

УДК 551.510.533

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ НОЧНОГО СПРАЙТА

А. А. Евтушенко, Ф. А. Кутерин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложена радиально-симметричная самосогласованная модель спрайта на высотах от 60 до 90 км в области с радиусом 60 км. Проведён анализ возмущения концентрации ионов, электронов, нейтральных частиц и интенсивности эмиссии фотонов на высотах мезосферы для спрайта в ночных условиях. Вследствие быстрого вытеснения электрического поля в верхней части диффузной области спрайта на высотах 78÷81 км излучение на оси разряда заканчивается ранее, чем во внешней области, т. е. наблюдается тороидальная структура электрического поля и излучения спрайта. На высотах 83÷87 км при развитии разряда происходит уменьшение концентрации электронов, связанное с возрастанием роли диссоциативного прилипания к молекулярному кислороду, что существенно уменьшает проводимость на этих высотах.

ВВЕДЕНИЕ

В конце 20-го века были открыты свечения атмосферы на высотах до 100 км, коррелирующие с грозовой активностью в тропосфере и получившие общепринятое название TLE (Transient Luminous Events). Сразу после открытия высотных разрядов встал вопрос об их влиянии на состояние атмосферы. Прямые измерения возмущения химического состава и проводимости в области развития высотных разрядов технически сложны, а иногда и невозможны. Мезосфера и нижняя ионосфера труднодоступны для исследования наземными методами, т. к. они находятся слишком высоко для самолётов и аэростатов, и непосредственные измерения возможны лишь с помощью запуска дорогостоящих ракет, вносящих при своём движении существенное возмущение в состояние мезосферы. При этом совмещение во времени и пространстве запуска ракеты и высотного разряда само по себе является неразрешимой задачей. В этой связи особую важность приобретает развитие детальных моделей высотных разрядов и методов для решения обратных прикладных задач, позволяющих по данным дистанционного исследования разрядов получать информацию о возмущении проводимости и состава мезосферы.

С точки зрения возможного влияния на химический состав атмосферы наибольшее внимание привлекают спрайты, т. к. они являются наиболее ярким типом TLE (яркость до 1,5 МРл), имеют значительный объём (до 10^4 км³) и высокую частоту появления в атмосфере Земли (до 1 события в минуту) [1–3]. Первые достаточно подробные одноточечные модели были предложены в 2008 году для стримерной части спрайтов в ночных условиях [4, 5]. По результатам моделирования было предсказано значительное возмущение концентраций ионов и электронов на высотах 70 км и ниже. Основным дискуссионным вопросом при построении этих моделей является несогласованный учёт электрического поля, при этом расчёты ведутся для полей, превышающих пробойные в 3÷5 раз. В статье [6] показано, что спрайты могут быть важным источником молекул NO_x в тропиках на высоте 70 км и локально возмущать концентрацию оксидов азота (возмущение может достигать 20%) над областями высокой молниевой активности, но глобального эффекта на содержание NO_x не оказывают.

В статье [7] на основе построенной ранее химической модели [5] подробно исследованы причины задержки между разрядом в тропосфере и спрайтом, особо подчёркивается роль диссоциативного прилипания электронов с образованием иона O⁻ и последующего ассоциативного отлипания.

* a_evtushenko@inbox.ru

Для дневных условий развита одноточечная модель стримерной части спрайта [8]. Показано, что вследствие существенно более высокой проводимости атмосферы спрайт инициируется на меньших высотах, чем в ночных условиях. Проведён анализ химических возмущений атмосферы на высотах 31; 42 и 54 км. Предсказано уменьшение концентрации озона после вспышки спрайта, которое на высоте 54 км достигает 15 % через 15 мин после разряда.

В статьях [9, 10] развита одномерная самосогласованная модель диффузной области спрайта. Показано, что электрическое поле, с учётом значительного изменения проводимости, превышает пробойное (вплоть до 1,5 раз), что приводит к формированию лавины электронов и возмущению химического баланса мезосферы выше 70 км. Исследована зависимость размера диффузной области спрайта от параметров молниевых разрядов в тропосфере.

Несмотря на достигнутые успехи при моделировании эффектов влияния высотных разрядов на химический баланс атмосферы, разработано крайне мало численных моделей, учитывающих радиальную неравномерность при развитии разрядов. В статье [11] предложена двумерная модель для описания отклика мезосферы на возмущение медленно меняющегося электрического поля, связанного с разрядными процессами в тропосфере. В связи со сложностью и длительностью расчётов химический блок модели сильно упрощён и содержит обобщающие составляющие положительных, отрицательных и кластерных ионов, электроны, ионы O^- , а также несколько нейтральных компонент. По результатам расчётов подчёркивается важность учёта процессов быстрого отлипания электронов от ионов O^- для описания возмущения химического баланса мезосферы, особенно в предпробойных полях.

