

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



На правах рукописи

УДК 550.388, 551.510.535

Дашкевич Жанна Владимировна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ**

1.6.18 - науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Апатиты - 2024

I. Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию характерных особенностей оптического излучения полярных сияний, детальному анализу эффективности физико-химических механизмов, ответственных за формирование аврорального излучения, а также вопросам диагностики и прогнозирования состояния возмущенной ионосферной плазмы в области полярных сияний.

Актуальность проблемы

Принятая в 2021 году программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» ставит цели, связанные с повышением качества жизни северян, развитием Северного морского пути, а также задачи охраны окружающей среды, обеспечения общественной и военной безопасности. Это связано, в том числе, с поддержкой работоспособности спутниковых систем, наземных средств связи и систем энергообеспечения, что, в свою очередь, зависит от ионосферных особенностей. Ведь именно ионосфера, как среда распространения радиоволн, существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Поэтому исследование структуры высокоширотной ионосферы и понимание физики протекающих в ней процессов имеет как фундаментальное, так и большое практическое значение.

В высоких широтах ионосфера Земли постоянно подвергается воздействию потоков высыпающихся из магнитосферы авроральных электронов, которые в неосвещенной Солнцем ионосфере являются доминирующим источником энергии, определяющим как ее структуру, так и динамику протекающих в ней процессов. Высыпающиеся частицы инициируют комплекс физико-химических взаимодействий между составляющими ионосферы, что приводит к появлению мелкомасштабных неоднородностей на высотах E и F областей ионосферы, являющихся причиной сбоя средств связи и неполадок в энергосистемах. Таким образом, наблюдение и прогнозирование космической погоды представляется средством обеспечения жизнедеятельности человека на Земле и в космосе. Контроль космической погоды основан на мониторинге и исследованиях ионосферы наземными и космическими средствами, в том числе и во время авроральных событий. Для этих целей, например, на планируемом для запуска спутнике РОС предусмотрена установка четырех фотометров, регистрирующих излучение в видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Одним из наиболее ярких проявлений авроральных высыпаний в полярной ионосфере являются полярные сияния, излучение которых состоит из эмиссий атомарных линий и полос систем возбужденных атмосферных газов. Наиболее яркие из них в видимой и ультрафиолетовой областях спектра это эмиссии

$\lambda 557.7$ ОI и $\lambda 630.0$ ОI нм атомарного кислорода, полосы 1NG первой отрицательной системы иона молекулярного азота, полосы первой положительной системы 1PG, второй положительной системы 2PG, системы Вегарда-Каплана VK, системы Лаймана-Берджа-Хопфилда LBH молекулярного азота. Интенсивность авроральных эмиссий напрямую зависит от характеристик высыпающегося потока электронов, формирующих электродинамическую обстановку ионосферы в локальных зонах аврорального овала. Таким образом, измерение интенсивности излучения полярных сияний в авроральных структурах способствует диагностики характеристик полярной ионосферы.

В настоящее время основными экспериментальными средствами в проведении исследований являются прямые измерения авроральных высыпаний и состава среды на космических аппаратах и наземные наблюдения с помощью радиофизической и спектрофотометрической аппаратуры. При этом, преимущественной особенностью оптических наблюдений является возможность проведения непрерывного мониторинга и исследование процессов, происходящих в конкретных формах полярных сияний.

Следует отметить, что, несмотря на многолетние исследования, опирающиеся на результаты спектрофотометрических наблюдений, в литературе существует ряд противоречий в результатах, касающихся, в первую очередь, количественных оценок эффективности отдельных каналов диссипации энергии, ответственных за излучение эмиссий в полярных сияниях и ряд нерешенных задач, таких как: а) разработка методов диагностики малых, но химически активных компонент ионосферной плазмы в области полярных сияний; б) исследование характерных особенностей двумерного распределения объемной интенсивности излучения в конкретных формах полярных сияний; в) исследование характерных особенностей вида энергетических спектров высыпающихся электронов, ответственных за формирование отдельных форм полярных сияний; г) создание эффективных и обоснованных методик для получения планетарного распределения интенсивности излучения.

Основой для решения поставленных задач является создание вычислительной модели для расчета характеристик возмущенной ионосферной плазмы и интенсивностей оптического излучения в локальной зоне высыпаний из магнитосферы энергичных электронов. Анализ получаемых в рамках данной модели результатов позволит разработать методики и соответствующие алгоритмы для диагностики состояния среды и оценки параметров потока высыпающихся электронов по данным спектрофотометрических наблюдений и тем самым приблизиться к решению актуальной в настоящее время проблеме прогнозирования космической погоды.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование физико-химических процессов, инициированных высыпавшимися в ионосферу авроральными электронами, анализ эффективности механизмов, ответственных за излучение основных эмиссий в полярных сияниях, разработка методов диагностики состояния возмущенной ионосферы и восстановления параметров потока авроральных электронов по данным спектрометрических наблюдений. В связи с этим выделяются следующие основные задачи:

1. Создание нестационарной модели авроральной ионосферы, описывающей в области электронных высыпаний процессы перераспределения выделившейся энергии и включающей в себя корректный учет электронно-колебательной кинетики в процессах возбуждения триплетных и синглетных состояний молекулярного азота.

2. Исследование каналов возбуждения и особенностей основных авроральных эмиссий, регистрируемых в полярных сияниях, а именно: эмиссий 557.7 и 630.0 нм атомарного кислорода, полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота 1NG N_2^+ , полос первой и второй положительной системы молекулярного азота 1PG и 2PG N_2 , полос системы Вегарда-Каплана VK N_2 и полос системы Лайман-Бердж-Хопфилда LBH N_2 .

3. Исследование влияния параметров потоков высыпавшихся электронов и количества содержания атмосферных газов, в особенности, окиси азота NO на эффективность каналов возбуждения 1D и 1S термов атомарного кислорода и интенсивность эмиссий 557.7 и 630.0 нм.

4. Исследование характерных особенностей двумерного распределения объемной интенсивности излучения в конкретных формах полярных сияний с использованием метода оптической томографии.

5. Разработка методов восстановления характеристик потока высыпавшихся электронов по данным спектро-фотометрических наблюдений.

6. Разработка методов диагностики химического состава и свойств ионосферы в области полярных сияний

7. Исследование характерных особенностей энергетических спектров потоков высыпавшихся электронов, формирующих полярные сияния.

Методы исследования

Основным методом исследования, разработанным и примененным в диссертации, является численное моделирование физико-химических процессов, протекающих в высокоширотной ионосферной плазме во время авроральных высыпаний. Численное моделирование основано на решении системы нестационарных балансных уравнений, которые описывают процессы диссипации

и перераспределения энергии в области полярных сияний, инициированных потоками высыпающихся авроральных электронов.

Научная новизна

1. Создана нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы, описывающая процессы возбуждения электронно-колебательных состояний компонент ионосферной плазмы прямым электронным ударом и последующее перераспределение выделившейся энергии вследствие химических реакций для произвольно заданной формы энергетического спектра высыпающегося потока электронов в локальной зоне аврорального овала. С ее помощью можно проводить моделирование ионного состава и электронного содержания ионосферы в зоне электронных высыпаний, в том числе получать высотные профили концентраций электронов и ионов O_2^+ , N_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, O^+ , NO^+ , N^+ , также рассчитывать высотные профили концентрации возбужденных компонент $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(W^3\Delta_u)$, $N_2(B'^3\Sigma_u^-)$, $N_2(a^1\Pi_g)$, $N_2(w^1\Delta_u)$, $N_2(a'\Sigma_u^-)$ на высотах 95-250 км.

- Для расчета скоростей образования возбужденных и ионизированных составляющих ионосферы в модели использовался эффективный механизм, связывающий скорость образования ионосферной компоненты с выделившейся в атмосфере энергией прямым соотношением, в котором учтены все рожденные в ионизационных процессах поколения электронов, что существенно упрощает процедуру расчетов и позволяет судить о процессах, происходящих в ионосфере в реальном времени.

