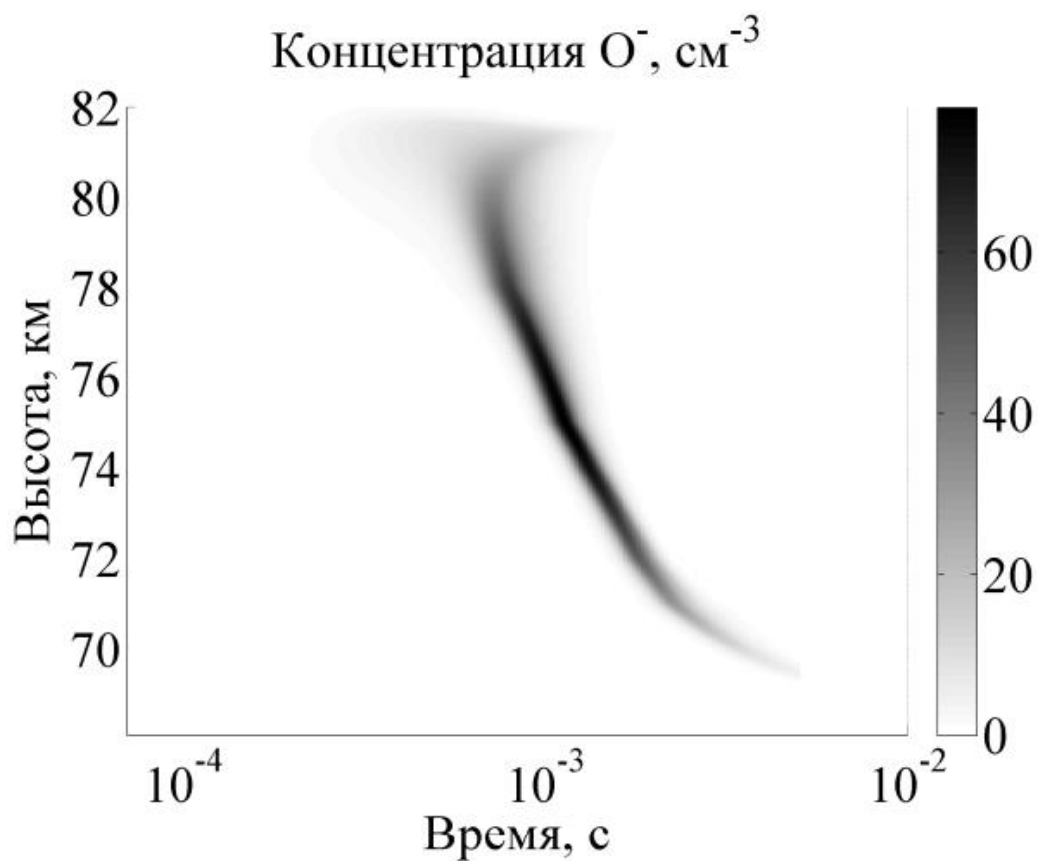
Наряду с электронами отрицательный заряд активно накапливается на ионах. Значительное возмущение концентрации иона O^- происходит во время развития спрайта (см. Рис. 2.13). Основным источником O^- – взаимодействие электронов с молекулярным кислородом в электрическом поле. Несмотря на значительную скорость образования, большого накопления O^- не происходит, вследствие ионной конверсии с молекулярным кислородом с образованием O_2^- . Релаксация после

завершения спрайта происходит очень быстро: к 1 мс не остается возмущения в верхней части спрайта, а к 3 мс в нижней.

Возмущение концентрации O_2^- проходит во всей области диффузного разряда. Условно можно выделить 2 области разряда, разделенные во времени и пространстве (см. Рис. 2.14). Практически сразу после начала разряда начинается интенсивная наработка O_2^- на высотах от 70 до 75 км, с максимумом 350 см^{-3} на высоте 71 км. Основные реакции образования – реакция электронов с озоном в электрическом поле и реакции ионной конверсии O_4^- с нейтральными молекулами. Релаксация возмущения происходит достаточно быстро: через 10 с концентрация возвращается к доспрайтовым значениям. Вторая область с большим возмущением концентрации находится на высотах 75-78 км. Ее образование связано с ионной конверсией O^- с молекулярным кислородом. Дольше всего возмущение сохраняется в верхней части спрайта и продолжается около 800 с, но максимальные возмущения не высоки.

Рис. 2.8 Динамика возмущения концентрации O_2^+ Рис. 2.9 Динамика возмущения концентрации N_2^+

Рис. 2.10 Динамика возмущения концентрации O_4^+ Рис. 2.11 Динамика возмущения концентрации H_3O^+

Рис. 2.12 Динамика возмущения концентрации H_5O_2^+ Рис. 2.13 Динамика возмущения концентрации O^-

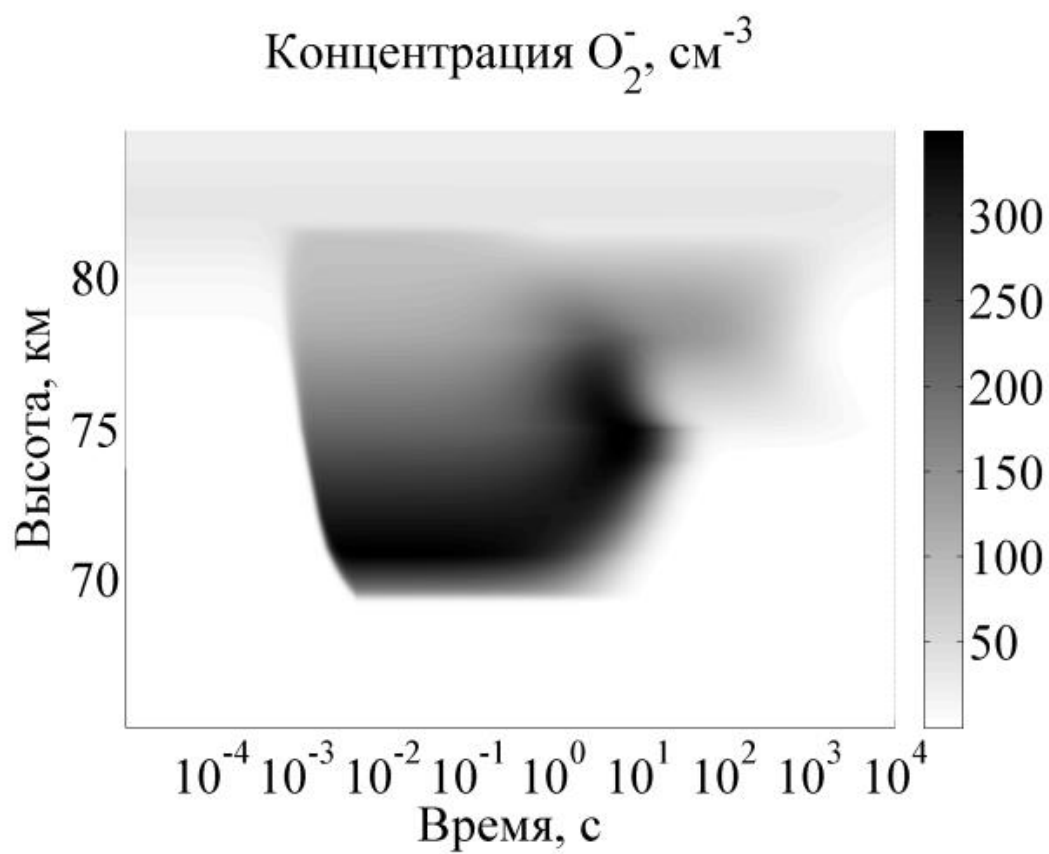


Рис. 2.14 Динамика возмущения концентрации O_2^-

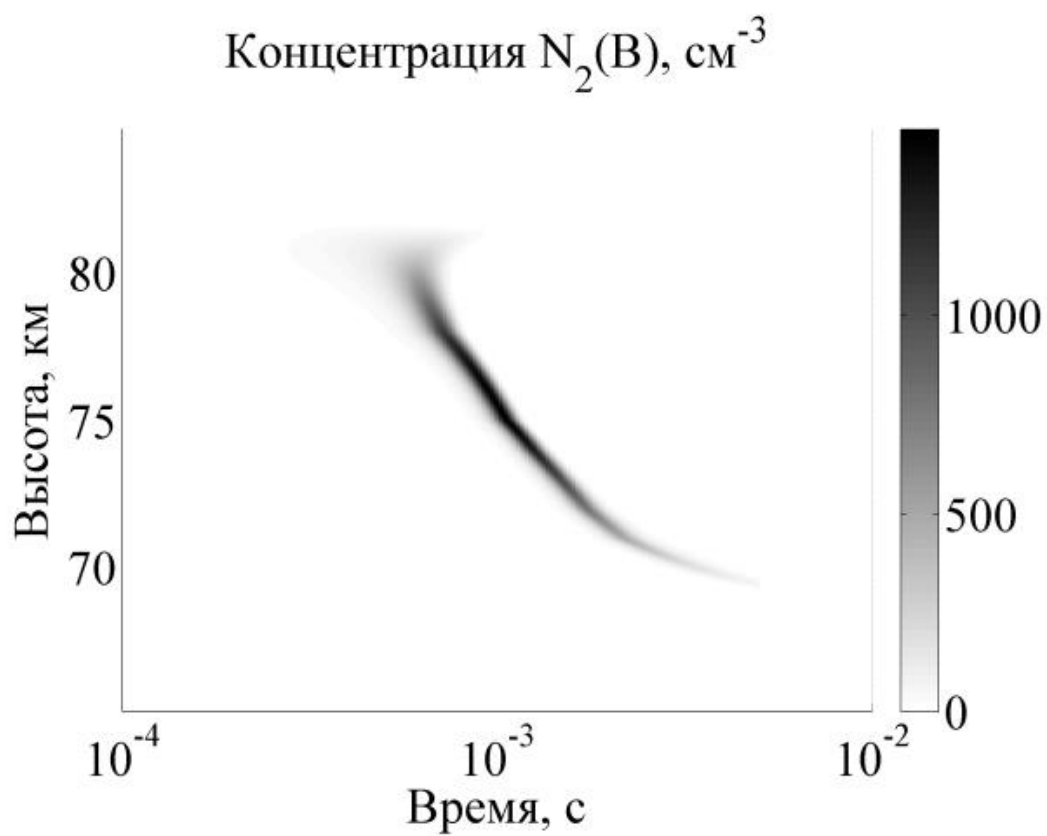
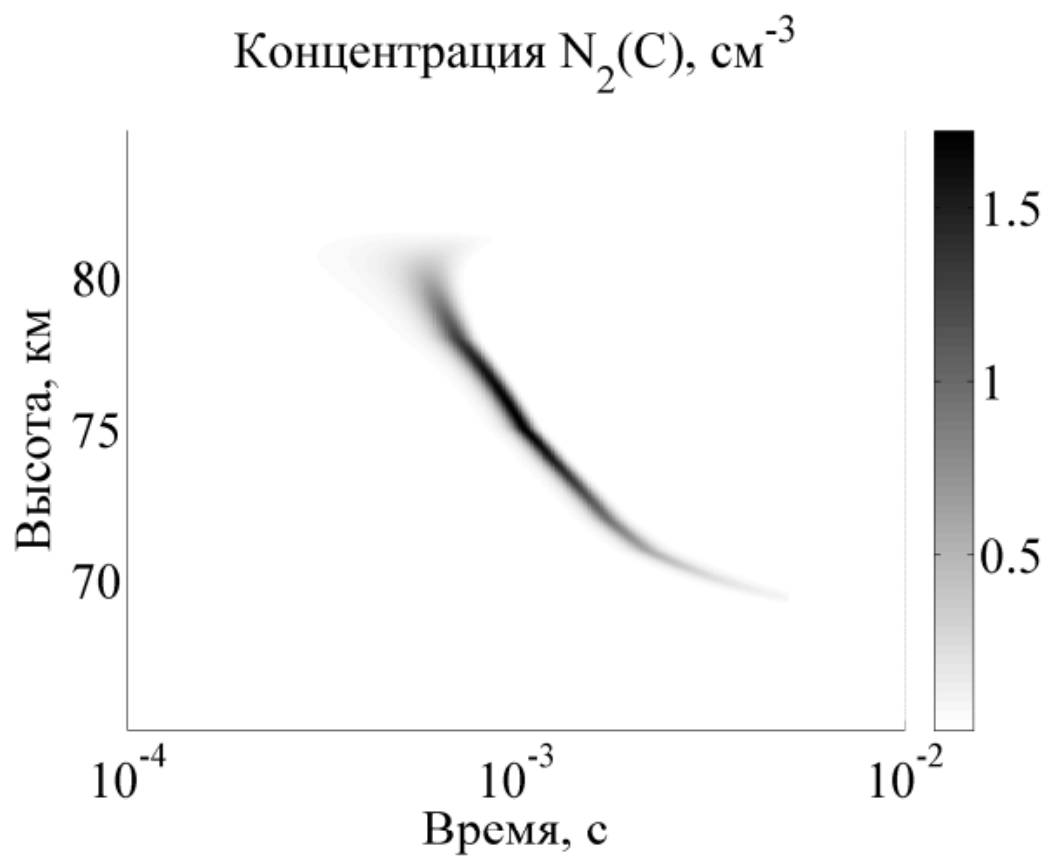
2.4 Исследование возмущения возбужденных компонент и связанных с ними излучений

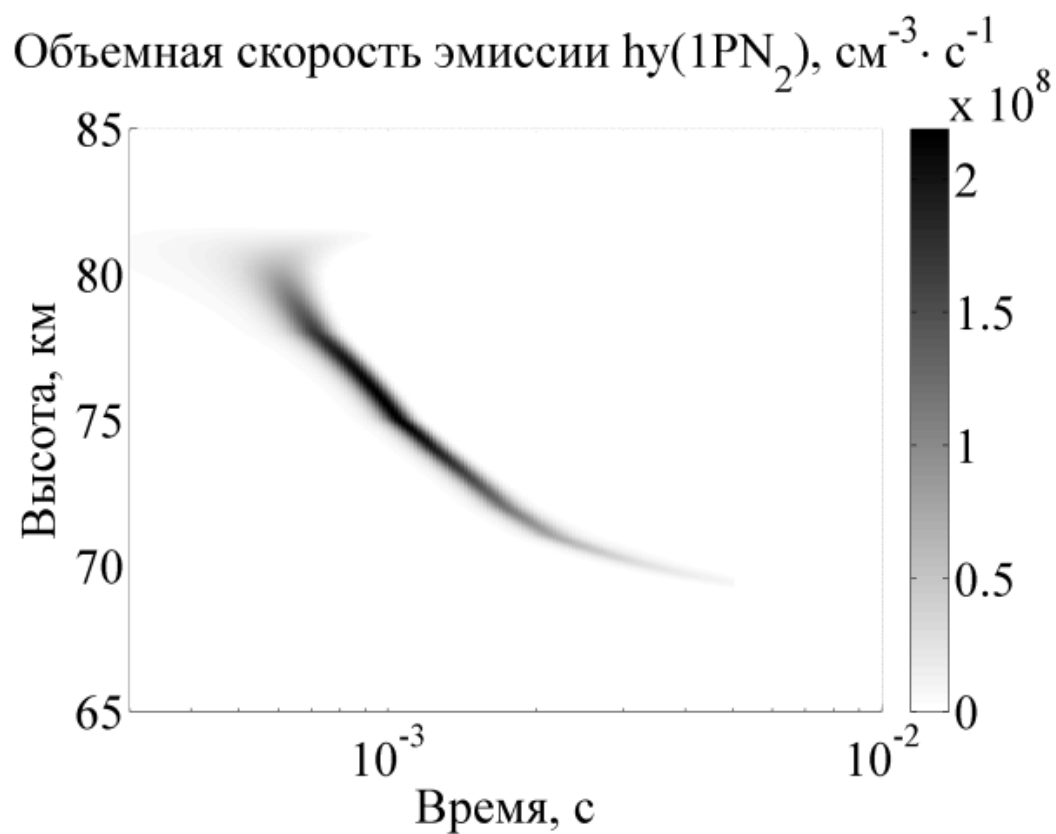
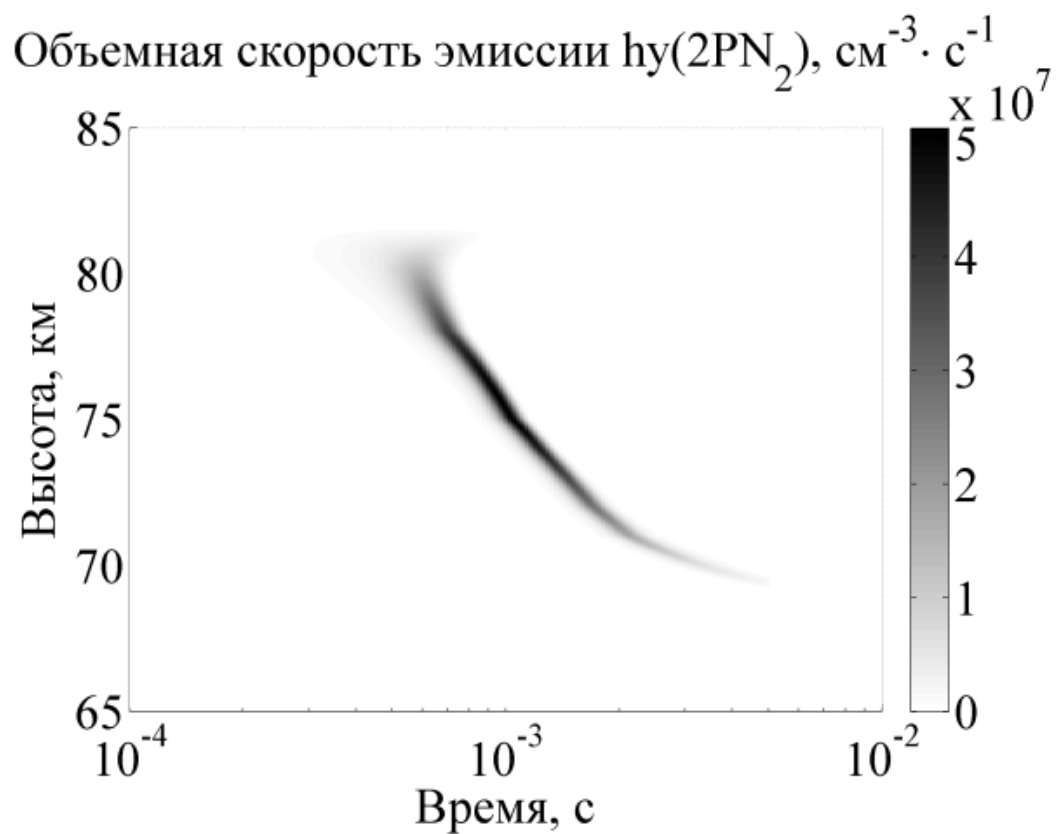
Образование большого количества возбужденных молекул и атомов кислорода и азота приводит к излучению фотонов на разных частотах. По оптическим наблюдениям спрайтов выяснилось, что основное излучение приходится на первую и вторую положительные полосы излучения молекулярного азота. Излучение первой полосы происходит вследствие реакции $N_2(B) \rightarrow N_2(A) + h\nu(1PN_2)$, а второй полосы по реакции $N_2(C) \rightarrow N_2(B) + h\nu(2PN_2)$. Существенного возмущения концентрации $N_2(C)$ не происходит, несмотря на высокую скорость его образования в электрическом поле, так как излучение фотонов во второй положительной полосе идет очень интенсивно. Максимальная концентрация $N_2(C)$ не превышает $1,7 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 2.16). Объемная скорость излучения фотонов имеет максимальную скорость около $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ на высоте 75,5 км (см. Рис. 2.18). Возмущение концентрации $N_2(B)$ существенно больше, чем $N_2(C)$: максимальное значение на высоте 75,5 км составляет 1478 см^{-3} . Время релаксации $N_2(B)$ и $N_2(C)$ не превышает несколько сотен мкс вне зависимости от высоты.