Экспериментальные наблюдения показывают, что спрайты далеко не всегда зажигаются точно над разрядом облако—земля, а имеют горизонтальное смещение до нескольких километров. Зарегистрированы случаи зажигания спрайтов по кольцу вокруг вспышки облако—земля. Для изучения радиальных эффектов в высотных разрядах авторами модернизирована разработанная ранее одномерная самосогласованная модель спрайта в ночных условиях [9, 10]: модель рассматривается в аксиально-симметричной постановке. Исследуются высотная и радиальная динамика возмущения электрического поля, химического состава, проводимости и оптического излучения в диффузной части спрайта и над ним.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе представлена радиально-симметричная модель высотного разряда, являющаяся развитием одномерной самосогласованной плазмохимической модели спрайта, предложенной в работе [9]. Для описания химического состояния мезосферы и оптической эмиссии на высотах от 60 до 90 км и от 0 до 60 км в радиальном направлении использовалась система из 267 химических реакций для 61 химической компоненты. Учитываются основные положительные ионы O_2^+ , NO^+ , кластерные ионы $H^+(H_2O)_n$, отрицательные ионы O^- , O_2^- , нейтральные компоненты азотно-кислородной смеси, включающие, в том числе, атомы азота и кислорода в возбуждённых состояниях. Блок химических реакций в основном построен на основе работы [12] и дополнен данными из работ [4, 5, 13]. Полный перечень химических реакций и компонент приведён в работе [9]. Система дифференциальных уравнений, соответствующая модели, включает в себя уравнения химической кинетики вида

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{k \in K_i} v_k \prod_{s \in J_k^i} N_s, \quad i = 1, \dots, 61, \quad (1)$$

где i — индекс химической компоненты, K_i и J_k^i — множества индексов, соответствующие химическим реакциям, в которых участвует i -ая химическая компонента, v_k — скорость химической

реакции с номером k . Начальные концентрации химических компонент взяты из атмосферной климатической модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model), являющейся частью обобщённой модели CESM (Community Earth System Model) версии 1.2, в точке с координатами 38° с. ш., 0° в. д. [14].

Возмущение электрического поля на высотах мезосферы является следствием разрядных процессов в тропосфере. В результате развития особенно мощных разрядов облако—земля (в основном положительной полярности) в облаке формируется значительный нескомпенсированный заряд. Динамика электрического поля E на высотах мезосферы моделируется самосогласованно в соответствии со следующим дифференциальным уравнением (см., например, [15, 16]):

$$\frac{dE}{dt} + \frac{\sigma E}{\varepsilon_0} = \frac{dE_{\text{ext}}}{dt}. \quad (2)$$

Здесь σ — электронная проводимость, E_{ext} — модуль внешнего электрического поля нескомпенсированного заряда от молниевых разрядов облако—земля, которое с учётом высокой проводимости земли задаётся в дипольном приближении, E — модуль действующего электрического поля на высотах мезосферы, ε_0 — диэлектрическая постоянная. Под «действующим» здесь понимается поле, которое используется для вычисления скоростей химических реакций во время высотного разряда. Уравнение (2) является приближённым — оно описывает поле в области мезосферы в квазистатическом приближении; при этом учитывается динамика внешнего поля, обусловленная динамикой тока в канале молнии, и возмущения проводимости в области разряда. В работах [15, 16] такой упрощённый подход использовался для расчёта поля М-компоненты молниевой вспышки (с учётом реалистичного высотного профиля проводимости) на высотах инициации спрайта и показал высокую эффективность. При этом было установлено, что именно вытеснение квазистатического поля из области высокой проводимости (связанной как с резким ростом проводимости с высотой, так и с возмущениями проводимости из-за роста температуры и концентрации электронов в разрядной области) играет ключевую роль в динамике разряда на временах развития спрайта. В данной работе подразумевается, что в уравнение (2) входит модуль напряжённости электрического поля для вычисления скоростей химических реакций, что позволило грубо учесть поправку, связанную с влиянием горизонтальной компоненты поля на динамику разряда на его периферии. Разумеется, последовательный учёт самосогласованной динамики поля потребовал бы решения несравненно более сложной задачи с учётом полной системы уравнений Максвелла.

Заряженная область находится на высоте $H = 10$ км над земной поверхностью, её радиальный размер $L = 10$ км. Считается, что нескомпенсированный заряд распределён в облаке по нормальному двумерному закону с характерным среднеквадратичным отклонением $L/3$. Максимальное значение силы тока в молниевом канале составляло 121,7 кА, что соответствует максимальному дипольному моменту 790 Кл · км. Ток в канале молнии задаётся выражением (3)

$$I(t) = I_0 \cdot (t/\tau_1)^2 \cdot \exp(-t/\tau_2) / [1 + (t/\tau_1)^2] \quad (3)$$

при значениях параметров $I_0 = 150$ кА, $\tau_1 = 70$ мкс, $\tau_2 = 500$ мкс.

Система дифференциальных уравнений химической кинетики и электрического поля (1) и (2) решается независимо в узлах сетки с шагом 100 м по высоте и 1 км по радиусу.