- В модель включен детальный учет электронно-колебательной кинетики триплетных и синглетных уровней возбужденного молекулярного азота, что позволяет получить полную картину образования во время полярных сияний возбужденных атомов и молекул, являющихся источниками аврорального излучения.

2. Впервые показано, что в возбуждение 1D терма атомарного кислорода существенный вклад могут вносить парциально незначительные столкновительные реакции $N(^2D)+O$, $N(^2D)+O_2$, $N(^2P)+O_2$, N^++O_2 . Их суммарный вклад в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм может быть вторым по эффективности в области высот ~110–150 км.

3. Впервые показано, что относительный вклад реакции $O_2^++e_{th}$ в интенсивность эмиссии 557.7 нм уменьшается с ростом концентрации окиси азота. Вклад этой реакции составляет $>10\%$, когда концентрация окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max} > 10^8 \text{ см}^{-3}$ и достигает 40 % при $[NO]_{max} = 10^7 \text{ см}^{-3}$.

4. Впервые показано, что основным каналом подавления интенсивности эмиссии 557.7 нм является реакция $O_2^+ + NO$, которая уменьшает вклад реакции диссоциативной рекомбинации иона O_2^+ в формирование 1S состояния атомарного кислорода, тогда как на интенсивность красной линии 630.0 нм атомарного кислорода данная реакция не оказывает значительного влияния.

5. Впервые показано, что величина концентрации окиси азота влияет на отношение интенсивностей эмиссий $I_{557.7}/I_{427.8}$, а наблюдаемые в полярных сияниях вариации отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ могут быть обусловлены вариациями концентрации NO в области полярных сияний.

6. Разработана методика восстановления высотных профилей энерговыделения, сформированных потоками высыпавшихся электронов из триангуляционных наблюдений структур полярных сияний камерами с приемниками, регистрирующими излучение в широком диапазоне длин волн.

7. Впервые восстановлены и исследованы особенности энергетических спектров высыпавшихся электронов $f(E)$, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях. Обнаружено, что полученные распределения $f(E)$ хорошо аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер и максвелловское распределение по энергиям

8. Разработана методика оценки концентрации NO в области полярных сияний по данным фотометрических измерений эмиссий 427.8 нм, 557.7 нм и 630.0 нм.

9. Разработан алгоритм для расчета планетарного распределения интенсивностей свечения и полной электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний без априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпавшихся электронов.

10. Впервые проведено исследование влияния параметров высыпавшегося потока электронов на эффективный коэффициент рекомбинации. Найдено, что в $F1$ области ионосферы эффективный коэффициент рекомбинации зависит как от потока энергии, так и от вида энергетического спектра высыпавшегося потока авроральных электронов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность разработанной модели, описывающей процессы диссипации энергии в области электронных высыпаний, и предложенных методик диагностики опирается в первую очередь на детальное описание возможных каналов диссипации энергии авроральных электронов в ионосфере Земли и подтверждается согласием полученных модельных расчетов с

результатами измерений ионного состава и интенсивностей излучения авроральных эмиссий в ракетно-спутниковых и наземных экспериментах.

Научная и практическая значимость работы

Представленная в диссертации нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы позволяет установить количественную связь между параметрами потока высыпавшихся авроральных электронов и высотными профилями объемной интенсивности излучения основных эмиссий в полярных сияниях, а также высотные профили концентраций ионного состава ионосферной плазмы.

Нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы, может быть использована как часть глобальных динамических моделей ионосферы Земли для исследований крупномасштабных процессов, происходящих в космическом земном пространстве.

Проведенные в работе исследование каналов возбуждения атмосферных газов, ответственных за наблюдаемые в полярных сияниях оптические эмиссии, имеют фундаментальное значение и вместе с моделью авроральной ионосферы открывают возможности для дальнейшего решения научных задач в области ионосферной химии.

Исследования особенностей внутренней структуры отдельных форм полярных сияний и параметров высыпавшихся потоков авроральных электронов, полученные из данных описанных в работе экспериментов с помощью представленной модели, полезны для изучения процессов, происходящих в магнитосфере Земли и близлежащем космосе.

Методики, предложенные в диссертационной работе, могут быть использованы напрямую в задачах прогнозирования космической погоды и определения характеристик ионосферы в реальном времени. В том числе для прогнозирования планетарного распределения интенсивностей излучения в конкретных эмиссиях в видимой и ультрафиолетовой областях оптического спектра, распределение электронной концентрации по данным эмпирических моделей планетарного распределения электронных высыпаний. Кроме того, представленная модель способствует дальнейшей разработке необходимой теоретической основы для проведения диагностики состояния ионосферы в области полярных сияний, а также разработке методов для прогнозирования условий сцинтилляции радиосигналов.

Результаты работы могут быть использованы для проведения исследований атмосфер других планет Солнечной системы.

Нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы была задействована в следующих разработках:

1. «Диссипация потоков авроральных электронов в атмосфере Земли: высотные распределения. Предпосылки дистанционного контроля оптической аппаратурой» в соответствии с договорами № 1204-МП между ФГБНУ «Центральная аэрологическая обсерватория» и ФГБНУ «Полярный геофизический институт», заключенного на основании договора № 2630/9-11 между ФГУП «НПП ВНИИЭМ» и ОАО «Российские космические системы», договора № 1109-МП между ОАО «Российские космические системы» и ФГБУ «ЦАО», 2012 г.;

2. Совместный проект «Влияние солнечной активности и потоков солнечного ветра на магнитосферные возмущения, высыпания частиц и эмиссии полярных сияний» в соответствии с «Соглашением о сотрудничестве между Российской академией наук и Болгарской академией наук в области фундаментальных космических исследований», 2009-2014 гг.;

3. Совместный проект «Комплексный анализ авроральных и субавроральных явлений по данным спутника ERC и российским и японским наземным наблюдениям на северо-западе России и Скандинавии», поддержанный грантом РФФИ №19-52-50025, 2019-2020 гг.;

4. Договор между ФГБНУ «Полярный геофизический институт» и АО «НПК «НИИДАР»», 2022-2023 гг.

5. Договор НИР ПГИ - НИИЯФ МГУ «Проведение совместной регистрации пульсирующих полярных сияний на основе стереометрических данных телескопов-спектрометров НИИЯФ МГУ и камер всего неба ПГИ», 2024 г.

Апробация работы.

Результаты исследований представлялись следующих международных и российских конференциях:

- 18 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Method (Tromso, Norway, 1991);
- 19 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Kiruna, Sweden, 1992);
- 20 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Apatity, Russia, 1993);
 - the XIX General Assembly of the European Geophysical Society (Grenoble, France, 1994);
 - 26 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Stockholm, Sweden, 2000);
 - The International Beacon Satellite Symposium, Boston College (Massachusetts, USA, 2001);

- 31 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Ambleside, The Lake District, UK, 2004);
- 10 Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere" (Болгария, Приморско, 2018);
- 45 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Kiruna, Sweden, 2018);
- 11 Workshop "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere" (Болгария, Приморско, 2019);
- 10-я anniversary international conference "Solar-terrestrial relationships and physics of earthquakes precursor" (Paratunka, Kamchatky kray, 2019);
- 46 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, (Oulu, Finland, 2019);
- 13-ая конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2018;
- 19-ая конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2024,

а также на Всероссийских ежегодных семинарах «Физика авроральных явлений» (г. Апатиты в 2001, 2002, 2003, 2010, 2015, 2016, 2018, 2019, 2021, 2022, 2024), на конференции Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды (Москва, 2018)

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы описывает диссипативные процессы в ионосферной плазме, инициированные потоками высыпающихся авроральных электронов, и позволяет рассчитывать высотные профили объемной интенсивности излучения эмиссий $\lambda 557.7$ нм, $\lambda 630.0$ нм атомарного кислорода, полос 1PG, 2PG, V-K и LBH систем молекулярного азота, полос 1NG системы иона молекулярного азота, высотные профили концентраций ионов O_2^+ , N_2^+ , O^+ , NO^+ , N^+ , и концентрацию электронов в области полярных сияний в процессе высыпания авроральных электронов.