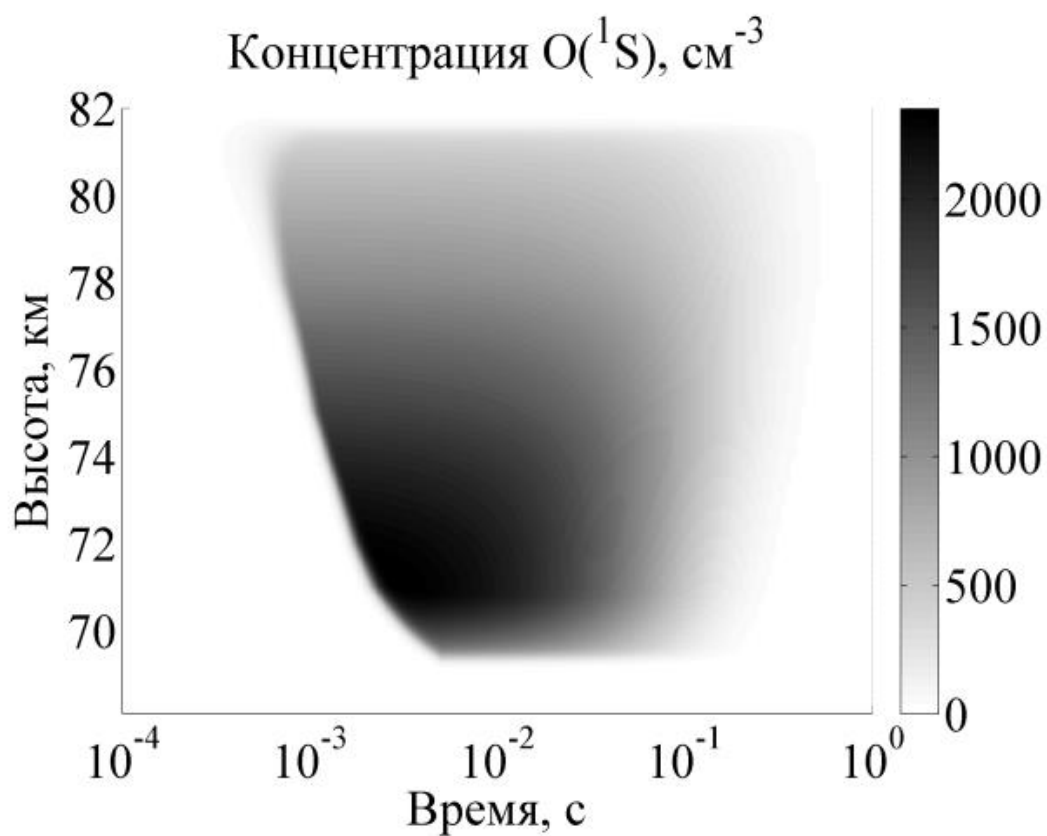
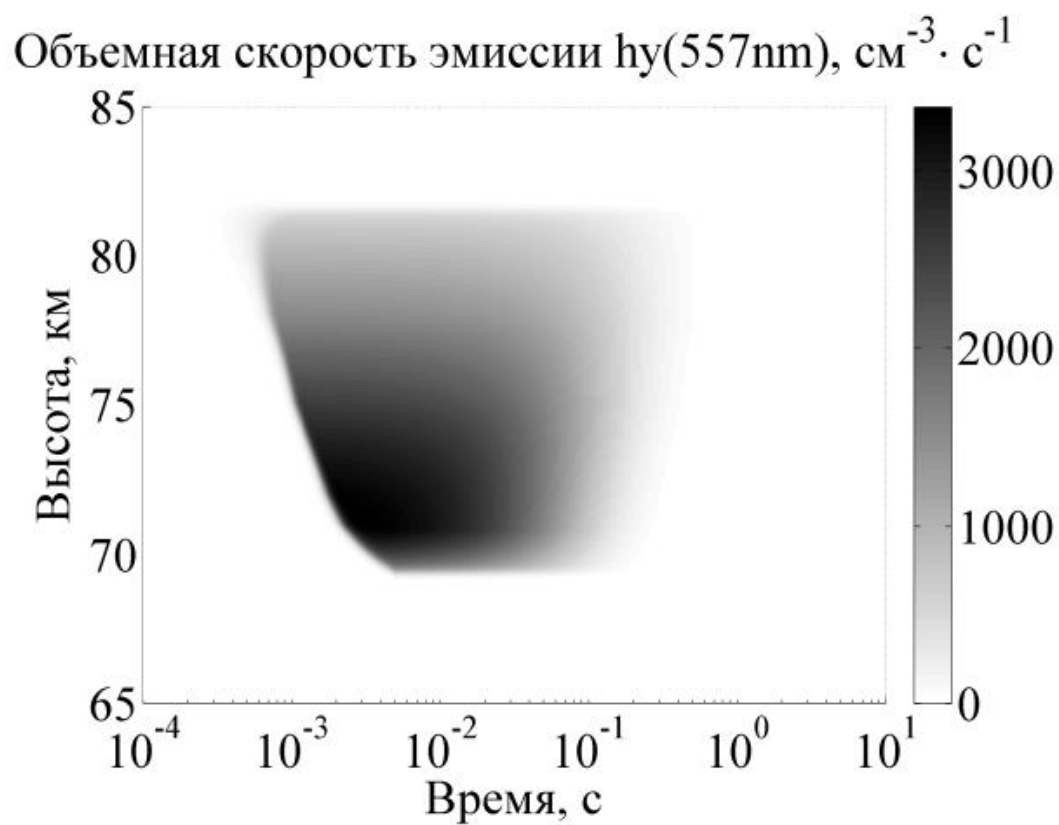
В присутствии электрического поля эффективно идет образование возбужденного состояния атомарного кислорода $O(^1S)$ по реакции $e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1S)$, который в свою очередь излучает фотон и переходит в $O(^1D)$ по реакции $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu(557\text{nm})$. Возмущение концентрации $O(^1S)$ превышает $2,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 2.19), причем максимальные значения наблюдаются в нижней части спрайта на высоте 71 км. Процесс излучения фотонов идет интенсивно – объемная скорость эмиссии фотонов достигает $3,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. Рис. 2.20), и через 0,5 с концентрация $O(^1S)$ приходит к доспайтовым значениям во всем диапазоне высот, и излучение фотонов прекращается.

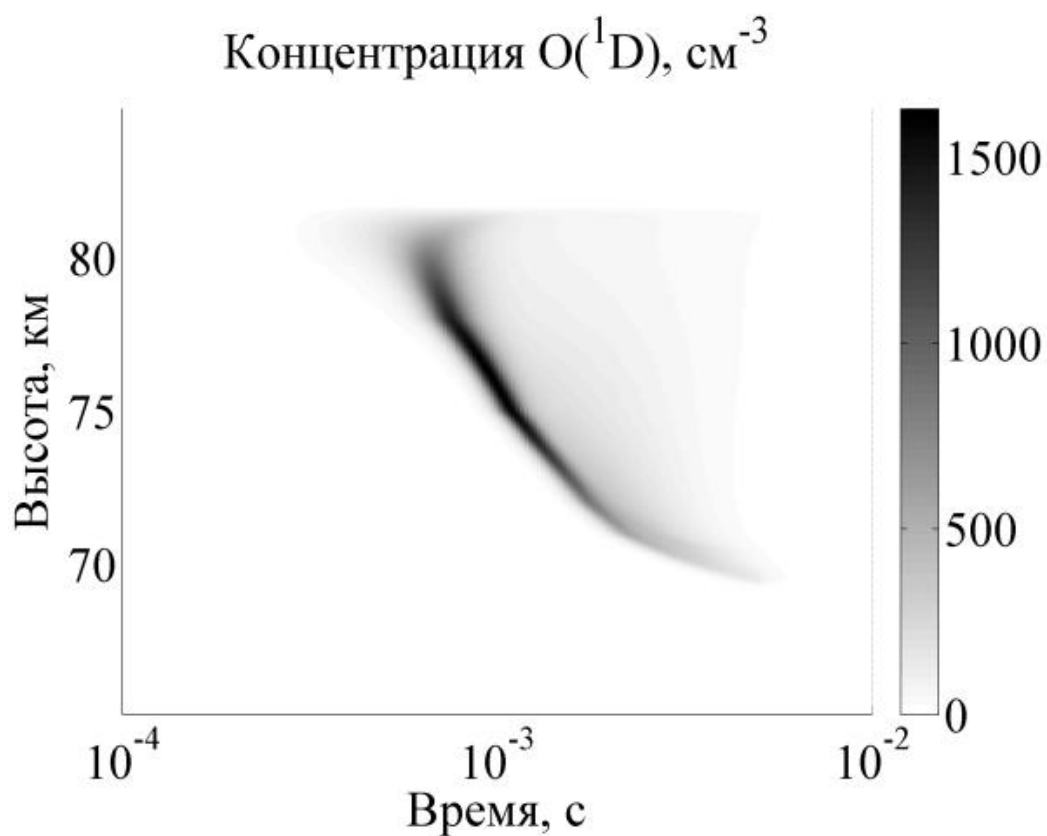
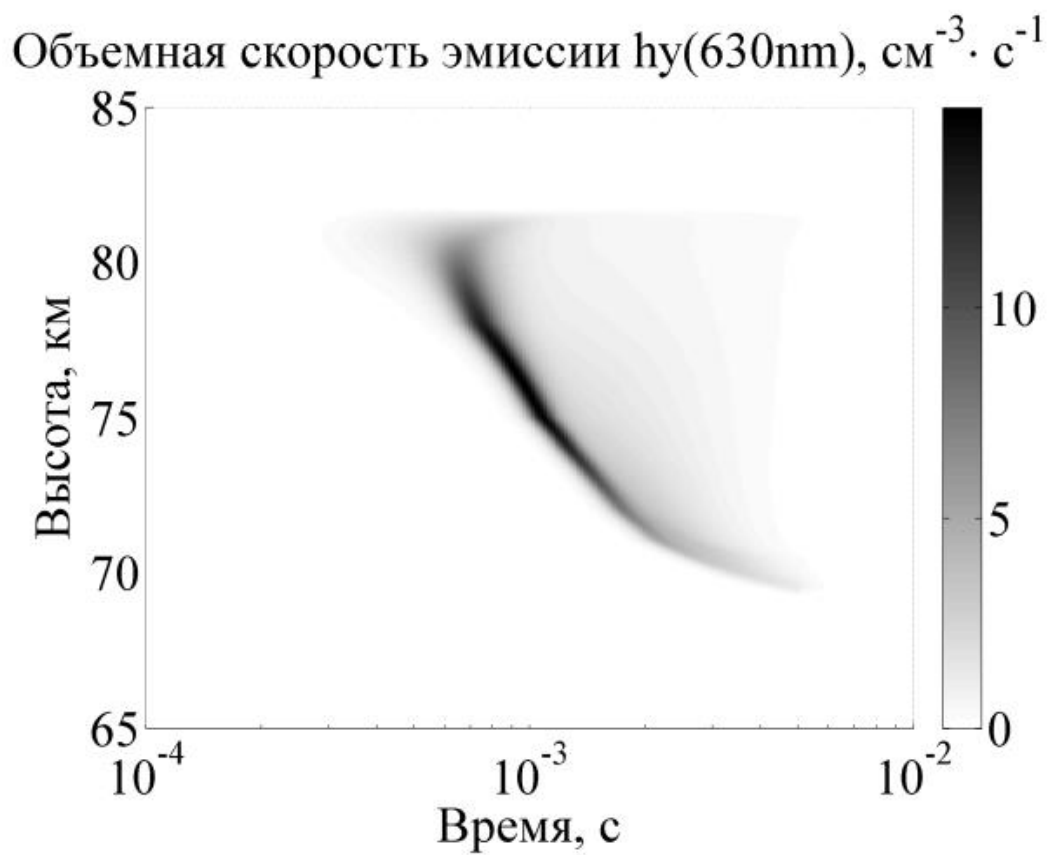
Практически весь $O(^1S)$ с излучением фотона и при взаимодействии с молекулярным кислородом переходит в $O(^1D)$. Максимальная концентрация $O(^1D)$ превышает $1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ на высоте 76,5 км (см. Рис. 2.21), что не совпадает с максимумом $O(^1S)$, вследствие значительного вклада реакции $e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1D)$, идущей существенно быстрее в верхней части спрайта. Излучение по реакции $O(^1D) \rightarrow O + h\nu(630\text{nm})$ идет не очень интенсивно (см. Рис. 2.22), вследствие невысокой скорости реакции и значительных скоростей тушения $O(^1D)$ на нейтральных молекулах.

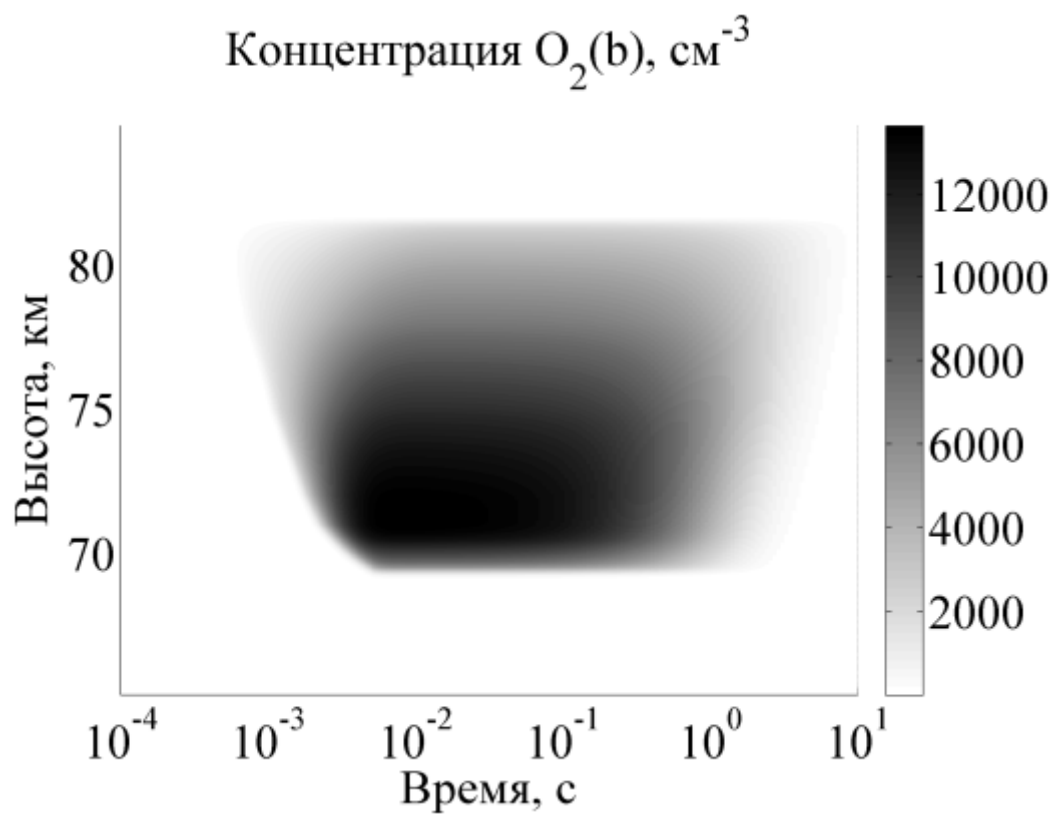
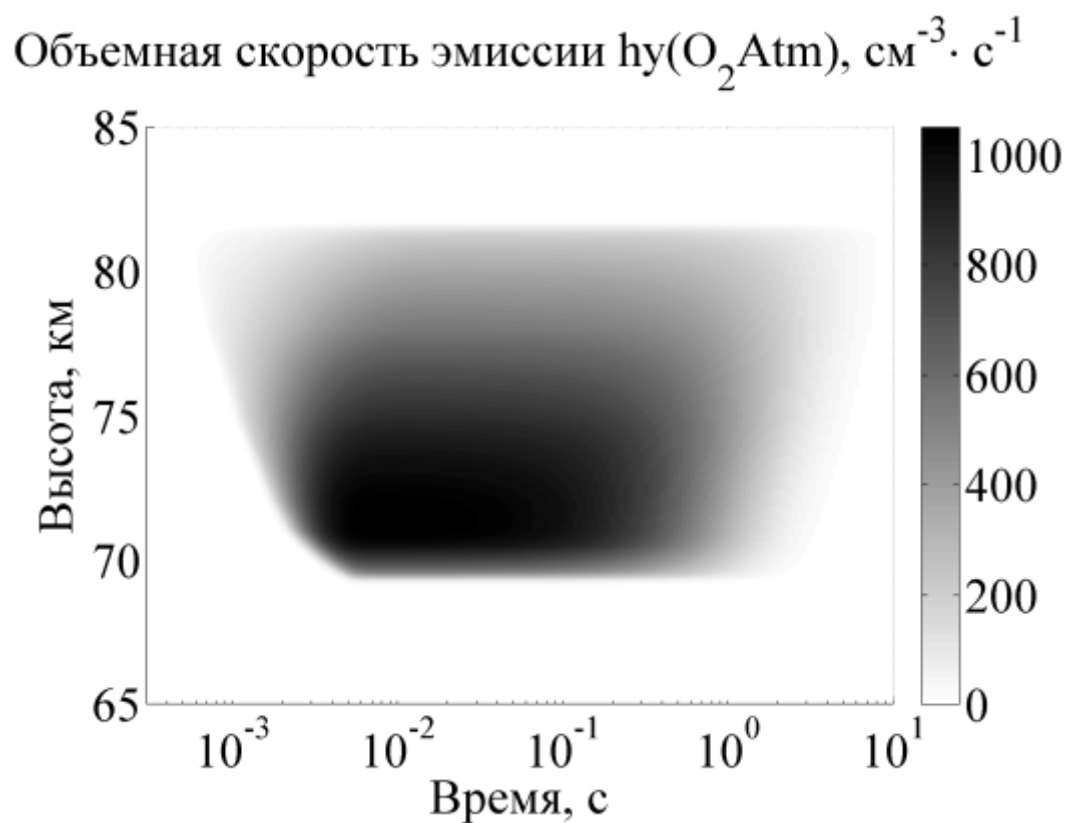
Излучение фотона $h\nu(O_2\text{Atm})$ происходит по реакции $O_2(b) \rightarrow O_2 + h\nu(O_2\text{Atm})$. Возмущение концентрации $O_2(b)$ весьма значительно и в нижней части спрайта на высотах 71-73 километра практически достигает $1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (см. Рис. 2.23). Соответственно объемная скорость эмиссии фотонов имеет максимальное значение на этих же высотах и превышает $10^3 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. Рис. 2.24).

Рис. 2.15 Возмущение концентрации $N_2(B)$ Рис. 2.16 Возмущение концентрации $N_2(C)$

Рис. 2.17 Объемная скорость излучения $h\nu(1\text{PN}_2)$ Рис. 2.18 Объемная скорость излучения $h\nu(2\text{PN}_2)$

Рис. 2.19 Возмущение концентрации $O(^1S)$ Рис. 2.20 Объемная скорость излучения $h\nu(557\text{nm})$

Рис. 2.21 Возмущение концентрации $O(^1D)$ Рис. 2.22 Объемная скорость излучения $h\nu(630\text{nm})$

Рис. 2.23 Возмущение концентрации $O_2(b)$ Рис. 2.24 Объемная скорость излучения $h\nu(O_2\text{Atm})$

2.5 Исследование влияния гало на химический состав мезосферы

По данным, представленным в статье [37], гало наблюдаются на Земле чаще чем один раз в минуту. Для их развития достаточно меньшей чем для спрайтов напряженности квазистатического электрического поля в мезосфере после молниевых разрядов облако-земля в тропосфере. Полярность разряда в тропосфере не играет существенной роли и гало возникает и после отрицательных разрядов, если переносится существенный заряд. Характерные значения напряженности нормированного электрического поля для гало 80-100 Тд [5]. Для моделирования влияния гало на состав мезосферы в одномерной самосогласованной модели использовано значение параметра $I_0 = 62,5$ кА. При этом ток, протекающий в молниевом канале переносит электрический заряд в 26 Кл, и максимальное значение нормированного электрического поля достигает величины 95 Тд (см. Рис. 2.25). Область максимальных полей выше 85 Тд расположена с 76,5 до 79 км. Вследствие того, что лавина электронов не образуется, заметного возмущения концентрации ионных и нейтральных компонент не наблюдается.

Основное излучение фотонов при вспышке гало, так же как и спрайта, приходится на первую и вторую положительные полосы азота. Максимальная объемная скорость эмиссий приходится на высоты 79-79,5 км (см. Рис. 2.26 и Рис. 2.27), что выше области максимальных значений напряженности электрического поля и связано с увеличением с высотой концентрации электронов, существенно влияющих на скорость образования возбужденных состояний азота. Время излучения фотонов невелико – через 4 мс излучение фотонов заканчивается. Основное излучение фотонов $h\nu(557nm)$ и $h\nu(O_2Atm)$ происходит на высотах 78-80 км (см. Рис. 2.28 и Рис. 2.29). Время излучения порядка секунды для $h\nu(557nm)$ и почти 10 с для $h\nu(O_2Atm)$. Таким образом, вертикальные

размеры области гало составляют около четырех километров с центром на 79 км, что совпадает с экспериментальными данными [3,38].

