

УДК 551.594+537.5

ВСПЫШКИ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ МОЛНИЕВЫМИ РАЗРЯДАМИ: ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И БУДУЩЕЕ ОПТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЯ

А. Ю. Костинский^{1,2}

¹ Высшая школа экономики, г. Москва;

² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

За последние годы в исследованиях разрядов в средней и верхней атмосфере, инициированных ударами молнии, были получены важные экспериментальные результаты. Их появление стало возможным благодаря самой распространённой методике измерений, связанной с высокоскоростными высокочувствительными камерами видимого диапазона, а также благодаря спектроскопии — наиболее быстро развивающейся методике наблюдений за вспышками в верхней атмосфере. Обе методики используются при наземных, баллонных и спутниковых наблюдениях. Их рассмотрению и посвящён данный обзор.

1. НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Объёмные разряды в средней и верхней атмосфере, достигающие в размерах десятков километров, были впервые экспериментально зафиксированы в 1989 году Дж. Р. Винклером (J. R. Winkler) с помощью высокочувствительных скоростных монохромных видеокамер с телескопическими объективами. В первые восемь лет их изучение продолжалось данным методом с использованием всё более совершенных монохромных, а позднее цветных видеокамер с более мощными объективами и более чувствительными и скоростными ПЗС-матрицами. До сих пор основной объём информации о физических параметрах высотных разрядов получен с помощью таких устройств. По результатам данных наблюдений было выделено множество типов атмосферных разрядов: красные спрайты, джеты, гигантские джеты, эльфы, гало, феи, гномы, тролли, которые получили общее название — вспышки в средней и верхней атмосфере (TLE, transient luminous events). К настоящему времени классификация TLE установилась, и основными типами разрядов в верхней и средней атмосфере считаются эльфы, спрайты, джеты, гигантские джеты и голубые стартеры.

Специализированные объективы и наблюдения с борта самолёта позволили различить сложную внутреннюю пространственную структуру некоторых вспышек в средней и верхней атмосфере, например спрайтов. Оказалось, что в нижней мезосфере свечение спрайтов неоднородно и распадается на каналы, похожие на лабораторные стримеры, получаемые при подаче высокого напряжения на электрод. Сложную пространственную структуру имеют также джеты и гигантские джеты. Эти наблюдения породили множество работ, которые переносили полученные в лабораториях методики и вычислительные методы на изучение вспышек в средней и верхней атмосфере. Визуальными методами с поверхности Земли были определены их важные физические характеристики: внешний вид, геометрические размеры, скорость изменений областей свечения в видимом диапазоне в вертикальном и горизонтальном направлениях и характерные времена их появления после разрядов молнии (при дополнительном использовании данных наземных систем грозопеленгации). С помощью космических систем при наблюдении в надир была определена их динамика в горизонтальном направлении (т. е. в горизонтальном сечении). Спутниковые наблюдения также позволили установить частоту появления различных вспышек в средней и верхней

атмосфере, которые можно наблюдать со значительных расстояний. Излучение слабых вспышек и вспышек, возникающих в глубоких слоях атмосферы (джеты и голубые стартеры), может быть ниже порога обнаружения на орбитах искусственных спутников Земли. Подавляющее число зафиксированных спутниками вспышек в средней и верхней атмосфере [2] приходится на эльфы (около 96 %), спрайты и гало (приблизительно по 3 %). Джеты спутниками фиксируются относительно редко.

С помощью калиброванных видеокамер при спутниковых и наземных наблюдениях, а также с помощью калиброванных фотометров и фотоэлектрических умножителей были оценены абсолютные интенсивности излучения от вспышек в средней и верхней атмосфере в некоторых спектральных диапазонах.

Важные физические наблюдения над объектами, напоминающими лабораторные стримеры (структурные элементы спрайтов), были сделаны с помощью скоростных видеокамер. Удалось зафиксировать динамику свечения, оценить поток излучения в видимом диапазоне и скорость головки подобного стримера, по порядку величины равную 10^7 м/с. Видимые диаметры каналов стримеров находятся в пределах $10 \div 100$ м [3]. Эти результаты имеют серьёзное значение не только для атмосферного электричества, но и для физики газового разряда в целом.