2. Результаты исследования эффективности механизмов возбуждения и дезактивации 1D и 1S состояний атомарного кислорода демонстрируют влияние окиси азота NO на процессы возбуждения эмиссий $\lambda 557.7$ нм и $\lambda 630.0$ нм, эффективность совокупности источников $N(^2D)+O$; $N(^2D)+O_2$; $N(^2P)+O_2$; N^++O_2 , $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu_{557.7}$ в возбуждении эмиссии $\lambda 630.0$ нм на высотах 110-150 км, эффективность диссоциативной рекомбинацией иона молекулярного кислорода $O_2^++e_{th}$ в возбуждение эмиссии $\lambda 557.7$ нм, уменьшение отношения интенсивностей $I_{557.7}/I_{427.8}$ с увеличением концентрации NO.

3. Численные оценки содержания окиси азота в области электронных высыпаний, полученные на основе экспериментальных данных фотометрических наблюдений, демонстрируют интервал концентрации NO в максимуме высотного профиля $1-3.3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$.

4. Восстановленные на основе экспериментальных данных из наблюдений полярных сияний двумя разнесенными по расстоянию камерами всего неба энергетические спектры высыпающихся электронов $f(E)$, формирующие лучистые структуры полярных сияний, аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер и максвелловское распределение по энергиям, что позволяет связать появление лучей с высыпаниями электронов, имеющими степенной энергетический спектр $f(E) \sim NE^{-\alpha}$.

5. Разработанный комплекс диагностических методик позволяет восстанавливать параметры потока высыпающихся электронов и оценивать величину концентрации окиси азота по данным спектрофотометрических наблюдений интенсивностей излучения $\lambda 427.8 \text{ нм}$, $\lambda 557.7 \text{ нм}$, $\lambda 630.0 \text{ нм}$ и полос системы LBH, восстанавливать высотные профили энерговыделения на основе триангуляционных наблюдений полярных сияний камерами с приемниками, регистрирующими излучение в широком диапазоне длин волн, а также моделировать планетарное распределение интенсивностей излучения в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний, не привлекая априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпающихся электронов.

Соответствие паспорту специальности 1.6.18- науки об атмосфере и климате:

1. Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе. Применение радиолокационной, лазерной, спектрометрической, радио и спутниковой аппаратуры. Ракетное, самолетное, лазерное, акустическое, спектрометрическое и микроволновое зондирование.

2. Вычислительные методы и технологии систем анализа и усвоения данных наблюдений. Геоинформационные системы в метеорологии, климатологии и агрометеорологии.

3. Состав атмосферы. Водяной пар, газовые примеси, аэрозоли. Парниковые газы. Фотохимические процессы в атмосфере. Озон, диоксид углерода, метан, гидроксид, азотистые и другие малые примеси в атмосфере. Радиоактивность атмосферы. Загрязнение атмосферы

4. Строение атмосферы. Приземный и пограничный слой. Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли. Строение и физика средней атмосферы (стратосфера, мезосфера), верхней атмосферы (термосфера, экзосфера) и ионосферы, включая влияние ионосферы на распространение радиоволн. Строение и физика магнитосферы и околоземного космического пространства, включая взаимодействие с солнечным ветром и геомагнитные возмущения. Озоновый слой.

6. Космическое и корпускулярное излучение. Оптические явления в атмосфере. Дальность видимости.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 30 публикаций, из них 14 работ в рецензируемых журналах, 12 статей в трудах международных конференций, 4 статьи в сборниках трудов Кольского научного центра РАН и ПГИ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Общий объем 314 стр., включая 127 рисунков, 14 таблиц, библиографию из 223 наименований.

Личный вклад автора.

Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его активном участии.

Статьи, опубликованные по теме диссертации, написаны при определяющем вкладе автора.

II. Содержание работы

В первой главе представлена нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы, описывающая процессы возбуждения электронно-колебательных состояний компонент ионосферной плазмы прямым электронным ударом и последующее перераспределение выделившейся энергии посредством физико-химических реакций для произвольно заданного энергетического спектра высыпающегося потока авроральных электронов. Для высокоширотной ионосферы на высотах E - и F_1 -областей (~ 90 - 160 км), где процессами массопереноса можно пренебречь, численное моделирование данных процессов сводится к решению системы нестационарных одномерных уравнений баланса вида:

$$\frac{d[N_{Yk}(h,t)]}{dt} = Q_{Yk}(h,t) + Q_{Yk}^*(h,t) - L_{Yk}(h,t) \quad (1),$$

где: $[N_{Yk}(h,t)]$ – концентрация Y -компоненты атмосферного газа, возбужденного в k -е состояние, $Q_{Yk}(h,t)$ – скорость образования Yk -состояния за счет прямого удара, $Q_{Yk}^*(h,t)$ – скорость образования Yk -состояния в химических реакциях, $L_{Yk}(h,t)$ – скорость гашения Yk -состояния в химических реакциях и излучательных переходах, h – высота над поверхностью Земли, t – продолжительность высыпаний.

Скорость возбуждения k -го состояния Y -ой составляющей атмосферных газов в столкновительных реакциях определяется как:

$$Q_{Yk}^*(h,t) = \sum_X \sum_Z [N_X(h,t)][N_Z(h,t)]k_{XZ} \quad (2),$$

где: $[N_X(h,t)]$ и $[N_Z(h,t)]$ – концентрации газов сорта X и Z , k_{XZ} – константа скорости реакции.

Потери $L_{Yk}(h,t)$ складываются из потерь в столкновительных реакциях гашения и излучательных переходах и определяются как:

$$L_{Yk}(h,t) = \sum_X [N_{Yk}(h,t)][N_X(h,t)]k_{YX} + \sum_i A_{Yi}^{Yk} [N_{Yk}(h,t)] \quad (3),$$

где: $[N_{Yk}(h,t)]$ и $[N_X(h,t)]$ – концентрации газа в Yk -состоянии и газа сорта X , k_{YX} – константа скорости реакции дезактивации, A_{Yi}^{Yk} – вероятность спонтанного излучения Yk -состояния с переходом в Yi .

Для расчета высотных профилей скоростей образования возбужденных компонент атмосферы электронным ударом $Q_{Yk}(h)$ использовался метод, основанный на знании энергетических цен возбуждения частицы сорта Y в k -ое состояние и безразмерной функции диссипации энергии, которые позволяют аналитически связать высотные профили скоростей возбуждения различных компонент ионосферы с потоком авроральных электронов на верхней границе высыпаний:

$$Q_{Yk}(h) = P_Y(h)\rho(h) \frac{q_{v'}}{\varepsilon_{Yk}} \int_E \frac{E \cdot f(E)[1-T(E)]}{R(E)} \lambda(E, \chi) dE \quad (4),$$

где: $P_Y(h)$ – доля энергии, затраченной на возбуждение газа сорта Y , $\rho(h)$ – плотность атмосферы, ε_{Yk} – дифференциальная энергетическая цена возбуждения газа сорта Y в k -ое состояние, E – энергия высыпающихся электронов, $f(E)$ – первичный энергетический спектр потока высыпающихся электронов, $T(E)$ – величина альbedo-потока, $R(E)$ – интегральная длина пробега, $\lambda(E, \chi)$ – безразмерная функция диссипации энергии, χ – безразмерный параметр, равный отношению массы вещества, пройденной от источника до высоты h .

