

УДК 533.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ СОСТАВА МЕЗОСФЕРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОТНЫХ РАЗРЯДОВ — СПРАЙТОВ

*А. А. Евтушенко, Е. А. Мареев*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Измерения, проведённые в последнее время, показали, что во время электрического разряда в мезосфере (спрайта) имеются предпосылки для возмущения химического состава мезосферы. В настоящей работе предложена плазмохимическая система уравнений, позволяющая описать сложную взаимосвязь химических компонент во время разряда. Проведён анализ возмущений ионного состава мезосферы в ночных и дневных условиях на высоте 75 км, характерной для инициации спрайта, и на высоте 85 км, где обычно наблюдается диффузная область разряда. Про моделированы наиболее вероятные сценарии развития возмущений электрического поля и температуры электронов, характерных для диффузной и стримерной областей спрайта. Выполнены оценки величины и характерного времени возмущений основных ионных компонент ( $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $H_5O_2^+$ ,  $N_2^+$ ). Полученные значения возмущений электронной концентрации согласуются с экспериментальными данными и теоретическими оценками. Установлено, что серии спрайтов, которые регистрируются над обширными стратифицированными областями мезомасштабных конвективных систем, могут приводить к генерации сравнительно долгоживущих возмущений ионного состава мезосферной плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

Открытие в конце XX века нового геофизического явления — высотных разрядов — поставило целый ряд новых вопросов перед специалистами по физике и химии атмосферы [1–4]. Одним из наиболее сложных и практически важных среди них является вопрос о возможном влиянии высотных разрядов на состав средней атмосферы [5–8].

В связи с разнообразием типов высотных разрядов и их физических характеристик здесь мы имеем дело, фактически, с целым комплексом задач. Так, один из типов высотных разрядов, джеты (jets), стартуют в верхней части облака и до высот порядка 40 км распространяются со скоростью около 100 км/с, т. е. через область, где расположен максимум концентрации озона в атмосфере. В связи с этим были предприняты попытки оценить влияние джетов на баланс малых химических составляющих стратосферы [8–10], хотя по причине редкости этих событий и малого (до сих пор) объёма накопленных экспериментальных данных этот вопрос остаётся невыясненным.

Но, пожалуй, наибольший интерес среди высотных разрядов с точки зрения возможного влияния на состав средней атмосферы вызывают спрайты. Спрайты — это высотные разряды, возникающие в мезосфере и нижней термосфере на высотах от 50 до 90 км, относящихся к  $D$ -слою ионосферы. Оптическая вспышка в мезосфере возникает через несколько миллисекунд (иногда через несколько десятков или даже сотен миллисекунд) после разряда облако—земля (почти всегда положительной полярности) иногда на удалении от нижней части канала молниевой вспышки по горизонтали до нескольких десятков километров [3]. Как свидетельствует статистика, спрайты наблюдаются достаточно часто — порядка  $10^4$  событий в сутки на всём земном шаре [11, 12] — и занимают достаточно большой объём — несколько тысяч кубических километров [13–17]. Основанные на наблюдениях оценки [18, 19] показывают, что при формировании спрайта температура электронов на высотах мезосферы увеличивается до полутора-двух электрон-вольт на временах порядка нескольких десятков микросекунд, а электрическое поле достигает сотен вольт на метр.

*А. А. Евтушенко, Е. А. Мареев*

123

Скорости ряда плазмохимических реакций существенно зависят от температуры электронов и напряжённости электрического поля [20–22]. Поэтому во время мезосферного разряда должны увеличиваться концентрации электронов, ионных компонент, а также возбуждённых атомов и молекул.

Исследование возмущения состава мезосферы, обусловленного высотными разрядами, кроме фундаментального (поиск дополнительных источников поддержания ионизации нижней ионосферы в ночное время) представляет значительный практический интерес. Так, возмущения ионизации *D*-слоя влияют на условия распространения волн ОНЧ-диапазона. Как показано в ряде работ, обусловленные спрайтами возмущения *D*-слоя приводят к существенным вариациям амплитуды и фазы сигнала на ОНЧ-трассах [23]. Сильные возмущения, обусловленные наиболее мощными разрядами, в принципе, могут проявляться при радиопросвечивании ионосферы и влиять на точность геофизических и астрофизических измерений этим методом [24]. Наконец, исследование динамики основных и возбуждённых 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 [25] предлагается использовать спутниковые оптические измерения спрайтов для оценки возмущения электрического поля и некоторых характеристик релаксации возбуждённых состояний молекулы азота.

В настоящее время химические модели, разрабатываемые для описания динамики состава средней атмосферы, можно условно разделить на два класса. Первый класс составляют упрощённые модели, содержащие несколько химических компонент и около 20 химических реакций [26, 27]. Основная цель разработки таких моделей — попытка описать основные закономерности поведения концентрации химических компонент во времени с учётом их долготной и широтной зависимостей, а также эффектов переноса. Второй класс — это сложные модели, содержащие сотни (тысячи) реакций и позволяющие детально просчитывать изменение концентраций химических компонент в отдельных слоях атмосферы [28]. Единственная представленная в литературе модель для анализа химии спрайтов, описанная в работе [7], может быть отнесена именно к классу сложных моделей. Она разработана пока лишь для одной высоты (70 км) применительно к возмущениям, возникающим в плазме стримеров спрайта.

Авторами начата разработка модели, занимающей промежуточное положение между этими двумя классами. Будучи не слишком сложной для расчётов, она в перспективе должна позволить оценивать возмущения концентраций всех основных ионов, атомов и возбуждённых молекул под действием высотного разряда и давать обоснованные оценки яркости вспышки. В настоящей работе представлены результаты исследования первого блока разрабатываемой модели, который описывает около 50 химических компонент и учитывает влияние сравнительно кратковременного возмущения электрического поля и температуры электронов на ионный состав мезосферной плазмы без учёта явлений переноса.

Основными задачами работы, наряду с выбором плазмохимических реакций и параметризацией эффективных источников и стоков в соответствующих уравнениях, являлись оценки возможного влияния разрядов на состав мезосферы (включая мезопаузу) в наиболее вероятном диапазоне физических параметров. Поэтому задача решалась для нескольких высот, типичных для спрайтов. Учитывалось, что начальные концентрации электронов, ионов и ряда нейтральных молекул в дневных и ночных условиях могут отличаться на несколько порядков, поэтому изучаемые эффекты существенно зависят от времени суток.

В первом разделе работы обсуждаются постановка задачи и выбор базового плазмохимического блока модели. Во втором разделе приведены результаты расчётов для наиболее простого случая кратковременной вспышки на разных высотах. В третьем разделе исследуется влияние

продолжительности и интенсивности вспышки на уровень возмущений (в рамках условий применимости модели). Специально рассматривается случай последовательности спрайтов, разделённых сравнительно коротким временным интервалом, когда возмущения могут накапливаться. В четвёртом разделе полученные результаты сравниваются с результатами некоторых предшествующих работ (прежде всего, [7]) и обсуждаются ближайшие перспективы развития модели.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ВЫБОР ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ИОННОГО СОСТАВА

Физическая причина возникновения спрайтов и гало в верхних слоях атмосферы достаточно проста: пороговое поле пробоя воздуха падает с высотой экспоненциально (в соответствии с экспоненциальным падением давления), в то время как возмущение электрического поля, возникающее в момент мощных молниевых вспышек облако—земля, уменьшается с высотой медленнее (по степенному закону) и на высотах примерно 75 км превышает пробойное поле. Однако детали распределения поля по высоте и его эволюции, определяемые не только неоднородностью давления, но также профилем проводимости и динамикой вспышки, могут быть очень сложными. Примеры модельных расчётов динамики поля при инициации спрайта в мезосфере приведены в работах [3, 13, 29]. При моделировании плазмохимических процессов строго поставить и решить самосогласованную задачу, учитывающую возмущения температуры электронов, электрического поля и проводимости, пока не представляется возможным. Поэтому в настоящей работе, интересуясь, прежде всего, динамикой ионного состава атмосферы, мы будем считать возмущения поля и температуры электронов заданными, а вытеснение поля из области повышенной проводимости учтём косвенно, варьируя продолжительность этих (сравнительно кратковременных) возмущений.

Наблюдения показывают, что область свечения спрайта в мезосфере имеет ярко выраженную структуру. Большинство спрайтов имеют сравнительно однородно светящуюся диффузную верхнюю область (на высотах более 80 км) с поперечным размером порядка 30 км и структурированную в виде светящихся каналов стримерную нижнюю область (на высотах меньше 70÷75 км). Тонкая структура нижней части спрайтов характеризуется множеством светящихся каналов-стримеров с поперечными размерами от десятков до сотен метров [30]. Между диффузной и стримерной областями располагается переходная зона. Область инициации спрайта, как правило, лежит в переходной или в верхней части стримерной зоны [14]. С помощью щелевого спектрографа, оснащённого усилителем яркости, в спрайтах были зарегистрированы молекулярные полосы излучения  $N_2IP$ , по относительным интенсивностям которых удалось оценить температуру электронов в разряде в предположении бальмовского распределения по энергиям, оказавшуюся порядка 2 эВ [18, 19]. Была получена также оценка величины  $E/N_m \sim 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>, соответствующая наблюдаемой температуре электронов. Это означает, что на высоте около 70 км, где концентрация атомов и молекул  $N_m \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, электрическое поле  $E$  должно быть порядка 100 В/м. В то же время очевидно, что функция распределения электронов в разряде не является равновесной, поэтому полученные оценки следует рассматривать как приближённые.

Как уже отмечалось, в настоящей работе основное внимание уделяется анализу возмущений ионного состава мезосферы во время вспышки молнии. В дальнейшем мы чаще говорим именно о вспышке (молнии), а не о разряде в мезосфере, т. к. определение условий инициации спрайта само является одной из задач моделирования, поэтому задаваемые возмущения электрического поля и температуры электронов не всегда достаточны для развития разряда (спрайта).