Использование в высокоскоростных видеокамерах ПЗС-матриц с цветовым разрешением позволило получить первые представления о спектрах излучения разрядов, имеющих вид широких спектральных полос. В частности, спрайты получили название «красные спрайты», джеты — «голубые джеты». Эти измерения активизировали интерес к подробному анализу кинетических процессов, происходящих в плазме вспышек в средней и верхней атмосфере (с использованием уравнения Больцмана). В результате были рассчитаны интенсивности и временные характеристики излучения молекул и молекулярных ионов азота при возбуждении их электронами, ускоренными в электрическом поле, возникающем после резкой нейтрализации заряда облака при ударе молнии.

Из лабораторных экспериментов известно, что основной вклад в излучение при давлениях выше 1 торр вносит вторая положительная система азота 2^+N_2 , интенсивность излучения которой на один-два порядка величины превышает интенсивность излучения первой положительной системы 1^+N_2 . Поэтому свечение стримеров при этих давлениях в видимом диапазоне имеет фиолетово-голубой цвет. Первая положительная система, электронные переходы в красном и инфракрасном диапазоне спектра, начинает вносить серьёзный вклад в излучение от вспышек в средней и верхней атмосфере при давлениях $0,1 \div 0,01$ торр, характерных для верхней мезосферы. Это происходит, когда с высотой существенно уменьшается тушение нейтральными молекулами верхнего уровня $B^3\Pi_g$ электронной полосы 1^+N_2 . Голубой цвет джетов и стартеров, развивающихся с верхней части грозового облака (относительно высокие давления), и красный цвет спрайтов (низкие давления) вполне вписывался в эту качественную картину. Однако дальнейшее углубление понимания физики вспышек в средней и верхней атмосфере требовало перехода к экспериментам с помощью приборов высокого спектрального разрешения (для наблюдений с поверхности Земли), а также к использованию фотоэлектрических умножителей (при наблюдении со спутников) для обеспечения высокого временного разрешения.

2. ОСНОВНЫЕ СПЕКТРЫ И ПОЛОСЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Основной излучающей молекулой при вспышках в средней и верхней атмосфере, судя по наблюдениям [3], является N_2 . Считается, что в высотных вспышках в средней и верхней атмосфере основной вклад даёт первая положительная система молекулы азота 1^+N_2 (другое обозначение —

1PG N₂), соответствующая переходу между электронными уровнями $B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$. Первая положительная система азота излучает в широком красном (560÷620 и 640÷700 нм) и ближнем инфракрасном (700÷800 и 830÷910 нм) диапазонах длин волн. Характерное время излучения составляет 5÷6 мкс, так что излучение первой положительной системы проявляется только при низких давлениях верхней мезосферы; при более высоких давлениях это излучение быстро тушится окружающими молекулами воздуха. Вторая положительная система молекулы азота 2^+N_2 (2PG N₂), соответствующая переходу между её электронными уровнями $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$, излучает в основном в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (300÷400 нм). Малое характерное время излучения (около 50 нс) определяет важность второй положительной системы на всех высотах, особенно в тропосфере и стратосфере. Кроме того, важную роль для оценки физических параметров плазмы разрядов играет первая отрицательная система молекулярного иона азота $1^-N_2^+$ (1NG N₂), соответствующая переходу между электронными уровнями иона молекулы азота $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$. Она значительно излучает в фиолетовом диапазоне (391,4 и 427,8 нм), но из-за относительно высокой энергии возбуждения излучательного уровня $B^2\Sigma_u^+$ и наложения спектров полосы $1^-N_2^+$ при невысоком разрешении спектральной аппаратуры на полосу 2^+N_2 излучение первой отрицательной системы молекулярного иона азота обычно довольно сложно зафиксировать.