В области полярных сияний активно возбуждаются триплетные и синглетные состояния молекулярного азота N_2 : $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, $a'^1\Sigma_u^-$, которые являются источниками целого ряда систем полос, регистрируемых в спектрах полярных сияний. При расчетах электронно-колебательной заселенности триплетных и синглетных термов молекулярного азота в модели учитывались следующие каналы перераспределения энергии:

- а) излучательные спонтанные переходы,
- б) переносы энергии между колебательными уровнями электронных термов путем межсистемных каскадных переходов,
- в) межмолекулярные и внутримолекулярные переносы энергии в столкновительных реакциях,

Модель включает в себя 56 физико-химических процессов и позволяет рассчитывать высотные профили концентраций ионных и нейтральных компонент ионосферной плазмы N_2^+ , O_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, NO , NO^+ , N^+ , $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(B'^3\Sigma_u^-)$, $N_2(C^3\Pi_u)$, $N_2(W^3\Delta_u)$, $N_2(a^1\Pi_g)$, $N_2(a'^1\Sigma_u^-)$, $N_2(w^1\Delta_u)$ с учетом электронно-колебательной заселенности триплетных и синглетных уровней молекулярного азота в процессе электронных высыпаний. Концентрация электронов рассчитывается при условии термодинамического равновесия как сумма концентраций всех ионов:

$$[e] = [N_2^+] + [O_2^+] + [O^+(^4S)] + [O^+(^2D)] + [O^+(^2P)] + [NO^+] + [N^+] \quad (5).$$

Во второй главе проведено тестирование представленной в первой главе модели авроральной ионосферы. В качестве экспериментальных данных использованы результаты уникального ракетно-спутникового эксперимента [Rees et al. // *J. Geophys. Res.* 1977. V.82. №16. P.2250-2261], во время которого на запущенной в область дуги полярного сияния ракете и пролетающим в окрестности сияния спутнике одновременно были измерены: энергетический спектр электронного потока, концентрации атмосферных газов N_2 , O_2 и O в интервале высот 160-240 км, высотные профили концентрации ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ и концентрация электронов, высотные профили интенсивностей эмиссий 557.7 и 630.0 нм атомарного кислорода, 391.4 нм первой отрицательной системы полос N_2^+ , 337.1 нм второй положительной системы полос и 320.0 нм системы полос Вегарда-Каплана N_2 .

При моделировании данного события в качестве входных параметров были использованы:

- а) модель нейтральной атмосферы, адаптированная к экспериментально измеренным значениям концентраций атмосферных газов;

б) спектр высыпавшихся электронов, восстановленный из экспериментальных данных высотного профиля интенсивности эмиссии 391.4 нм;

в) высотный профиль окиси азота NO, адаптированный к значениям концентрации окиси азота, измеренной в эксперименте.

Приведены результаты моделирования данного события в рамках представленной в первой главе модели. Рис.1 иллюстрирует рассчитанные и измеренные в эксперименте высотные профили концентрации ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ и концентрацию электронов, а также рассчитанные и измеренные в эксперименте высотные распределения интенсивностей эмиссий 557.7 нм, 630.0 нм 391.4 нм, 337.1 нм и 320.0 нм:

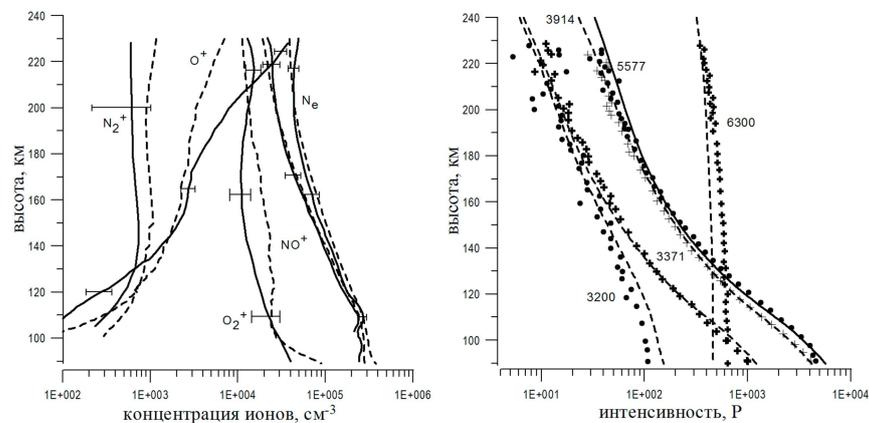


Рис. 1. а) высотные распределения концентраций ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ и концентрации электронов. Пунктирные линии – результаты моделирования; сплошные линии – экспериментальные данные. б) высотные распределения интенсивностей эмиссий 557.7 нм, 630.0 нм 391.4 нм, 337.1 нм и 320.0 нм: линии – результаты моделирования; кружки и крестики – экспериментальные данные.

Степень согласия рассчитанных распределений концентраций ионного состава и интенсивностей излучения определена по отношениям измеренных плотностей N_2^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ и n_e , а также отношениям измеренных интенсивностей излучения в эмиссиях 391.4, 320.0, 337.1, 557.7 и 630.0 нм к соответствующим величинам, рассчитанным в рамках данной модели. Показано, что в большинстве случаев отношения модельных и экспериментальных величин лежат в пределах погрешностей измерения, а в отдельных случаях колеблются около единицы.

Сделан вывод, что представленная в первой главе физико-химическая модель авроральной ионосферы, описывающая процессы в области полярных сияний, демонстрирует удовлетворительное согласие с результатами прямых измерений.

Третья глава посвящена исследованию механизмов, приводящих к излучению ряда основных эмиссий, регистрируемых в полярных сияниях, исследованию характеристик излучения линий и полос полярного сияния, расчету ионного состава и характеристик временной динамики выхода на стационарный режим концентраций компонент ионосферной плазмы.

Во *Введении третьей главы* дана общая информация об излучении в полярных сияниях. Излучения или эмиссия полярного сияния формируется благодаря спонтанным переходом с вышележащего уровня k' возбужденной Y -составляющей атмосферы на ее нижележащий уровень k'' . Каждому спонтанному переходу соответствует своя длина волны λ , определяющая цвет излучения полярного сияния.

Объемная интенсивность эмиссии с длиной волны λ на высоте h определяется выражением:

$$\eta_{\lambda}(h) = A_{Yk' \rightarrow Yk''} [N_{Yk'}(h)] \quad (6),$$

где $\eta_{\lambda}(h)$ – объемная интенсивность излучения на высоте h в *фотон см⁻³·с⁻¹*, $A_{Yk' \rightarrow Yk''}$ – коэффициенты Эйнштейна для перехода $Yk' \rightarrow Yk''$ с вышележащего уровня k' возбужденной Y -составляющей атмосферы на ее нижележащий уровень k'' , $[N_{Yk'}(h)]$ – концентрация Y -компоненты атмосферного газа, возбужденного в k' -е состояние.

Интенсивность эмиссии в столбе полярного сияния может быть рассчитана как:

$$I_{\lambda} = \int \eta_{\lambda}(h) dh \quad (7),$$

где I_{λ} – величина интенсивности эмиссии с длиной волны λ на нижней границе полярного сияния в *фотон·см⁻²·с⁻¹*

В *первом параграфе* главы анализируются характерные особенности высотных профилей объемной интенсивности излучения полосы первой отрицательной системы иона молекулярного азота $\lambda 391.4$ нм 1NG N_2^+ , возникающей вследствие дипольно-разрешенного перехода $B_2\Sigma_u^+(v'=0) \rightarrow X_2\Sigma_g^+(v''=0)$.