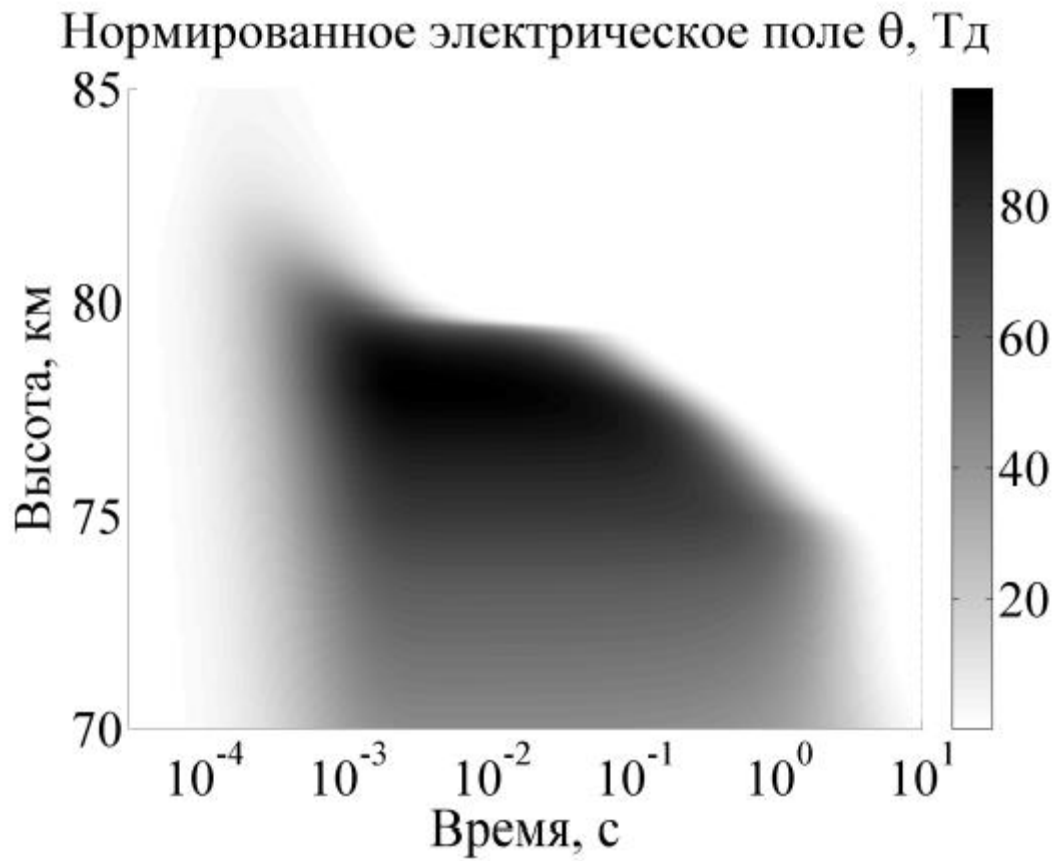
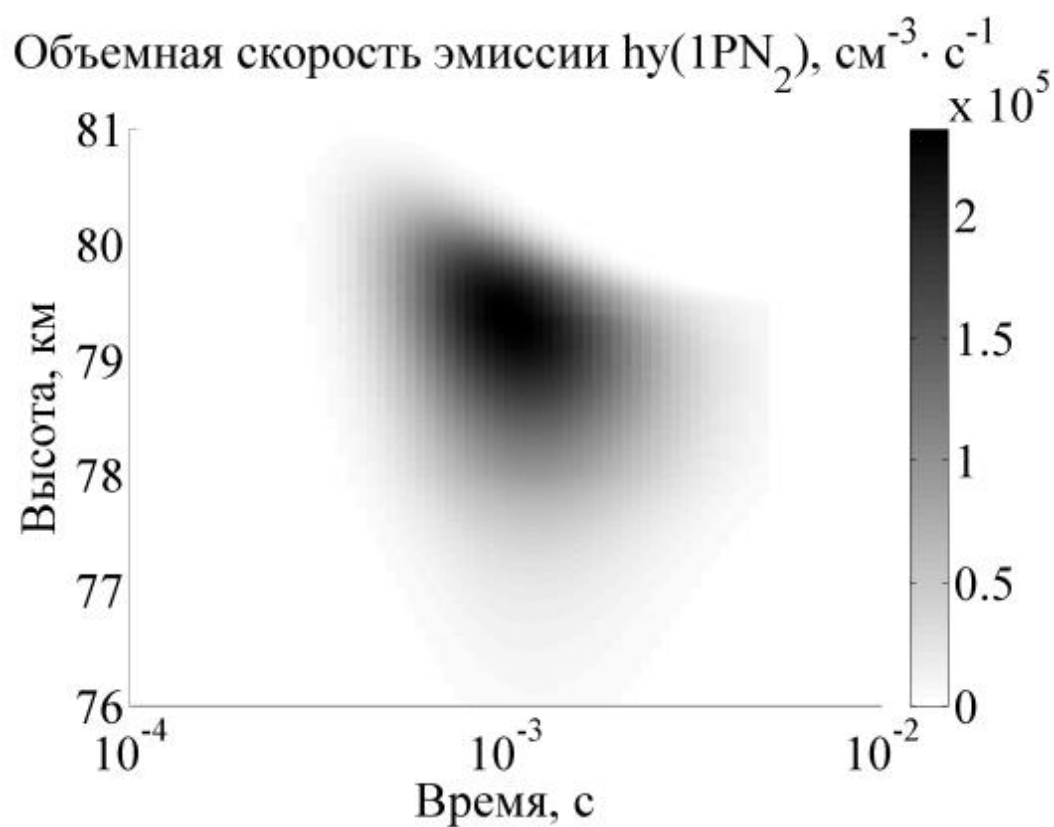
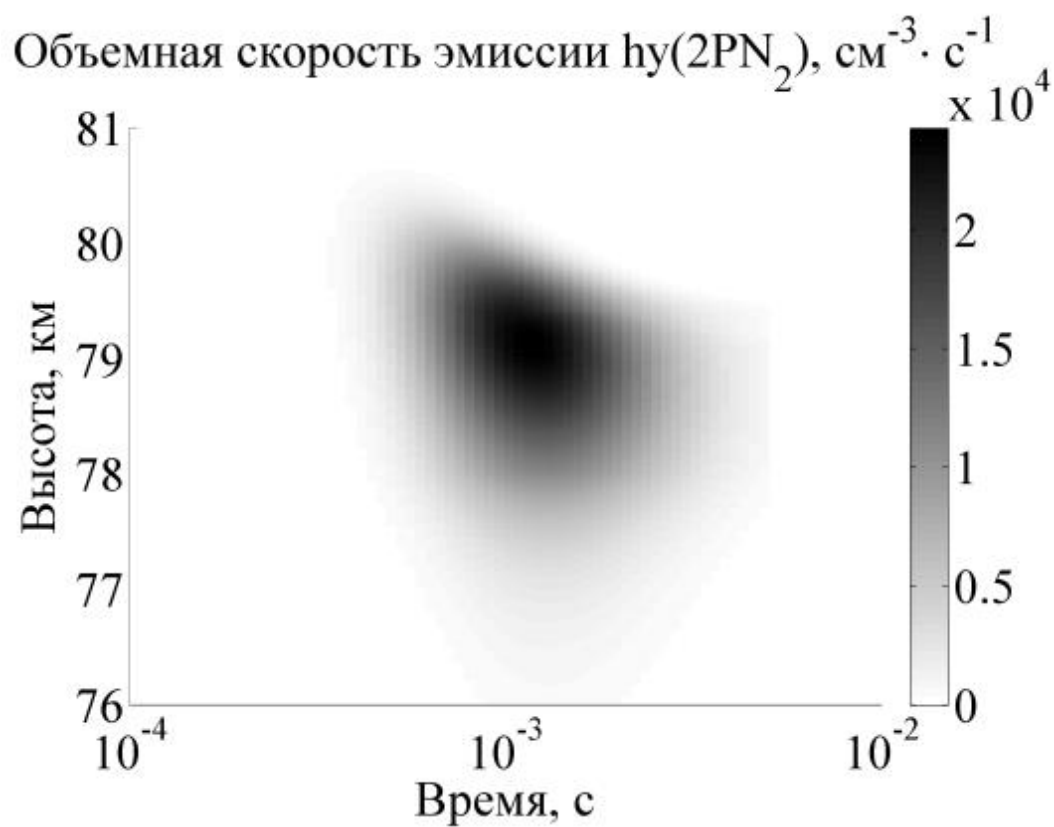
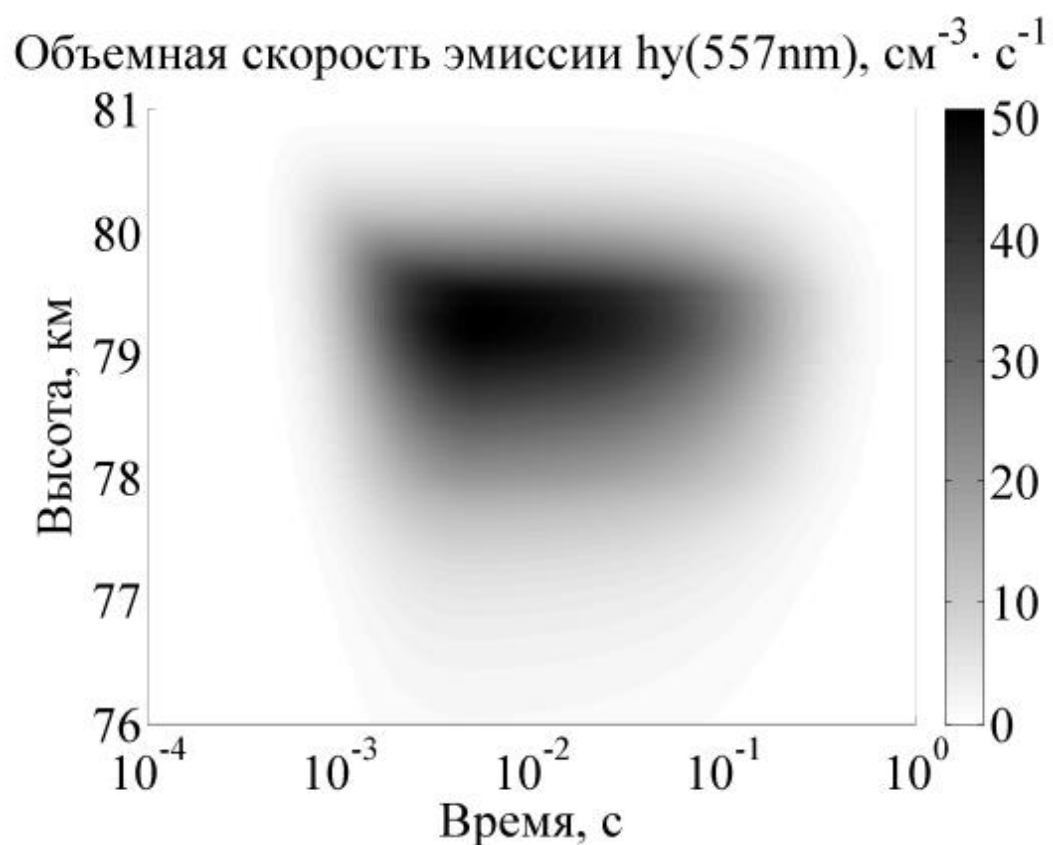
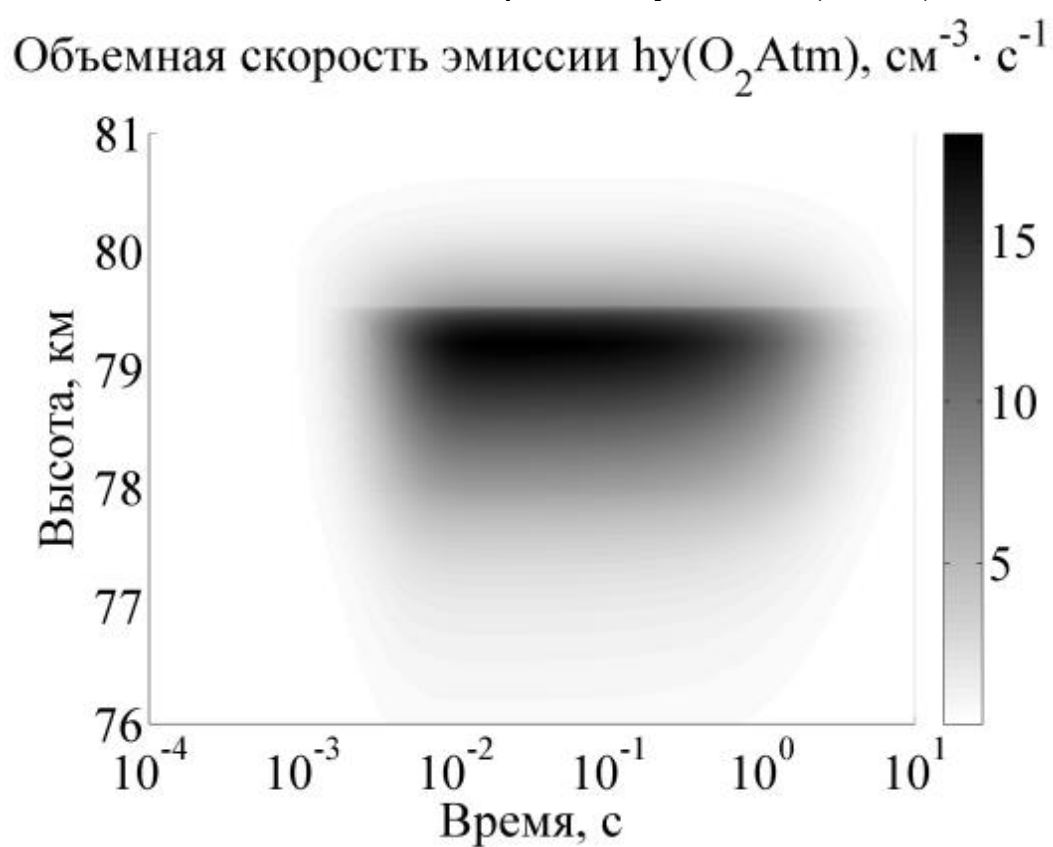


Рис. 2.25 Динамика возмущения параметра ϑ

Рис. 2.26 Объемная скорость излучения $h\nu(1\text{PN}_2)$ Рис. 2.27 Объемная скорость излучения $h\nu(2\text{PN}_2)$

Рис. 2.28 Объемная скорость излучения $h\nu(557\text{nm})$ Рис. 2.29 Объемная скорость излучения $h\nu(\text{O}_2\text{Atm})$

2.6 Исследование зависимости области спрайта от величины дипольного момента в тропосфере

При исследовании разрядных явлений в мезосфере интересным является вопрос о величине области разряда. На Рис. 2.30 показана зависимость величины области диффузного разряда от величины дипольного момента нескомпенсированного заряда в тропосфере. Границы области спрайта определяются по значению $\theta = 128$ Тд. При значении дипольного момента менее 340 Кл·км превышения пробойного поля не наблюдается и возможно развитие гало, но не спрайта. При значении дипольного момента более 340 Кл·км появляется незначительное превышение пробойного поля на высоте 78,2 км, максимальное нормированное электрическое поле достигает 130 Тд, перенесенный заряд в тропосфере 34 Кл. При дальнейшем увеличении тока в молниевом канале происходит постепенное расширение области диффузного разряда. Причем вниз область разрастается значительно больше и может достигать 65 км. В то же время увеличение области вверх ограничивается возрастанием проводимости на высоте выше 81 км, и поле на эти высоты практически не проникает. На Рис. 2.30 темной линией выделена высота, на которой наблюдается максимальное значение нормированного электрического поля. Она практически одинакова для всех расчетов и варьируется от 78,2 до 78,5 км. Рост максимального значения θ в зависимости от тока нелинейный. При росте тока более чем в 3 раза с величины соответствующей началу появления спрайта рост θ менее чем в 2 раза, и максимальные значения не превышают 235 Тд (см. Рис. 2.31). Данный эффект связан с резким увеличением проводимости во время разряда и может быть учтен только в самосогласованной постановке задачи.

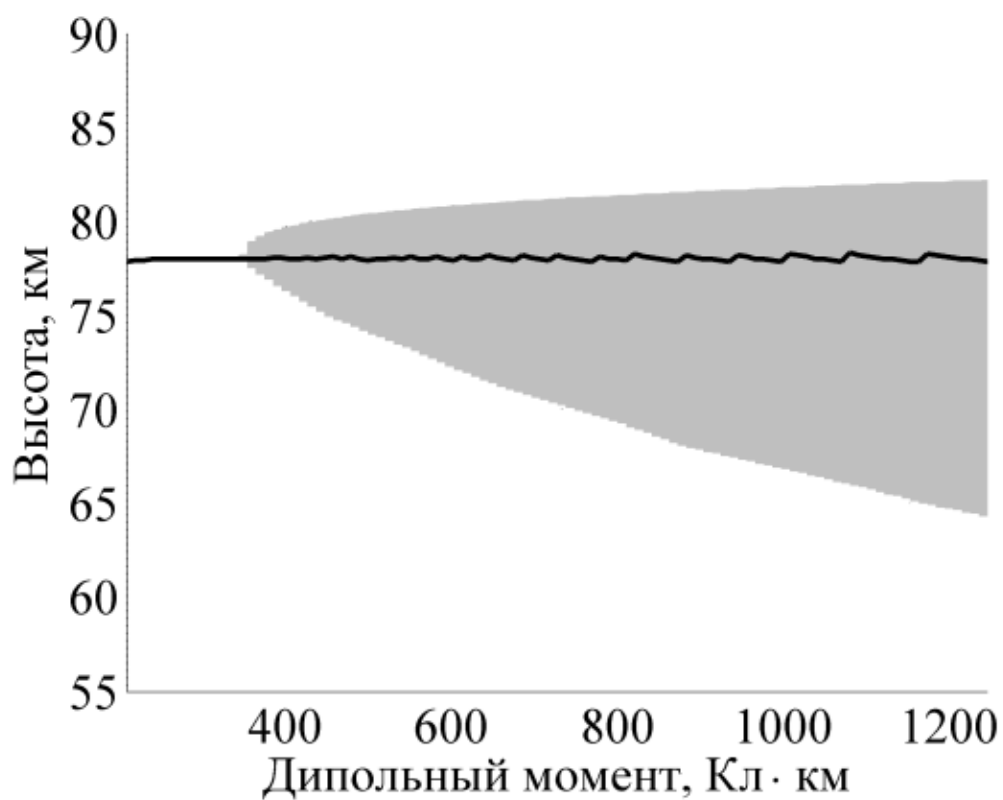


Рис. 2.30 Зависимость размера области диффузного разряда от величины дипольного момента в тропосфере и высота максимального θ

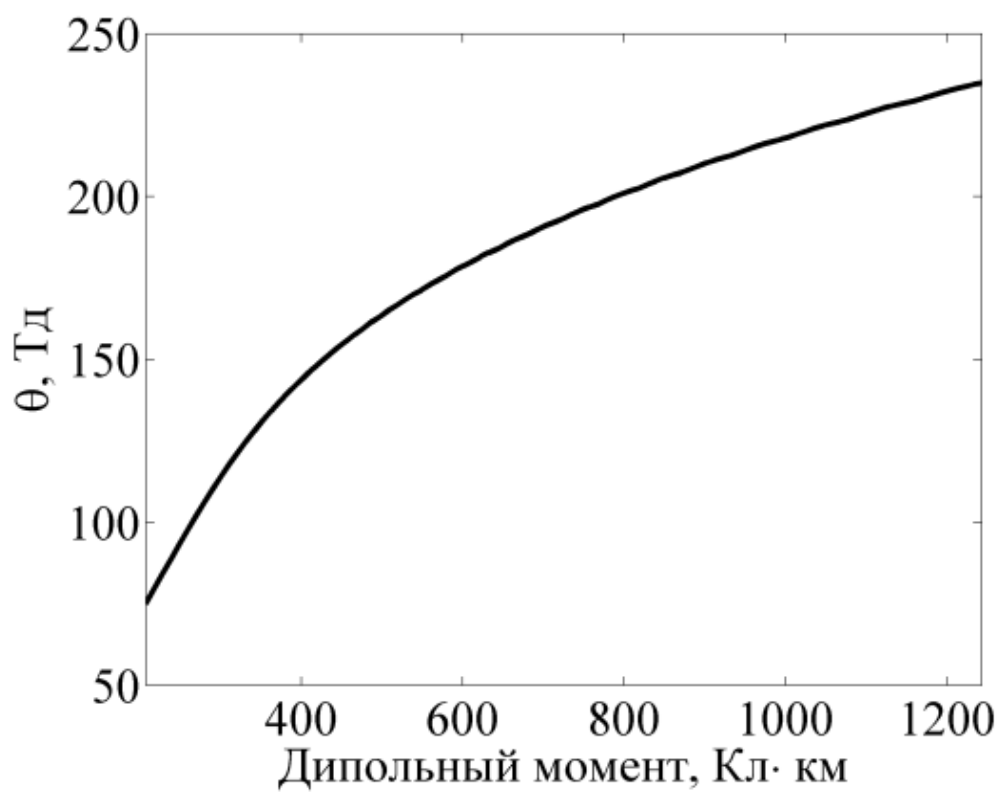


Рис. 2.31 Зависимость максимального параметра θ от величины дипольного момента в тропосфере

2.7 Особенности самосогласованного моделирования и основные результаты

Учет самосогласованного развития поля позволил существенно более корректно провести моделирование высотных разрядов по сравнению с одноточечным моделированием. Однако, следует отметить некоторые особенности и ограничения для модели.

Во-первых, рассмотренная в работе модель является одномерной, при этом диффузионные процессы не учитываются. Реально система дифференциальных уравнений для электрического поля и химических компонент считается на множестве не связанных между собой высот. Для химических компонент с малым временем релаксации отсутствие учета диффузии не критично, так как она не успеет проявиться. Для химических компонент с большими временами релаксации (например, для возмущения концентрации ионов-связок) влияние диффузии может оказаться весьма значительным. Поэтому для развития модели необходимо добавить диффузионные члены в систему дифференциальных уравнений.

Во-вторых, при заданных условиях моделирования верхняя граница диффузной области спрайта составляет примерно 82 км, а не 90 км как показывают эксперименты [22]. Отсутствие разряда выше 82 км связано с невозможностью проникновения поля в область с высокой проводимостью (см. Рис. 2.30). Возможно, необходимо скорректировать дополнительный источник ионизации в сторону уменьшения, чтобы поле могло проникнуть на высоты до 85-90 км, тем более проводимость мезосферы в ночное время не постоянна, или предложить другую параметризацию электрического поля.

В-третьих, полученное значение для минимального дипольного момента 340 Кл·км, необходимого для развития спрайта, достаточно большое (см. Рис. 2.30). В работе [24] зарегистрировано развитие очень маленького спрайта уже при величине дипольного момента 130 Кл·км.

Данный факт говорит о том, что дипольное приближение, применяемое в нашей модели, не позволяет полностью описать процессы, происходящие в мезосфере после молниевой вспышки в тропосфере.

В-четвертых, в данной постановке задачи форма зависимости силы тока в молниевом канале практически не влияет на развитие спрайта. Возможно, учет более тонких особенностей протекания тока в молниевом канале (например, M компоненты) позволит решить вопрос о больших значениях дипольного момента, необходимых для развития спрайта.

3 Одномерная модель электрической структуры стратифицированной области мезомасштабных конвективных систем

3.1 Мезомасштабные конвективные системы

В последнее время большое внимание уделяется исследованию физических процессов, связанных с формированием и развитием в атмосфере мезомасштабных конвективных систем (ММКС) – многоячейковых облачных структур, включающих обширную (несколько сотен километров) область стратификации [13,39,40]. В некоторых районах земного шара ММКС являются достаточно частым явлением и сопровождаются разрушительными ливнями, грозами и шквалами [40–42]. Интерес к таким системам особенно возрос после того, как выяснилась их важная роль в генерации интенсивных положительных разрядов облако-земля, разрядов в средней атмосфере и в динамике глобальной атмосферной электрической цепи [11,43–45].

Характерной особенностью ММКС является высокая молниевая активность (как правило, в ночное время суток) в течение нескольких часов. Как показали измерения электрического поля непосредственно в грозовых облаках, проведенные на баллонах и самолетах, это связано с наличием долгоживущих (до 6-12 часов) слоев электрического заряда в стратифицированной области ММКС [46–50]. Несмотря на сложную аэродинамику и большой горизонтальный масштаб ММКС, на порядок превосходящий размеры обычной грозовой ячейки, распределение вертикальных слоев заряда сохраняет примерно постоянную структуру на протяжении всей стратифицированной области. При этом в большинстве экспериментов проявляется наличие интенсивного тонкого слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы, а также более распределенного слоя отрицательного заряда ниже нулевой изотермы. Даже если при формировании этих зарядовых слоев играет роль

разделение зарядов в конвективной области с ее высокой (до 25-30 м/с) скоростью восходящего воздушного потока, в области стратификации должны действовать дополнительные механизмы электризации, способные длительное время поддерживать стабильность электрической структуры [4,50,51].

Данная глава посвящена рассмотрению проблемы генерации электрического поля и заряда в стратифицированной области ММКС. Основное внимание уделяется анализу механизма формирования и динамики слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы. Развиваемая теория может найти применение и при анализе электрических процессов в слоисто-дождевых облаках, где также наблюдается достаточно высокая электрическая активность, зачастую связанная с высокими электрическими полями вблизи нулевой изотермы [52,53].

Основы применяемого в данной работе подхода были сформулированы в [54], но детальный анализ в рамках предлагаемой модели предпринимается впервые. Ранее возможные механизмы образования слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах обсуждались в работах [4,50,51], но лишь на качественном уровне. В работе [55] была разработана двумерная численная модель электрической структуры ММКС, однако даже качественного согласия с экспериментальными результатами для стратифицированной области достигнуто не было, причем из-за сложности гидродинамического блока подобных моделей выявить основные факторы, влияющие на формирование зарядовых слоев, не представляется возможным.

3.2 Механизмы зарядки облачных частиц

Проблемы зарядки облачных частиц традиционно занимают важнейшее место в исследованиях грозового электричества. В литературе рассматривается множество механизмов разделения заряда, обладающих специфической микрофизикой [39,56–59]. Они зависят от большого числа факторов, в частности, от температуры, фазового состава, размеров облачных частиц. Для динамики процесса электризации особенно важную роль играет зависимость величины заряда, передаваемого в единичном акте электризации, δq от напряженности электрического поля, поэтому все механизмы принято подразделять на индукционные и безындукционные (неиндукционные). Для первого класса механизмов величина δq зависит от величины и направления внешнего электрического поля и связана с поляризацией взаимодействующих частиц. Для другого класса механизмов величина δq , разделяемого при столкновениях гидрометеоров, не зависит в явном виде от напряженности электрического поля.