Кроме этих полос учитывается также запрещённая излучательная полоса молекулы азота Лаймана—Бёрджа—Хопфилда (LBH N₂) [2, 5], соответствующая переходу между уровнями молекулы азота $a^1\Pi_g - X^1\Sigma_g^+$. Эта полоса находится в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (180÷225 нм) и характеризуется большим характерным временем излучения порядка 150 мкс. Кроме того, поскольку эта полоса отвечает переходу в основное состояние молекулы азота, поглощение излучения в ней весьма значительно даже при низких давлениях верхней мезосферы. Всё это делает обнаружение полос Лаймана—Бёрджа—Хопфилда молекулы N₂ крайне проблематичным. На наш взгляд, при корректном спектральном анализе в диапазоне длин волн этой полосы необходимо обязательно учитывать другие полосы и линии излучения. Это, во-первых, γ -полосы молекулы окиси азота NO (230÷270 нм), соответствующие электронному переходу $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. Характерное время излучения в ней достаточно короткое и составляет величину порядка всего лишь 200 нс, что делает излучение в γ -полосах весьма интенсивным. Во-вторых, в этом диапазоне длин волн сильно излучают атомы и ионы азота и кислорода, которые возбуждаются при молниевом разряде, который и порождает вспышки в средней и верхней атмосфере. В результате излучение этих источников не всегда можно разделить во времени.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ БЕЗ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Первые спектры излучения спрайтов были получены на наземных наблюдательных пунктах и самолётах без временного разрешения (в режиме накопления сигнала), но со значительным для таких экспериментов (порядка 1÷3 нм) спектральным разрешением, достигнутым с помощью щелевых спектрографов. Данные измерения позволили адекватно анализировать и идентифицировать принадлежность спектров к определённым излучательным переходам молекул и атомов. На рис. 1 приведены характерные спектры с основными полосами 2^+N_2 (2PG N₂), 1^+N_2 (1PG N₂) и 1^-N_2 (1NG N₂). Подобные наземные измерения с относительно небольших расстояний до атмосферных разрядов (по сравнению со спутниковыми измерениями) крайне важны для получения общей картины явлений, но не позволяют значительно продвинуться в понимании характера физических процессов при разряде.

Первым недостатком использования наземных измерений для определения параметров плазмы является сложность сравнения относительных интенсивностей излучения в различных диа-