Из-за малого времени жизни молекулы N_2^+ ($B_2\Sigma_u^+$) ($\sim 10^{-7}$ сек), считается, что терм $B_2\Sigma_u^+$ целиком гасится благодаря радиационным переходам на терм $X_2\Sigma_g^+$. Концентрация $[N_2^+(B_2\Sigma_u^+)]$ в условиях фотохимического равновесия будет определяться простым стационарным уравнением баланса:

$$0 = Q_{v'}(h) - \sum_{v''} A_{v'v''} [N_2^+(B_2\Sigma_u^+, v'), h] \quad (8).$$

Объемная интенсивность полосы $I_{391.4}$ определяется выражением:

$$\eta_{394.1}(h) = \frac{A_{394.1}}{\sum_{v''} A_{v'v''}} Q_{v'}(h) \quad (9),$$

где $A_{391.4}$ – коэффициент Эйнштейна для перехода N_2^+ ($B_2\Sigma_u^+, v'=0 \rightarrow X_2\Sigma_g^+, v''=0$), $[N_2^+(B_2\Sigma_u^+, v'=0)]$ – концентрация иона молекулярного азота в $B_2\Sigma_u^+, v'=0$ состоянии.

Согласно формулам (4) и (9), высотный профиль объемной интенсивности эмиссий полосы первой отрицательной системы N_2^+ аналогичен высотному распределению выделившейся в атмосфере энергии. Этот факт важен при исследовании полярных сияний с помощью фотометрических методов.

Скорость возбуждения $B^2\Sigma_u^+$ электронным ударом рассчитывается по формуле (4) с учетом распределения возбуждения по колебательным уровням согласно факторам Франка-Кондона.

Высотные профили, рассчитанные для четырех видов потока высыпающихся электронов и различных средних энергий потока электронов приведены на рис.2. Рассматривались две формы энергетического спектра (моноэнергетический поток и поток с максвелловским распределением по энергиям) и два вида распределение электронов по питч-углам (мононаправленное вдоль силовых линий магнитного поля и изотропное в нижней полусфере).

Проанализировано поведение высоты максимума свечения h_{max} и вертикальная протяженность излучения на уровне 0.3 от высоты свечения в максимуме профиля Δh от параметров энергетического спектра потока высыпающихся электронов. Показано, что высота максимума слабо зависит от вида начального дифференциального потока высыпающихся электронов и определяется в основном величиной средней энергии E_{cp} .

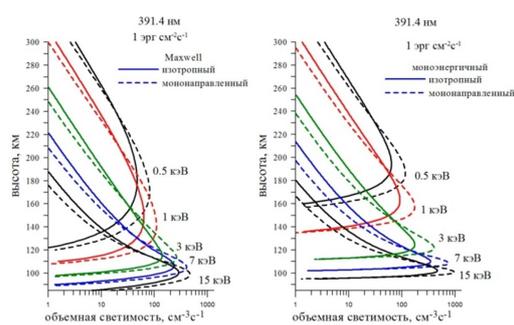


Рис.2. Высотные профили объемной интенсивности излучения эмиссии 391.4 нм.

Высота максимума свечения лежит в диапазоне высот $183 \div 98.5$ км при изменении средней энергии от 0.5 до 20 кэВ. Максимальная величина ширины профиля Δh_{max} соответствует потоку высыпающихся электронов с максвелловским распределением по энергиям и изотропному

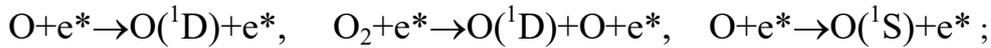
распределению по питч-углам и лежит в диапазоне 115÷230 км при изменении средней энергии от 0.5 до 20 кэВ.

Минимальная ширина профиля Δh_{\min} соответствует моноэнергетическому потоку высыпающихся электронов, инжектированных вдоль магнитного поля, и лежит в диапазоне 65÷10 км при изменении средней энергии от 0.5 до 20 кэВ.

Полученный результат представляется полезным в прикладных задачах построения планетарного распределения высоты максимума излучения в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний.

Второй параграф посвящен эмиссиям возбужденного атомарного кислорода 557.7 нм и 630.0 нм. Исследованы каналы возбуждения 1D и 1S уровней атомарного кислорода, являющимися источниками эмиссий 557.7 нм и 630.0 нм:

- процессы возбуждения 1D и 1S состояний за счет прямого электронного удара высыпающимися авроральными электронами e^* :



- диссоциативная рекомбинация иона молекулярного кислорода термальными электронами e_{th} : $O_2^+ + e_{th} \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$;

- излучательный переход: $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu$

- процессы столкновительных взаимодействий между компонентами атмосферных газов:



Поскольку термы 1D и 1S атомарного кислорода являются метастабильными, то гашение их происходит не только за счет спонтанного излучения на нижележащие уровни атомарного кислорода, но и в результате столкновительных реакций с составляющими атмосферных газов.

Уравнения баланса для расчета концентрации термов $O(^1D)$ и $O(^1S)$ на заданной высоте h :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [O(^1S), h] = & Q_{1S}(h) + \sum_{XY} k_{XY} [N_X(h)] [Y(h)] - \\ & - (A_{1S \rightarrow 1D} + A_{1S \rightarrow 3P}) [O(^1S), h] - \sum_Y k_Y [N_Y(h)] [O(^1S), h] \end{aligned} \quad (10),$$

$$\frac{d}{dt} [O(^1D), h] = Q_{1D}(h) + \sum_{XY} k_{XY} [N_X(h)] [N_Y(h)] + A_{1S \rightarrow 1D} [O(^1S), h]$$

$$-A_{1D \rightarrow 3P}[O(^1D), h] - \sum_Y k_Y [N_Y(h)][O(^1D), h] \quad (11),$$

где в правой части первый член $Q(h)$ - скорость возбуждения электронного терма атома кислорода электронным ударом на высоте h , $\sum_{XY} k_{XY}[X(h)][Y(h)]$ - возбуждение терма в результате столкновительных взаимодействий частиц сорта X с частицами сорта Y , $A[O(^1S), h]$ - дезактивация терма за счет радиационного перехода, $\sum_Y k_Y [Y(h)][O(^1D), h]$ - дезактивация термов в результате столкновительных взаимодействий, $A_{1S \rightarrow 1D}[O(^1S), h]$ - возбуждение 1D терма за счет радиационного перехода с 1S терма атомарного кислорода (реакция 34), k_{XY} - константы скоростей реакций, $A_{1S \rightarrow 1D}, A_{1D \rightarrow 3P}, A_{1D \rightarrow 3P}$ - коэффициенты Эйнштейна соответствующих переходов.

Рассчитаны высотные профили объемной интенсивности эмиссий 557.7 и 630.0 нм для четырех видов потока высыпающихся электронов: две формы энергетического спектра (моноэнергетический поток и поток с максвелловским распределением по энергиям) и два вида распределение электронов поpitch-углам (мононаправленное вдоль силовых линий магнитного поля и изотропное в нижней полусфере). Проанализировано поведение высоты максимума свечения h_{\max} и вертикальная протяженность излучения на уровне 0.3 от высоты свечения в максимуме профиля Δh от параметров энергетического спектра потока высыпающихся электронов для эмиссии $\lambda 557.7$ нм. Показано, что высота максимума слабо зависит от вида начального дифференциального потока высыпающихся электронов и определяется величиной средней энергии

Сделан анализ эффективности относительных вкладов каналов возбуждения атомов $O(^1D)$ в суммарную интенсивность эмиссий $\lambda 630.0$ нм. На рис.3 показана высотная зависимость относительных вкладов каналов возбуждения 1D состояния атомарного кислорода в объемную интенсивность эмиссии $\lambda 630.0$ нм, рассчитанная для трех средних энергий высыпающихся электронов.

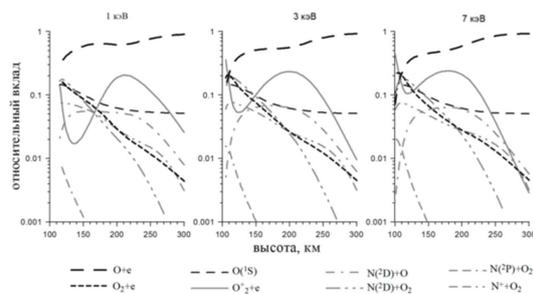


Рис.3. Высотная зависимость относительных вкладов каналов возбуждения 1D состояния атомарного кислорода в объемную интенсивность эмиссии 630.0 нм.