Система реакций — источников и стоков химических компонент — включает основные положительные ионы  $O_2^+$  и  $NO^+$ , ионы-связки, другие положительные ионы, отрицательные ионы

и нейтральные частицы. Уровень ионизации в ночных условиях определяется потоком космических лучей. Возбуждённые состояния атомов и молекул на данном этапе не учитываются, за исключением возбуждённого состояния молекулы кислорода  $O_2(^1\Delta_g)$ , учёт которого может быть важным с точки зрения баланса ионизации на малых временах. Всего система включает 200 уравнений. В их число входят все основные реакции с учётом электронов, ионов и нейтральных частиц, которые обычно учитываются при моделировании нижней ионосферы; при выборе констант скоростей этих реакций было проведено тщательное сравнение различных источников [20–22] с учётом последних результатов в этой области [7, 28]. Сама система приводится в Приложении. Ниже мы обсуждаем только реакции, которые вносят основной вклад в динамику возмущений при тех или иных условиях. В них использованы следующие обозначения:  $T$  — температура нейтрального газа, которая не возмущается во время вспышки и на исследуемых высотах принимается равной 200 К (конкретная величина  $T$  не влияет заметным образом на возмущения концентрации ионов во время вспышки);  $M$  — концентрация нейтрального газа,  $T_e$  — температура электронов,  $\theta$  — отношение напряжённости электрического поля  $E$  [В/см] к концентрации нейтрального газа  $M$  [см<sup>-3</sup>] с коэффициентом  $10^{-16}$ .

Параметры  $T_e$  и  $\theta$ , которые входят в реакции с участием электронов, сильно возмущаются во время вспышки; временные профили возмущений  $T_e$  и  $\theta$  выбирались на основе результатов измерений и некоторых модельных оценок. В отсутствие молниевых разрядов электрическое поле на высотах мезосферы обычно слабое, поэтому считалось, что до начала возмущения  $\theta = 0$ . Во время возмущения в течение 10 мкс параметр  $\theta$  растёт, затем поддерживается на постоянном уровне в течение определённого времени  $T_p$ , которое варьировалось в расчётах от нуля до нескольких миллисекунд, потом линейно падает до нуля. Температура электронов во время возмущения менялась синхронно с электрическим полем — вначале повышалась с 200 К (что совпадает с температурой нейтрального газа на исследуемых высотах) до  $1,5 \cdot 10^4$  К, поддерживалась на постоянном уровне, а затем линейно убывала с характерным временем 10 мкс. Время роста и релаксации температуры электронов соответствует известным модельным оценкам для рассматриваемого диапазона высот [13]. Что касается динамики поля, то выбранная нами постановка задачи в зависимости от продолжительности возмущения описывает две различных ситуации. В стримерной области мощный и короткий импульс поля соответствует прохождению головки стримера (с радиусом порядка десяти метров) через выбранную точку. Согласно существующим (хотя и не устоявшимся) представлениям именно горячая плазма, формируемая головками стримеров, служит основным источником химических возмущений, вызываемых спрайтами на высотах ниже  $70 \div 75$  км [7]. В диффузной и переходной зонах область достаточно сильного (порядка критического) поля может занимать большой объём — несколько километров по вертикали и более десяти километров по горизонтали. Для моделирования этих зон выбранная нами постановка задачи также применима, но с учётом возможных вариаций амплитуды и длительности возмущения поля (и, соответственно, температуры электронов) на разных высотах. Следует заметить, что во время очень мощных разрядов поле в течение достаточно длительного интервала времени (до десятка миллисекунд) может оставаться на пробойном уровне; этот вопрос ниже обсуждается отдельно.

С учётом описанной выше характерной пространственной структуры спрайта детальные расчёты были проведены для двух высот — 75 км, характерной для инициации спрайта, и 85 км, где обычно наблюдается диффузная область разряда (для сравнения ниже представлены также некоторые результаты расчётов для высоты 70 км). Как известно, основные ионы на высоте 85 км — это ионы кислорода  $O_2^+$  и окиси азота  $NO^+$ , а ионы-связки имеют незначительные концентрации. При переходе к высоте 75 км концентрации ионов-связок растут, а концентрация  $O_2^+$ , напротив, значительно снижается. Поэтому эффекты возмущения ионного состава плазмы на этих двух

высотах могут существенно отличаться.

Расчёты проводились для начальных концентраций основных составляющих, соответствующих известным (типичным) экспериментальным данным. Традиционной для моделирования химии средней атмосферы является проблема неполного (или неточного) учёта химических реакций источников. Поэтому квазистационарное состояние, достигаемое в рамках выбранной системы на тех или иных высотах, не всегда соответствует желаемым (например, заимствованным из эмпирических моделей) профилям основных компонент. В связи с этим при задании начального состояния плазмохимической системы иногда вводятся эффективные источники и стоки соответствующих химических компонент. Для задач, рассматриваемых в данной работе, указанная проблема была не столь острой в условиях ночной атмосферы, когда наблюдается подавляющее большинство спрайтов. Но при задании начального состояния в дневных условиях, когда используемая система, не учитывающая фотохимию, заведомо является неполной, мы вводили эффективные источники и стоки по следующей схеме: 1) задавались начальные концентрации основных составляющих и рассчитывались их изменения за 100 с; 2) вычислялась разность между конечным и исходным значениями концентрации каждой составляющей и делилась на время расчёта. Полученный результат с обратным знаком учитывался в расчётах в качестве источника (если итоговая величина положительная) или стока (если она отрицательная). Конечно, такое введение эффективных источников и стоков требует детального тестирования алгоритма, в частности проверки сохранения плотности полного заряда. Такое тестирование показало, что при умеренной плотности нейтрального газа такое (линейное) задание источников не приводит к нарушению квазинейтральности.

## 2. ВОЗМУЩЕНИЯ ИОННОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ВСПЫШКЕ

Сначала рассмотрим случай кратковременного возмущения электрического поля и температуры электронов, когда остывание электронов и падение поля начинается сразу после нагревания: в течение 10 мкс задан линейный рост, затем в течение 10 мкс линейное падение поля и температуры. Параметр  $\theta$  растёт до  $80 \text{ В} \cdot \text{см}^2$  на высоте 85 км и  $50 \text{ В} \cdot \text{см}^2$  на высоте 75 км, что в пересчёте на напряжённость электрического поля даёт 1,6 и 2,5 В/см соответственно. Температура электронов на тех же временах возмущается до  $1,5 \cdot 10^4 \text{ К}$ .

На рис. 1а приведены зависимости концентрации электронов и важнейших ионных компонент для ночных и дневных условий (панели слева и справа соответственно) на высотах 75 и 85 км (панели сверху и снизу соответственно). Рассмотрим вначале более подробно результаты расчётов для высоты 85 км. Концентрация электронов возрастает значительно — практически в 10 раз (с 640 до  $6000 \text{ см}^{-3}$ ). Отрицательные ионы не характерны для высоты 85 км, поэтому весь отрицательный заряд сосредоточен на электронах. Как видно из графиков, релаксация электронов имеет, скорее, нелинейный характер. К накоплению электронов приводят в основном реакции ионизации молекул азота и кислорода:  $\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2^+ + e + e$ , константа реакции  $k = 10^{(-8,3-36,5/\theta[\text{В} \cdot \text{см}^2])}$ ,  $\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O}_2^+ + e + e$ ,  $k = 10^{(-8,8-28,1/\theta[\text{В} \cdot \text{см}^2])}$ . Основные положительные ионы на высоте 85 км — это ионы  $\text{O}_2^+$  и  $\text{NO}^+$ . Ионы-связки присутствуют, но их концентрации незначительны. Видно, что релаксация положительных ионов — сильно нелинейный процесс, т. е. при больших возмущениях релаксация происходит вначале быстро, а затем скорость релаксации существенно снижается. Поэтому при больших полях характерное время релаксации возмущений зависит от стадии процесса.

Во время вспышки концентрация ионов  $\text{NO}^+$  практически не меняется, однако потом различные положительные ионы пополняют запас данного компонента в основном за счёт реакции