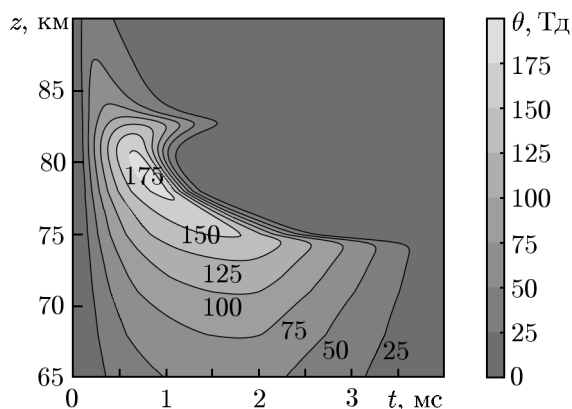


Рис. 1. Высотная зависимость нормированного электрического поля θ на оси разряда

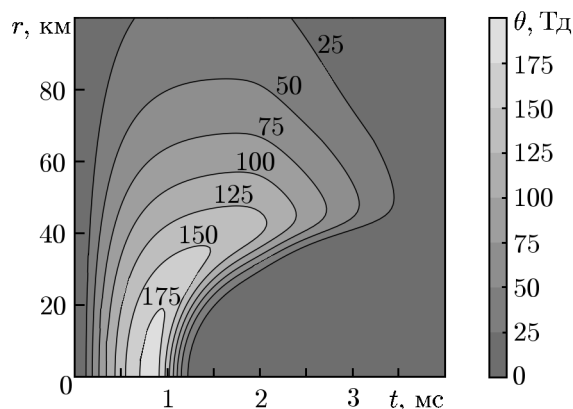


Рис. 2. Радиальная зависимость нормированного электрического поля θ на высоте $z = 79$ км

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.1. Электрическое поле

На рис. 1 и 2 показана динамика нормированного электрического поля. Пробойное поле 128 Тд достигается на высоте 81 км через 0,4 мс после начала разряда в тропосфере. В дальнейшем будем называть момент достижения пробойного поля на высоте инициации разряда началом спрайта. Максимальная напряжённость электрического поля достигает 185 Тд на высоте 79 км через 0,3 мс после начала спрайта. Распространение области диффузного разряда вверх происходит до высоты 84 км со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с за 150 мкс. Внизу спрайт достигает высоты 73 км. Скорость распространения при движении вниз составляет $2 \cdot 10^7$ м/с в первые 150 мкс с дальнейшим убыванием. В среднем скорость распространения диффузной области разряда вниз составляет $4,7 \cdot 10^6$ м/с, распространение продолжается 1,7 мс.

На оси разряда на высоте 80 км через 1 мс от начала протекания тока в молниевом канале формируется лавина электронов и их концентрация возрастает более чем на порядок, что приводит к росту проводимости и вытеснению электрического поля из области разряда. Эффект вытеснения поля особенно заметен на высотах $79 \div 81$ км, совпадающих с высотами максимального возмущения концентрации электронов и проводимости. Быстрое вытеснение электрического поля приводит к формированию тороидальной структуры разряда на исследуемых высотах. Через 1,2 мс на оси разряда электрическое поле полностью вытесняется, при этом на расстоянии 20 км по радиусу разряд продолжается (см. рис. 2). В связи с тесной связью динамики электрического поля и излучения спрайта в первой и второй положительных полосах молекулярного азота, излучение спрайта на высотах $79 \div 81$ км исходит из тороидальной формы. С понижением высоты данный эффект проявляется всё меньше, т. к. максимальные поля, а следовательно и возмущение проводимости уменьшаются и поле дольше не вытесняется из области разряда.

2.2. Проводимость

Одним из основных прикладных вопросов, встающих при моделировании высотных разрядов, является исследование динамики возмущения проводимости, существенно влияющей на условия распространения радиоволн сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона. С одной стороны, измене-

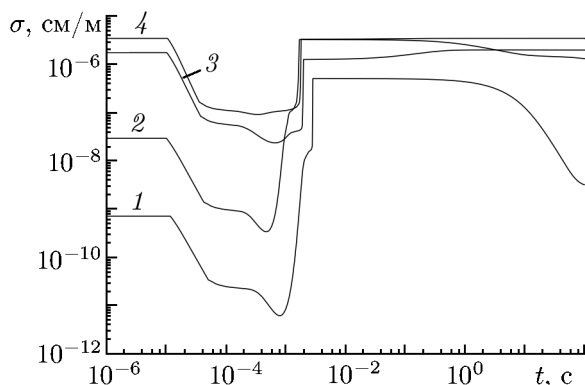


Рис. 3. Зависимость проводимости σ от времени на оси разряда на высотах 75 км (кривая 1), 79 км (кривая 2), 83 км (кривая 3) и 85 км (кривая 4)

спрайта и формировании лавинной ионизации происходит резкий рост концентраций заряженных частиц, что приводит к пропорциональному увеличению проводимости. Фактически во время разряда и в течение нескольких секунд после него проводимость на высотах 77÷81 км достигает 5÷6 мкСм/м, что сопоставимо с проводимостью на высоте 86 км в невозмущённых условиях. На высоте 75 км релаксация возмущения проводимости происходит за несколько секунд. В то же время на высотах 80÷83 км характерное время релаксации несколько сотен секунд. Высоты 83÷86 км выделяются динамикой электронов: во время разряда их концентрация, как и проводимость, падает вследствие увеличения роли реакций прилипания, и в течение нескольких секунд идёт восстановление к доспайтовому уровню. На высоте 78 км радиус возмущения проводимости достигает 35 км.