Показано, что основным каналом возбуждения эмиссии 630.0 нм является прямой электронный удар с атомарным кислородом: $O+e^* \rightarrow O(^1D)+e$.

Показано, что реакции: столкновительные взаимодействия $N(^2D)+O$, $N(^2D)+O_2$, $N(^2P)+O_2$, N^++O_2 и радиационный переход $^1S \rightarrow ^1D$, ранее считавшиеся «незначительными» по вкладу в возбуждения $O(^1D)$ и отнесенные в опубликованной литературе к разряду малых, могут вносить существенный вклад в интенсивность излучения эмиссии $\lambda 630.0$ нм. К «незначительным» каналам возбуждения эмиссии $\lambda 630.0$ нм можно отнести только реакцию $N(^2P)+O_2$. Для диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$ характерно наличие в высотной зависимости ее вклада в возбуждение 1D терма локального минимума в интервале высот 110÷150 км и максимума, локализованного в интервале 180÷220 км. Наличие минимума в кривой высотного распределения относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации приводит к тому, что в области высот 110÷150 км вторым по эффективности механизмом возбуждения эмиссии $\lambda 630.0$ нм становится совокупность каналов столкновительных взаимодействий $N(^2D)+O$, $N(^2D)+O_2$, $N(^2P)+O_2$, N^++O_2 . Показано, что причиной минимума в высотном распределении относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации в интенсивность объемной эмиссии $\lambda 630.0$ нм является процесс дезактивации иона O_2^+ в столкновительной реакции O_2^++NO .

Проведено исследование динамики изменения высотного распределения относительного вклада реакции $O_2^+ + e_{th}$ в объемную интенсивность эмиссий $\lambda 630.0$ нм в зависимости от концентрации $[NO]_{max}$ для различных средних энергий высыпавшихся электронов, которое показало, что глубина минимума становится тем больше, чем больше концентрация окиси азота.

Рассмотрены вклады реакций возбуждения в интенсивность в столбе полярного сияния эмиссии 630.0 нм, $I_{630.0}$, в зависимости от плотности окиси азота. Плотность окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max}$ варьировалась в интервале 10^6 - 10^9 см⁻³. Показано, что вклады реакций возбуждения малочувствительны к изменению $[NO]$, за исключением реакции диссоциативной рекомбинации O_2^+ , вклад которой уменьшается с 16 до 6% с увеличением $[NO]_{max}$.

Сделан анализ эффективности вкладов каналов возбуждения атомов $O(^1S)$ в интенсивность эмиссии $\lambda 557.7$ нм. Показано, что на высотах $h < 170$ км доминирующим каналом возбуждения эмиссии $\lambda 557.7$ нм является столкновительная реакция $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O \rightarrow N_2 + O(^1S)$, а на высотах $h > 170$ км прямой электронный удар, третьей по величине вклада является реакция диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th} \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$.

Рассчитана высотная зависимость относительных вкладов в возбуждение 1S состояния атомарного кислорода для трех средних энергий высыпающихся электронов. В высотной зависимости относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th} \rightarrow$ в возбуждение эмиссий $\lambda 557.7$ нм присутствует минимум в интервале высот $\sim 110-150$ км. Показано, что причинами формирования минимума в высотном распределении относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации в объемную интенсивность излучения эмиссии $\lambda 557.7$ нм являются столкновительные реакции иона молекулярного кислорода O_2^+ с нечетным азотом $N(^4S)$, $N(^2D)$ и NO , при этом основным процессом дезактивации иона O_2^+ является реакция $O_2^+ + NO$.

Исследована динамика изменения высотного распределения величины относительного вклада реакции $O_2^+ + e_{th}$ в объемную интенсивность эмиссии $\lambda 557.7$ нм в зависимости от концентрации NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$ для различных средних энергий высыпающихся электронов. Показало, что глубина минимума становится тем больше, чем больше концентрация окиси азота.

Рассчитана зависимость относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации O_2^+ в интенсивность эмиссии $\lambda 557.7$ нм в столбе полярного сияния. Показано, что относительный вклад реакции $O_2^+ + e_{th}$ в интенсивность зеленой линии уменьшается с ростом концентрации окиси азота и составляет $>10\%$, когда концентрация окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max} < 10^8 \text{ см}^{-3}$. При $[NO]_{max} = 10^7 \text{ см}^{-3}$ относительный вклад реакции $O_2^+ + e_{th}$ достигает 40%

Проведено исследование влияния концентрации окиси азота на интенсивность эмиссий $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм. Показано, что основным каналом подавления интенсивности эмиссии $\lambda 557.7$ нм является реакция дезактивации $O_2^+ + NO$, которая уменьшает вклад диссоциативной рекомбинации иона O_2^+ в формирование 1S состояния атомарного кислорода, когда как на интенсивность красной линии 630.0 нм атомарного кислорода данная реакция не оказывает значительного влияния.

В третьем параграфе проведены модельные расчеты отношений интенсивностей эмиссий $I_{630.0}/I_{427.8}$ и $I_{557.7}/I_{427.8}$ и их вариаций в зависимости от параметров высыпающегося потока электронов и состава ионосферы. Средняя энергия варьировалась в интервале от 0.5 до 20 кэВ, поток энергии – от 1 до 10 эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, присутствие полярным сияниям. Показано, что для рассматриваемых величин средних энергий и потока энергии, отношение интенсивностей $I_{557.7}/I_{427.8}$ меняется в пределах 10% . Показано, что отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ имеет однозначную сильную зависимость от средней энергии высыпающихся электронов и не

незначительно меняется с изменением величины потока энергии электронов. Проведено сравнение полученных отношений с экспериментальными данными, показывающее хорошую согласованность расчета и эксперимента.

Исследовано влияние концентрации атмосферного атомарного кислорода на величину отношений $I_{557.7}/I_{427.8}$ и $I_{630.0}/I_{427.8}$. Концентрация $[O]$ варьировалась в интервале $0.5[O]_{MSIS}-2[O]_{MSIS}$. Отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ незначительно меняется в рассматриваемом интервале $[O]$. Показано, что величина концентрации атомарного кислорода влияет на форму зависимости отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ от средней энергии электронов.

Исследовано влияние концентрации окиси азота на величину отношений $I_{557.7}/I_{427.8}$ и $I_{630.0}/I_{427.8}$. Плотность окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max}$ варьировалась в интервале 10^6-10^9 см⁻³. Показано, что величина отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ с изменением концентрации NO меняется незначительно. Показано, что влияние средней энергии авроральных электронов на отношение интенсивностей эмиссий $\lambda 557.7$ нм и $\lambda 427.8$ нм гораздо слабее, чем влияние концентрации окиси азота $[NO]_{max}$ и что это отношение $I_{557.7}/I_{427.8}$ испытывает сильную зависимость от концентрации окиси азота $[NO]_{max}$ в диапазоне E_{cp} 1-20 кэВ. Наблюдаемые в полярных сияниях вариации отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ могут быть обусловлены вариациями концентрации окиси азота в области полярных сияний.

Четвертый параграф посвящен моделированию излучения полос систем молекулярного азота.