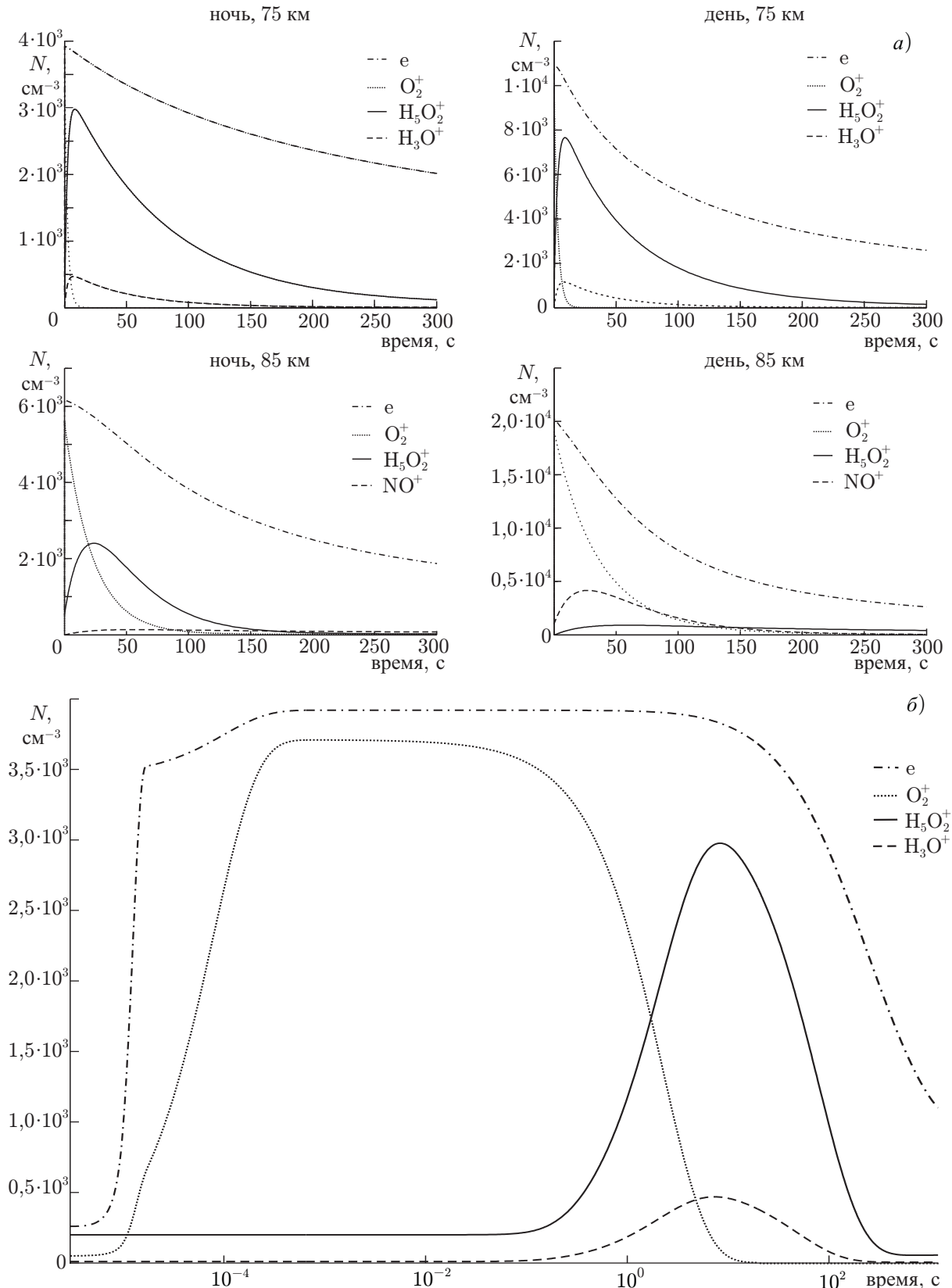


Рис. 1. Возмущение концентраций ионов и электронов в мезосфере после высотного разряда (спрайга)

$O_2^+ + NO \rightarrow O_2 + NO^+$ ,  $k = 4,4 \cdot 10^{-10}$ . Как следствие, концентрация ионов  $NO^+$  растёт ещё около 30 с. Далее наблюдается пик концентрации с величиной около  $2500 \text{ см}^{-3}$  (примерно пятикратное увеличение исходной концентрации), а затем плавное падение с характерным временем около 100 с.

Концентрация ионов молекулярного кислорода  $O_2^+$  также испытывает сильное возмущение, увеличиваясь более чем в 50 раз. Основными источниками этих ионов являются реакция  $N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$ ,  $k = 6 \cdot 10^{-11} \exp[300/(T[K])^{1/2}]$  и ионизация молекулярного кислорода. При релаксации концентрация молекулярного кислорода падает достаточно быстро — более чем в 5 раз за 50 с. Далее идёт плавное уменьшение концентрации с выходом на стационарное значение. Именно быстрая релаксация ионов кислорода определяет рост концентрации ионов окиси азота  $NO^+$ . На высоте 75 км время релаксации концентрации  $O_2^+$  существенно меньше, чем на 85 км, поэтому время роста концентрации  $NO^+$  тоже уменьшается. Положительные ионы-связки не характерны для высоты 85 км, однако во время вспышки они появляются. Суммарная концентрация ионов-связок возрастает до  $200 \text{ см}^{-3}$ .

Для удобства на рис. 1б графики возмущений концентраций электронов и основных ионных компонент на высоте 75 км в ночных условиях показаны с временной шкалой в логарифмическом масштабе.

Динамике ионов-связок следует уделить особое внимание при рассмотрении химических возмущений после вспышки на высоте 75 км (см. рис. 2). Если на высоте 85 км преобладают ионы  $NO^+$  и  $O_2^+$ , а ионов-связок обычно почти нет, то на высоте 75 км концентрации ионов-связок сопоставимы с концентрацией иона  $NO^+$ . По данным ракетных измерений, на высоте 75 км преобладающими являются ионы  $H_5O_2^+$  с молярной массой 37. После вспышки их концентрация также демонстрирует самое большое возмущение (до  $3000 \text{ см}^{-3}$ ), превосходящее возмущение концентраций всех других ионов-связок, вместе взятых. Возмущение концентраций ионов-связок в основном происходит в соответствии с цепочкой химических реакций, начинающихся с иона  $O_2^+$ . После присоединения молекулы воды посредством реакции  $O_2^+(H_2O) + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH + C_2$  ( $k = 2 \cdot 10^{-10}$ ) он превращается в ион  $H_3O^+$ . В дальнейшем процесс гидратации продолжается согласно реакции  $H_3O^+ + H_2O + M \rightarrow H_5O_2^+ + M$ ,  $k = 3,4 \cdot 10^{-27}$ . Скорость релаксации ионов  $H_5O_2^+$  сопоставима со скоростью релаксации ионов  $H_3O^+$ . На процессы с участием ионов с большим количеством присоединённых молекул воды (3 и 4 соответственно) существенно влияют ионы окиси азота  $NO^+$ , что приводит к более длительному времени увеличения концентрации и более длительной релаксации её возмущения. Динамика релаксации концентрации электронов на высоте 75 км не претерпевает существенных изменений по сравнению с высотой 85 км.

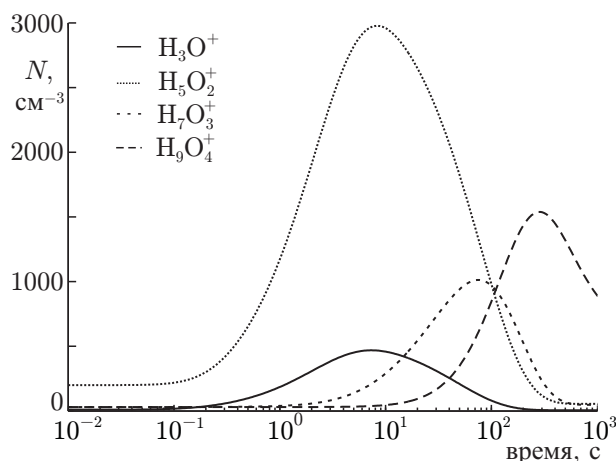


Рис. 2. Возмущение концентраций ионов-связок на высоте 75 км

### 3. ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ВСПЫШКИ НА УРОВЕНЬ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Во время вспышки скорость образования электронов, определяемая параметром  $\theta$ , естественно, возрастает, а скорость гибели электронов, определяемая их температурой, падает:  $O_2^+ + e \rightarrow$

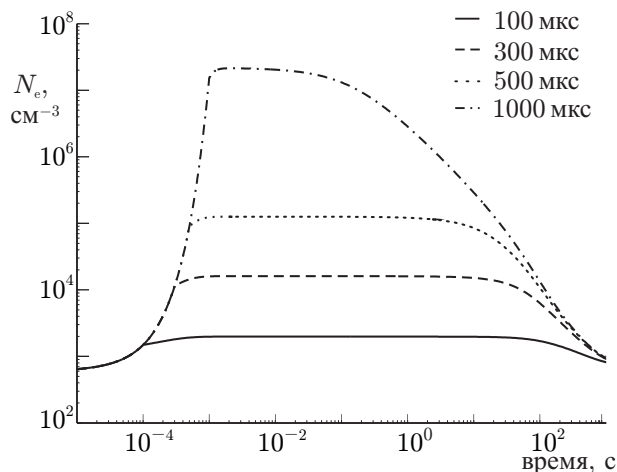


Рис. 3. Временные зависимости концентрации электронов на высоте 85 км в ночных условиях от продолжительности плато в возмущении температуры и поля

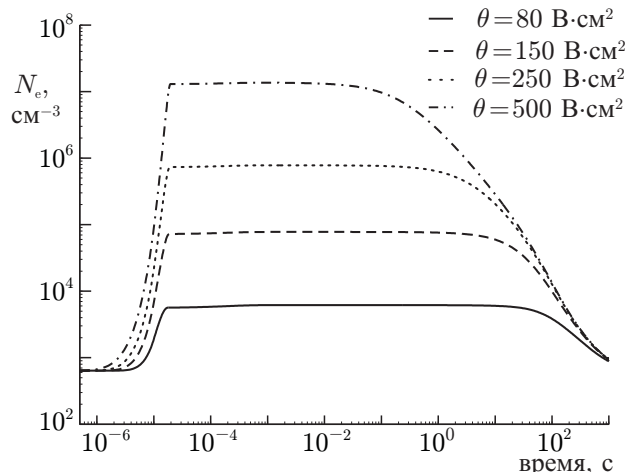


Рис. 4. Временные зависимости концентрации электронов на высоте 85 км в ночных условиях от величины электрического поля

$\rightarrow O+O, k = 2 \cdot 10^{-7} (300/T_e[\text{K}]), NO^+ + e \rightarrow N+O, k = 4 \cdot 10^{-7} (300/T_e[\text{K}])^{3/2}$ . Поэтому увеличение продолжительности вспышки и напряжённости электрического поля должно приводить к росту возмущения концентрации химических компонент, что можно наблюдать на рис. 3 и 4.

На рис. 3 приведены временные профили концентрации электронов при различной длительности плато электрического поля и температуры. При расчётах максимальное значение  $\theta$  полагалось равным 20, что на высоте 85 км даёт электрическое поле  $E = 0,4 \text{ В/см}$ , сопоставимое с критическим полем на этой высоте. Температура электронов возмущается синхронно с полем, достигая максимального значения  $1,5 \cdot 10^4 \text{ К}$ . На рис. 4 время роста и релаксации  $\theta$  и  $T_e$  составляет по 10 мкс; в расчётах менялась лишь максимальная величина  $\theta$ . Заметим, что при изменении длительности вспышки спрайта ярко проявляется нелинейность системы. Например, увеличение длительности с 300 до 500 мкс приводит к изменению амплитуды возмущения электронов более чем в 6 раз. В зависимости от величины возмущения сильно меняется и характерное время релаксации: чем больше возмущение, тем быстрее идёт релаксация.