Многие авторы подчеркивают важную роль безындукционного механизма зарядки при столкновении кристаллов льда и частиц снежной крупы [58–63]. Применительно к типичной грозовой ячейке более или менее общепринятой является «диполь-трипольная» модель электрической структуры облака [58], включающая «основные» отрицательный и положительный заряды (в среднем несколько десятков кулон по величине), и меньший по величине (порядка 10 Кл) «нижний» положительный заряд. Основной отрицательный заряд занимает обычно интервал высот, соответствующий температурам от -10 до -25°C , тогда как располагающийся выше основной положительный заряд распределен в более широком интервале высот в верхней части облака. Средние плотности электрического заряда в грозовых облаках не превышают обычно нескольких нКл/м³, а максимальная напряженность электрического поля составляет 200-300 кВ/м (что существенно ниже порога пробоя

сухого воздуха) [13,39]. В лабораторных экспериментах (где измерялся заряд, передаваемый мишени) было установлено, что величина и знак заряда существенно зависят от температуры воздуха и содержания влаги (liquid water content), причем существует характерное значение температуры (так называемая точка реверса, лежащая обычно между -15°C и -20°C), при которой меняется знак заряда, передаваемого мишени при столкновении [59–61]. Существование точки реверса, хотя и не вполне понятно с точки зрения микрофизики, является весьма привлекательным для объяснения трипольной структуры грозовой ячейки. И хотя детали параметризации этого механизма вот уже в течение более чем 30 лет остаются дискуссионными, последние лабораторные эксперименты позволили в значительной мере понять причину расхождений в данных различных групп экспериментаторов [62,63] и приблизиться к построению микрофизической модели электризации при столкновениях льда и снежной крупы.

Как показывают измерения, в верхней части области стратификации ММКС, лежащей в области низких температур, наблюдается слой положительного заряда, а под ним – слой отрицательного заряда, который обычно занимает диапазон высот в полтора раза меньший [4,51]. Формирование этих слоев, скорее всего, действительно связано с электризацией мелких кристаллов льда и частиц снежной крупы при столкновениях. При этом вполне вероятным является вариант, при котором данные заряды активно образуются в области конвекции, а затем сносятся в область стратификации адвективными потоками воздуха.

Как уже отмечалось, наиболее характерной особенностью стратифицированной области ММКС является наличие интенсивного тонкого слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы, а также более распределенного слоя отрицательного заряда ниже нулевой изотермы. Анализируя экспериментальные данные, можно заметить, что слой положительного заряда иногда располагается несколько ниже или

выше нулевой изотермы, но всегда явно привязан к ней. Поэтому естественным является предположение, что при формировании этого слоя положительного заряда основную роль играет электризация при таянии частиц льда. Учитывая, что отрицательный заряд находится ниже нулевой изотермы и распределен в большем диапазоне высот, можно предположить, что крупные тающие гидрометеоры заряжены отрицательно, а мелкие капли воды – положительно. Это предположение подтверждается результатами измерений зарядов гидрометеоров и облачных частиц [50]. Оно также согласуется с тремя особенностями искомого механизма, наблюдаемыми в экспериментах и отмеченными авторами работы [4]: 1) высокие значения плотности заряда должны наблюдаться на уровне и/или вблизи нулевой изотермы по мере того, как все большее число частиц осадков проходит этот уровень; 2) меньшие значения плотности заряда обратного знака должны формироваться частицами осадков, переносящими заряд к земле; 3) концентрация облачных частиц на уровне и/или вблизи нулевой изотермы должна возрастать со временем.

Существующие лабораторные эксперименты не дают ясной и однозначной картины разделения зарядов при таянии ледяных кристаллов [57,64–66]. Во всех опытах по измерению зарядов на мелких оторвавшихся от тающей частицы каплях воды обнаруживаются как положительно, так и отрицательно заряженные, причем преобладающий знак заряда отличается в различных экспериментах. Физические механизмы, приводящие к разделению зарядов, не вполне ясны. Очевидно, однако, что в реальных условиях на знак отрываемого заряда может существенно влиять электрическое поле, т.е. может реализоваться индукционный механизм вследствие сдувания поляризованного заряда на крупной частице. Возможно также, что определенную роль играет в рассматриваемых процессах и безындукционная зарядка, связанная с различиями в

подвижностях ионов OH^- и H^+ , существующих в гидратированном состоянии во льду и в воде [57,64].

Важным экспериментальным фактом является наличие ледяных агрегатов вблизи нулевой изотермы и резкий рост концентрации облачных частиц в слое таяния (количество частиц со средним диаметром 10 мкм возрастает на 2 порядка между слоями 0°C и $0,5^\circ\text{C}$ [67]). Если основной вклад в электризацию вблизи нулевой изотермы вносят процессы поляризации ледяных агрегатов в электрическом поле с последующим их распадом (в основном, вследствие таяния), это означает, что процессы индукционной зарядки активизируются по мере роста концентрации ледяных агрегатов.

Величина поляризованного заряда на частице пропорциональна квадрату ее радиуса, поэтому эффект должен существенно зависеть от концентрации ледяных агрегатов с размерами порядка и более 1 мм. Величина проводимости и форма агрегатов также может влиять на величину поляризационного заряда и среднего заряда, разделяющегося при разрушении агрегатов и сдувании с них мелких водяных капель. Данные, указывающие на рост концентрации ледяных агрегатов на высотах несколько сотен метров над нулевой изотермой [67], делают естественным предположение об активизации процессов индукционной зарядки на этих высотах. Это обстоятельство, наряду с наличием медленного восходящего потока над нулевой изотермой, снимает отмеченную в работах [4],[68] трудность с привлечением механизма таяния, касающуюся образования заряженных слоев выше нулевой изотермы.

3.3 Базовая модель генерации электрического поля

Предлагаемая модель основана на системе уравнений квазигидродинамики основных фракций, участвующих в процессах формирования зарядовых слоев, которая, благодаря большому горизонтальному масштабу описываемой системы, анализируется в одномерном приближении. Ключевую роль при написании этой системы играет параметризации процессов электризации облачных частиц, для чего необходимо записать выражение для величины передаваемого за одно соударение заряда δq .

В численной модели анализируются оба механизма зарядки тающих гидрометеоров: индукционный и безындукционный. Рассматривается поток тающих гидрометеоров с постоянной концентрацией. При прохождении области таяния, лежащей в окрестности нулевой изотермы, от них отрываются и сносятся встречным по отношению к гидрометеору потоком воздуха мелкие капли воды, уносящие электрический заряд. Область таяния определяется функцией таяния $f(z)$, которая характеризует интенсивность процесса разделения зарядов в зависимости от высоты в окрестности нулевой изотермы. При приближении ледяной частицы к нулевой изотерме на ней начинается формирование тонкого слоя воды, которая начинает уносить электрический заряд с тающего гидрометеора. По мере развития процесса величина заряда, уносимого каждой каплей, увеличивается. Однако данный процесс разделения зарядов может идти только при достаточно тонкой водной оболочке. Поэтому, начиная с некоторой высоты, процесс отрыва электрических зарядов замедляется, а потом, несмотря на то, что капля с тающего гидрометеора отрывается все больше, зарядка прекращается.

Величина заряда, разделяемого при таянии гидрометеоров, для безындукционного механизма зарядки зависит от концентрации тающих гидрометеоров, частоты отрыва капель и функции таяния. Для

индукционного механизма добавляется явная зависимость от напряженности электрического поля.

Как уже упоминалось ранее, область стратификации ММКС характеризуется небольшими скоростями воздушных потоков до 0,5 м/с, которые при этом могут флуктуировать по направлению [67]. Характерные радиусы тающих гидрометеоров составляют 1-2 мм. Соответствующая скорость падения по формуле Стокса, составляет 1,25-5 м/с. Отрывающиеся от тающих гидрометеоров капли имеют размер на 1-2 порядка меньше. От каждого гидрометеора в процессе таяния может оторваться не менее тысячи капель до полного исчезновения. За время движения гидрометеора от нулевой изотермы к Земле от него отрывается не более сотни частиц. Так как уменьшение массы в области интенсивной электризации не значительное, то считается, что скорость движения гидрометеоров не изменяется. Предполагается, что изменение геометрии тающей частицы и влияние воздушного потока также не ведет к существенным изменениям скорости падения.

Предлагаемая модель включает в себя уравнения непрерывности для плотности заряда различных фракций, участвующих в процессах формирования зарядовых слоев, и уравнение Пуассона. Дополнительно учитывается зависимость скорости аэроионов от величины электрического поля, зависимость скорости образования аэроионов от высоты и приведены выражения для электрического заряда, отрываемого в единичном акте электризации тающего гидрометеора при учете индукционного и безындукционного механизма разделения заряда.

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \frac{\partial (V_Q \cdot \rho_Q)}{\partial z} = -R \cdot f(z) - \gamma \cdot \rho_Q \cdot A_+ \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho_q}{\partial t} + \frac{\partial (V_q \cdot \rho_q)}{\partial z} = R \cdot f(z) + \gamma \cdot \rho_q \cdot A_- \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial A_+}{\partial t} + \frac{\partial(V_+ \cdot A_+)}{\partial z} = I(z) + \kappa \cdot A_+ \cdot A_- + \gamma \cdot A_+ \cdot \rho_Q \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial A_-}{\partial t} + \frac{\partial(V_- \cdot A_-)}{\partial z} = -I(z) - \kappa \cdot A_+ \cdot A_- - \gamma \cdot A_- \cdot \rho_q \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial z} = \rho_q + \rho_Q + A_+ + A_- + \rho_{ADD} \quad (3.5)$$

$$V_{\pm}(z) = V_{conv} \pm \mu \cdot E \quad (3.6)$$

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(z / h) \quad (3.7)$$

$$R = \begin{cases} \Delta q_0 \cdot \nu \cdot N_Q, & \text{безындукционный механизм} \\ \alpha \cdot \nu \cdot N_Q \cdot E, & \text{индукционный механизм} \end{cases} \quad (3.8)$$

Уравнения (3.1-3.4) описывают баланс плотности заряда тающих гидрометеоров (т.е. ледяных агрегатов) - ρ_Q , заряженных капель воды - ρ_q , положительных и отрицательных аэроионов воздуха - A_+ и A_- . Уравнение (3.7) определяет $I(z)$ - интенсивность ионообразования, растущую экспоненциально с высотой с характерным масштабом h . Величина функции R в уравнении (3.8) выбирается в зависимости от механизма разделения зарядов - безындукционного или индукционного. Для безындукционного механизма зарядки N_Q - концентрация тающих гидрометеоров, ν - частота отрыва заряженных капель воды, Δq_0 - максимальный заряд, отрывающийся в единичном акте электризации. Зависимость от напряженности электрического поля отсутствует. Для индукционного механизма зарядки вводится α - коэффициент поляризации тающих гидрометеоров и линейная зависимость параметра R от напряженности электрического поля. Величина $R \cdot f(z)$ в уравнениях (3.1-3.2) определяет интенсивность разделения зарядов и по смыслу аналогична функции $I(z)$ в уравнениях (3.3-3.4) для аэроионов. Уравнение (3.5) представляет собой уравнение Пуассона, где учитываются все заряды, в

том числе и заряды, образованные из-за процессов электризации в верхней части облака ρ_{ADD} , которые в данном разделе мы считаем заданными и их динамика не учитывается. Уравнение (3.6) описывает скорость движения аэроионов, полностью определяемую скоростью воздушного потока V_{conv} , электрическим полем и подвижностью аэроионов μ . Коэффициент рекомбинации легких аэроионов $\kappa=10^8 \text{ м}^3/(\text{Кл}\cdot\text{с})$, коэффициент прилипания аэроионов к каплям и гидрометеорам $\gamma=10^7 \text{ м}^3/(\text{Кл}\cdot\text{с})$.

Профиль скорости восходящего потока в области стратификации в ММКС имеет свои характерные особенности [51,67]. Величина средней вертикальной скорости движения воздуха мала – порядка десятков см/с. Картина осложняется, однако, турбулентными пульсациями вертикальной скорости и наличием противоположно направленных горизонтальных потоков воздуха выше и ниже нулевой изотермы. Над нулевой изотермой часто наблюдается медленный восходящий поток, тогда как ниже (иногда и на уровне) нулевой изотермы - нисходящий поток. Такое распределение скорости будет рассмотрено ниже. Вначале рассмотрен более простой случай - когда над землей восходящий поток отсутствует, потом идет плавный рост вертикальной компоненты скорости потока с выходом на некоторое постоянное значение и последующим снижением скорости. Для расчетов принят степенной рост скорости до высоты 1 км с выходом на значение 0,5 м/с, остающейся постоянной до высоты 6 км. При дальнейшем увеличении высоты скорость падает по экспоненциальному закону с характерным масштабом 3 км. Именно скоростью воздушного потока определяется движение легких аэронов воздуха и в значительной мере движение оторвавшихся от тающих гидрометеоров заряженных капель воды.

Легкие ионы воздуха постоянно образуются в атмосфере и отвечают за естественную проводимость. В исследуемом диапазоне высот от 0 до 20 км для моделирования источника легких аэроионов использовалась экспоненциальная функция $I(z)$ с характерным масштабом роста $h=6 \text{ км}$.

Скорость образования аэроионов около поверхности Земли составляет 10 пар в секунду в каждом кубическом сантиметре. Для расчетов принято, что на каждом аэроионе находится один элементарный заряд. Заметим, что прилипание аэроионов к нейтральным облачным частицам (не учтенное в системе) уменьшает проводимость облачной среды и может повлиять на динамику процесса электризации. Непосредственный учет этого процесса даже в простейшем приближении приводит к существенному усложнению исследуемой системы. Между тем, как показывают дополнительные аналитические и численные расчеты, при наличии интенсивного прилипания к гидрометеорам и заряженным облачным частицам, которое детально учитывается в работе, дополнительный учет прилипания к нейтральным частицам лишь незначительно меняет динамику процесса электризации заряженных слоев.

Начальное поле создается зарядами, расположенными над нулевой изотермой и обозначенными в системе уравнений ρ_{ADD} . Положительный заряд распределен по нормальному закону в интервале высот от 7 до 10 км, отрицательный – от 5,2 до 7 км. Максимальная плотность положительного заряда составляет $4 \cdot 10^{-11}$ Кл/м³, отрицательного – $6,65 \cdot 10^{-11}$ Кл/м³, причем интеграл от суммарного добавленного заряда, отнесенный к единице площади, равен нулю. Величина этих зарядов в расчетах постоянна во времени за исключением случаев, оговоренных отдельно. Предполагается, что указанные слои генерируются и постоянно поддерживаются за счет действия столкновительных механизмов зарядки на высотах, близких к температуре точки реверса -15° С. Считается, что в начале моделирования на тающих гидрометеорах и на мелких каплях воды, образующихся при таянии гидрометеоров, заряды отсутствуют.

3.4 Результаты моделирования с учетом безындукционного механизма зарядки тающих гидрометеоров

Перед подробным рассмотрением динамики электрического поля с учетом процессов генерации около нулевой изотермы, необходимо промоделировать поведение системы, учитывая только добавленные сверху заряды ρ_{ADD} . В начальный момент времени хорошо виден горб поля на высотах от 5 до 10 км из-за добавленных зарядов (см. Рис. 3.1). Напряженность поля достигает 60 кВ/м в начальный момент времени. В отсутствие процессов электризации в окрестности нулевой изотермы электрическое поле экранируется возникающими слоями аэронов воздуха. За 300 с электрическое поле существенно релаксирует и приобретает квазистационарную структуру. В области добавленных зарядов поля уменьшаются более чем в 2 раза и достигают только 25 кВ/м. На границе с Землей напряженность электрического поля составляет 1 кВ/м и направлена вверх, то есть имеет полярность, противоположную полю хорошей погоды. В верхней части области моделирования поле падает практически до нуля. Аналогичные процессы экранирования будут происходить при включении генерации зарядов в окрестности нулевой изотермы. Подвижность в расчетах данного раздела $\mu = 0,1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Рассмотрим теперь простую модель с генерацией зарядов в окрестности нулевой изотермы с учетом безындукционного механизма зарядки. На высотах выше 5 км не происходит никаких изменений в структуре и динамике электрического поля. Поле полностью определяется формирующимися экранирующими слоями аэронов (см. Рис. 3.2). Но вблизи нулевой изотермы, то есть на высоте около 4 км, видно образование мощного и тонкого слоя положительного заряда, что соответствует резкому возрастанию напряженности поля. Максимальная напряженность поля нелинейно растет со временем, и при времени численного счета $t=2 \cdot 10^3 \text{ с}$ достигает величины 70 кВ/м (см. Рис. 3.4). Ниже и выше нулевой

изотермы видны размытые слои отрицательного заряда (см. Рис. 3.3). Слой положительного заряда, сосредоточенного на оторвавшихся от тающих гидрометеоров заряженных каплях воды, а слой отрицательного заряда на тающих гидрометеорах. Сверху над слоем положительного заряда образуется слой отрицательного заряда, сосредоточенного на легких аэроах воздуха (см. Рис. 3.5).

После начала работы генератора около нулевой изотермы начинается разделение зарядов на тающих гидрометеорах. Снизу оказывается отрицательный заряд, а сверху равный ему положительный. При такой структуре зарядов значение поля сначала падает, а потом возрастает до величины, с которой начало свое падение (т.е. образуется горб поля). Однако на экспериментальных профилях поля, приведенных в [46] (см. Рис. 3.8), электрическое поле создается тремя слоями заряда, что обусловлено дополнительным отрицательным зарядом, сосредоточенным над слоем положительного заряда. В модели этот заряд возникает из-за переноса нижнего отрицательного заряда вверх. Ниже области нулевой изотермы наблюдается отрицательный заряд на гидрометеорах, на которых происходит рекомбинация положительных аэроионов. С небольшим восходящим потоком преимущественно отрицательные аэроа переносятся выше области нулевой изотермы и из-за разности скоростей с мелкими каплями воды образуют слой отрицательного заряда выше (см. Рис. 3.5), причем плотности зарядов на легких аэроах сопоставимы с добавленными и генерируемыми зарядами (см. Рис. 3.5). Следует заметить, что динамика роста величины положительного заряда на каплях воды замедляется со временем и система приходит в квазистационарное состояние.

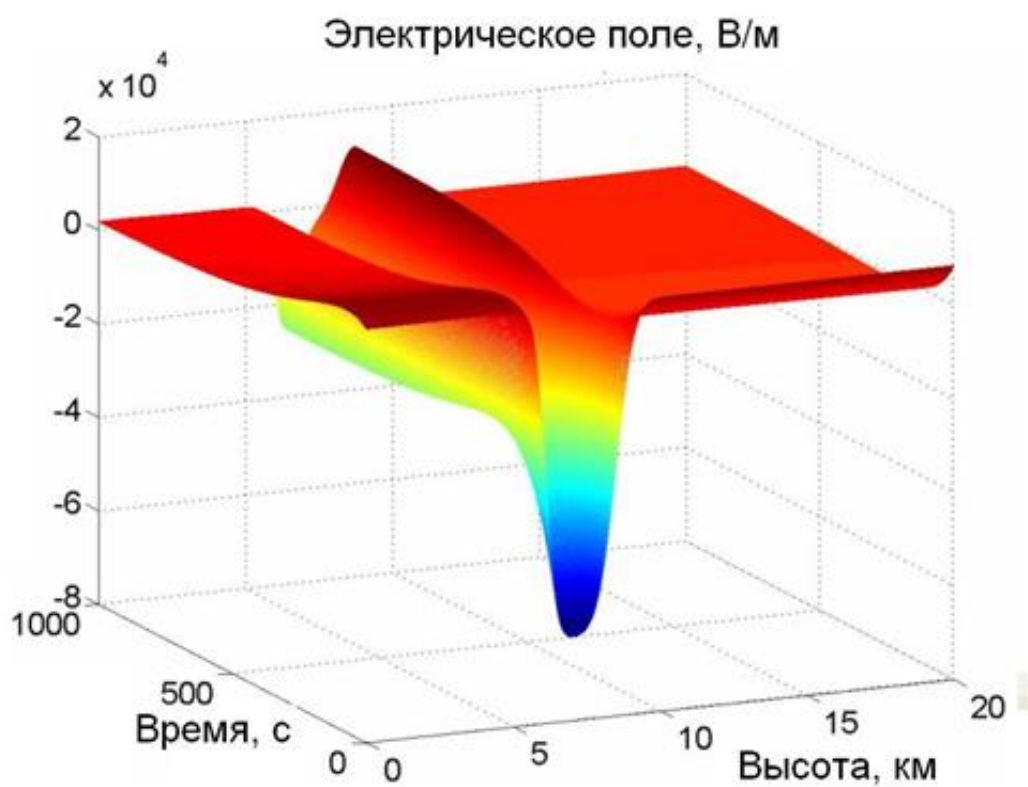


Рис. 3.1 Динамика напряженности электрического поля без процессов генерации около нулевой изотермы (базовая модель)

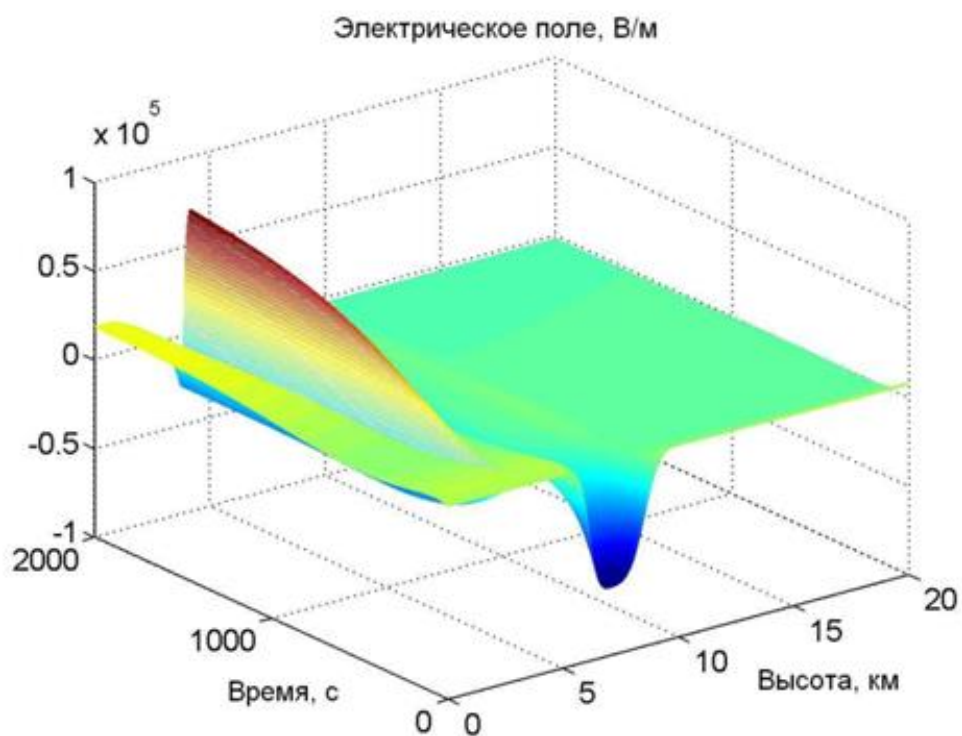


Рис. 3.2 Динамика электрического поля с учетом безындукционного механизма зарядки около нулевой изотермы