2.3. Электроны

Значительное возмущение концентрации электронов происходит на высотах от 74,5 до 86,5 км в области с радиальным размером до 30 км (см. рис. 4 и 5). Диффузную область спрайта можно разделить на две части с качественно различной динамикой концентрации электронов. Концентрация электронов увеличивается в нижней части разряда от 74,5 до 82,5 км и уменьшается на высотах от 82,5 до 86,5 км. В невозмущённой ночной мезосфере основным источником электронов является ионизация нейтральных частиц, а сток приходится на рекомбинацию с положительными ионами. Наряду с этими процессами наблюдается образование ионов O_2^- при быстром прилипании электронов к молекулярному кислороду и диссоциативном прилипании к O_3 . Нарбатываемый ион O_2^- взаимодействует с атомарным кислородом, что приводит к образованию O_3 и электронов при ассоциативном отлипании. Скорости химических реакций в приведённой цепочке высоки, и накопления O_2^- на исследуемых высотах не происходит. Сильное возмущение электрического поля во время разряда приводит к перераспределению источников и стоков для электронов. Основными источниками во время разряда становятся реакции ионизации молекулярного кислорода и азота, скорости которых нелинейно зависят от напряжённости электрического поля. Как и для других заряженных частиц, лавинное увеличение концентрации электронов происходит с задержкой по отношению к началу разряда в тропосфере: резкое возрастание концентрации на высоте 81,5 км имеет место только через 0,75 мс. В течение 1,4 мс волна возмущения концентрации электронов распространяется вниз и достигает высоты 75 км. Вертикальная скорость распространения возмущения концентрации электронов составляет $4,65 \cdot 10^9$ м/с.

ние проводимости может влиять на радиосвязь, а с другой стороны — может являться инструментом для исследования самих спрайтов. Для корректного моделирования динамики проводимости необходим самосогласованный расчёт электрического поля и проводимости, что и было сделано в данной работе.

Значительное изменение проводимости наблюдается на высотах от 75 до 90 км. Можно выделить две области принципиально разной динамики проводимости в области разряда. На высотах от 75 до 82 км проводимость существенно снижается на начальной стадии разряда вследствие роста температуры электронов и их частоты столкновений (см. рис. 3). При развитии

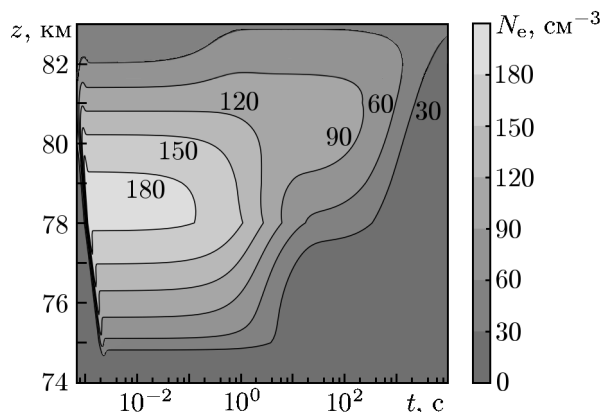


Рис. 4. Высотно-временная зависимость концентрации электронов N_e на оси разряда

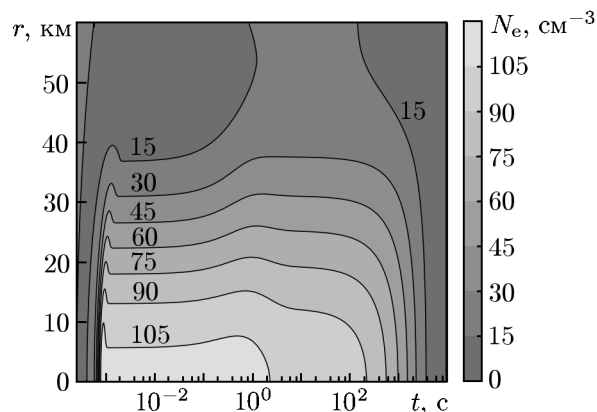


Рис. 5. Радиально-временная зависимость концентрации электронов N_e на высоте $z = 83$ км

В начале спрайта основную роль играет реакция с молекулярным кислородом, что связано с более высокой скоростью этой реакции при незначительном превышении полей пробойного значения. С развитием разряда роль ионизации азота возрастает и достигает 70 %, что определяется процентным содержанием азота в воздухе, при этом скорости ионизации азота и кислорода практически сравниваются. Основной сток для электронов связан с их прилипанием к молекулярному кислороду с образованием O^- согласно реакции $O_2 + e \rightarrow O^- + O$.

Максимальное возмущение концентрации электронов на высоте 78 км составляет 198 см^{-3} , что в 275 раз превышает равновесное значение $0,72 \text{ см}^{-3}$. Время релаксации концентрации электронов увеличивается с ростом высоты от нескольких секунд на 75 км до 1 000 с на высоте 82 км. Радиус возмущения концентрации электронов растёт с 10 км на высоте 75 км, до 40 км на высоте 79 км.