При дальнейшем увеличении возмущения поля и длительности вспышки спрайта концентрации ионизованных компонент изменяются на 3–4 порядка сильнее по сравнению со случаем кратковременного маломощного разряда. Появляются значительные, хотя и очень быстро релаксирующие, возмущения концентрации отрицательных ионов. Эффективно генерируются новые положительные ионы. Существенно изменяются и времена релаксации. Так, если взять возмущение параметра  $\theta$  равным  $500 \text{ В} \cdot \text{см}^2$ , концентрация электронов достигнет  $1,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ , а падение их концентрации на порядок произойдёт всего за 3 секунды. Рассмотрение столь больших возмущений поля в рамках данной (несамосогласованной) постановки задачи, однако, представляется нереалистичным. При таких возмущениях сильно меняется проводимость мезосферы и электрическое поле вытесняется из области разряда. Поэтому для высоты 75 км мы рассмотрели ситуацию, когда продолжительность вспышки сильно возрастает, при весьма умеренных значениях амплитуды электрического поля.

На рис. 5 приведены результаты расчёта концентраций электронов и ионов на высоте 75 км для продолжительного возмущения (рост электрического поля и температуры электронов 1 мс, плато 3 мс, релаксация 1 мс). Параметр  $\theta$  был равным  $13,3 \text{ В} \cdot \text{см}^2$ . На рис. 6 приведены результаты расчёта концентраций электронов и ионов на высоте 75 км для кратковременной вспышки



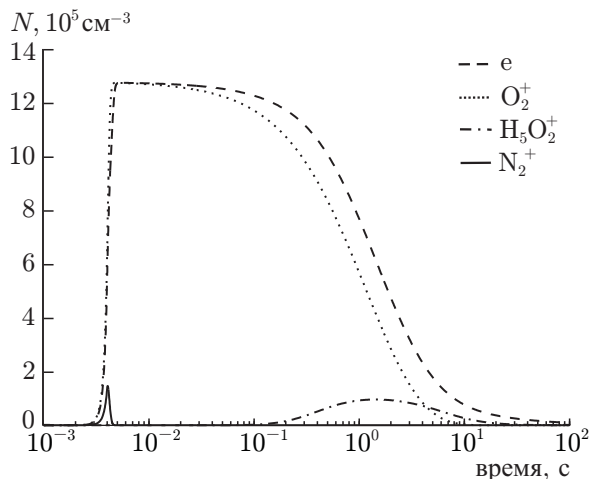


Рис. 5. Возмущение концентрации ионов и электронов на высоте 75 км в ночных условиях после спрайта большой длительности

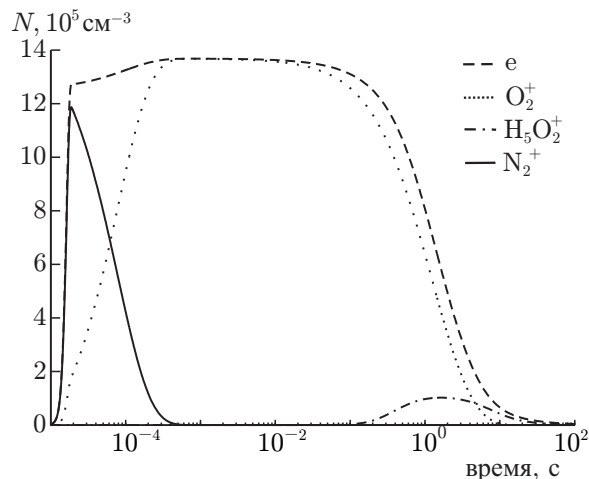


Рис. 6. Возмущение концентрации ионов и электронов на высоте 75 км в ночных условиях после спрайта с большим возмущением электрического поля ( $\theta = 130 \text{ В} \cdot \text{см}^2$ )

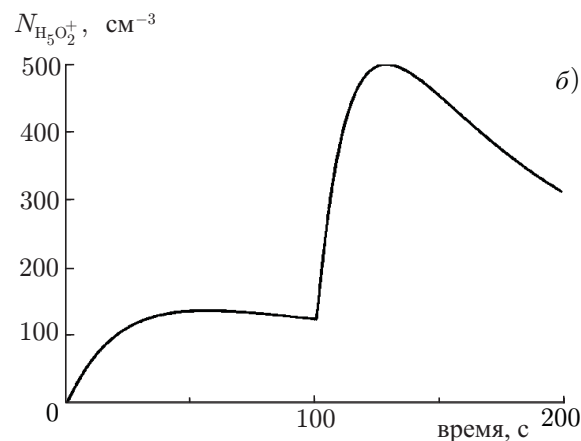
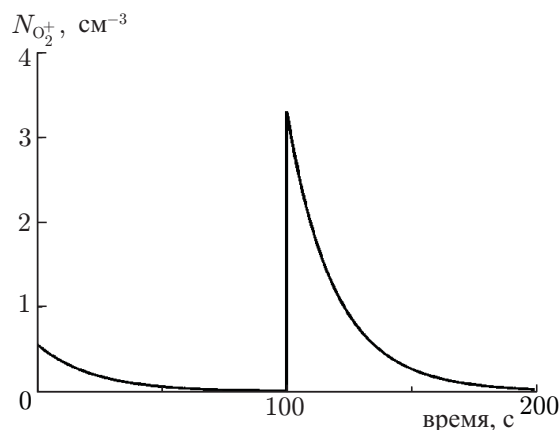
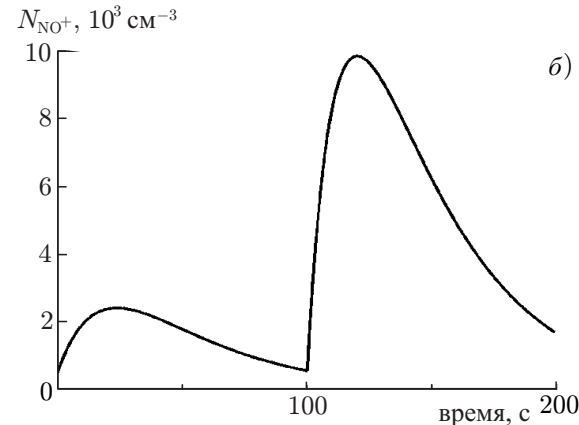
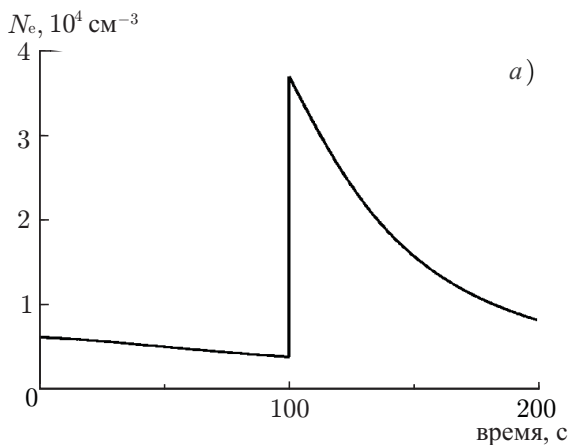


Рис. 7. Динамика ионного состава мезосферы после серии из двух спрайтов для ночных условий на высоте 85 км

(стадии роста и релаксации электрического поля и температуры электронов по 10 мкс) при достаточно сильном возмущении поля:  $\theta = 130 \text{ В} \cdot \text{см}^2$ . Это значение параметра  $\theta$  соответствует  $E = 7,15 \text{ В/см}$ , что примерно в 6 раз превосходит критическое поле ( $E_{cr} \approx 1,2 \text{ В/см}$ ).

Недавние наблюдения показывают, что вспышки спрайтов — не такое редкое явление, как считалось ранее: зафиксированы случаи, когда частота спрайтов достигает нескольких событий в минуту [11, 12]. Поэтому был рассмотрен случай реализации двух последовательных спрайтов, разделённых временным интервалом в 100 с. Каждый из спрайтов обеспечивает возмущение поля и температуры электронов в течение 20 мкс (рост  $\theta$  до  $80 \text{ В} \cdot \text{см}^2$  и  $T_e$  до  $1,5 \cdot 10^4 \text{ К}$  имел место в течение 10 мкс, затем  $\theta$  и  $T_e$  релаксировали за 10 мкс). Результаты приведены на рис. 7 для высоты 85 км в ночных условиях.

Из приведённых графиков видно, что к началу второго спрайта возмущение концентрации электронов не успело полностью релаксировать. Образование электронов идёт в соответствии с реакциями ионизации молекулярного азота и кислорода. Поэтому начальная концентрация электронов очень важна, и во время второго спрайта концентрация электронов возрастает больше, чем во время первого. Однако относительное увеличение концентрации электронов для первого и второго спрайтов одинаковое — практически в 10 раз. Концентрация ионов  $\text{O}_2^+$  успевает полностью релаксировать к началу второго спрайта. Однако возмущение концентрации ионов молекулярного кислорода после второго спрайта больше, чем после первого. Это связано с тем, что начальная концентрация  $\text{O}_2^+$  не влияет на возмущение концентрации, которое определяется начальной концентрацией электронов.

Ионы  $\text{NO}^+$  и  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  не являются первичными для вспышки спрайта: они образуются и накапливаются в результате релаксации ионов  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ . Время релаксации концентрации ионов  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  достаточно большое: после первого спрайта релаксации практически не было, после второго спрайта концентрация уменьшилась почти в 2 раза. Поэтому можно сделать вывод о накоплении ионов  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  после последовательности спрайтов. Концентрация ионов  $\text{NO}^+$  после первого спрайта успевает релаксировать, а после второго спрайта остаётся выше начальной почти в 3 раза.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выше представлены результаты исследования первого блока разрабатываемой модели, который описывает около 50 химических компонентов и учитывает влияние сравнительно кратковременного возмущения на ионный состав мезосферной плазмы без учёта явлений переноса. Выполнены расчёты, позволяющие оценить уровень возможного влияния разрядов на состав мезосферы при наиболее вероятных сценариях развития возмущений электрического поля и температуры электронов на высоте 75 км, характерной для инициации спрайта, и на высоте 85 км, где обычно наблюдается диффузная область разряда. Выполнены оценки величины и характерного времени возмущений концентраций электронов и основных ионных компонент:  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}_5\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ .