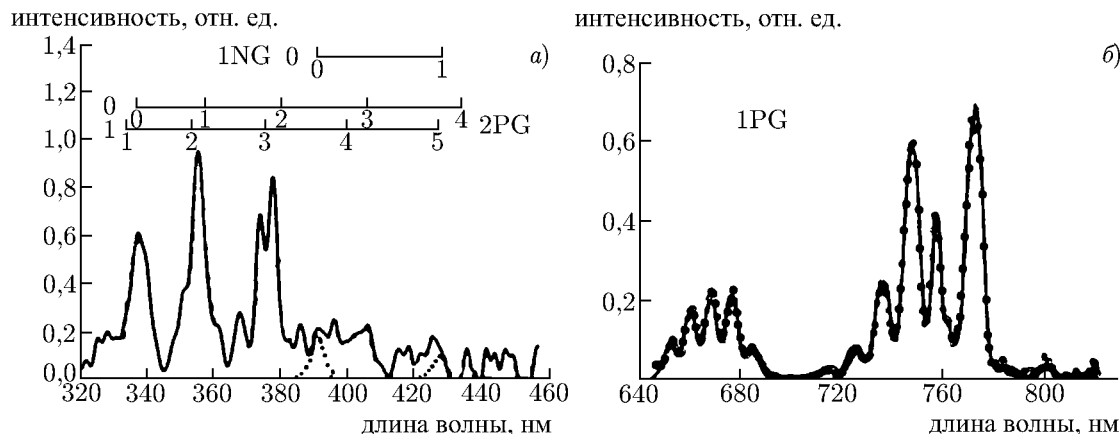


Рис. 1. Полосы излучения азота: *а* — вторая положительная система азота 2^+N_2 (2PG) и первая отрицательная система молекулярного иона $1^-N_2^+$ (1NG). Для первой отрицательной системы (1NG) указаны положения электронно-колебательных переходов (0,0), (0,1), где первое число — колебательный уровень верхнего электронного состояния, а второе — колебательный уровень нижнего электронного состояния; для второй положительной системы (2PG) верхняя шкала указывает электронно-колебательные переходы с нулевого колебательного уровня от (0,0) до (0,4); нижняя линейка — переходы с первого колебательного уровня от (1,1) до (1,5), где первое число — колебательный уровень верхнего электронного состояния, а второе — колебательный уровень нижнего электронного состояния; *б* — первая положительная система азота 1^+N_2 (1PG)

пазонах, т. к. ультрафиолетовое излучение (300÷400 нм) при прохождении от области вспышек в средней и верхней атмосфере к прибору поглощается в атмосфере на один-два порядка сильнее, чем излучение красного и ближнего инфракрасного (650÷1 000 нм) диапазонов длин волн [3], а крайне важное излучение в диапазоне 200÷300 нм полностью поглощается озоновым слоем и просто не доходит до Земли. При этом существует сильная зависимость поглощения ультрафиолетового излучения от угла наблюдения и длины волны [3]. Такие спектральные измерения не в меньшей степени характеризуют длину трассы прохождения излучения и угол измерения, чем собственно излучаемые спектры. Вторым недостатком подобных измерений является отсутствие временного разрешения, что не позволяет использовать опыт лабораторных экспериментов и кинетического моделирования процессов в плазме для определения её параметров из спектров, например путём сравнения относительных интенсивностей разных спектральных полос молекулы азота или сравнения излучения разных колебательно-вращательных уровней внутри электронной полосы N_2 .

4. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В спектральных исследованиях вспышек в средней и верхней атмосфере важным был переход к их проведению с помощью космических аппаратов. Необходимо выделить наиболее удачный тайваньский прибор ISUAL, расположенный на спутнике FORMOSAT-2, и приборы «Татьяна» и «Татьяна-2», созданные в НИИ ядерной физики МГУ. Характерная динамика свечения в шести спектральных каналах прибора ISUAL [2] приведена на рис. 2.

Спектральные диапазоны выделялись с помощью интерференционных фильтров в соответствии с представлениями авторов о том, какие излучательные переходы молекул и атомов необходимо выбрать для получения полезной информации. Из-за слабости излучения, доходящего до орбиты спутника, невозможно получить спектры одновременно с приемлемым спектральным и