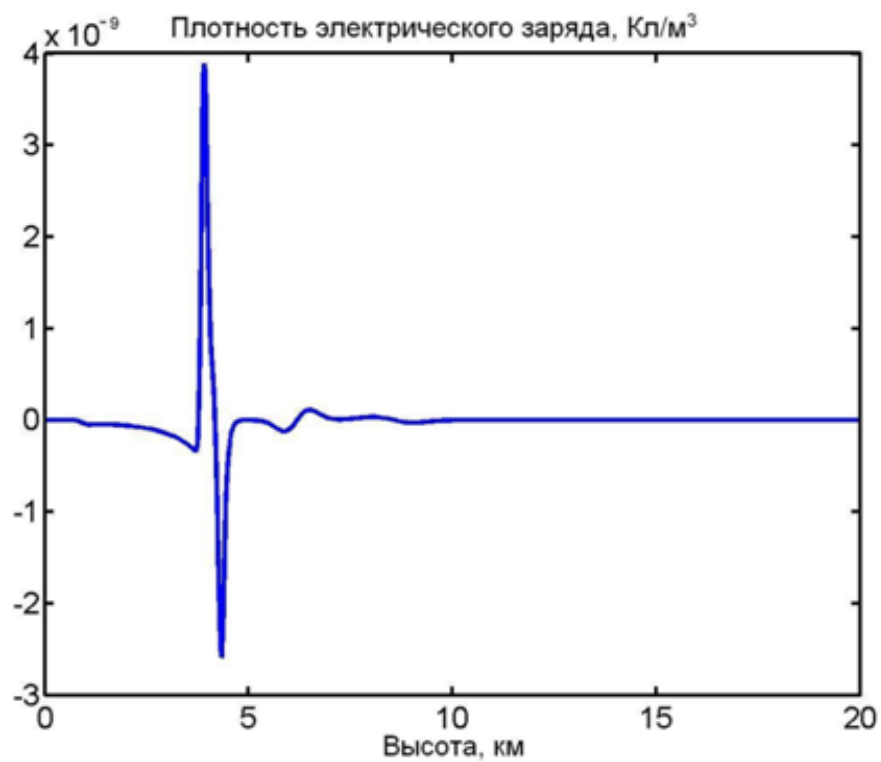


Рис. 3.3 Профиль плотности электрического заряда

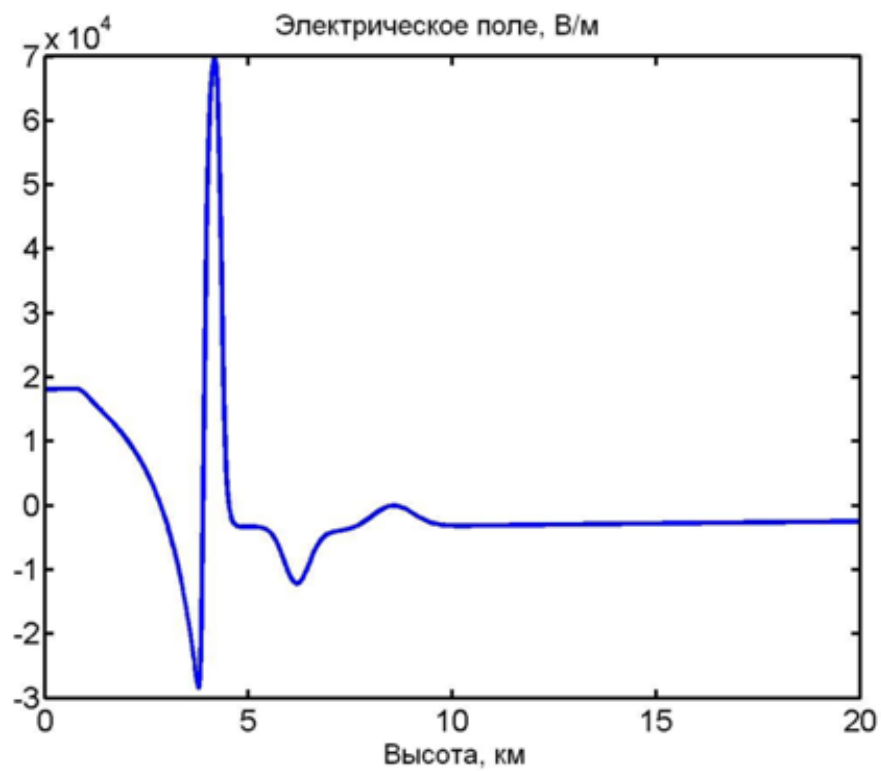


Рис. 3.4 Профиль напряженности электрического поля

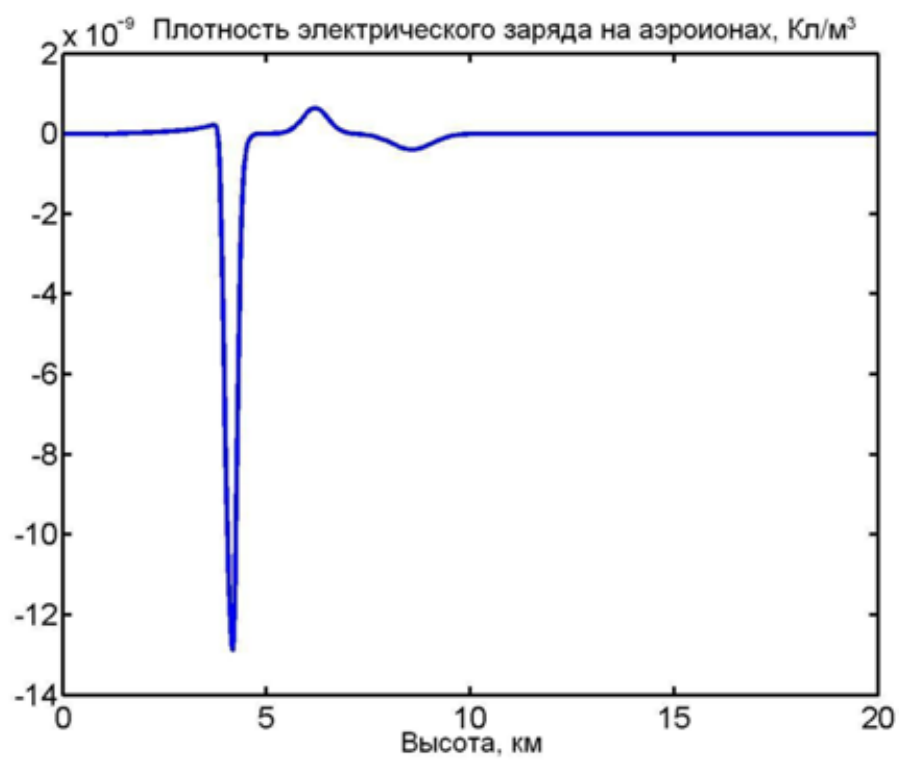


Рис. 3.5 Профиль плотности электрического заряда на легких аэроах воздуха

3.5 Результаты моделирования с учетом индукционного механизма зарядки тающих гидрометеоров

Для исследования эффектов индукционного механизма разделения зарядов при таянии, приводящих к формированию наблюдаемой структуры поля, необходимо наложить более жесткое условие на скорости движения различных фракций. Оторвавшиеся от тающих гидрометеоров капли воды либо зависают на одной высоте, либо медленно падают, а легкие аэроны воздуха сносятся восходящим потоком. Для численного моделирования взята скорость воздушного потока направленная вверх 0,5 м/с, скорость легких капель воды направлена вниз и равна 0,1 м/с. Тяжелые частицы падают со скоростью 1,5 м/с. При выбранных параметрах существенных отличий во временной динамике поля между результатами расчетов, полученными при индукционном и безындукционном механизмах таяния, не выявляется (см. Рис. 3.6, Рис. 3.7, Рис. 3.4). Существенным преимуществом индукционного механизма таяния является то, что физические процессы, ведущие к разделению зарядов, более понятны.

Наиболее простым, но достаточно часто реализующимся в экспериментах является профиль электрического поля так называемых ММКС типа Б, представленный на Рис. 3.8 [46]. Для сравнения был рассчитан профиль электрического поля с дополнительными условиями. Добавлен слой отрицательного заряда над нулевой изотермой (от 4,5 до 6 км, распределенный по гауссову закону), равномерно растущий во времени (т.е. обусловленный постоянно действующим механизмом сепарации зарядов) и связанный, по предположению, с горизонтальной адвекцией зарядов из конвективной области. Максимальный заряд в слое достигал значения $5 \cdot 10^{-10}$ Кл/м³. Для учета специфики аэродинамических потоков в стратифицированной области, рассмотрен профиль с изменением направления скорости воздушного потока в окрестности

нулевой изотермы: над нулевой изотермой наблюдается медленный восходящий поток, а ниже нисходящий (см. Рис. 3.10). На Рис. 3.9 показан профиль электрического поля, формирующегося за время $2 \cdot 10^3$ с, практически полностью повторяющий экспериментальный профиль не только качественно, но и количественно (см. Рис. 3.8). На профиле четко виден слой положительного заряда, образовавшийся вследствие действия индукционного механизма разделения зарядов около нулевой изотермы, находящейся на 4 км. В положительном поле положительный электрический заряд индуцируется на верхней части тающей частицы и при отрыве капель сносится медленным восходящим потоком. Выше этого слоя виден тонкий экранирующий слой отрицательного заряда, появляющийся в расчетах вследствие выноса отрицательных аэроионов восходящим потоком воздуха из области, имеющей отрицательный заряд и характеризующейся интенсивным прилипанием положительных аэроионов к тающим гидрометеорам. Таким образом, при формировании профиля поля важную роль играет профиль вертикальной скорости воздушного потока, а роль легких аэроионов не ограничивается релаксацией электрических зарядов - они дают существенный вклад в формирование электрической структуры грозовых облаков.

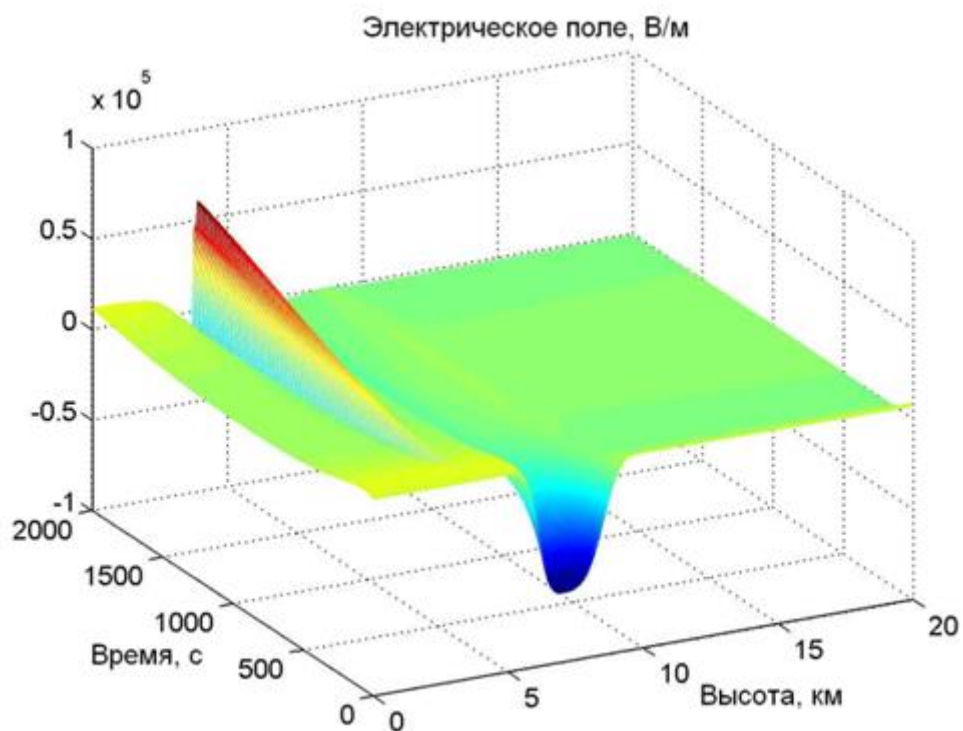


Рис. 3.6 Динамика электрического поля с учетом индукционного механизма зарядки около нулевой изотермы

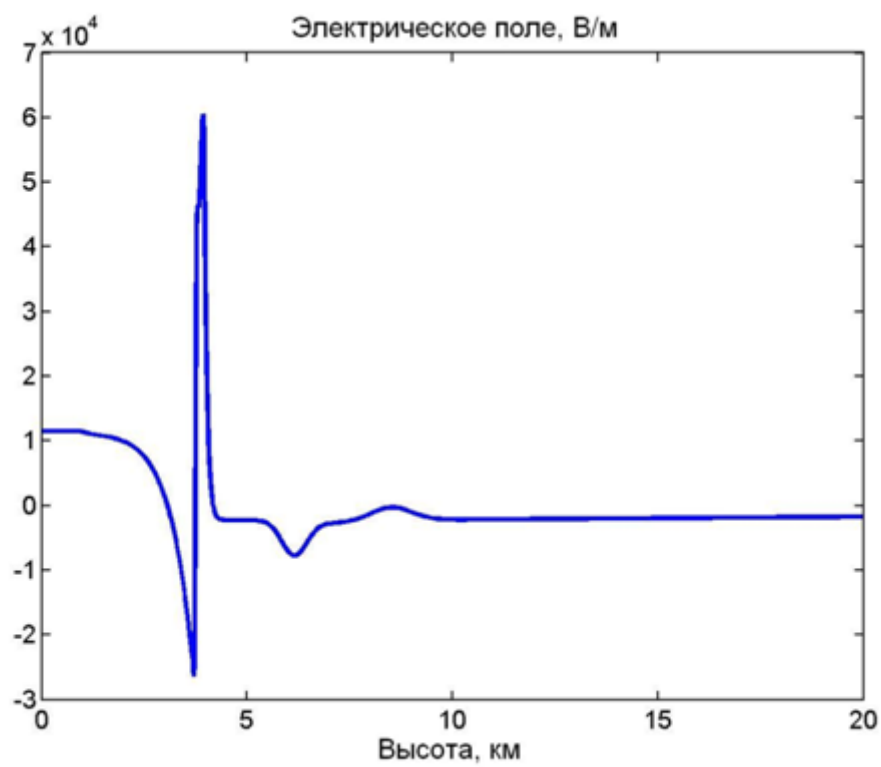


Рис. 3.7 Профиль напряженности электрического поля

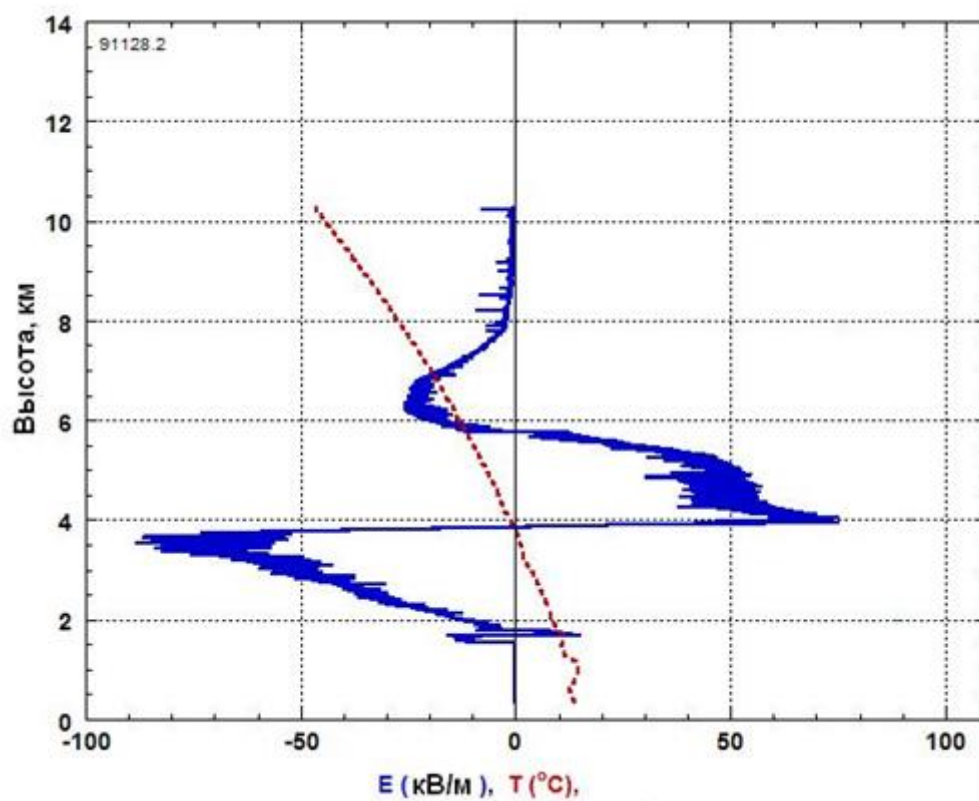


Рис. 3.8 Профиль электрического поля для ММКС типа Б в соответствии с экспериментальными данными [46]

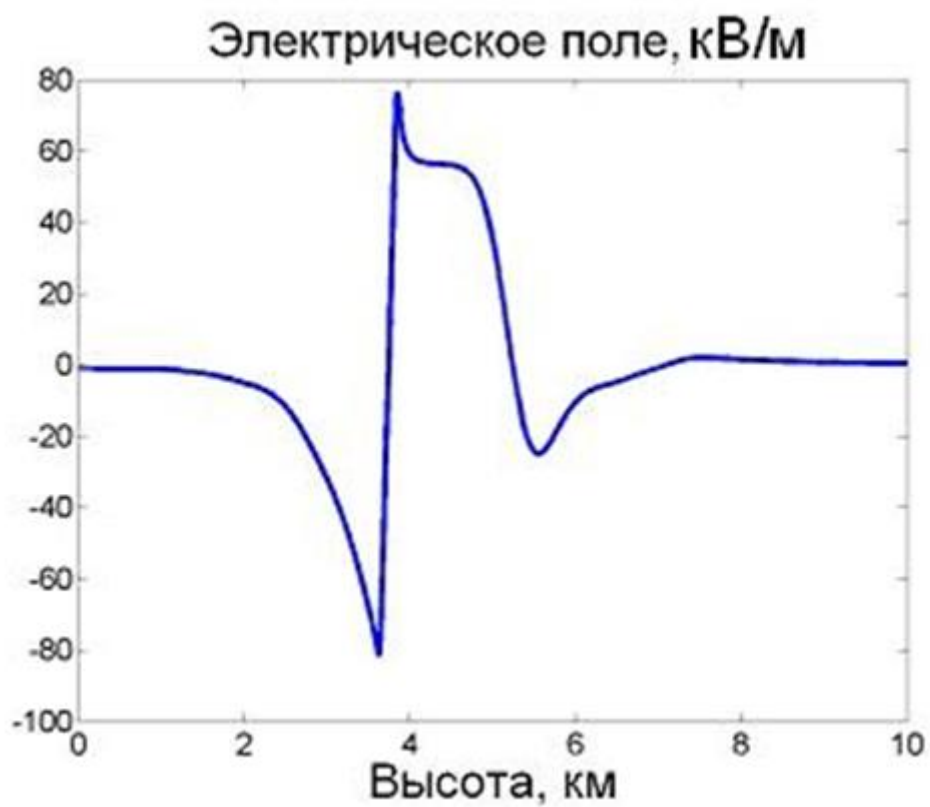


Рис. 3.9 Профиль напряженности электрического поля

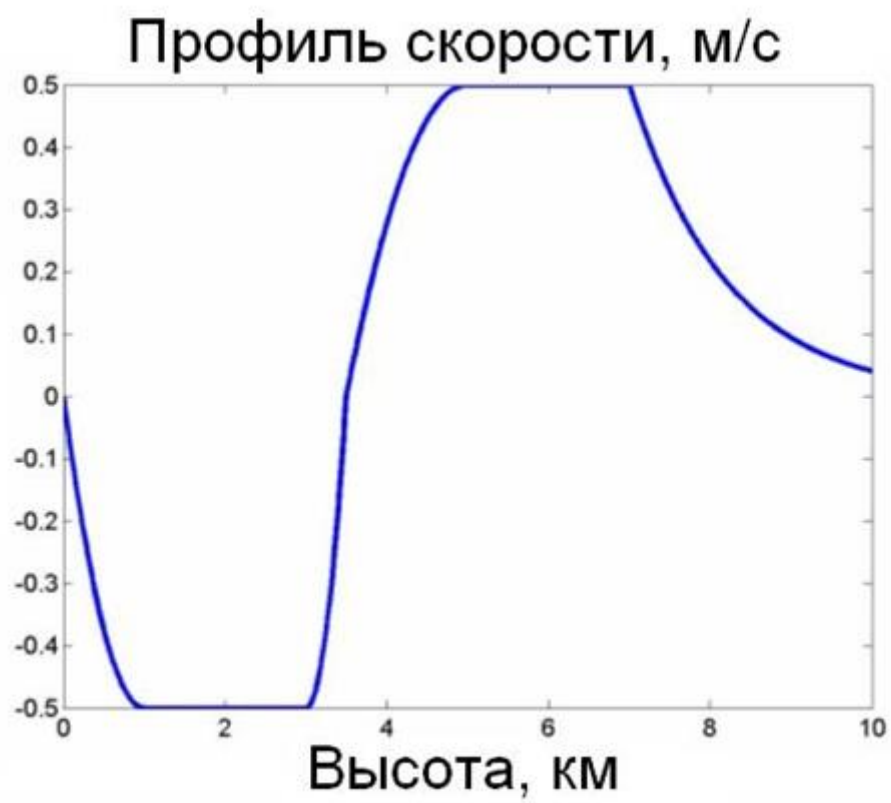


Рис. 3.10 Профиль скорости движения воздуха

3.6 Моделирование многослойной структуры заряда с учетом поляризации гидрометеоров и капель при прилипании аэроионов

Для учета поляризации ледяных агрегатов и капель воды при прилипании аэроионов воспользуемся следующими соотношениями из работы [69], определяющие частоты прилипания аэроионов к заряженным частицам.