Интересной особенностью разряда является понижение концентрации электронов на высотах $82,5 \div 86,5$ км с выраженной зависимостью от радиуса (см. рис. 4 и 5), что связано с достижением полей практически пробойных значений на данных высотах. Эффективность реакции $O_2 + e \rightarrow O^- + O$ существенно возрастает, а лавины электронов не образуется, что также наблюдается при смещении от оси разряда. Концентрация электронов на высоте 83 км и радиусе $15 \div 30$ км уменьшается в 2 раза по сравнению с невозмущённым состоянием (см. рис. 5). После окончания разряда идёт восстановление концентрации электронов до невозмущённых значений за 1 с в основном из-за их отлипания от отрицательных ионов.

2.4. Ионы

Накопление O_2^- идёт при развитии лавины электронов в разряде и при дальнейшей релаксации концентраций других отрицательных ионов. Значительное возмущение концентрации O_2^- наблюдается на высотах от 74,5 до 84 км с радиусом до 42 км (см. рис. 6). Релаксация возмущения концентрации O_2^- имеет сильную высотную зависимость. На высоте от 74,5 до 76,5 км время релаксации возмущения составляет несколько десятков секунд. На высотах $76,5 \div 81,3$ км происходит резкий скачок времени релаксации практически до 600 с. Выше 81,5 км само возмущение невелико и время релаксации не превышает 1 с.

Возмущение концентрации ионов O_2^- начинается на высоте 81 км через 1 мс после начала протекания тока в тропосферном молниевом канале. Возмущение концентрации O_2^- распространяется вниз за 1,4 мс и вверх за 0,5 мс. По радиусу возмущение распространяется на 15 км от оси разряда не более чем за 1 мс.

Максимальное возмущение концентрации O_2^- существенно смещено к низу диффузной части

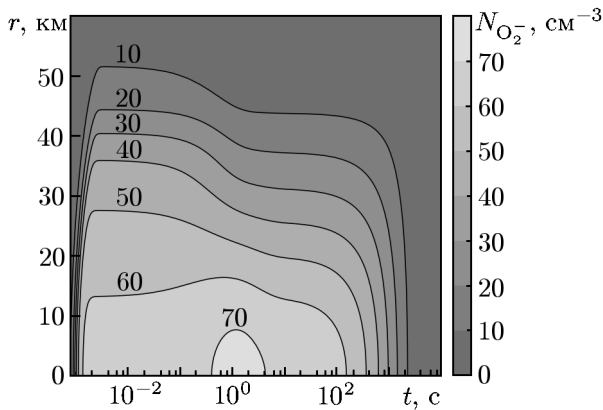


Рис. 6. Радиально-временная зависимость концентрации ионов O_2^- на высоте $z = 80$ км

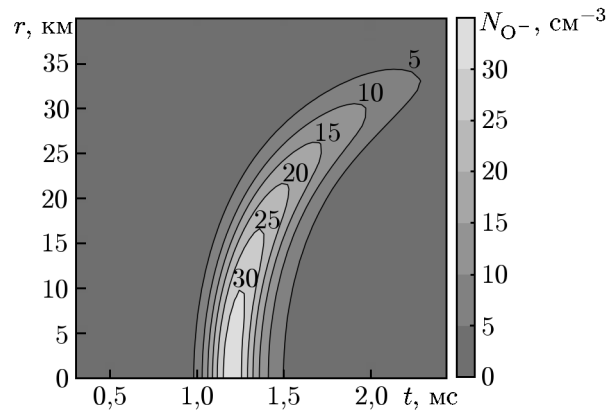


Рис. 7. Радиально-временная зависимость концентрации ионов O^- на высоте $z = 78$ км

спрайта, наблюдается на высоте $76 \div 78$ км и составляет 115 см^{-3} . Время жизни максимальных концентраций ионов O_2^- равно 7 с на высоте 76 км, при этом радиус возмущения достигает 20 км. На высотах между 76 и 78 км наблюдается пик возмущения концентрации после окончания разряда с 1-ой до 9-ой секунды, что связано с ионной конверсией других отрицательных ионов. Радиальный размер возмущения не превышает 10 км. Возмущение концентрации O_2^- имеет сильную радиальную зависимость. На высоте 75 км возмущение имеет радиус не более 10 км. С увеличением высоты радиус возмущения растёт и составляет 20 км на 76 км, 35 км на высоте 78 км и превышает 40 км на высоте $80 \div 82$ км. Выше 83 км возмущение концентрации ионов практически отсутствует.

Основной источник ионов O^- — это реакция диссоциативного прилипания электронов к молекулярному кислороду, которая является и основным стоком для электронов. Время релаксации возмущения концентрации этих ионов мало, и они практически сразу исчезают после окончания возмущения поля. Максимальная концентрация достигается на высоте 78 км и составляет 30 см^{-3} . Возмущение концентрации достигает 30 км по радиусу и распространяется с задержкой около 1,5 мс после начала спрайта (см. рис. 7).