Следует подчеркнуть, что вышеприведённое рассмотрение проводилось при заданных изменениях электрического поля и температуры электронов. Характерные времена и амплитуды возмущений при этом выбирались на основе известных оценок. Как видно из результатов проведённых расчётов, принятое приближение применимо лишь для весьма кратковременной вспышки. В этом случае полученные значения возмущений электронной концентрации согласуются с экспериментальными данными и теоретическими оценками (см., в частности, [31–33]).

Как уже отмечалось выше, единственная представленная в литературе модель для анализа химии спрайтов описана в работе [7]. Эта модель была разработана пока лишь для одной высоты (70 км) применительно к возмущениям, возникающим в плазме стримеров спрайта. В настоящей работе рассмотрен более широкий круг ситуаций, которые могут возникать на высотах 75 и 85 км, включая развитие диффузионного разряда. При развитии стримерного разряда в работе [7] поле зависит от времени по гауссовому закону, продолжительность возмущения поля равна 6 мкс

(что близко к значениям нашей модели), но поле в 5 раз превышает пробойное (наши расчёты проведены для поля чуть выше пробойного). Поэтому для более детального сравнения с результатами работы [7] мы провели расчёты в рамках предложенной нами модели для кратковременной вспышки (выбирая длительность стадий роста и релаксации электрического поля и температуры электронов равными 10 мкс), возникающей на высоте 70 км. Максимальное значение параметра  $\theta$  принято равным 63, что соответствует полю 9,3 В/см, так что максимальное поле  $E = 5E_{ст}$ , как и в работе [7]. На рис. 8 приведены результаты расчёта концентраций электронов и ионов. Отметим, что максимальные возмущения концентраций электронов и основных ионных компонент весьма близки к приведённым в работе [7].

В нашей работе впервые проведено также исследование зависимости величины возмущений от продолжительности и интенсивности вспышки (в рамках применимости модели, т. е. пока без учёта возмущённых состояний атомов и молекул). Следует обратить внимание на выявленные отличия между продолжительным и мощным спрайтами со сравнимой энергетикой. Для продолжительного спрайта возмущение ионов азота  $N_2^+$  оказывается существенно меньше. Связано это с их быстрой ионной конверсией в  $O_2^+$ . При мощной же вспышке образуется больше ионов атомарного кислорода  $O^-$ , что видно из увеличения концентрации электронов после спрайта (время жизни возмущения концентрации  $O^-$  невелико).

Одним из наиболее интересных результатов настоящего исследования, на наш взгляд, является вывод о том, что серии спрайтов, которые регистрируются над обширными стратифи-

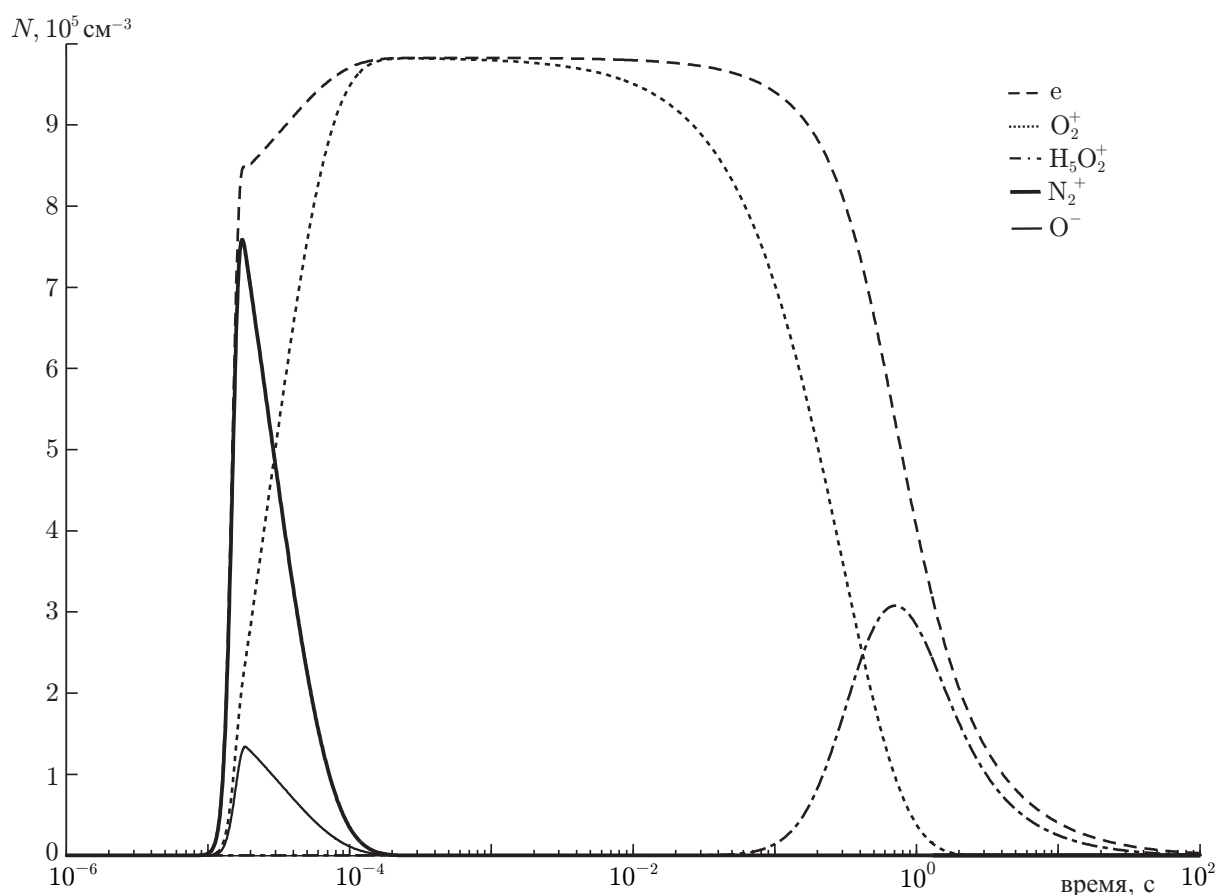


Рис. 8. Эволюция концентраций ионов и электронов на высоте 70 км в ночных условиях после спрайта с большим возмущением электрического поля ( $\theta = 63 \text{ В} \cdot \text{см}^2$ )

цированными областями мезомасштабных конвективных систем, могут приводить к генерации сравнительно долгоживущих возмущений ионного состава мезосферной плазмы.

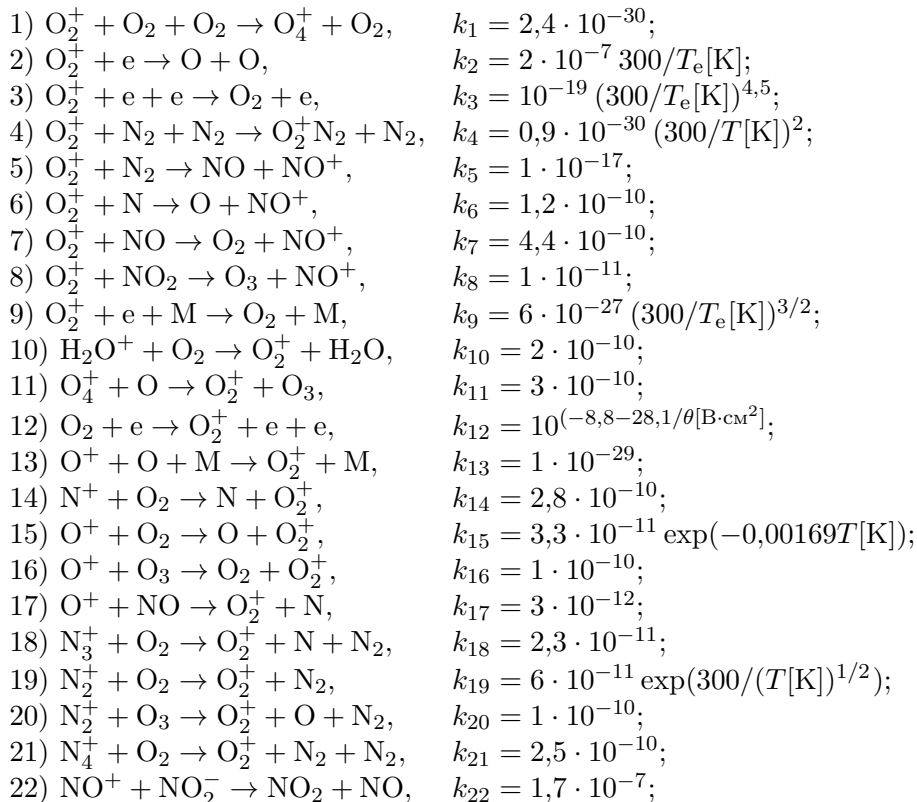
На следующих этапах работы предполагается самосогласованным образом задавать электрическое поле, а также более детально учесть роль возбуждённых атомов и молекул при расчётах влияния спрайтов на состав мезосферы. Заметим, что скорости реакций, приводящие к образованию возбуждённых состояний, сильно зависят от параметра  $\theta$ , поэтому при небольших полях учёт возбуждённых состояний не приводит к существенному изменению количества и амплитуды возмущающихся ионных компонент. При учёте же возбуждённых состояний количество возмущающихся компонент увеличится в основном из-за нейтральных молекул и короткоживущих ионов.

Разрабатываемая модель в дальнейшем будет дополнена также учётом фотохимических процессов. В перспективе модель позволит оценить возмущения концентраций всех основных ионов, атомов и возбуждённых молекул под действием высотного разряда и давать обоснованные оценки яркости вспышки. Конечным результатом работы должно стать создание трёхмерной модели влияния спрайта на состав мезосферы с учётом диффузии.