Проведено исследование особенностей колебательной заселенности пяти триплетных: $A^3\Sigma_u^+$, $V^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$ и трех синглетных $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, $a'\Sigma_u^-$ уровней молекулярного азота, которые являются источниками излучения первой положительной системы полос N_2 ($V^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$), второй положительной системы полос N_2 ($C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$), полос системы Вегарда-Каплана N_2 ($A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$) и системы полос Лаймана-Бердж-Хопфилда N_2 ($a^1\Pi_g, v' \rightarrow X^1\Sigma_u^+$). Расчеты колебательной заселенности проводились в рамках модели, представленной в первой главе диссертации. Для определения колебательной заселенности триплетных уровней N_2 была составлена система из 73 балансных уравнений: для 22-х колебательных уровней $A^3\Sigma_u^+$ терма, 13-ти колебательных уровней $V^3\Pi_g$ терма (начиная с тринадцатого колебательного уровня этот терм преддиссоциирует), 19-ти колебательных уровней $W^3\Delta_u$ терма, 14-ти колебательных уровней $V'^3\Sigma_u^-$ терма и 5-ти колебательных уровней $C^3\Pi_u$ терма. Для определения колебательной заселенности синглетных уровней N_2 была составлена система из 36 балансных уравнений: 7-ми колебательных уровней

$a^1\Pi_g$ терма (с седьмого колебательного уровня этот терм преддиссоциирует), 14-ти колебательных уровней $w^1\Delta_u$ терма (с тринадцатого колебательного уровня этот терм преддиссоциирует), 15-ти колебательных уровней $a'\Sigma_u^-$ терма. Количество уровней выбиралось исходя из принципа целесообразности, учитывая расположение колебательных уровней триплетов и синглетов относительно друг друга. Результаты расчетов показали удовлетворительное согласие с результатами как лабораторных экспериментов так и с оценками колебательной заселенности, полученными по данным спектрометрических наблюдений полярных сияний.

Смоделированы и проанализированы высотные профили объемной интенсивности излучения эмиссий первой положительной системы полос, второй положительной системы полос, полос системы Вегарда-Каплана и системы полос Лайман-Бердж-Хопфилда молекулярного азота. Исследовано влияние столкновительного гашения электронных термов на интенсивности полос систем VK и LBH. Показано, как поглощение излучения LBH полос в континууме Шумана-Рунге молекулярного кислорода влияет на их интенсивность.

В пятом параграфе смоделированы высотные профили концентраций ионосферных ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , N^+ и NO^+ и вторичных электронов в условиях полярных сияний. Показано, как изменяется высотный профиль концентраций и общее содержание ионов в зависимости от средней энергии авроральных электронов и концентрации окиси азота в полярной атмосфере. Увеличение средней энергии вторгающихся электронов с 1 до 20 кэВ ведет к уменьшению содержания ионов N_2^+ , O^+ и N^+ на два порядка, ионов NO^+ на 40%. При этом содержание ионов O_2^+ увеличивается на 20%, вторичных электронов уменьшается на 20%. Показано, что содержание иона молекулярного кислорода O_2^+ в столбе полярного сияния падает с увеличением в атмосфере концентрации окиси азота NO.

В шестом параграфе рассчитаны вариации содержания ионосферных ионов и интенсивностей эмиссий с течением времени от начала высыпаний авроральных электронов в атмосферу. Показано, что для стабилизации концентраций всех ионов и интенсивностей эмиссий необходимо время порядка 1000 сек.

В четвертой главе рассмотрен круг вопросов, непосредственно связанный с задачами диагностики и прогнозирования состояния среды в области полярных сияний по данным фотометрических наблюдений.

В первом параграфе рассмотрены и проанализированы методы, позволяющие получать информацию о параметрах энергетического спектра

потока высыпающих электронов по данным фотометрических наблюдений, а именно:

а) метод восстановления энергетического спектра потока высыпающих электронов по высотным профилям объемной интенсивности излучения полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота $1NG N_2^+$;

б) метод оценки средней энергии потока высыпающих электронов по отношению интенсивности излучения эмиссии $\lambda 630.0$ нм к интенсивности полосы первой отрицательной системы иона молекулярного азота $1NG N_2^+$;

в) метод оценка средней энергии потока высыпающих электронов по отношению интенсивностей излучения полос системы LBH, имеющих различную степень поглощения в континууме Шумана-Рунге O_2 .

Второй параграф посвящен исследованию характерных особенностей энергетических спектров потока высыпающих электронов, ответственных за формирование лучистых структур в полярных сияниях. Исследование проводилось на основе данных систематических (с 2011 по 2020 гг.) триангуляционных наблюдений полярных сияний с использованием камер, регистрирующих излучение в спектральном интервале длин волн 380-580 нм. Для этих данных разработаны методики восстановления высотных профилей объемной интенсивности свечения. Рассчитан коэффициент, определяющий связь между скоростью отсчетов ПЗС матрицы камеры и полной интенсивностью свечения $I(h)$ (в единицах фотон $см^{-2} сек^{-1}$).

Установлен коэффициент $k(h)$ связи между интенсивностью свечения $I(h)$, регистрируемой в эксперименте, и величиной суммарного энерговыделения $W(h): W(h) = k(h) \cdot I(h)$. Расчеты коэффициента $k(h)$, проведенные в рамках нестационарной модели авроральной ионосферы, показали слабую зависимость $k(h)$ от параметров потока высыпающих электронов. Это позволило пересчитать экспериментальные профили $I(h)$ в высотные профили энерговыделения $W(h)$. В этом случае связь между энергетическим спектром потока высыпающих электронов $f(E)$ и высотным профилем энерговыделения $W(h)$ определяется интегральным уравнением вида:

$$W(h) = \rho(h) \int_E \frac{E}{R(E)} \lambda(h, E) f(E) dE \quad (12),$$

где: $\rho(h)$ - плотность атмосферы на высоте h ; $R(E)$ - интегральная длина пробега $\lambda(h, E)$ – безразмерная функция диссипации энергии, описывающая долю энергии электрона, выделившейся на высоте h .

Восстановленные энергетические спектры высыпающих электронов $f(E)$ для 11 случаев лучистых форм полярных сияний. Полученные спектры

имеют две особенности. В области энергий $E \sim 500 \div 1000$ эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \leq 200$ эВ для величины дифференциального потока электронов характерно резкое возрастание с уменьшением энергии близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$. Подобный характер поведения кривой $F(E)$ позволил аппроксимировать восстановленные энергетические спектры суммой следующих функций:

$$F(E) = N_1 \cdot E^{-\alpha} + N_2 \cdot E \cdot \exp(-E/E_M)/E_M^2,$$

где: E_M – характеристическая энергия.

Полученные результаты позволили предположить, что лучистые структуры в полярных сияниях формируются благодаря сбросу в ионосферу электронов, имеющих степенное распределение по энергиям.

Третий параграф посвящен исследованию двумерного распределения объемной интенсивности излучения и соответствующему ему распределению параметров потоков высыпающихся электронов в конкретных формах полярных сияний. Экспериментальным материалом послужили результаты проведенного в Полярном геофизическом институте эксперимента по оптической томографии.

В эксперименте интенсивности аврорального свечения регистрировались тремя сканирующими фотометрами, расположенными на меридиональной цепочке: г. Апатиты ($67^\circ 34'$, $33^\circ 24'$) – п. Верхнетуломский ($68^\circ 35'$, $31^\circ 45'$) – п. Корзуново ($69^\circ 24'$, $30^\circ 59'$), проходящей вдоль геомагнитного меридиана. Для анализа был отобран магнитоспокойный период наблюдения, когда на небосводе наблюдались изолированные спокойные полосы полярного сияния. Для реконструкции высотных профилей объемной интенсивности были выбраны эмиссия OI $\lambda 557.7$ нм и эмиссия $\lambda 427.8$ нм 1NG N₂. Энергетические спектры, соответствующие данным высыпаниям, восстанавливались по методике, описанной в первом параграфе данной главы. Проведенные исследования показывают, что высота пика интенсивности излучения уменьшается в направлении юг-север и могут составлять около 4-14 км на расстоянии около 140 км. Типичной особенностью внутри отдельной изолированной дуги является перевернутая V-структура, наблюдаемая в средней энергии электронов вдоль меридиана, а также соответствующие V-образные изменения высоты пика интенсивности излучения поперек дуги.