Максимальное значение концентрации ионов O_2^+ равняется 255 см^{-3} и достигается на высоте 78 км, а область высот с возмущениями более 230 см^{-3} лежит в диапазоне $77 \div 79$ км. Нижняя граница возмущения достаточно резкая и находится на высоте 73 км. Верхняя граница возмущения концентрации O_2^+ на высоте 82 км размыта, и небольшие возмущения концентрации наблюдаются практически до 90 км. Радиальный размер возмущения концентрации O_2^+ сильно увеличивается с высотой: на высоте 75 км радиус равняется 10 км, на высоте 78 км — более 30 км. Также наблюдается задержка при радиальном распространении возмущения: на высоте 78 км задержка при радиусе 35 км составляет 0,7 мс. Релаксация концентрации этого иона сильно зависит от высоты. Дольше всего релаксация продолжается на высоте 82 км: возврат к доспрайтовым значениям происходит за 100 с, а на высоте 75 км — за несколько секунд.

Концентрация иона N_2^+ в невозмущённых условиях ночной мезосферы мала. Заметное возмущение концентрации N_2^+ наблюдается только во время разряда и очень быстро релаксирует после его завершения. Возмущение концентрации N_2^+ наблюдается на высотах $73 \div 82$ км с радиальным размером до 40 км. Максимальное значение 105 см^{-3} достигается на высоте 78 км.

2.5. Излучение и азот в возбужденном состоянии

Основное излучение высотного разряда приходится на первую и вторую положительные полосы азота. Излучение во второй полосе связано с переходом $N_2(C) \rightarrow N_2(B) + h\nu(^2PN_2)$. Радиационное время жизни $N_2(C)$ мало, поэтому, несмотря на существенное увеличение скорости образования $N_2(C)$ согласно реакции $N_2 + e \rightarrow N_2(C) + e$ в электрическом поле, возмущение концентрации $N_2(C)$ не превышает 1 см^{-3} . Основное излучение во второй полосе азота приходится на высоты $75,0 \div 81,5$ км, при этом радиальный размер области излучения достигает 30 км с максимумом на оси спрайта на высоте 78 км, где объёмная скорость эмиссии фотонов составляет $1,35 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Радиационное время жизни состояния $N_2(B)$ существенно больше, чем у $N_2(C)$. Основные источники для $N_2(B)$ — это переход из $N_2(C)$ с излучением во второй полосе и возбуждение азота при столкновении с электронами в электрическом поле, а основной сток — излучение в первой положительной полосе азота. Высотный диапазон возмущения $N_2(B)$ — от 75 до 81,5 км, а максимальное возмущение 405 см^{-3} достигается на высоте 78 км. Динамика концентрации $N_2(B)$ полностью определяется полем и его релаксацией. Состояние $N_2(B)$ имеет самое большое время жизни из всех учтённых возбуждённых состояний молекулярного азота. Основные источники $N_2(A)$ — это переход из $N_2(B)$ с излучением в первой положительной полосе: $N_2(B) \rightarrow N_2(A) + h\nu(^1PN_2)$, и возбуждение азота при столкновении с электронами в электрическом поле. Область возмущения концентрации $N_2(A)$ находится на высотах $74,5 \div 82,5$ км, максимальное возмущение концентрации достигает $1,73 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Максимальная интенсивность излучения в первой положительной полосе находится на оси спрайта на высоте 78 км и составляет $6,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Отношение интенсивностей хорошо коррелирует с данными экспериментальных наблюдений спрайтов (см. рис. 8). С увеличением высоты время релаксации возмущения увеличивается с 2 мс на 74,5 км до 5 мс на 82,5 км. Радиальный размер возмущения для $N_2(B)$ и $N_2(A)$ достигает 35 км.

На высоте 78 км возмущение концентрации $N_2(B)$ начинается в момент времени 1 мс на оси разряда и распространяется в радиальном направлении за 0,8 мс. При этом на оси разряда за 0,3 мс всё возмущение успевает релаксировать. Таким образом, для состояния $N_2(B)$, в отличие от $N_2(A)$, наблюдается тороидальность возмущения: на оси разряда возмущения нет, а на расстоянии 15 км по радиусу и больше — есть. Такая динамика концентрации $N_2(B)$ связана с динамикой электрического поля и его быстрым вытеснением из области разряда с большим возмущением проводимости.