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН РАН «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследования атмосферных процессов» и РФФИ (грант 10-05-01045-а). Авторы признательны Ф. А. Кутерину за дискуссии и помощь в расчётах, а также рецензенту данной статьи за ценные замечания.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Система плазмохимических реакций, используемая в данной работе:



23) $\text{NO}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$ ,	$k_{23} = 3,4 \cdot 10^{-8}$ ;
24) $\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$ ,	$k_{24} = 4 \cdot 10^{-7} (300/T_e[\text{K}])^{3/2}$ ;
25) $\text{NO}^+ + e + e \rightarrow \text{NO} + e$ ,	$k_{25} = 10^{-19} (300/T_e[\text{K}])^{4,5}$ ;
26) $\text{NO}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+\text{N}_2 + \text{N}_2$ ,	$k_{26} = 2 \cdot 10^{-31} (300/T[\text{K}])^{4,4}$ ;
27) $\text{NO}^+ + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+\text{O}_2 + \text{N}_2$ ,	$k_{27} = 3 \cdot 10^{-31}$ ;
28) $\text{NO}^+ + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}^+\text{O}_2 + \text{O}_2$ ,	$k_{28} = 0,9 \cdot 10^{-31}$ ;
29) $\text{NO}^+ + e + \text{M} \rightarrow \text{NO} + \text{M}$ ,	$k_{29} = 6 \cdot 10^{-27} (300/T_e[\text{K}])^{3/2}$ ;
30) $\text{NO} + e \rightarrow \text{NO}^+ + e + e$ ,	$k_{30} = 10^{(-8,8-28,1/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}$ ;
31) $\text{N}^+ + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{31} = 10^{-29}$ ;
32) $\text{O}^+ + \text{N}_2 + \text{M} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N} + \text{M}$ ,	$k_{32} = 6 \cdot 10^{-29} (300/T[\text{K}])^2$ ;
33) $\text{O}^+ + \text{N} + \text{M} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{33} = 1 \cdot 10^{-29}$ ;
34) $\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$ ,	$k_{34} = 2,5 \cdot 10^{-10}$ ;
35) $\text{N}^+ + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$ ,	$k_{35} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
36) $\text{N}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$ ,	$k_{36} = 8 \cdot 10^{-10}$ ;
37) $\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$ ,	$k_{37} = 3 \cdot 10^{-12} \exp(-0,00311T[\text{K}])$ ;
38) $\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$ ,	$k_{38} = 2,4 \cdot 10^{-11}$ ;
39) $\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$ ,	$k_{39} = 1,3 \cdot 10^{-10} (300/T[\text{K}])^{1/2}$ ;
40) $\text{N}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}_2$ ,	$k_{40} = 3,3 \cdot 10^{-10}$ ;
41) $\text{N}_3^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{NO} + \text{N}_2$ ,	$k_{41} = 7 \cdot 10^{-11}$ ;
42) $\text{N}_4^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2$ ,	$k_{42} = 4 \cdot 10^{-10}$ ;
43) $\text{O}_4^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2 + \text{O}_2$ ,	$k_{43} = 10^{-10}$ ;
44) $\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow (\text{H}_2\text{O})\text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{44} = 1,8 \cdot 10^{-28}$ ;
45) $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH} + \text{O}_2$ ,	$k_{45} = 2 \cdot 10^{-10}$ ;
46) $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{M}$ ,	$k_{46} = 3,4 \cdot 10^{-27}$ ;
47) $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + \text{N}_2$ ,	$k_{47} = 2,8 \cdot 10^{-28}$ ;
48) $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + \text{O}_2$ ,	$k_{48} = 1,9 \cdot 10^{-28}$ ;
49) $\text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{H}_7\text{O}_3^+ + \text{M}$ ,	$k_{49} = 2,3 \cdot 10^{-27}$ ;
50) $\text{H}_7\text{O}_3^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{H}_9\text{O}_4^+ + \text{M}$ ,	$k_{50} = 2,4 \cdot 10^{-27}$ ;
51) $(\text{H}_2\text{O})\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow (\text{H}_2\text{O})_2\text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{51} = 1 \cdot 10^{-27}$ ;
52) $(\text{H}_2\text{O})_2\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow (\text{H}_2\text{O})_3\text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{52} = 1 \cdot 10^{-27}$ ;
53) $(\text{H}_2\text{O})_3\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_7\text{O}_3^+ + \text{NO} + \text{OH}$ ,	$k_{53} = 7 \cdot 10^{-11}$ ;
54) $\text{NO}^+ + \text{CO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2\text{NO}^+ + \text{M}$ ,	$k_{54} = 7 \cdot 10^{-30}$ ;
55) $\text{CO}_2\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{H}_2\text{O})\text{NO}^+ + \text{CO}_2$ ,	$k_{55} = 1 \cdot 10^{-9}$ ;
56) $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + e \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{56} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;
57) $\text{H}_3\text{O}^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{57} = 1,3 \cdot 10^{-6}$ ;
58) $\text{H}_5\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{58} = 2,7 \cdot 10^{-6}$ ;
59) $\text{H}_7\text{O}_3^+ + e \rightarrow \text{H} + 3\text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{59} = 4,6 \cdot 10^{-6}$ ;
60) $\text{H}_9\text{O}_4^+ + e \rightarrow \text{H} + 4\text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{60} = 7,5 \cdot 10^{-6}$ ;
61) $(\text{H}_2\text{O})\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{61} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;
62) $(\text{H}_2\text{O})_2\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{62} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;
63) $(\text{H}_2\text{O})_3\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{NO} + 3\text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{63} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;
64) $\text{CO}_2\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}$ ,	$k_{64} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;
65) $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$ ,	$k_{65} = 10^{-9}$ ;
66) $\text{O}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + \text{O}_2$ ,	$k_{66} = 2 \cdot 10^{-9}$ ;
67) $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+(\text{OH}) + \text{O}_2$ ,	$k_{67} = 1,9 \cdot 10^{-9}$ ;
68) $\text{H}_3\text{O}^+(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{OH}$ ,	$k_{68} = 1,2 \cdot 10^{-9}$ ;
69) $\text{NO}^+\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{H}_2\text{O})\text{NO}^+ + \text{N}_2$ ,	$k_{69} = 1 \cdot 10^{-9}$ ;

70) $N_2 + e \rightarrow N_2^+ + e + e,$	$k_{70} = 10^{(-8,3-36,5/\theta[\text{В}\cdot\text{см}^2])};$
71) $O_4^+ + e \rightarrow O_2 + O_2,$	$k_{71} = 1,4 \cdot 10^{-6} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
72) $N_2^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_2 + N_4^+,$	$k_{72} = 5 \cdot 10^{-29};$
73) $N_2^+ + N + N_2 \rightarrow N_2 + N_3^+,$	$k_{73} = 0,9 \cdot 10^{-29} \exp(400/T[\text{K}]);$
74) $N^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_2 + N_3^+,$	$k_{74} = 0,9 \cdot 10^{-29} \exp(400/T[\text{K}]);$
75) $N^+ + N + M \rightarrow N_2^+ + M,$	$k_{75} = 10^{-29};$
76) $N^+ + O_2 \rightarrow O^+ + NO,$	$k_{76} = 2,8 \cdot 10^{-11};$
77) $N^+ + O \rightarrow O^+ + N,$	$k_{77} = 1 \cdot 10^{-12};$
78) $N^+ + NO \rightarrow N_2^+ + O,$	$k_{78} = 3 \cdot 10^{-12};$
79) $N^+ + NO \rightarrow N_2 + O^+,$	$k_{79} = 1 \cdot 10^{-12};$
80) $N_2^+ + O \rightarrow O^+ + N_2,$	$k_{80} = 1 \cdot 10^{-11} (300/T[\text{K}])^{0,2};$
81) $N_2^+ + N \rightarrow N^+ + N_2,$	$k_{81} = 2,4 \cdot 10^{-15} T[\text{K}];$
82) $N_4^+ + O \rightarrow O^+ + N_2 + N_2,$	$k_{82} = 2,5 \cdot 10^{-10};$
83) $N_4^+ + N \rightarrow N^+ + N_2 + N_2,$	$k_{83} = 10^{-11};$
84) $O_2^+ N_2 + O_2 \rightarrow O_4^+ + N_2,$	$k_{84} = 10^{-9};$
85) $NO^+ N_2 + O_2 \rightarrow NO^+ + N_2 + O_2,$	$k_{85} = 10^{-9};$
86) $NO^+ O_2 + O_2 \rightarrow NO^+ + O_2 + O_2,$	$k_{86} = 10^{-9};$
87) $N_4^+ + e \rightarrow N_2 + N_2,$	$k_{87} = 2 \cdot 10^{-6} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
88) $NO^+ N_2 + e \rightarrow NO + N_2,$	$k_{88} = 1,3 \cdot 10^{-6} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
89) $NO^+ O_2 + e \rightarrow NO + O_2,$	$k_{89} = 1,3 \cdot 10^{-6} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
90) $O_2^+ N_2 + e \rightarrow O_2 + N_2,$	$k_{90} = 1,3 \cdot 10^{-6} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
91) $N_3^+ + e \rightarrow N_2 + N,$	$k_{91} = 2 \cdot 10^{-7} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
92) $N_2^+ + e \rightarrow N + N,$	$k_{92} = 4,8 \cdot 10^{-7} (300/T_e[\text{K}])^{1/2};$
93) $N_2^+ + e + e \rightarrow e + N_2,$	$k_{93} = 10^{-19} (300/T_e[\text{K}])^{9/2};$
94) $N^+ + e + e \rightarrow e + N,$	$k_{94} = 10^{-19} (300/T_e[\text{K}])^{9/2};$
95) $O^+ + e + e \rightarrow e + O,$	$k_{95} = 10^{-19} (300/T_e[\text{K}])^{9/2};$
96) $N_2^+ + e + M \rightarrow N_2 + M,$	$k_{96} = 6 \cdot 10^{-27} (300/T_e[\text{K}])^{3/2};$
97) $N^+ + e + M \rightarrow N + M,$	$k_{97} = 6 \cdot 10^{-27} (300/T_e[\text{K}])^{3/2};$
98) $O^+ + e + M \rightarrow O + M,$	$k_{98} = 6 \cdot 10^{-27} (300/T_e[\text{K}])^{3/2};$
99) $O_2 + O_2 + e \rightarrow O_2^- + O_2,$	$k_{99} = 1,5 \cdot 10^{-30};$
100) $O_2^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O_2,$	$k_{100} = 3,5 \cdot 10^{-10};$
101) $O_2^- + O \rightarrow O_3 + e,$	$k_{101} = 2,5 \cdot 10^{-10};$
102) $O_3^- + NO \rightarrow NO_3^- + O,$	$k_{102} = 1 \cdot 10^{-11};$
103) $O_3^- + CO_2 \rightarrow CO_3^- + O_2,$	$k_{103} = 4 \cdot 10^{-10};$
104) $CO_3^- + O \rightarrow O_2^- + CO_2,$	$k_{104} = 9 \cdot 10^{-11};$
105) $NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2,$	$k_{105} = 1,8 \cdot 10^{-11};$
106) $CO_3^- + NO \rightarrow NO_2^- + CO_2,$	$k_{106} = 9 \cdot 10^{-12};$
107) $O_3^- + O \rightarrow O_2^- + O_2,$	$k_{107} = 1 \cdot 10^{-10};$
108) $O_2^- + O_2 + O_2 \rightarrow O_4^- + O_2,$	$k_{108} = 4 \cdot 10^{-31};$
109) $O_4^- + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2 + O_2,$	$k_{109} = 2,4 \cdot 10^{-14};$
110) $O_4^- + CO_2 \rightarrow CO_4^- + O_2,$	$k_{110} = 4,3 \cdot 10^{-10};$
111) $O_4^- + NO \rightarrow NO_3^- + O_2,$	$k_{111} = 2,5 \cdot 10^{-10};$
112) $O_4^- + O \rightarrow O_3^- + O_2,$	$k_{112} = 4 \cdot 10^{-10};$
113) $CO_4^- + NO \rightarrow NO_3^- + CO_2,$	$k_{113} = 4,8 \cdot 10^{-11};$
114) $CO_4^- + O \rightarrow CO_3^- + O_2,$	$k_{114} = 1,5 \cdot 10^{-10};$
115) $NO_2^- + H \rightarrow OH^- + NO,$	$k_{115} = 3 \cdot 10^{-10};$
116) $OH^- + O \rightarrow HO_2 + e,$	$k_{116} = 2 \cdot 10^{-10};$