$-q_M < q_C < q_M$	$a = n_1 \cdot \mu_1 \cdot E \cdot 3 \cdot \pi \cdot r_C^2 \left(1 - \frac{q_C}{q_M}\right)^2$	$b = n_2 \cdot \mu_2 \cdot E \cdot 3 \cdot \pi \cdot r_C^2 \left(1 + \frac{q_C}{q_M}\right)^2$
$q_C > q_M$	$a = 0$	$b = n_2 \cdot \mu_2 \cdot \left(\frac{q_C}{\varepsilon_0}\right)$
$q_C < -q_M$	$a = -n_1 \cdot \mu_1 \cdot \left(\frac{q_C}{\varepsilon_0}\right)$	$b = 0$

Таблица 3.1 Частоты прилипания аэроионов к заряженным частицам

Здесь r_C - радиус капель воды или частиц льда, $\mu_{1,2}$ - подвижности положительных и отрицательных аэроионов соответственно, $n_{1,2}$ - концентрации положительных и отрицательных аэроионов. $q_M = 12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot |E| \cdot r_C^2$ - характерный заряд, возникающий при поляризации сферической капли во внешнем поле напряженностью E , q_C - заряд на частице, a и b - частоты прилипания соответственно положительных и отрицательных аэроионов к заряженным частицам. Наличие индексов (a_Q , b_Q) обозначает сорт частиц, к которым идет прилипание. В случае, когда $|q_C| < |q_M|$ учитывается прилипание как положительных, так и отрицательных ионов к частице, поляризующейся во внешнем поле. Более простая постановка задачи, рассмотрена в параграфах 3.4, 3.5: фактически принималось, что всегда выполняется условие $|q_C| > |q_M|$: к положительным частицам прилипают только отрицательные аэроионы, а к отрицательным только положительные.

Рассмотрим изменения системы уравнений, к которым приводит учет поляризации, на примере уравнения (3.1). В этом уравнении изменения будут касаться лишь последнего слагаемого, в котором следует сделать замену $\gamma \cdot \rho_Q \cdot A_+ \Rightarrow e \cdot N_Q \cdot (a_Q - b_Q) = N_Q \cdot \Delta v_Q$, где N_Q - концентрация фракции, к которой идет прилипание аэроионов, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона. В результате система уравнений примет вид:

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \frac{\partial (V_Q \cdot \rho_Q)}{\partial z} = -R \cdot f(z) - N_Q \cdot \Delta v_Q \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho_q}{\partial t} + \frac{\partial (V_q \cdot \rho_q)}{\partial z} = R \cdot f(z) - N_q \cdot \Delta v_q \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \rho_{q1}}{\partial t} + \frac{\partial (V_{q1} \cdot \rho_{q1})}{\partial z} = R_1 \cdot f_1(z) - N_{q1} \cdot \Delta v_{q1} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho_{Q1}}{\partial t} + \frac{\partial (V_{Q1} \cdot \rho_{Q1})}{\partial z} = -R_1 \cdot f_1(z) - N_{Q1} \cdot \Delta v_{Q1} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial A_+}{\partial t} + \frac{\partial (V_+ \cdot A_+)}{\partial z} = I(z) + \kappa \cdot A_+ \cdot A_- + e \cdot (N_q \cdot a_q + N_Q \cdot a_Q + N_{q1} \cdot a_{q1} + N_{Q1} \cdot a_{Q1}) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial A_-}{\partial t} + \frac{\partial (V_- \cdot A_-)}{\partial z} = -I(z) - \kappa \cdot A_+ \cdot A_- - e \cdot (N_q \cdot b_q + N_Q \cdot b_Q + N_{q1} \cdot b_{q1} + N_{Q1} \cdot b_{Q1}) \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial z} = \rho_q + \rho_Q + A_+ + A_- + \rho_{q1} + \rho_{Q1} \quad (3.15)$$

Уравнения (6)-(8) остаются без изменений. Для более детального описания процессов зарядки в верхней части облака система дополнена двумя уравнениями (3.11 и 3.12), отражающими динамику электрических слоев в окрестности точки реверса. Функция зарядки $f_1(z)$ знакопеременная и симметричная относительно 6 км: отрицательная в интервале от 5 до 6 км и положительная в интервале от 6 до 7 км. Механизм зарядки безындукционный и интенсивность зарядки $R_1 = 6 \cdot 10^{-11}$ Кл/(м³·с).

На Рис. 3.11 показана динамика, а на Рис. 3.12 профиль напряженности электрического поля при $t = 10^3$ с. Механизм электризации в окрестности нулевой изотермы безындукционный. Наряду со слоями в области таяния, хорошо видна структура зарядов в верхней части облака.

В отличие от более простой постановки задачи, обсуждавшейся в параграфах 3.4, 3.5, выход на квазистационарное состояние происходит уже на временах порядка 500 с. Полученный профиль электрического поля качественно и частично количественно совпадает с профилем поля наблюдаемых в ММКС типа А, представленный на Рис. 3.13, которые также достаточно часто наблюдаются в натурных экспериментах. Таким образом, учет поляризации тающих агрегатов и капель воды приводит к уменьшению максимальных значений электрического поля и ускорению выхода системы на квазистационарное состояние.

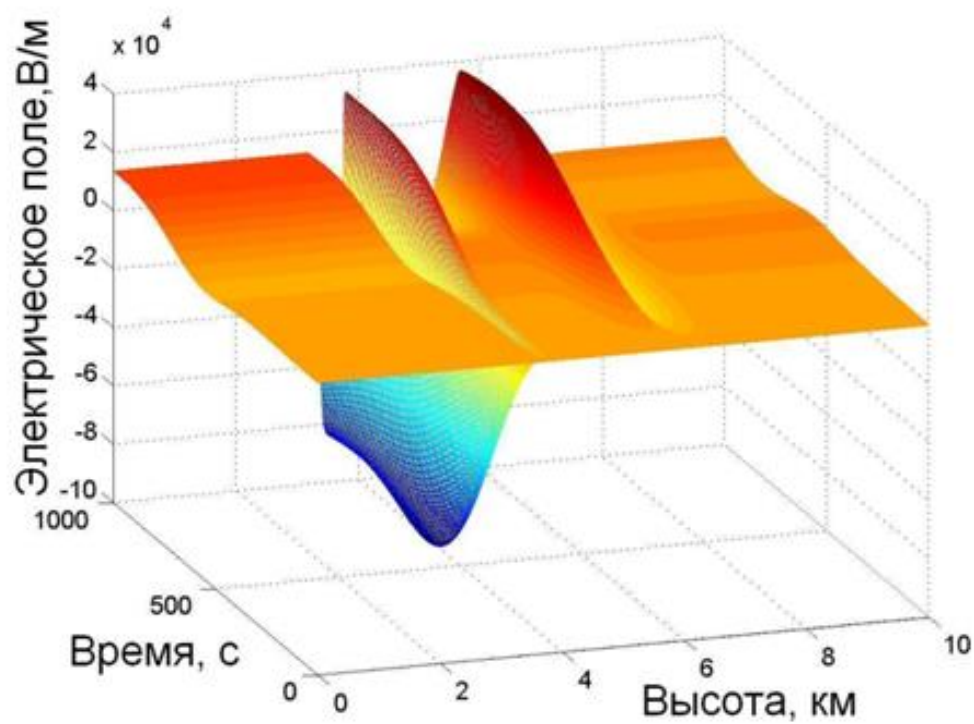


Рис. 3.11 Динамика электрического поля с учетом поляризации гидрометеоров и капель воды

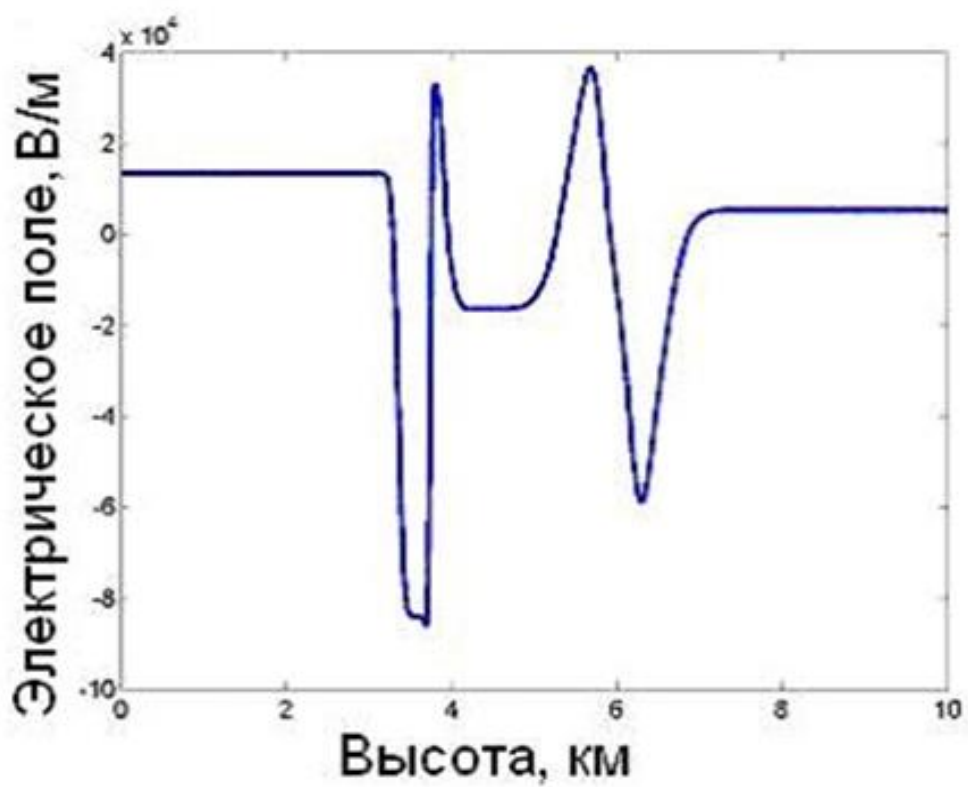


Рис. 3.12 Профиль электрического поля с учетом разделения зарядов в верхней части облака

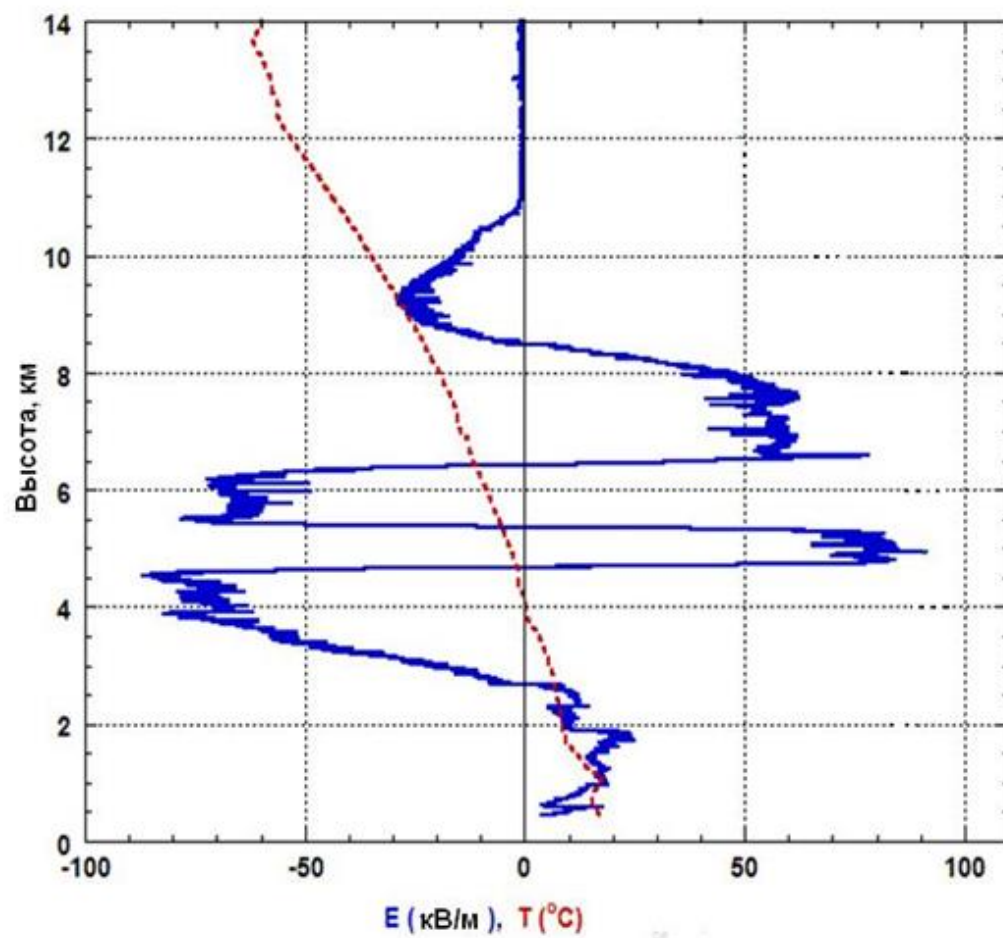


Рис. 3.13 Профиль электрического поля для ММКС типа А в соответствии с экспериментальными данными из работы [46]

3.7 Основные результаты и особенности моделирования электрической структуры ММКС

Предложена и численно проанализирована в одномерном приближении система уравнений квазигидродинамики для электрического поля, зарядов и концентраций облачных частиц и легких аэронов воздуха в стратифицированной области мезомасштабной конвективной системы. При разумных предположениях о характере электризации при таянии облачных частиц полученные решения описывают структуру и динамику пространственно разделенных областей электрического заряда в стратифицированной области.

Развита модель электризации тающих гидрометеоров вблизи нулевой изотермы, позволяющая дать удовлетворительное объяснение экспериментальных данных по структуре электрического поля и заряда в стратифицированной области мезомасштабных конвективных систем. Установлена важная роль слоев экранирующего заряда, обусловленного легкими ионами. Показано, что как безындукционная, так и индукционная зарядка частиц, связанная с таянием, при соответствующих аэродинамических условиях может приводить к образованию узкого интенсивного слоя положительного заряда вблизи нулевой изотермы. В частности, с учетом индукционного механизма зарядки и реальной структуры скорости восходящего потока за время порядка 30 мин формируется распределение зарядов и напряженности электрического поля (с максимумом порядка 100 кВ/м), описывающее наблюдаемые в экспериментах профили.

Выяснено, что в случае индукционного механизма зарядки частиц при таянии на профиль электрического поля существенно влияет скорость воздушных потоков в стратифицированной области. Особое значение имеет высота, на которой скорость меняет свой знак. Если смена знака происходит выше нулевой изотермы, то интенсивность слоя

положительного заряда в окрестности нулевой изотермы существенно снижается.

Полученные результаты представляют принципиальную важность для объяснения аномально высокой молниевой активности ММКС, а также их роли в инициации разрядов в средней атмосфере и поддержании квазистационарного состояния глобальной электрической цепи.

Заключение

В заключение приведем основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработана и проанализирована нульмерная плазмохимическая модель воздействия спрайта на химический баланс мезосферы. Показано, что во время и после вспышки на высотах переходной и диффузной области спрайта существенно возмущаются концентрации электронов (до $2,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$), положительных и отрицательных ионов, нейтральных компонент (в том числе в возбужденном состоянии). Объемная скорость эмиссии фотонов в первой положительной полосе азота достигает $10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Показано, что при генерации последовательности спрайтов, разделенных временным интервалом 100 с, ряд химических компонент не успевает релаксировать после первого разряда, что приводит к изменению условий развития второго разряда и накоплению отдельных химических компонент (H_5O_2^+ , NO^+).

3. Разработана одномерная плазмохимическая самосогласованная модель воздействия спрайта на состав мезосферы для высот от 60 до 90 км. Показано, что развитие лавинной ионизации начинается на высоте около 78 км, с последующим распространением вверх до 82 км и вниз до 70 км.

4. Установлено, что проводимость мезосферы на стадии инициации спрайта падает почти на два порядка из-за роста частоты столкновений электронов с нейтрами при увеличении температуры, что способствует развитию разряда. По мере формирования лавины электронов проводимость существенно возрастает, что приводит к вытеснению поля и прекращению разряда.

5. Проанализирована зависимость величины области диффузного разряда спрайта от дипольного момента нескомпенсированного заряда в тропосфере. Показано, что спрайт развивается при значениях дипольного момента, превышающих 340 Кл·км. При меньших значениях дипольного

момента на высотах 78-80 км формируется гало, не сопровождающееся возмущением концентрации ионов и электронов. Объемная скорость эмиссии фотонов во время гало не превышает $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для первой положительной полосы азота.

6. Разработана модель, описывающая генерацию слоев электрического поля и заряда в стратифицированной области мезомасштабной конвективной системы. Показано, что при учете индукционного и безындукционного механизмов зарядки тающих гидрометеоров в окрестности нулевой изотермы в течение 30 минут формируется структура электрического поля, наблюдаемая в натурных экспериментах для мезомасштабных конвективных систем А и Б типа.

7. Показано, что влияние поляризации ледяных агрегатов и капель воды на прилипание аэроионов приводит к замедлению процессов разделения заряда в грозовом облаке, не изменяя структуру формирующегося электрического поля.

8. Установлено, что максимальная плотность электрического заряда в окрестности нулевой изотермы достигает 4 нКл/м^3 . С учетом вертикального размера слоя положительного заряда (около 300 метров) и горизонтальных размеров стратифицированной области ММКС (тысячи квадратных километров), накопленный заряд может достигать нескольких тысяч кулон, что достаточно для генерации спрайтов.

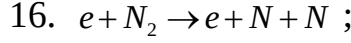
Приложение А. Список химических реакций модели

Базовая ионизация

1. $Q + N_2 \rightarrow N_2^+ + e + Q$; $k_1 = 0.585/M$; [16]
2. $Q + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + Q$; $k_2 = 0.154/M$; [16]
3. $Q + N_2 \rightarrow N^+ + N + e + Q$; $k_3 = 0.185/M$; [16]
4. $Q + O_2 \rightarrow O^+ + O + e + Q$; $k_4 = 0.076/M$; [16]

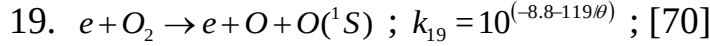
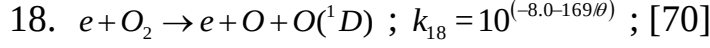
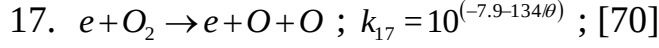
Реакции зависящие от напряженности электрического поля

5. $e + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + e$; $k_5 = 10^{(-8.8-281/\theta)}$; [70]
 6. $e + N_2 \rightarrow N_2^+ + e + e$; $k_6 = 10^{(-8.3-365/\theta)}$; [70]
 7. $e + O_2 \rightarrow O^- + O$; $k_7 = \begin{cases} 10^{(-9.3-123/\theta)}, & \theta < 80 \text{ Td} \\ 10^{(-10.2-57/\theta)}, & \theta > 80 \text{ Td} \end{cases}$; [70]
 8. $e + O_3 \rightarrow O_2 + O + e$; $k_8 = 10 \cdot (10^{(-7.9-134/\theta)} + 10^{(-8-169/\theta)} + 10^{(-8.8-119/\theta)})$; [70]
 9. $e + N_2 \rightarrow e + N_2(A)$; $k_9 = 10^{(-8.4-140/\theta)}$; [70]
 10. $e + N_2 \rightarrow e + N_2(B)$; $k_{10} = 10^{(-8.3-154/\theta)} + 10^{(-8.7-168/\theta)} + 10^{(-8.2-148/\theta)}$; [70]
 11. $e + N_2 \rightarrow e + N_2(a)$; $k_{11} = 10^{(-8.8-167/\theta)} + 10^{(-8.3-174/\theta)} + 10^{(-8.8-175/\theta)}$; [70]
 12. $e + N_2 \rightarrow e + N_2(C)$; $k_{12} = 10^{(-8.2-211/\theta)} + 10^{(-10.1-254/\theta)} + 10^{(-9.2-262/\theta)}$; [70]
 13. $e + O_2 \rightarrow e + O_2(a)$; $k_{13} = \begin{cases} 10^{(-9.0-52/\theta)}, & \theta < 40 \text{ Td} \\ 10^{(-10.2-3.5/\theta)}, & \theta > 40 \text{ Td} \end{cases}$; [70]
 14. $e + O_2 \rightarrow e + O_2(b)$; $k_{14} = \begin{cases} 10^{(-9.5-60/\theta)}, & \theta < 30 \text{ Td} \\ 10^{(-11.2-7.2/\theta)}, & \theta > 30 \text{ Td} \end{cases}$; [70]
 15. $e + N_2 \rightarrow e + N + N(^2D)$;
 $k_{15} = \begin{cases} 10^{-10} \cdot (3.096 - 0.671 \cdot (\theta/10) + 0.03 \cdot (\theta/10)^2 - 1.59 \cdot 10^{(-3)} \cdot (\theta/10)^3 - 1.57 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta/10)^4), & \theta > 76 \text{ Td} \\ 0, & \theta < 76 \text{ Td} \end{cases}$;
- [16]

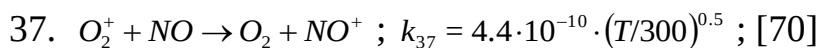
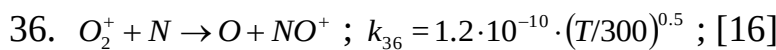
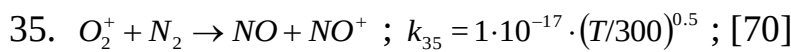
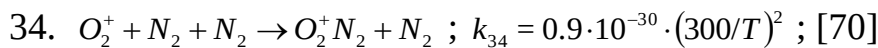
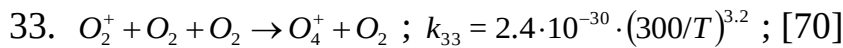
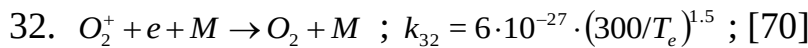
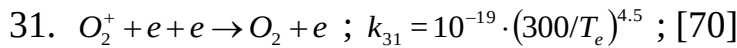
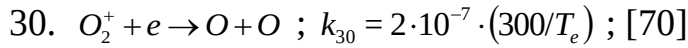
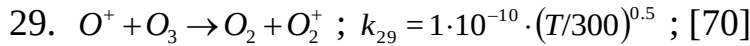
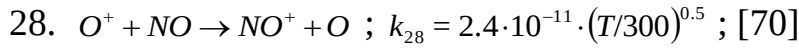
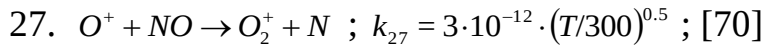
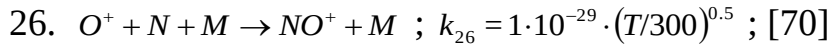
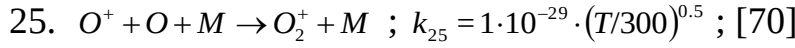
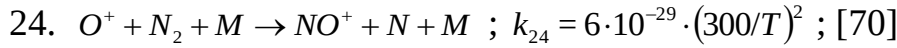
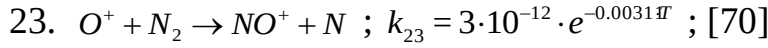
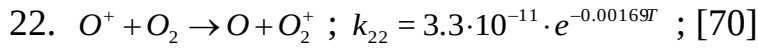
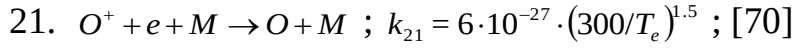
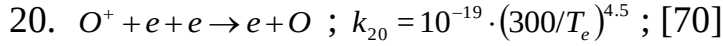


$$k_{16} = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-10} \cdot (3.096 - 0.671 \cdot (\theta/10) + 0.03 \cdot (\theta/10)^2 - 1.59 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta/10)^3 - 1.57 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta/10)^4), & \theta > 76 \text{ Td} \\ 0, & \theta < 76 \text{ Td} \end{cases} ;$$