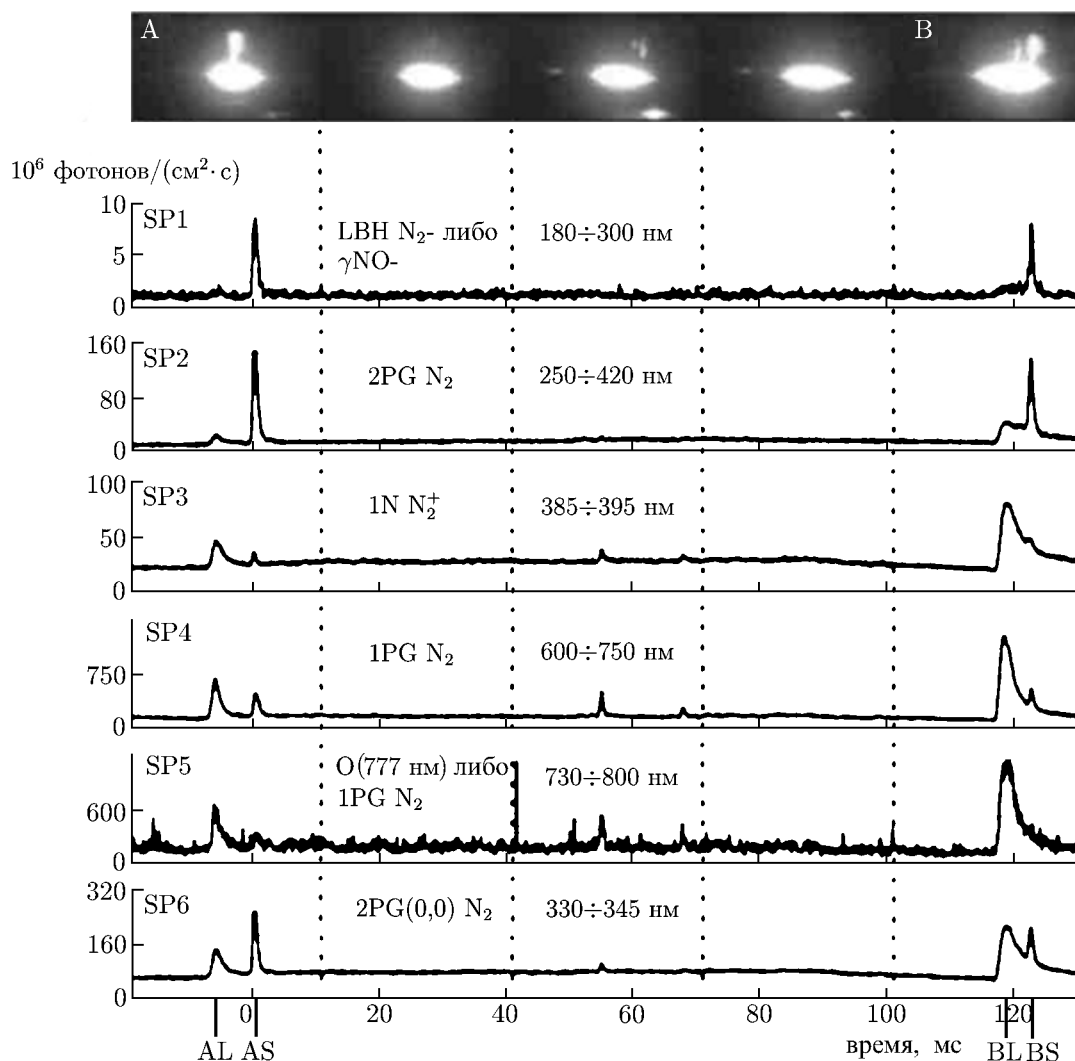


Рис. 2. Динамика спектров в шести каналах прибора ISUAL на спутнике FORMOSAT-2. События AL и BL — молнии, AS и BS — спрайты [2]. На верхней панели изображены последовательные кадры видеосъёмки спрайтов. На кадрах выделены события A и B. Ниже приведены синхронные с видеоизображением сигналы с шести спектральных каналов SP1-SP6. Для каждого канала указаны возможные полосы излучения молекул или линии атомов (второй столбец), а также спектральный диапазон, который регистрируется на данном канале (третий столбец)

временным разрешениями (даже с помощью фотоэлектрического умножителя). При наблюдении с космических аппаратов приоритет отдаётся временному разрешению. Спектральные наблюдения со спутников усложняются тем, что в объектив одновременно попадают как свечения, связанные с материнскими грозowymi разрядами, порождающими вспышки в средней и верхней атмосфере, так и свечения самих этих процессов. Во многих случаях, но не всегда, их удаётся отделить друг от друга благодаря сдвигу во времени: вспышки в средней и верхней атмосфере обычно проявляются на несколько миллисекунд позже разрядов молнии. Однако излучения от них часто накладываются друг на друга.

С помощью таких измерений по аналогии с лабораторными экспериментами была сделана попытка оценить приведённое электрическое поле в разряде в области интенсивного возбуждения молекулярных полос азота, т. е. величину E/N , где E — напряжённость электрического поля,