117) $\text{OH}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{e}$ ,	$k_{117} = 1 \cdot 10^{-9}$ ;
118) $\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{e}$ ,	$k_{118} = 10^{(-9,5-6/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}$ ;
119) $\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O}^- + \text{O}$ ,	$k_{119} = 10^{(-9,3-12,3/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}$ ;
120) $\text{O}_3 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O} + \text{e}$ ,	$k_{120} = 10^{(-8-5,2/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}$ ;
121) $\text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^-$ ,	$k_{121} = 1,4 \cdot 10^{-29} \frac{300}{T_e[\text{K}]} \exp\left\{\frac{-600}{T[\text{K}]} + 700\left(\frac{1}{T[\text{K}]} - \frac{1}{T_e[\text{K}]}\right)\right\}$ ;
122) $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^-$ ,	$k_{122} = 1,07 \cdot 10^{-31} \frac{300}{T_e[\text{K}]^2} \exp\left\{\frac{-70}{T[\text{K}]} + 1500\left(\frac{1}{T[\text{K}]} - \frac{1}{T_e[\text{K}]}\right)\right\}$ ;
123) $\text{O}_2 + \text{O} + \text{e} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}^-$ ,	$k_{123} = 10^{-31}$ ;
124) $\text{O}_2 + \text{O} + \text{e} \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}$ ,	$k_{124} = 10^{-31}$ ;
125) $\text{O}_2 + \text{O}_3 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3^-$ ,	$k_{125} = 10^{-31}$ ;
126) $\text{O}_3 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}$ ,	$k_{126} = 10^{-9}$ ;
127) $\text{O}_3 + \text{e} \rightarrow \text{O}^- + \text{O}_2$ ,	$k_{127} = 10^{-11}$ ;
128) $\text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{e}$ ,	$k_{128} = 4,6 \cdot 10^{-9}$ ;
129) $\text{O}_2^- + \text{N} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{e}$ ,	$k_{129} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
130) $\text{O}^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{e}$ ,	$k_{130} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
131) $\text{O}^- + \text{N} \rightarrow \text{NO} + \text{e}$ ,	$k_{131} = 2,6 \cdot 10^{-10}$ ;
132) $\text{O}_3^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e}$ ,	$k_{132} = 3 \cdot 10^{-10}$ ;
133) $\text{NO}_2^- + \text{O} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{e}$ ,	$k_{133} = 10^{-12}$ ;
134) $\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{e}$ ,	$k_{134} = 5 \cdot 10^{-15}$ ;
135) $\text{O}^- + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{e}$ ,	$k_{135} = 2,6 \cdot 10^{-10}$ ;
136) $\text{O}^- + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3^- + \text{M}$ ,	$k_{136} = 1,1 \cdot 10^{-30} (300/T[\text{K}])$ ;
137) $\text{O}^- + \text{NO} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{M}$ ,	$k_{137} = 10^{-29}$ ;
138) $\text{O}_2^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}^-$ ,	$k_{138} = 3,3 \cdot 10^{-10}$ ;
139) $\text{O}_2^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{O}_2$ ,	$k_{139} = 8 \cdot 10^{-10}$ ;
140) $\text{O}_2^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^-$ ,	$k_{140} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
141) $\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}$ ,	$k_{141} = 10^{-10}$ ;
142) $\text{O}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O}_3^-$ ,	$k_{142} = 5,3 \cdot 10^{-10}$ ;
143) $\text{O}^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{O}$ ,	$k_{143} = 1,2 \cdot 10^{-9}$ ;
144) $\text{NO}_2^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{NO}$ ,	$k_{144} = 4 \cdot 10^{-12}$ ;
145) $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_3^-$ ,	$k_{145} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
146) $\text{O}_3^- + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{O}_2$ ,	$k_{146} = 2,6 \cdot 10^{-12}$ ;
147) $\text{O}_3^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{NO}_2^-$ ,	$k_{147} = 7 \cdot 10^{-10}$ ;
148) $\text{O}_3^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^-$ ,	$k_{148} = 2 \cdot 10^{-11}$ ;
149) $\text{O}_3^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_3 + \text{NO}_3^-$ ,	$k_{149} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;
150) $\text{NO}_3^- + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NO}_2$ ,	$k_{150} = 3 \cdot 10^{-15}$ ;
151) $\text{O}_4^- + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{M}$ ,	$k_{151} = 10^{-10} \exp(-1044/T[\text{K}])$ ;
152) $\text{O}_4^- + \text{O} \rightarrow \text{O}^- + \text{O}_2 + \text{O}_2$ ,	$k_{152} = 3 \cdot 10^{-10}$ ;
153) $\text{OH} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ ,	$k_{153} = 0,69 \cdot 10^{-24} (T[\text{K}])^{-2,6}$ ;
154) $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$ ,	$k_{154} = 5,6 \cdot 10^{-12}$ ;
155) $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ,	$k_{155} = 4,8 \cdot 10^{-11} \exp(250/T[\text{K}])$ ;
156) $\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$ ,	$k_{156} = 2,2 \cdot 10^{-16} \exp(120/T[\text{K}])$ ;
157) $\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ ,	$k_{157} = 3 \cdot 10^{-11} \exp(200/T[\text{K}])$ ;
158) $\text{O}_2 + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$ ,	$k_{158} = 2,75 \cdot 10^{-32} (300/T[\text{K}])^{1,4}$ ;
159) $\text{O}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ ,	$k_{159} = 3,5 \cdot 10^{-34} (300/T[\text{K}])^{1,25} + 3,1 \cdot 10^{-34} (300/T[\text{K}])^2$ ;
160) $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$ ,	$k_{160} = 8 \cdot 10^{-12} \exp(-2060/T[\text{K}])$ ;