Наиболее ярко радиальная зависимость излучения в первой и второй полосе азота видна на высоте 78 км. Интенсивное излучение на оси спрайта начинается через 0,9 мс после начала разряда облако—земля. К моменту времени 1,2 мс поле распространяется на расстояние 22 км по радиусу. В дальнейшем излучение на оси спрайта на данной высоте прекращается в связи с вытеснением поля из области разряда. Распространение волны излучения продолжается и далее, достигая 30 км и более. Таким образом, когда спрайт уже достаточно развился, светится

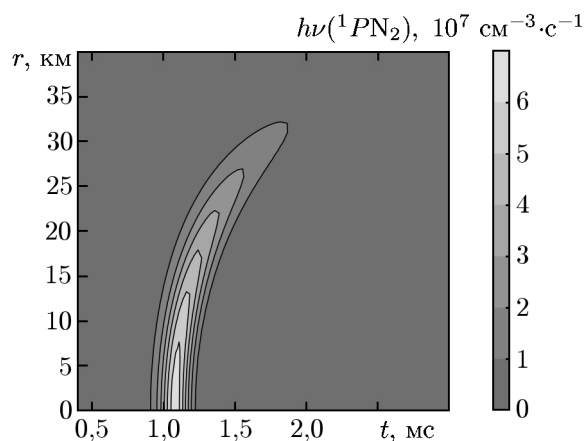


Рис. 8. Радиально-временная зависимость объёмной скорости эмиссии фотонов в первой положительной полосе молекулярного азота на высоте $z = 78$ км

только его внешняя оболочка. Излучение атомарного кислорода на длинах волн 557 и 630 нм и атмосферные линии молекулярного кислорода также учитывались при моделировании, но соответствующая интенсивность излучения на порядок меньше, чем во второй положительной полосе молекулярного азота.

3. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для проверки проведённых расчётов на основе предложенной аксиально-симметричной плазмохимической модели спрайта построена зависимость радиального размера области диффузного разряда от максимального тока в молниевом канале (максимального дипольного момента). Как показывают численные эксперименты, максимальное поле на оси разряда достигается на высоте 78,3 км, для которой проведены численные расчёты максимального и минимального размера диффузной области спрайта. Минимальные границы спрайта определены по значению поля 128 Тд, которое является критическим для развития разряда. Для оценки максимально возможного размера области свечения на рис. 9 построена ещё одна кривая, соответствующая значению поля 88 Тд, характерного для гало. По горизонтальной оси отложен максимальный ток в молниевом канале в тропосфере, вторая горизонтальная ось соответствует максимальному дипольному моменту (это сделано для удобства сравнения с экспериментальными данными).

Сравнение модельных расчётов и экспериментальных данных всегда достаточно сложно. В качестве основной проблемы стоит отметить, что данных, где одновременно доступно оптическое изображение, величина максимальной силы тока или максимальный дипольный момент, достаточно мало. На рис. 9 приведены 6 экспериментальных точек, взятых из работ [17] (точки 1, 3, 4, 6) и [18] (точки 2, 5); на их основе построена аппроксимирующая кривая. Для больших дипольных моментов численная модель даёт завышенные результаты для радиуса возмущения, что связано, в частности, с необходимостью уточнения уравнения (2) при больших отклонениях от оси разряда. Для малых дипольных моментов модель даёт слишком малый радиус свечения, или его отсутствие, что может быть обусловлено сложной динамикой поля и различными неоднородностями в разряде, не учитываемыми при нашей постановке задачи. Для средних значений дипольного момента, наиболее характерных для ночных спрайтов, модель даёт величины удовлетворительно соответствующие экспериментальным данным.

Важную информацию о динамике разряда, характерных значениях температуры электронов и напряжённости электрических полей могут дать спектрометрические исследования высотных разрядов, проводимые как с земли, так и со спутников. На рис. 10 представлено рассчитанное согласно модели отношение интенсивностей излучения в первой и второй положительных полосах молекулярного азота на различных высотах и общее отношение для всего исследуемого объёма разряда. Максимальное значение отношения интенсивностей в полосах на выделенных высотах находится в диапазоне $0,23 \div 0,25$, для всей области разряда оно равняется 0,21, что лишь немного превышает данные экспериментальных наблюдений [19]. Спутниковые наблюдения [20] дают завышенное значение отношения этих интенсивностей на высоте 78 км, не совпадающее с результатом расчётов, которое можно объяснить засвечиванием от инициирующей вспышки облако—земля или техническими особенностями регистрации излучения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана радиально-симметричная плазмохимическая самосогласованная модель воздействия возмущения электрического поля на состав мезосферы; модель применена для описания влияния спрайта на состав мезосферы. Показано, что условия для инициации высотного разряда

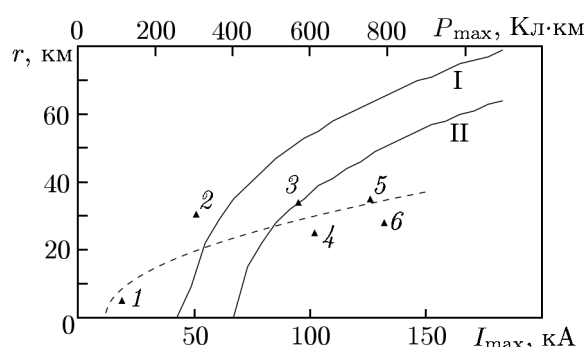


Рис. 9. Зависимость радиального размера диффузной области разряда от максимального тока I_{\max} и максимального дипольного момента P_{\max} . Кривая I соответствует $\theta = 88$ Тд, кривая II отвечает $\theta = 128$ Тд, штриховая кривая аппроксимирует экспериментальные данные