[16]



Реакции с участием положительных ионов



38. $O_2^+ + NO_2 \rightarrow O_3 + NO^+ ; k_{38} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
39. $O_4^+ + e \rightarrow O_2 + O_2 ; k_{39} = 1.4 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5} ; [70]$
40. $O_4^+ + O \rightarrow O_2^+ + O_3 ; k_{40} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [16]$
41. $O_4^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2 + O_2 ; k_{41} = 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
42. $N^+ + e + e \rightarrow e + N ; k_{42} = 10^{-19} \cdot (300/T_e)^{4.5} ; [70]$
43. $N^+ + e + M \rightarrow N + M ; k_{43} = 6 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T_e)^{1.5} ; [70]$
44. $N^+ + O + M \rightarrow NO^+ + M ; k_{44} = 10^{-29} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
45. $N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O ; k_{45} = 2.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
46. $N^+ + O_2 \rightarrow O^+ + NO ; k_{46} = 2.8 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
47. $N^+ + O_2 \rightarrow N + O_2^+ ; k_{47} = 2.0 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [16]$
48. $N^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_2 + N_3^+ ; k_{48} = 0.9 \cdot 10^{-29} \cdot e^{400/T} ; [70]$
49. $N^+ + N + M \rightarrow N_2^+ + M ; k_{49} = 10^{-29} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
50. $N^+ + O \rightarrow O^+ + N ; k_{50} = 1 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
51. $N^+ + NO \rightarrow NO^+ + N ; k_{51} = 8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
52. $N^+ + NO \rightarrow N_2^+ + O ; k_{52} = 3 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
53. $N^+ + NO \rightarrow N_2 + O^+ ; k_{53} = 1 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
54. $N^+ + O_3 \rightarrow NO^+ + O_2 ; k_{54} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5} ; [70]$
55. $N_2^+ + e + M \rightarrow N_2 + M ; k_{55} = 6 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T_e)^{1.5} ; [70]$
56. $N_2^+ + e \rightarrow N + N(^2D) ; k_{56} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5} ; [70]$
57. $N_2^+ + e \rightarrow N + N ; k_{57} = 2.8 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5} ; [70]$
58. $N_2^+ + e + e \rightarrow e + N_2 ; k_{58} = 10^{-19} \cdot (300/T_e)^{4.5} ; [70]$
59. $N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N ; k_{59} = 1.3 \cdot 10^{-10} \cdot (300/T)^{0.5} ; [70]$
60. $N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2 ; k_{60} = 6 \cdot 10^{-11} \cdot (300/T)^{0.5} ; [70]$
61. $N_2^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_2 + N_4^+ ; k_{61} = 5 \cdot 10^{-29} \cdot (T/300)^{0.5} ; [16]$
62. $N_2^+ + N + N_2 \rightarrow N_2 + N_3^+ ; k_{62} = 0.9 \cdot 10^{-29} \cdot e^{400/T} ; [70]$
63. $N_2^+ + N \rightarrow N^+ + N_2 ; k_{63} = 2.4 \cdot 10^{-15} \cdot T ; [70]$

64. $N_2^+ + O \rightarrow O^+ + N_2$; $k_{64} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot (300/T)^{0.2}$; [70]
65. $N_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + N_2$; $k_{65} = 3.3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
66. $N_2^+ + O_3 \rightarrow O_2^+ + O + N_2$; $k_{66} = 1 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
67. $N_3^+ + e \rightarrow N_2 + N$; $k_{67} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5}$; [70]
68. $N_3^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N + N_2$; $k_{68} = 2.3 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
69. $N_3^+ + O_2 \rightarrow NO_2^+ + N_2$; $k_{69} = 4.4 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
70. $N_3^+ + N \rightarrow N_2^+ + N_2$; $k_{70} = 6.6 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
71. $N_3^+ + NO \rightarrow NO^+ + N + N_2$; $k_{71} = 7 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
72. $N_4^+ + e \rightarrow N_2 + N_2$; $k_{72} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5}$; [70]
73. $N_4^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2 + N_2$; $k_{73} = 2.5 \cdot 10^{-10}$; [20]
74. $N_4^+ + NO \rightarrow NO^+ + N_2 + N_2$; $k_{74} = 4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
75. $N_4^+ + O \rightarrow O^+ + N_2 + N_2$; $k_{75} = 2.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
76. $N_4^+ + N \rightarrow N^+ + N_2 + N_2$; $k_{76} = 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
77. $NO^+ + e \rightarrow N + O$; $k_{77} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{1.5}$; [70]
78. $NO^+ + e + e \rightarrow NO + e$; $k_{78} = 10^{-19} \cdot (300/T_e)^{4.5}$; [70]
79. $NO^+ + e + M \rightarrow NO + M$; $k_{79} = 6 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T_e)^{1.5}$; [70]
80. $NO^+ + N_2 + N_2 \rightarrow NO^+ N_2 + N_2$; $k_{80} = 2 \cdot 10^{-31} \cdot (300/T)^{4.4}$; [70]
81. $NO^+ + O_2 + N_2 \rightarrow NO^+ O_2 + N_2$; $k_{81} = 3 \cdot 10^{-31} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
82. $NO^+ + O_2 + O_2 \rightarrow NO^+ O_2 + O_2$; $k_{82} = 0.9 \cdot 10^{-31} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
83. $NO^+ + O_3 \rightarrow NO_2^+ + O_2$; $k_{83} = 10^{-15} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
84. $NO_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + NO_2$; $k_{84} = 2.9 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
85. $NO^+ N_2 + e \rightarrow NO + N_2$; $k_{85} = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5}$; [70]
86. $NO^+ O_2 + e \rightarrow NO + O_2$; $k_{86} = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5}$; [70]
87. $O_2^+ N_2 + e \rightarrow O_2 + N_2$; $k_{87} = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T_e)^{0.5}$; [70]
88. $H_3O^+ + e \rightarrow H + H_2O$; $k_{88} = 1.3 \cdot 10^{-6}$; [30]
89. $H_5O_2^+ + e \rightarrow H + H_2O + H_2O$; $k_{89} = 2.7 \cdot 10^{-6}$; [30]

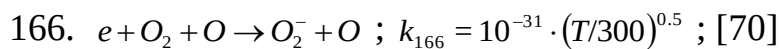
90. $H_7O_3^+ + e \rightarrow H + H_2O + H_2O + H_2O$; $k_{90} = 4.6 \cdot 10^{-6}$; [30]
91. $H_9O_4^+ + e \rightarrow H + H_2O + H_2O + H_2O + H_2O$; $k_{91} = 7.5 \cdot 10^{-6}$; [30]
92. $NO^+ + H_2O + M \rightarrow (H_2O)NO^+ + M$; $k_{92} = 1.8 \cdot 10^{-28} \cdot (300/T)^{4.7}$; [16]
93. $NO^+ + CO_2 + M \rightarrow CO_2NO^+ + M$; $k_{93} = 7 \cdot 10^{-30} \cdot (300/T)^3$; [16]
94. $O_2^+(H_2O) + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH + O_2$; $k_{94} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
95. $O_2^+ + H_2O + N_2 \rightarrow O_2^+(H_2O) + N_2$; $k_{95} = 2.8 \cdot 10^{-28}$; [30]
96. $O_2^+ + H_2O + O_2 \rightarrow O_2^+(H_2O) + O_2$; $k_{96} = 1.9 \cdot 10^{-28}$; [30]
97. $O_4^+ + H_2O \rightarrow O_2^+(H_2O) + O_2$; $k_{97} = 1.5 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
98. $H_2O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + H_2O$; $k_{98} = 3.3 \cdot 10^{-10}$; [20]
99. $H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH$; $k_{99} = 10^{-9}$; [30]
100. $H_3O^+ + H_2O + M \rightarrow H_5O_2^+ + M$; $k_{100} = 3.4 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^4$; [16]
101. $H_3O^+ + NO_2^- \rightarrow H_2O + NO + OH$; $k_{101} = 1 \cdot 10^{-6}$; [20]
102. $H_3O^+ + O_3^- \rightarrow H_2O + O_2 + OH$; $k_{102} = 1 \cdot 10^{-6}$; [20]
103. $H_5O_2^+ + H_2O + M \rightarrow H_7O_3^+ + M$; $k_{103} = 2.3 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^4$; [16]
104. $H_7O_3^+ + H_2O + M \rightarrow H_9O_4^+ + M$; $k_{104} = 2.4 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^4$; [16]
105. $(H_2O)NO^+ + H_2O + M \rightarrow (H_2O)_2NO^+ + M$; $k_{105} = 1 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^{4.7}$; [16]
106. $(H_2O)_2NO^+ + H_2O + M \rightarrow (H_2O)_3NO^+ + M$; $k_{106} = 1 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^{4.7}$; [16]
107. $(H_2O)_3NO^+ + H_2O \rightarrow H_7O_3^+ + NO + OH$; $k_{107} = 7 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
108. $CO_2NO^+ + H_2O \rightarrow (H_2O)NO^+ + CO_2$; $k_{108} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
109. $O_2^+(H_2O) + H_2O \rightarrow H_3O^+(OH) + O_2$; $k_{109} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
110. $H_3O^+(OH) + H_2O \rightarrow H_5O_2^+ + OH$; $k_{110} = 1.4 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
111. $O_2^+N_2 + O_2 \rightarrow O_4^+ + N_2$; $k_{111} = 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
112. $O_2^+N_2 + N_2 \rightarrow O_2^+ + N_2 + N_2$; $k_{112} = 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot (300/T)^{5.3} \cdot e^{-2357/T}$; [70]

Реакции с участием отрицательных ионов

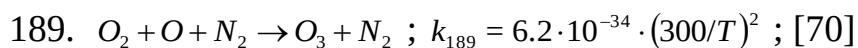
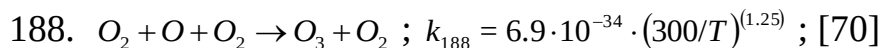
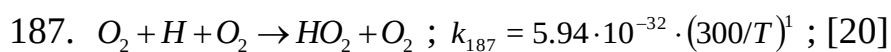
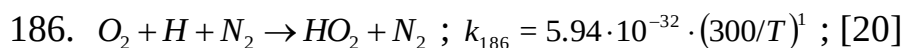
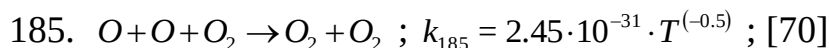
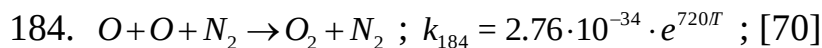
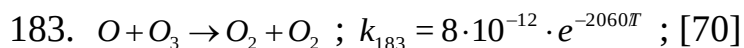
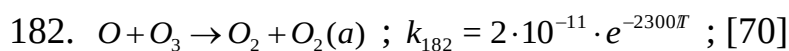
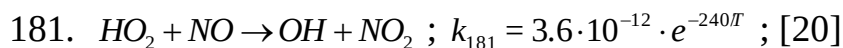
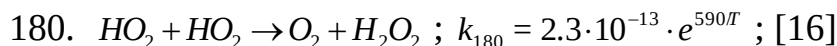
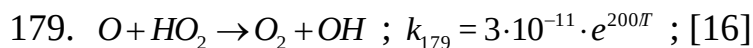
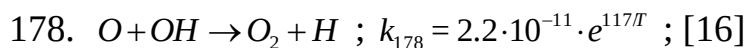
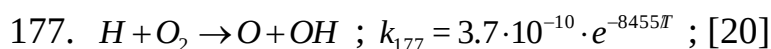
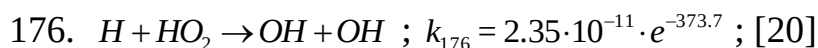
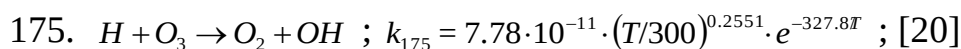
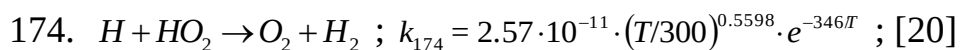
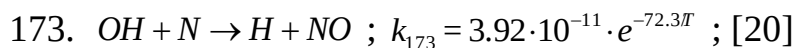
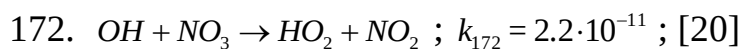
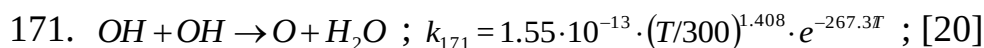
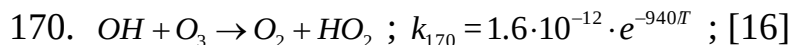
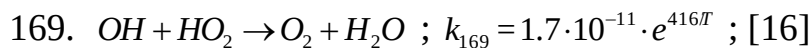
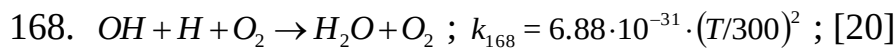
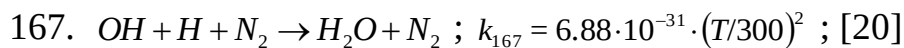
113. $O^- + O \rightarrow O_2 + e$; $k_{113} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]

114. $O^- + N \rightarrow NO + e$; $k_{114} = 2.6 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
115. $O^- + O_2 \rightarrow O_3 + e$; $k_{115} = 5 \cdot 10^{-15} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
116. $O^- + NO \rightarrow NO_2 + e$; $k_{116} = 2.6 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
117. $O^- + O_2 + M \rightarrow O_3^- + M$; $k_{117} = 1.1 \cdot 10^{-30} \cdot (300/T)$; [70]
118. $O^- + NO + M \rightarrow NO_2^- + M$; $k_{118} = 10^{-29} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
119. $O^- + O_2(a) \rightarrow O_2^- + O$; $k_{119} = 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
120. $O^- + O_3 \rightarrow O + O_3^-$; $k_{120} = 8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
121. $O^- + NO_2 \rightarrow NO_2^- + O$; $k_{121} = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
122. $O_2^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O_2$; $k_{122} = 4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
123. $O_2^- + O \rightarrow O_3 + e$; $k_{123} = 1.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
124. $O_2^- + O_2 + M \rightarrow O_4^- + M$; $k_{124} = 4 \cdot 10^{-31}$; [16]
125. $O_2^- + N_2(A) \rightarrow O_2 + N_2 + e$; $k_{125} = 2.1 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
126. $O_2^- + N_2(B) \rightarrow O_2 + N_2 + e$; $k_{126} = 2.5 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
127. $O_2^- + N \rightarrow NO_2 + e$; $k_{127} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
128. $O_2^- + O \rightarrow O_2 + O^-$; $k_{128} = 3.3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
129. $O_2^- + NO_2 \rightarrow NO_2^- + O_2$; $k_{129} = 8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
130. $O_2^- + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_3^-$; $k_{130} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
131. $O_2^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + e$; $k_{131} = 2.7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{-5590/T}$; [20]
132. $O_2^- + O_2(a) \rightarrow O_2 + O_2 + e$; $k_{132} = 2 \cdot 10^{-10}$; [20]
133. $O_2^- + O_2(b) \rightarrow O_2 + O_2 + e$; $k_{133} = 3.6 \cdot 10^{-10}$; [20]
134. $O_3^- + NO \rightarrow NO_3^- + O$; $k_{134} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
135. $O_3^- + CO_2 \rightarrow CO_3^- + O_2$; $k_{135} = 5.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
136. $O_3^- + O \rightarrow O_2^- + O_2$; $k_{136} = 3.2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
137. $O_3^- + O \rightarrow O_2 + O_2 + e$; $k_{137} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
138. $O_3^- + NO \rightarrow NO_2^- + O_2$; $k_{138} = 2.6 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
139. $O_3^- + NO_2 \rightarrow O_3 + NO_2^-$; $k_{139} = 7 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]

140. $O_3^- + NO_2 \rightarrow O_2 + NO_3^-$; $k_{140} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
141. $O_3^- + NO_3 \rightarrow O_3 + NO_3^-$; $k_{141} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
142. $O_4^- + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2 + O_2$; $k_{142} = 10^{-10} \cdot e^{-1440T}$; [70]
143. $O_4^- + CO_2 \rightarrow CO_4^- + O_2$; $k_{143} = 4.3 \cdot 10^{-10}$; [16]
144. $O_4^- + NO \rightarrow NO_3^- + O_2$; $k_{144} = 2.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
145. $O_4^- + O \rightarrow O_3^- + O_2$; $k_{145} = 4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
146. $O_4^- + M \rightarrow O_2^- + O_2 + M$; $k_{146} = 10^{-10} \cdot e^{-1044T}$; [70]
147. $O_4^- + O \rightarrow O^- + O_2 + O_2$; $k_{147} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
148. $CO_3^- + O \rightarrow O_2^- + CO_2$; $k_{148} = 1.1 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
149. $CO_3^- + NO \rightarrow NO_2^- + CO_2$; $k_{149} = 1.1 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
150. $CO_4^- + NO \rightarrow NO_3^- + CO_2$; $k_{150} = 4.8 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [30]
151. $CO_4^- + O \rightarrow CO_3^- + O_2$; $k_{151} = 1.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [30]
152. $NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2$; $k_{152} = 1.8 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
153. $NO_2^- + H \rightarrow OH^- + NO$; $k_{153} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
154. $NO_2^- + O \rightarrow NO_3 + e$; $k_{154} = 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
155. $NO_2^- + NO_2 \rightarrow NO_3^- + NO$; $k_{155} = 4 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
156. $NO_2^- + NO_3 \rightarrow NO_2 + NO_3^-$; $k_{156} = 5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
157. $NO_3^- + NO \rightarrow NO_2^- + NO_2$; $k_{157} = 3 \cdot 10^{-15} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
158. $OH^- + O \rightarrow HO_2 + e$; $k_{158} = 4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
159. $OH^- + H \rightarrow H_2O + e$; $k_{159} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [30]
160. $e + O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + O_2^-$; $k_{160} = 1.4 \cdot 10^{-29} \cdot (300/T_e) \cdot e^{-600T} \cdot e^{700(T_e - T)/(T_e \cdot T)}$; [70]
161. $e + N_2 + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^-$; $k_{161} = 1.07 \cdot 10^{-31} \cdot (300/T_e)^2 \cdot e^{-70T} \cdot e^{1500(T_e - T)/(T_e \cdot T)}$; [70]
162. $e + O_2 + O_3 \rightarrow O_2 + O_3^-$; $k_{162} = 1.4 \cdot 10^{-29} \cdot (300/T_e) \cdot e^{-600T} \cdot e^{700(T_e - T)/(T_e \cdot T)}$; [70]
163. $e + O_3 \rightarrow O_2^- + O$; $k_{163} = 10^{-9} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
164. $e + O_3 \rightarrow O_2 + O^-$; $k_{164} = 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
165. $e + O_2 + O \rightarrow O^- + O_2$; $k_{165} = 10^{-31} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]



Реакции с участием нейтральных компонент



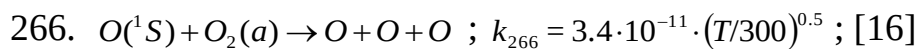
190. $N + O_2 \rightarrow NO + O$; $k_{190} = 4.5 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-3220/T}$; [70]
191. $N + O_3 \rightarrow NO + O_2$; $k_{191} = 2 \cdot 10^{-16} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
192. $N + NO \rightarrow N_2 + O$; $k_{192} = 1.05 \cdot 10^{-12} \cdot T^{0.5}$; [70]
193. $N + NO_2 \rightarrow N_2 + O_2$; $k_{193} = 7 \cdot 10^{-13} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
194. $N + NO_2 \rightarrow N_2 + O + O$; $k_{194} = 9.1 \cdot 10^{-13} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
195. $N + NO_2 \rightarrow NO + NO$; $k_{195} = 2.3 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
196. $N + O + M \rightarrow NO + M$; $k_{196} = 1.76 \cdot 10^{-31} \cdot T^{(-0.5)}$; [70]
197. $N + N + N \rightarrow N_2 + N$; $k_{197} = 3.31 \cdot 10^{-27} \cdot (300/T)^{1.5}$; [20]
198. $O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$; $k_{198} = 1.13 \cdot 10^{-11} \cdot (T/1000)^{0.18}$; [16]
199. $O + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_2$; $k_{199} = 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
200. $NO + NO_3 \rightarrow NO_2 + NO_2$; $k_{200} = 1.7 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
201. $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$; $k_{201} = 2 \cdot 10^{-16}$; [20]
202. $NO_2 + O_3 \rightarrow O_2 + NO_3$; $k_{202} = 1.2 \cdot 10^{-13} \cdot e^{-2450/T}$; [70]
203. $NO_2 + NO_3 \rightarrow O_2 + NO + NO_2$; $k_{203} = 2.3 \cdot 10^{-13} \cdot e^{-1600/T}$; [70]
204. $NO_3 + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_2 + NO_2$; $k_{204} = 5 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-3000/T}$; [70]
205. $N + N + M \rightarrow N_2 + M$; $k_{205} = 8.27 \cdot 10^{-34} \cdot e^{500/T}$; [70]

Реакции с участием возбужденных состояний

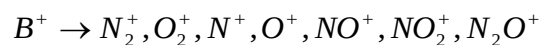
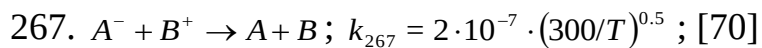
206. $O_2(a) \rightarrow O_2 + h\nu(O_2 IRAtm)$; $k_{206} = 2.22 \cdot 10^{-4}$; [16]
207. $O_2(a) + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$; $k_{207} = 2.2 \cdot ((T/300)^{0.8}) \cdot 10^{-18}$; [70]
208. $O_2(a) + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$; $k_{208} = 3 \cdot 10^{-21} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
209. $O_2(a) + O \rightarrow O_2 + O$; $k_{209} = 7 \cdot 10^{-16} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
210. $O_2(a) + N \rightarrow NO + O$; $k_{210} = 2 \cdot 10^{-14} \cdot e^{-600/T}$; [70]
211. $O_2(a) + NO \rightarrow O_2 + NO$; $k_{211} = 2.46 \cdot 10^{-17} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
212. $O_2(a) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O$; $k_{212} = 1.7 \cdot 10^{-13} \cdot e^{-1564/T}$; [70]
213. $O_2(a) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O(^1D)$; $k_{213} = 5.2 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-2840/T}$; [16]