161) $O + O + M \rightarrow O_2 + M,$	$k_{161} = 1,9 \cdot 10^{-30} \exp\{-170/T[K]\}/T[K] +$ $+ 2,4 \cdot 10^{-33} (300/T[K])^2;$
162) $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH,$	$k_{162} = 1,4 \cdot 10^{-10} \exp(-470/T[K]);$
163) $OH + O_3 \rightarrow O_2 + HO_2,$	$k_{163} = 1,6 \cdot 10^{-12} \exp(-940/T[K]);$
164) $H + HO_2 \rightarrow OH + OH,$	$k_{164} = 7,3 \cdot 10^{-11};$
165) $OH + OH \rightarrow O + H_2O,$	$k_{165} = 4,2 \cdot 10^{-12} \exp(-240/T[K]);$
166) $HO_2 + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O_2,$	$k_{166} = 2,3 \cdot 10^{-13} \exp(600/T[K]);$
167) $H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2,$	$k_{167} = 1,36 \cdot 10^{-11};$
168) $N + O_2 \rightarrow NO + O,$	$k_{168} = 4,5 \cdot 10^{-12} \exp(-3220/T[K]);$
169) $N + O_3 \rightarrow NO + O_2,$	$k_{169} = 2 \cdot 10^{-16};$
170) $N + NO \rightarrow N_2 + O,$	$k_{170} = 1,05 \cdot 10^{-12} (T[K])^{1/2};$
171) $N + NO_2 \rightarrow N_2 + O_2,$	$k_{171} = 7 \cdot 10^{-13};$
172) $N + NO_2 \rightarrow N_2 + O + O,$	$k_{172} = 9,1 \cdot 10^{-13};$
173) $N + NO_2 \rightarrow NO + NO,$	$k_{173} = 2,3 \cdot 10^{-12};$
174) $O + NO_2 \rightarrow NO + O_2,$	$k_{174} = 1,13 \cdot 10^{-11} (T[K]/1000)^{0,18};$
175) $O + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_2,$	$k_{175} = 10^{-11};$
176) $NO + O_3 \rightarrow O_2 + NO_2,$	$k_{176} = 4,3 \cdot 10^{-12} \exp(-1560/T[K]);$
177) $NO + NO_3 \rightarrow NO_2 + NO_2,$	$k_{177} = 1,7 \cdot 10^{-11};$
178) $NO_2 + O_3 \rightarrow O_2 + NO_3,$	$k_{178} = 1,2 \cdot 10^{-13} \exp(-2450/T[K]);$
179) $NO_3 + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_2 + NO_2,$	$k_{179} = 5 \cdot 10^{-12} \exp(-3000/T[K]);$
180) $NO_2 + NO_3 \rightarrow O_2 + NO + NO_2,$	$k_{180} = 2,3 \cdot 10^{-13} \exp(-1600/T[K]);$
181) $N + N + M \rightarrow N_2 + M,$	$k_{181} = 8,27 \cdot 10^{-34} \exp(500/T[K]);$
182) $N + O + M \rightarrow NO + M,$	$k_{182} = 1,76 \cdot 10^{-31} (T[K])^{-1/2};$
183) $O + OH + M \rightarrow HO_2 + M,$	$k_{183} = 1 \cdot 10^{-32};$
184) $H_3O^+(OH) + e \rightarrow H_2O + H_2O,$	$k_{184} = 1 \cdot 10^{-6};$
185) $(H_2O)NO^+ + e \rightarrow H_2O + NO,$	$k_{185} = 1 \cdot 10^{-6};$
186) $(H_2O)_2NO^+ + e \rightarrow H_2O + H_2O + NO,$	$k_{186} = 1 \cdot 10^{-6};$
187) $(H_2O)_3NO^+ + e \rightarrow NO + 3H_2O,$	$k_{187} = 1 \cdot 10^{-6};$
188) $Q + N_2 \rightarrow N_2^+ + e + Q,$	$k_{188} = 0,585/M[\text{cm}^{-3}];$
189) $Q + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + Q,$	$k_{189} = 0,154/M[\text{cm}^{-3}];$
190) $Q + N_2 \rightarrow N^+ + N + e + Q,$	$k_{190} = 0,185/M[\text{cm}^{-3}];$
191) $Q + O_2 \rightarrow O^+ + O + e + Q,$	$k_{191} = 0,076/M[\text{cm}^{-3}];$
192) $O_2(^1\Delta_g) + N_2 \rightarrow O_2 + N_2,$	$k_{192} = 3 \cdot 10^{-21} (T[K]/300)^{1/2};$
193) $O_2(^1\Delta_g) + O_2 \rightarrow O_2 + O_2,$	$k_{193} = 2,2 \cdot 10^{-18} (T[K]/300)^{0,8};$
194) $O_2(^1\Delta_g) + O \rightarrow O_2 + O,$	$k_{194} = 7 \cdot 10^{-16} (T[K]/300)^{1/2};$
195) $O_2(^1\Delta_g) + NO \rightarrow O_2 + NO,$	$k_{195} = 2,46 \cdot 10^{-17} (T[K]/300)^{1/2};$
196) $O_2(^1\Delta_g) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O,$	$k_{196} = 1,7 \cdot 10^{-13} \exp(-1564/T[K]);$
197) $O_2(^1\Delta_g) + N \rightarrow NO + O,$	$k_{197} = 2 \cdot 10^{-15} \exp(-600/T[K]);$
198) $O_2(^1\Delta_g) + O_2(^1\Delta_g) + O_2 \rightarrow O_3 + O_3,$	$k_{198} = 1 \cdot 10^{-31} (T[K]/300)^{1/2};$
199) $O_2(^1\Delta_g) \rightarrow O_2 + h\nu,$	$k_{199} = 2,22 \cdot 10^{-4};$
200) $e + O_2 \rightarrow e + O_2(^1\Delta_g),$	

$$k_{200} = \begin{cases} 10^{(-9,0-5,2/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}, & \theta < 4\text{B}\cdot\text{cm}^2; \\ 10^{(-10,2-0,35/\theta[\text{B}\cdot\text{cm}^2])}, & \theta \geq 4\text{B}\cdot\text{cm}^2; \end{cases}$$



$$201) e + N_2 \rightarrow e + N + N,$$

$$k_{201} = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-10} [3,096 - 0,671 (\theta[B \cdot \text{cm}^2]/100) + 0,03 (\theta[B \cdot \text{cm}^2]/100)^2 - \\ - 1,59 \cdot 10^{-3} (\theta[B \cdot \text{cm}^2]/100)^3 - 1,57 \cdot 10^{-5} (\theta[B \cdot \text{cm}^2]/100)^4], & \theta > 7,6B \cdot \text{cm}^2; \\ 0, & \theta \leq 7,6B \cdot \text{cm}^2; \end{cases}$$

$$202) e + O_2 \rightarrow e + O + O, \quad k_{202} = 10^{(-7,9-13,4/\theta[B \cdot \text{cm}^2])};$$

$$203) NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2, \quad k_{203} = 9,1 \cdot 10^{-12};$$

$$204) O + N_2 + O_2 \rightarrow O_3 + N_2, \quad k_{204} = 6,2 \cdot 10^{-34};$$

$$205) O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2, \quad k_{205} = 6,9 \cdot 10^{-34}.$$

Здесь  $T_e$  — температура электронов,  $M$  — нейтральные молекулы,  $O_2(^1\Delta_g)$  — молекула кислорода в возбуждённом состоянии,  $h\nu$  — инфракрасный фотон, испускаемый молекулой кислорода при релаксации возбуждённого состояния,  $Q$  — галактические космические лучи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neubert T. // Science. 2003. V. 300. P. 747.
2. Williams E. R. // Phys. Today. 2001. V. 54. P. 41.
3. Fullekrug M., Mareev E., Rycroft M. // Sprites, Elves, and Intense Lightning Discharges. New York: Springer, 2006. 340 p.
4. Sentman D., Wescott E. // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. P. 2514.
5. Hiraki Y., Tong L., Fukunishi H., et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. 14105.
6. Mende S. B., Frey H. U., Hsu R. R., et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. no. A11312.
7. Sentman D. D., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Morrill J. S. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. D11112.
8. Mishin E. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, No. 15. P. 1919.
9. Smirnova N. V., Lyakhov A. N., Kozlov S. I. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2003. V. 3, No. 3. P. 281.
10. Mishin E., Milikh G. // Space Sci. Rev. 2008. V. 137. P. 1.
11. Sato M., Fukunishi H. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No. 16. P. 1859.
12. Chen A. B., Kuo C.-L., Lee Y.-J., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. A08306. P. 8.
13. Pasko V. P., Inan U. S., Bell T. F., Taranenko Y. N. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, No. A3. P. 4529.
14. Pasko V. P., Stenbaek-Nielsen H. C. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No. 10. P. 1440.
15. Williams E. R. // J. Atmos. Terr. Phys. 1998. V. 60, P. 689.
16. Williams E. R., Huang E., Boldi R., et al. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 16943.
17. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2002. 687 p.
18. Hampton D. L., Heavner M. J., Wescott E. M., Sentman D. D. // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23, No. 1. P. 89.
19. Green B. D., Fraser M. E., Rawlins W. T., et al. // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23, No. 16. P. 2161.
20. Данилов А. Д., Власов М. Н. Фотохимия ионизованных и возбуждённых частиц в нижней ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 190 с.
21. Косый И. А., Костинский А. Ю., Матвеев А. А., Силаков В. П. // Труды ИОФАН. 1994. Т. 47. 20 с.
22. Адушкин В. В. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду. М.: Анкил, 2000. 640 с.
23. Dowden R. L., Rodger C. J., Nunn D. // IEEE Ant. Propagat Magazine. 2001. V. 34, No. 2. P. 12.
24. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С., Нестеров И. А. // УФН. Т. 180, № 5. С. 548.

25. Liu N., Pasko V.P., Frey H.U., et al. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A00E02. doi:10.1029/2008JA013735.
26. Kulikov M. Yu., Feigin A. M. // J. Adv. Space Res. 2005. V. 35, No. 11. P. 1992.
27. Sonnemann G., Fichtelmann B. // Z. Meteorol. 1989. V. 39, No. 6. P. 297.
28. Криволицкий А. А., Репнев А. И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 383 с.
29. Мареев Е. А., Яшунин С. А. // Изв. РАН. Физики атмос. океана. 2010. Т. 46, № 1. С. 78.
30. Gerken E. A., Inan U. S. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 11. P. 1344.
31. Fernsler R. F., Rowland H. L. // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101, No. 23. P. 29653.
32. Hayakawa M., Iudin D. I., Mareev E. A., Trakhtengerts V. Yu. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14, No. 4. P. 42902.
33. Asano T., Suzuki T., Hiraki Y., et al. // J. Geophys. Res. A. 2009. V. 114. No. A02310. doi:10.1029/2008JA013651.

Поступила в редакцию 19 ноября 2010 г.; принята в печать 22 февраля 2011 г.

### SIMULATION OF DISTURBANCES IN MESOSPHERIC COMPOSITION UNDER THE ACTION OF HIGH-ALTITUDE DISCHARGES (SPRITES)

*A. A. Evtushenko and E. A. Mareev*

Recent measurements show that a mesospheric electric charge (sprite) can provoke disturbances in the chemical composition of the mesosphere. In this paper, we propose a plasmochemical system of equations which allows one to describe the complex relationship among the chemical components during discharge. The disturbances of the ion composition of the mesosphere are analyzed under the night and daytime conditions at an altitude of 75 km, which is typical of the sprite initiation and at an altitude of 85 km where the diffusive region of discharge is usually observed. The most probable scenarios of the development of the electric-field and electron-temperature disturbances, which are characteristic of the diffusive and streamer regions of the sprite, are simulated. The value and characteristic time of disturbances of the main ion components ( $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $H_3O^+$ , and  $H_5O_2^+$ ,  $N_2^+$ ) are evaluated. The obtained values of the electron-density disturbances are in agreement with experimental and theoretical data. It was established that the sprite series, which are recorded over the vast stratified regions of mesoscale convection systems, can lead to generation of comparatively long-lived disturbances in the ion composition of mesospheric plasma.