N — концентрация нейтральных молекул [5]. Данная важная попытка определения физических параметров показывает, что даже анализ лишь шести достаточно широких спектральных каналов с временным разрешением позволяет сделать шаг вперёд по сравнению с интегральными спектрами с хорошим спектральным разрешением, но без временного разрешения. С помощью исследовательской аппаратуры, размещённой на спутнике FORMOSAT-2, были проведены спектральные измерения, имеющие в данный момент наибольшее значение для понимания физики вспышек в средней и верхней атмосфере. Однако при планировании миссии не были, на наш взгляд, учтены электронные полосы излучения крайне важной для верхней атмосферы молекулы NO, а также излучение атомов и ионов азота и кислорода. Последние могут быть наиболее интенсивными во время излучения джетов и гигантских джетов в нижней стратосфере, если в них важную роль играют лидеры молний, видимые с верхней кромки облаков [5]. Это несколько снижает ценность полученных спутником FORMOSAT-2 данных из-за наложения возможных неучтённых излучательных переходов на те, которые учитываются в модели при обработке эксперимента.

5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ

В настоящее время готовятся несколько космических проектов, в которых значительное внимание будет уделено дальнейшему изучению динамики развития вспышек в средней и верхней атмосфере и спектров их излучения с помощью большого числа многоанодных фотоэлектрических умножителей. Предполагается использовать несколько тысяч таких умножителей в приёмной матрице прибора. В частности, это российский проект по изучению космических лучей предельно высоких энергий (головная организация — НИИ ядерной физики МГУ) и международный проект JemEUSO (при участии НИИ ядерной физики МГУ) [4]. Набор фотоэлектрических умножителей будет формировать приёмное устройство с матрицей из $120 \div 200$ тысяч элементов, сравнимой по числу пикселей с быстрыми ПЗС-матрицами. Но матрица из фотоэлектрических умножителей позволяет продвинуться на несколько порядков как в области временного разрешения ($1 \text{ мкс} \div 1 \text{ нс}$), так и в задаче достижения почти предельной чувствительности ($3 \div 5$ фотонов на пиксел матрицы).

В проекте исследования космических лучей предельно высоких энергий, кроме динамических характеристик вспышек в средней и верхней атмосфере, предполагается измерять и их спектральные характеристики. Для этой цели предусмотрена установка 21 многоканального спектрального прибора, расположенных в плоскости основного детектора. Каждый из них будет иметь 24 канала. Спектры будут выделяться с помощью интерференционных фильтров. В приёмных устройствах также будут использованы многоанодные фотоэлектрические умножители. Такое количество спектральных каналов позволит как надёжно отделить излучение вспышек в средней и верхней атмосфере от излучения самого материнского разряда молнии (лидер, обратный удар), так и исследовать многие важнейшие особенности самого излучения от вспышек в средней и верхней атмосфере. Это позволит глубже понять физику разрядов и более обоснованно классифицировать их, т. к. существует высокая вероятность того, что, например, джеты также связаны с лидерами молнии [5].

Важная роль более подробной спектральной информации состоит также в том, что существует вероятность получить данные в пользу одного из двух предполагаемых механизмов пробоя и поддержания разрядов во вспышках в средней и верхней атмосфере: пробой электрическим полем или пробой на убегающих электронах, поддерживаемых электрическим полем. Для понимания природы таких явлений это крайне необходимо.

6. ВЛИЯНИЕ М-КОМПОНЕНТЫ ТОКА МОЛНИИ НА ДИНАМИКУ СПРАЙТОВ

Важным результатом последних лет является установление связи между М-компонентами разряда молнии и физикой спрайтов и «гало» [6]. Удалось теоретически объяснить, почему спрайты появляются не прямо над грозовыми разрядами, а также показать, что М-компонента может стать причиной возникновения спрайтов и «гало». Новые подходы к одновременному спектральному анализу многоканальными спектрометрами разрядов молнии и вспышек в средней и верхней атмосфере могут развить это направление, т. к. позволяют надеяться на разделение свечения М-компоненты и вспышек в средней и верхней атмосфере при наблюдении «в нади́р» со спутников.

7. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОБОЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ВСПЫШЕК В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Спектральные измерения с высоким временным разрешением и чувствительностью (благодаря датчикам на многоанодных фотоэлектрических умножителях) могут пролить свет на основные физические механизмы, ответственные за появление и поддержание вспышек в средней и верхней атмосфере. При этом два развиваемых сейчас подхода (пробой и поддержание разряда электрическим полем или пробой на убегающих электронах, поддерживаемых электрическим полем) приводят к различным функциям распределения электронов по энергиям, что должно значительно сказаться на некоторых излучательных переходах молекул и атомов. При классическом электрическом пробое электроны благодаря наличию электрического поля поднимаются вверх по «энергетической лестнице», теряя энергию на возбуждение гораздо более низких колебательных уровней основного электронного уровня молекул и других электронных уровней. В отличие от этого при пробое на убегающих электронах энергичные электроны «сыплются сверху» по энергетической шкале, имея возможность возбудить гораздо более высокие уровни молекул, атомов и ионов. Чувствительные приборы с высоким временным разрешением могут позволить сделать вывод в пользу одной или другой теории. Не исключён и их синтез, т. к. на разных стадиях пробоя ключевые роли могут играть разные механизмы. Например, может реализовываться ситуация, когда при пробое существенную роль играет механизм пробоя на убегающих электронах, а поддержание разряда осуществляет электрическое поле с функцией распределения электронов по энергиям, «забывшей» о начальной стадии пробоя.

ВЫВОДЫ

В дальнейших спектральных измерениях будет возрастать роль стратосферных баллонных и космических наблюдений, которые позволяют сократить сильное влияние поглощения в атмосфере в наиболее информативном ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

При спектральных измерениях важен учёт электронных полос молекул NO.

Для идентификации разрядных процессов в джетах и стартерах (где могут иметь место лидерные процессы) необходимо также учитывать сильные спектральные линии атомов и ионов азота и кислорода.

В ближайшее время для улучшения измерений различных спектральных полос будет происходить переход от ПЗС-матриц к спектрометрам, использующим многоанодные фотоэлектрические умножители, что приведёт к значительному увеличению чувствительности и временного разрешения.

Возрастает необходимость в более тщательном спектроскопическом лабораторном моделировании вспышек в средней и верхней атмосфере как в условиях сверхпробойного электрического поля, так и при пробое на убегающих электронах.

При увеличении чувствительности инфракрасных матриц и уменьшении расстояния до областей локализации вспышек в средней и верхней атмосфере с помощью баллонов станут возможными измерения в инфракрасном диапазоне длин волн $1,5 \div 5$ мкм как с помощью сверхчувствительных инфракрасных фото- и видеокамер, так и инфракрасной спектроскопии. Последняя, скорее всего, будет сосредоточена на излучении молекул NO, т. к. инфракрасное излучение молекул N₂ и O₂ в основном электронном состоянии практически отсутствует.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (договор 14.B25.31.0023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мареев Е. А. // Труды VI Росс. конф. по атмосферному электричеству. Нижний Новгород, 2007. С. 22.
2. Chen A. B., Kuo C.-L., Lee Y.-J., Su H.-T. // J. Geophys. Res. A. 2008. V. 113, No. 8. Doi:10.1029/2008JA013101.
3. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Kanmae T., Sentman D. D. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Art. no. L11105.
4. Труды конф. «Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration» (ТЕРА 2012), Москва, 2012.
5. Pasko V. P. // J. Geophys. Res. A. 2010. V. 115. Art. no. A00E35.
6. Yashunin S. A., Mareev E. A., Rakov V. A. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. D10109.

Поступила в редакцию 6 мая 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

FLASHES IN THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE INITIATED BY THE LIGHTNING DISCHARGES: RECENT RESULTS AND FUTURE OPTICAL AND SPECTRAL OBSERVATION METHODS

A. Yu. Kostinskiy

Recent years yielded important experimental results in the field of studying the middle- and the upper-atmospheric discharges initiated by the lightning strokes. These results have been obtained using the most widespread measurement method related to the high-speed high-sensitivity visible-band cameras and the spectroscopy, which is the most rapidly developing method of observation of the upper-atmospheric flashes. Both methods are used during the ground-based, as well as the balloon- and satellite-borne observations. The above-mentioned methods are reviewed in this paper.