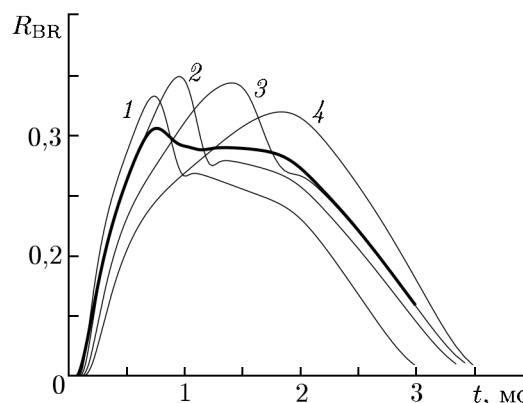


Рис. 10. Отношение интенсивностей излучения во второй и первой положительных полосах молекулярного азота R_{BR} на высотах 72; 76; 78 и 80 км (кривые 1–4 соответственно) и для всей области разряда (толстая линия)

(достижение пробойного поля) вначале создаются на высоте 81 км через 0,7 мс после начала протекания тока в молниевом канале в тропосфере. В дальнейшем пробойное поле распространяется вверх до высоты 83 км и вниз до 74 км. Установлено, что проводимость мезосферы на стадии инициации спрайта падает почти на два порядка из-за роста частоты столкновений электронов с нейтральными частицами при увеличении температуры, что способствует развитию разряда. По мере формирования лавины электронов проводимость существенно возрастает, что приводит к вытеснению поля и прекращению разряда. Показано, что на высотах 83÷87 км при развитии разряда наблюдается уменьшение концентрации электронов, связанное с возрастанием роли диссоциативного прилипания к молекулярному кислороду. Этот эффект существенно уменьшает проводимость на этих высотах. Учёт радиальной зависимости при моделировании разряда позволил выявить эффект вытеснения электрического поля и прекращения излучения с оси разряда; излучение на расстоянии от оси 15÷20 км при этом продолжается. Таким образом, показана тороидальность поля и области излучения в верхней части разряда.

Авторы выражают благодарность Е. А. Марееву за обсуждение рукописи статьи, а также С. О. Дементьевой за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16–17–00132).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuo C. L., Chen A. B., Chou J. K., et al. // J. Phys. O. 2008. V. 41, No. 23. Art. no. 234014.
2. Stenbaek-Nielsen H. C., Moudry D. R., Wescott E. M., et al. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, No. 23. P. 3829.
3. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G. // J. Phys. O. 2008. V. 41, No. 23. Art. no. 234009.
4. Sentman D. D., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Morrill J. S. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. D11. Art. no. D11112.
5. Gordillo-Vazquez F. J. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2008. V. 41, No. 23. Art. no. 234016.
6. Arnone E., Smith A. K., Enell C.-F., et al. // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2014. V. 119, No. 11. P. 6958.

7. Luque A., Gordillo-Vazquez F. J. // *Nature Geosci.* 2012. V. 5, No. 1. P. 22.
8. Winkler H., Notholt J. // *Atmospheric Chemistry Phys.* 2014. V. 14, No. 7. P. 3545.
9. Евтушенко А. А., Кутерин Ф. А. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2013. Т. 56, № 11–12. С. 947.
10. Evtushenko A. A., Kuterin F. A., Mareev E. A. // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2013. V. 102. P. 298.
11. Liu N. // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, No. A3. Art. no. A03308.
12. Косый И. А., Костинский А. Ю., Матвеев А. А., Силаков В. П. // *Труды ИОФ АН.* 1994. Т. 47. С. 37.
13. Митра А. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли.* М.: Мир, 1974. 372 с.
14. <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cam/>.
15. Yashunin S. A., Mareev E. A., Rakov V. A. // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, No. D10. Art. no. D10109.
16. Мареев Е. А., Яшунин С. А. // *Изв. РАН. ФАО.* 2010. Т. 46, № 1. С. 78.
17. Gerken E. A. // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, No. A11. P. 1344.
18. Wescott E. M., Stenbaek-Nielsen H. C., Sentman D. D., et al. // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, No. A6. P. 10467.
19. Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R. K. // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, No. 13. Art. no. L13808.
20. Adachi T., Fukunishi H., Takahashi Y., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, No. 17. Art. no. L17803.

Поступила в редакцию 15 марта 2016 г.; принята в печать 8 августа 2016 г.

SELF-CONSISTENT MODEL OF A NIGHT SPRITE

A. A. Evtushenko and F. A. Kuterin

We propose a radially symmetric self-consistent model of a sprite at altitudes from 60 to 90 km in the region with a radius of 60 km. The perturbations of the densities of ions, electrons, and neutral particles, as well as the photon-emission intensities at the mesospheric altitudes are analyzed with respect to a sprite under the night conditions. Because of the fast electric-field displacement in the upper part of the diffusion region of the sprite at altitudes of 78–81 km, radiation on the discharge axis stops earlier than that in the external region, i.e., the toroidal structures of the electric field and the sprite radiation are observed. At altitudes of 83–87 km, the electron-density decrease related to increasing role of the dissociative attachment to molecular oxygen occurs, which significantly decreases conductance at these altitudes.