214. $O_2(a) + O_2(a) + O_2 \rightarrow O_3 + O_3$; $k_{214} = 1 \cdot 10^{-31} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
215. $O_2(b) \rightarrow O_2 + h\nu(O_2\text{Atm})$; $k_{215} = 7.7 \cdot 10^{-2}$; [16]
216. $O_2(b) + N_2 \rightarrow O_2(a) + N_2$; $k_{216} = 4.9 \cdot 10^{-15} \cdot e^{-253/T}$; [70]
217. $O_2(b) + O_2 \rightarrow O_2(a) + O_2$; $k_{217} = 1.63 \cdot 10^{-22} \cdot e^{-253/T} \cdot (T/300)^{2.4}$; [16]
218. $O_2(b) + O \rightarrow O_2(a) + O$; $k_{218} = 8 \cdot 10^{-14} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
219. $O_2(b) + NO \rightarrow O_2(a) + NO$; $k_{219} = 4 \cdot 10^{-14} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
220. $O_2(b) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O$; $k_{220} = 1.8 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
221. $N_2(A) + O_2 \rightarrow N_2O + O$; $k_{221} = 7.8 \cdot 10^{-14} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
222. $N_2(A) + O_2 \rightarrow N_2 + O + O$; $k_{222} = 1.63 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.55}$; [16]
223. $N_2(A) + O_2 \rightarrow N_2 + O_2$; $k_{223} = 2.54 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
224. $N_2(A) + O_2 \rightarrow N_2 + O_2(a)$; $k_{224} = 1.29 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
225. $N_2(A) + O_2 \rightarrow N_2 + O_2(b)$; $k_{225} = 1.29 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
226. $N_2(A) + N_2 \rightarrow N_2 + N_2$; $k_{226} = 3 \cdot 10^{-18} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
227. $N_2(A) + O \rightarrow NO + N(^2D)$; $k_{227} = 7 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
228. $N_2(A) + O \rightarrow N_2 + O(^1S)$; $k_{228} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
229. $N_2(A) + NO \rightarrow N_2 + NO$; $k_{229} = 7 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
230. $N_2(A) + N_2O \rightarrow NO + N_2 + N$; $k_{230} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
231. $N_2(A) + O_2(a) \rightarrow N_2(B) + O_2$; $k_{231} = 1 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
232. $N_2(A) + N_2(A) \rightarrow N_2 + N_2(B)$; $k_{232} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
233. $N_2(A) + N_2(A) \rightarrow N_2 + N_2(C)$; $k_{233} = 1.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
234. $N_2(B) \rightarrow N_2(A) + h\nu(1PN_2)$; $k_{234} = 1.5 \cdot 10^5$; [70]
235. $N_2(B) + N_2 \rightarrow N_2(A) + N_2$; $k_{235} = 5 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
236. $N_2(B) + O_2 \rightarrow N_2 + O + O$; $k_{236} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
237. $N_2(B) + NO \rightarrow N_2(A) + NO$; $k_{237} = 2.4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
238. $N_2(C) \rightarrow N_2(B) + h\nu(2PN_2)$; $k_{238} = 3 \cdot 10^7$; [16]
239. $N_2(C) + O_2 \rightarrow N_2 + O(^1S) + O$; $k_{239} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]

240. $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O$; $k_{240} = 1.5 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
241. $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$; $k_{241} = 6 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
242. $N(^2D) + N_2 \rightarrow N + N_2$; $k_{242} = 6 \cdot 10^{-15} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
243. $N(^2D) + O \rightarrow N + O(^1D)$; $k_{243} = 4 \cdot 10^{-13} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
244. $N(^2D) + NO \rightarrow N_2 + O$; $k_{244} = 6 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [70]
245. $N(^2D) + N_2O \rightarrow NO + N_2$; $k_{245} = 3 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
246. $O(^1D) \rightarrow O + h\nu(630nm)$; $k_{246} = 9.1 \cdot 10^{-03}$; [16]
247. $O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$; $k_{247} = 6.4 \cdot 10^{-12} \cdot e^{67/T}$; [70]
248. $O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2(b)$; $k_{248} = 2.56 \cdot 10^{-11} \cdot e^{67/T}$; [70]
249. $O(^1D) + N_2 \rightarrow O + N_2$; $k_{249} = 1.8 \cdot 10^{-11} \cdot e^{107/T}$; [70]
250. $O(^1D) + O_3 \rightarrow O + O_2 + O$; $k_{250} = 1.2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
251. $O(^1D) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$; $k_{251} = 1.2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
252. $O(^1D) + NO \rightarrow N + O_2$; $k_{252} = 1.7 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
253. $O(^1D) + N_2O \rightarrow NO + NO$; $k_{253} = 7.2 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
254. $O(^1D) + N_2O \rightarrow N_2 + O_2$; $k_{254} = 4.4 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
255. $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu(557nm)$; $k_{255} = 1.43$; [70]
256. $O(^1S) + O_2 \rightarrow O(^1D) + O_2$; $k_{256} = 4.3 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-850/T}$; [70]
257. $O(^1S) + N_2 \rightarrow O + N_2$; $k_{257} = 5 \cdot 10^{-17} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
258. $O(^1S) + O_3 \rightarrow O(^1D) + O_2 + O$; $k_{258} = 5.8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
259. $O(^1S) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$; $k_{259} = 5.8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
260. $O(^1S) + O \rightarrow O(^1D) + O$; $k_{260} = 5 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-301/T}$; [16]
261. $O(^1S) + NO \rightarrow O + NO$; $k_{261} = 1.8 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
262. $O(^1S) + NO \rightarrow O(^1D) + NO$; $k_{262} = 3.2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
263. $O(^1S) + N_2O \rightarrow O + N_2O$; $k_{263} = 6.2 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
264. $O(^1S) + N_2O \rightarrow O(^1D) + N_2O$; $k_{264} = 3.1 \cdot 10^{-12} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]
265. $O(^1S) + O_2(a) \rightarrow O(^1D) + O_2(b)$; $k_{265} = 3.6 \cdot 10^{-11} \cdot (T/300)^{0.5}$; [16]



Рекомбинация ионов



Во всех скоростях химических реакций величина нормированного электрического поля θ измеряется в таунсендах (Тд), температура нейтральных компонент T и температура электронов T_e измеряется в кельвинах (К). Скорость химических реакций k измеряется в $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$ и $\text{см}^6 \text{с}^{-1}$ для двух- и трехкомпонентных реакций соответственно.

Приложение Б. Значение концентраций химических компонент

Химическая компонента	77 км	85 км
O_2	$1.4 \cdot 10^{14}$	$2.8 \cdot 10^{13}$
O_3	$1.8 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^7$
O	$2.7 \cdot 10^7$	$5.4 \cdot 10^{10}$
NO	$9.4 \cdot 10^3$	$8.4 \cdot 10^3$
NO_3^-	50	0
CO_2	$2 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{10}$
H	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
H_2O	$3 \cdot 10^9$	$1.1 \cdot 10^9$
e	7.5	78
$O_2(a)$	$2.2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$
NO^+	0	36
NO_2	$6.9 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^4$
NO_3	20	0
OH	$2.6 \cdot 10^6$	$3.7 \cdot 10^7$
N_2	$5.4 \cdot 10^{14}$	$1.1 \cdot 10^{14}$
N	30	98
HO_2	$1 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^2$
H_2	$1.8 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^8$
M	$6.8 \cdot 10^{14}$	$1.38 \cdot 10^{14}$
O_2^+	5	42
H_3O^+	9.5	0
$H_5O_2^+$	29.7	0
$H_7O_3^+$	7	0
$H_9O_4^+$	3	0
$(H_2O)NO^+$	2.2	0
$(H_2O)_2NO^+$	2.1	0
H_2O_2	$2.1 \cdot 10^3$	0

Концентрации приведены на высотах 77 и 85 км в ночных условиях в конце первого этапа расчетов. Все химические компоненты, имеющие концентрацию менее 1 см^{-3} , в таблице не приведены, и их концентрация считается равной нулю. Начальные концентрации на первом этапе были взяты из [30]. Для химических компонент, для которых нет данных, концентрация равна нулю.

Список цитированной литературы

1. Mishin E. V., Milikh G.M. Blue Jets: Upward Lightning // Space Sci. Rev. 2008. Vol. 137, № 1-4. P. 473–488.
2. Van der Velde O.A. et al. Analysis of the first gigantic jet recorded over continental North America // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112, № D20. P. D20104.
3. Pasko V.P. Recent advances in theory of transient luminous events // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. A00E35.
4. Shepherd R.T., Rust W. D., Marshall T.C. Electric Fields and Charges near 0°C in Stratiform Clouds // Mon. Weather Rev. 1996. Vol. 124, № 5. P. 919–938.
5. Adachi T. et al. Electric field transition between the diffuse and streamer regions of sprites estimated from ISUAL/array photometer measurements // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33, № 17. P. L17803.
6. Dowden R.L., Rodger C.J., Nunn D. Minimum sprite plasma density as determined by VLF scattering // IEEE Ant. Prop. Magazine. 2001. Vol. 34, № 2. P. 12–24.
7. Куницын В.Е. et al. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // УФН. 2010. Т. 180, № 5. С. 548–553.
8. Liu N. et al. Assessment of sprite initiating electric fields and quenching altitude of a1Πg state of N₂ using sprite streamer modeling and ISUAL spectrophotometric measurements // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. A00E02.
9. Sentman D.D., Wescott E.M. Red sprites and blue jets: thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. P. 2514–2522.
10. Neubert T. On sprites and their exotic kin // Science. 2003. Vol. 300, № 5620. P. 747–749.
11. M.Fullekrug, E.Mareev, M.Rycroft. Sprites, Elves and Intense

Lightning Discharges // NATO Science. Springer, 2006. Vol. 225. 398 p.

12. Mishin E. Ozone layer perturbation by a single blue jet // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24, № 15. P. 1919–1922.

13. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press, 2002. 687 p.

14. Smirnova N. V., Lyakhov A.N., Kozlov S.I. Lower stratosphere response to electric field pulse // *Int. Journ. Geomagn. Aeron.* 2003. Vol. 3, № 3. P. 281–287.

15. Hiraki Y. et al. Generation of metastable oxygen atom O(1D) in sprite halos // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. P. L14105.

16. Sentman D.D. et al. Plasma chemistry of sprite streamers // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, № D11. P. D11112.

17. Mende S.B. et al. D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, № A11. P. A11312.

18. Криволицкий А.А., Репнев А.И. *Воздействие космических факторов на озоносферу Земли*. М.: ГЕОС, 2009. 384 с.

19. Мареев Е.А., Яшунин С.А. Об условиях инициации электрических разрядов в средней атмосфере // *Физика Атмосферы и Океана*. 2010. Т. 46, № 1. С. 78–84.

20. Gordillo-Vázquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites // *Journal of Physics D: Applied Physics*. IOP PUBLISHING LTD, 2008. Vol. 41, № 23. P. 4016.

21. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Моделирование возмущений состава мезосферы под действием высотных разрядов – спрайтов // *Изв. ВУЗов – Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 2. С. 123–140.

22. Pasko V.P., Stenbaek-Nielsen H.C. Diffuse and streamer regions of sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, № 10. P. 1440–1444.

23. Stanley M. et al. Detection of daytime sprites via a unique sprite ELF signature // *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27, № 6. P. 871–874.

24. Cummer S.A. Current moment in sprite-producing lightning //

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. Vol. 65, № 5. P. 499–508.

25. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // Физика Атмосферы и Океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 242–252.

26. Gordillo-Vazquez F.J. Vibrational kinetics of air plasmas induced by sprites // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. A00E25.

27. Evtushenko A.A. Modeling the influence of a high altitude discharge on the chemical balance of the mesosphere // International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Perugia, 2007. P. 415.

28. Ebert U. et al. Review of recent results on streamer discharges and discussion of their relevance for sprites and lightning // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. A00E43.

29. Luque A., Gordillo-Vázquez F.J. Modeling and analysis of $N_2(B^3\Pi_g)$ and $N_2(C^3\Pi_u)$ vibrational distributions in sprites // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116, № A2. P. A02306.

30. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.

31. Green B.D. et al. Molecular excitation in sprites // Geophys. Res. Lett. 1996. Vol. 23, № 16. P. 2161–2164.

32. Yashunin S.A., Mareev E.A., Rakov V.A. Are lightning M components capable of initiating sprites and sprite halos? // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, № D10. P. D10109.

33. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 722–733.

34. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 722–733.

35. Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F. Sprites produced by quasi-

electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, № A3. P. 4529–4561.

36. <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.1/cam/> [Online].

37. Chen A.B. et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. P. A08306.

38. Wescott E.M. et al. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106, № A6. P. 10467.

39. MacGorman D.R., Rust W.D. The electrical nature of storms. Oxford Univ. Press, 1998. 422 p.

40. Laing A.G., Fritsch J.M. The large-scale environment of the global population of mesoscale convective complexes // Mon. Weather Rev. 2000. Vol. 128, № 8. P. 2756–2776.

41. Houze R.A. Cloud Dynamics. San Diego: Academic Press, 1993. 573 p.

42. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1980. Vol. 61, № 11. P. 1374–1387.

43. Marshall T.C. et al. Positive charge in the stratiform cloud of a mesoscale convective system // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106, № D1. P. 1157–1164.

44. Lang T.J., Rutledge S.A., Wiens K.C. Origins of positive cloud-to-cloud lightning flashes in the stratiform region of a mesoscale convective system // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31, № 10. P. L10105.

45. Davydenko S.S. et al. On the calculation of electric fields and currents of mesoscale convective systems // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109, № 6. P. D11103.

46. Marshall T.C., Rust W.D. Two types of vertical electrical structures in stratiform precipitation regions of mesoscale convective regions // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1993. Vol. 74, № 12. P. 2159–2170.

47. Stolzenburg M. et al. Electrical structure in thunderstorm

convective regions,1, Mesoscale convective systems // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103, № D12. P. 14,059–14,078.

48. Stolzenburg M., Marshall T.C., Rust W.D. Serial soundings of electric field through a mesoscale convective system // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106, № D12. P. 12,371–12,380.

49. Mo Q. et al. Horizontal structure of the electric field in the stratiform region of an Oklahoma mesoscale convective system // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, № D7. P. 4225.

50. Bateman M.G. et al. Precipitation charge and size measurements inside a New Mexico mountain thunderstorm // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, № D8. P. 9643–9653.

51. Stolzenburg M. et al. Horizontal distribution of electrical and meteorological conditions across the stratiform region of a mesoscale convective system // Mon. Weather Rev. 1994. Vol. 122, № 8. P. 1777–1797.

52. Брылев Г.Б. et al. Характеристики электрически активных зон в слоистообразных облаках. Ленинград: Л.: Гидрометеиздат, 1989. 160 с.

53. Кочин А.В. Механизм образования электрического заряда в слоистых и кучево-дождевых облаках // Метеорология и гидрология. 1995. Т. 10. С. 42–49.

54. Mareev E.A., Evtushenko A.A., Yashunin S.A. On the modeling of sprites and sprite producing clouds in the global electric circuit // Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharges, NATO Science Series / ed. Fullekrug M., Mareev E., Rycroft M. Cluwer: Springer, 2005. P. 313–340.

55. Schuur T.J., Rutledge S.A. Electrification of stratiform regions in mesoscale convective systems. Part II: Two-dimensional numerical model simulations of a symmetric MCS // J.Atmos.Sci. 2000. Vol. 57, № 13. P. 1983–2006.

56. И.М.Имянитов, Е.В.Чубарина. Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 93 с.

57. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 352 с.

58. Williams E.R. The tripole structure of thunderstorms // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94, № D11. P. 13151.
59. Saunders C.P.R. A review of thunderstorm electrification processes // J.Appl.Meteorol. 1993. Vol. 32, № 4. P. 642–655.
60. Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms // J.Atmos. Sci. 1978. Vol. 35, № 8. P. 1536–1548.
61. Takahashi T. Thunderstorm electrification - a numerical study // J.Atmos.Sci. 1984. Vol. 41, № 17. P. 2541–2558.
62. Saunders C.P.R., Peck S.L. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103, № D12. P. 13,949–13,956.
63. Pereyra R.G. et al. A laboratory study of graupel charging // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105, № D16. P. 20,803–820,812.
64. Takahashi T. Electric potential of liquid water on an ice surface // J.Atmos.Sci. 1969. Vol. 26, № 6. P. 1253–1258.
65. Drake J.C. Electrification accompanying the melting the melting of ice particles // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1968. Vol. 94, № 400. P. 176–191.
66. Knight C.A. Observations of the morphology of melting snow // J.Atmos.Sci. 1979. Vol. 36, № 6. P. 1123–1130.
67. Willis P.T., Heymsfield A.J. Structure of the melting layer in mesoscale convective system stratiform precipitation // J.Atmos.Sci. 1989. Vol. 46, № 13. P. 2007–2024.
68. Williams E.R., Yair Y. The Microphysical and electrical properties of sprite-producing thunderstorms // Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharges, NATO Science Series. Springer, 2006. P. 57–83.
69. Chiu C.S. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83, № 10. C. 5025–5047.
70. Косый И.А., Костинский А.Ю., Матвеев А.А. Плазмохимические процессы в неравновесной азотно-кислородной смеси

// Труды ИОФАН. 1994. Т. 47. С. 37–57.

Список работ по теме диссертации

1.a Mareev E.A., Evtushenko A.A., Yashunin S.A. On the modeling of sprites and sprite producing clouds in the global electric circuit // Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharges, NATO Science Series / под ред. М. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft. Cluwer: Springer. 2005. С. 313-340.

2.a Evtushenko A.A., Mareev E.A. On the generation of charge layers in MCS stratiform regions // Journal of Atmospheric research. 2008. V. 91. № 2-4. P. 272-280.

3.a Евтушенко А.А., Мареев Е.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // Физика Атмосферы и Океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 242-252.

4.a Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Моделирование возмущений состава мезосферы под действием высотных разрядов – спрайтов // Известия ВУЗов – Радиофизика. 2011. Т. 54. № 2. С. 123-140.

5.a Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А., Мареев Е.А. Об особенностях возмущения ионного состава, нейтральных компонент и оптических эмиссий в мезосфере под действием грозových разрядов // Физика Атмосферы и Океана. 2013. Т. 49. № 5. С. 1-11.

6.a Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 2013. V. 102. P. 298-310.

7.a Evtushenko A.A. Modeling the influence of a high altitude discharge on the chemical balance of the mesosphere // Proceedings of International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Perugia. 2007. P. 415.

8.a Evtushenko A. A., Mareev E. A., Marshall T. C., Stolzenburg M.. On the generation and stability of charge layers in MCS stratiform regions // Proceedings of XIII International Conference on Atmospheric Electricity. Beijing. 2007. <http://www.icae2011.net.br/>.

9.a Evtushenko A.A. The altitude dependence of sprite influence on the chemical balance of the mesosphere // Abstract book of IAGA 11th Scientific Assembly. Sopron. 2009. 201-MON-O1100-0323.

10.a Evtushenko A.A. About the sprite influence on the chemical composition of the mesosphere // Book of abstracts of XXX Dynamics Days Europe. Bristol. 2010. P. 74-75.

11.a Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere // XIV International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro. 2011. <http://www.icae2011.net.br/>.

12.a Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A self-consistent model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere // First Summer School Thunderstorm Effects on the Atmosphere-Ionosphere System (TEA-IS). Malaga. 2012. <http://teis.trappa.es/sites/all/files/webform/con>.

13.a Евтушенко А.А. О влиянии грозовой активности на химические процессы в атмосфере // Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере, Труды VII всероссийской конференции молодых ученых. Н.Новгород. 2003. С. 141-145.

14.a Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Моделирование динамики электрического поля в конвективных облаках и мезомасштабных конвективных системах // VIII всероссийская конференция молодых ученых. Состав атмосферы и электрические процессы. Москва. 2004. С. 46.

15.a Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Плазмохимическая модель влияния спрайта на состав мезосферы // IX Всероссийская конференция молодых ученых, Состав атмосферы и электрические процессы. Н.Новгород, 2005. С. 57.

16.a Евтушенко А.А. Моделирование динамики слоев электрического заряда в атмосфере с учетом различных механизмов

электризации // XI Всероссийская конференция молодых ученых, Состав атмосферы и электрические процессы. Н.Новгород. 2007. С. 45.

17.a Евтушенко А.А. О высотной зависимости влияния спрайта на состав мезосферы // XIII международная конференция молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы”, САТЭП-2009. Звенигород. 2009. С. 75.

18.a Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Трехмерная модель влияния спрайта на химический состав мезосферы // XV Всероссийская школа-конференция молодых ученых. Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. Борок. 2011. С. 78.

19.a Евтушенко А.А. Моделирование влияния спрайтов на состав мезосферы // Труды конференции молодых ученых “Нелинейные волновые процессы”, XIII научная школа “Нелинейные волны - 2006”. Н.Новгород. 2006. С. 42-43.

20.a Евтушенко А.А. О формировании профиля проводимости и электрического поля в облачной атмосфере // Труды конференции молодых ученых “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики”, XIV научная школа “Нелинейные волны - 2008”. Нижний Новгород. 2008. С. 43-44.

21.a Евтушенко А.А. О нелинейных эффектах влияния спрайта на состав атмосферы // Труды конференции молодых ученых “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики”, XV научная школа “Нелинейные волны - 2010”. Н.Новгород. 2010. С. 33-34.

22.a Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель возмущений состава мезосферы под действием высотного разряда – спрайта // Труды XVI научной школы “Нелинейные волны – 2012”. Н.Новгород. 2012. С. 41-42.

23.a Евтушенко А.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // XI Сессия молодых ученых. Н.Новгород. 2006. С. 81.

24.a Евтушенко А.А. О роли легких ионов и облачных частиц в формировании электрической структуры грозового облака // XII Нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород. 2007. С. 89-90.

25.a Evtushenko A.A. Modeling of the lower positive charge layer in the stratiform region // International Symposium, Topical problems of nonlinear wave physics. St. Petersburg – Nizhny Novgorod. 2005. С. 38-39.

26.a Evtushenko A.A. Modeling the fast growth of electric field structure in thunderstorm clouds // International Symposium, Topical problems of nonlinear wave physics. Nizhny Novgorod. 2008. P. 34-35.

27.a Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А., Мареев Е.А. Возмущение электрического поля и состава средней атмосферы под действием высотных разрядов // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург. 2012. С. 71-73.