В четвертом параграфе предложен и обоснован метод, позволяющий построить эффективные алгоритмы для диагностики планетарного распределения интенсивностей свечения в полярных сияниях и полной электронной концентрации, не делая априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпающихся электронов, а опираясь только на величины средних энергий и потоков энергий высыпающихся электронов,

представленных в эмпирических моделях авроральных высыпаний. Введены понятия эффективности возбуждения оптической эмиссии Φ_λ , определяемую как отношение интегральной интенсивности излучения с длиной волны λ - I_λ к полному потоку энергии высыпающихся электронов - F_E , и, по аналогии, эффективности формирования полного содержания электронной концентрации в столбе полярного сияния Φ_e , определяемую как отношение полного содержание электронной концентрации- N_e к потоку энергии высыпающихся электронов - F_E : $\Phi_\lambda = I_\lambda / F_E$ и $\Phi_e = N_e / F_E$.

Исследовано влияние параметров потока высыпающихся электронов на эффективности излучения Φ_λ и эффективность Φ_e . Эффективности Φ_λ и Φ_e рассчитаны для наиболее характерных и интенсивных полос, наблюдаемых в спектрах полярных сияниях, а именно: эмиссии $\lambda 391.4$ нм 1NG N_2^+ , эмиссии $\lambda 670.4$ нм 1PG N_2 , эмиссии $\lambda 337.1$ нм 2PG N_2 , эмиссии $\lambda 320.0$ нм VK N_2 , эмиссии $\lambda 127.3$ нм LBH N_2 и OI $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм. Все расчеты проводились в рамках модели, представленной в первой главе диссертации. Рассматривалось три вида энергетического спектра потока высыпающихся электронов: моноэнергетический, поток с экспоненциальным распределением по энергиям и поток с максвелловским распределением по энергиям. Средние энергии потока варьировались в диапазоне от 0.1 до 20 кэВ, который является типичным для авроральных электронов, возбуждающих полярные сияния. Показано, что эффективности Φ_λ и Φ_e слабо зависят от вида энергетического спектра и определяются в основном значениями средних энергий E_{cp} потока высыпающихся электронов. В качестве примера на рис. 4 приведены Φ_λ и Φ_e , рассчитанные для эмиссии $\lambda 391.4$ нм и электронной концентрации N_e .

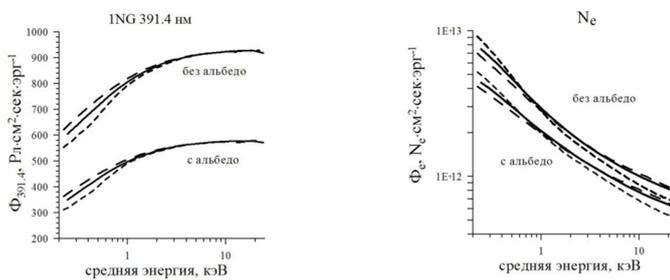


Рис.4. Эффективность возбуждения эмиссии 391.1 нм и электронной концентрации.

Слабая зависимость $\Phi_\lambda(E_{cp})$ и $\Phi_e(E_{cp})$ от вида энергетического спектра потока высыпающихся электронов позволяет в алгоритмах, реализующих прогноз планетарного распределения интенсивностей излучения I_λ и электронной концентрации N_e в полярных сияниях на основе эмпирических моделей

авроральных высыпания, использовать функциональную связь $I_{\lambda} = \Phi_{\lambda}(E_{cp}) \cdot F_E$ и $N_e = \Phi_e(E_{cp}) \cdot F_E$, не делая при этом предположений о форме спектра высыпавшихся электронов.

В пятом параграфе по данным фотометрических наблюдений полярных сияний в обсерваториях Ловозеро, Туманный и Баренцбург исследована зависимость отношения интенсивностей излучения $I_{630.0}/I_{427.8}$ и $I_{557.7}/I_{427.8}$ в зените от интенсивности эмиссии $I_{427.8}$. Для статистической обработки отношений $I_{630.0}/I_{427.8}$ было отобрано 13 ночных интервалов с 1100 измерениями, для обработки отношений $I_{557.7}/I_{427.8}$ - 1335 измерений в 8 ночных сериях наблюдений в обс. Ловозеро, 1200 измерений в 8 ночных сериях наблюдений в обс. Туманный, 225 измерений в 12 сериях наблюдений на ст. Баренцбург. Получено, что величина отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ уменьшается от 2 до 0.4 при изменении интенсивности излучения эмиссии $\lambda 427.8$ нм от 0.1 до 3 кРл, что согласуется с известными литературными данными, в то время как величина отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ демонстрирует тенденцию к возрастанию и в диапазоне интенсивностей излучения эмиссии $\lambda 427.8$ нм 0.1 – 1.7 кРл принимает значения от 4.2 до 6.4.

В шестом параграфе представлен и обоснован метод оценки содержания окиси азота NO в области полярных сияний по данным фотометрических наблюдений интенсивностей свечения эмиссий $\lambda 427.8$ нм, $\lambda 557.7$ нм и $\lambda 630.0$ нм. В основе метода лежит тот факт, что NO является активным гасителем ионов молекулярного кислорода O_2^+ , диссоциативная рекомбинация которого $O_2^+ + e_{th}$ является одним из основных источников возбуждения 1S состояния атомарного кислорода. Для получения оценок концентрации NO были использованы результаты фотометрических наблюдений в зените интенсивностей эмиссий $\lambda 427.8$ нм, $\lambda 557.7$ нм и $\lambda 630.0$ нм. в полуночном секторе аврорального овала.. Процедура восстановления высотных профилей концентрации окиси азота [NO] включала определение параметров потока высыпавшихся электронов, которые обеспечивали наблюдаемые в эксперименте интенсивности излучения эмиссий $\lambda 427.8$ нм и $\lambda 630.0$ нм, а затем непосредственное восстановление высотных профилей концентрации окиси азота [NO], которые обеспечивали наблюдаемые в эксперименте интенсивности излучения эмиссии $\lambda 557.7$ нм. Все расчеты проводились в рамках модели, представленной в первой главе диссертации. Было получено, что концентрация NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$ лежит в интервале $(1 \div 3.3) \cdot 10^8$ см⁻³, что находится в удовлетворительном согласии с результатами оценок концентрации NO, полученными на основе анализа ионного состава в полярных сияниях, измеренного в ракетных экспериментах. [Sharp

//J.Geophys.Res.V.83. №9. P.4373–4376. 1978; Swider and, Narcisi R.S. //Planet. Space Sci. V.25. №2. P.103–116.1977].

В седьмом параграфе исследуется вопрос о степени влияния параметров потока высыпающихся электронов на величину эффективного коэффициента рекомбинации $\alpha_{эф}$ в E и F₁ областях ионосферы.

В стационарном случае эффективный коэффициент рекомбинации $\alpha_{эф}$ будет выражаться как: $\alpha_{эф} = \frac{Q_e}{n_e^2}$, где n_e - концентрация электронов, Q_e - скорость образования электронов, равная сумме скоростей ионизации O₂, N₂, O: $Q_e = q(O_2) + q(N_2) + q(O)$. Расчеты проводились в рамках модели, представленной в первой главе диссертации. Энергетический спектр потока высыпающихся электронов задавался в виде максвелловского распределения. Характеристическая энергия E_m варьировалась в интервале 0.5 – 20 кэВ, поток энергии F_E - в интервале 1 - 15 эрг см⁻²с⁻¹. Показано, что в области высот ~ 90 ÷ 140 км величина $\alpha_{эф}$ слабо зависит от параметров потока высыпающихся электронов и определяется в основном физико-химическими свойствами среды, в то время как в области высот ≥ 140 км начинает сказываться влияние как характеристической энергии E_m , так и потока энергии F_E на величину эффективного коэффициента рекомбинации. Так, на высоте ~200 км при изменении характеристической энергии E_m с 1 до 15 кэВ относительное изменение эффективного коэффициента рекомбинации достигает величины порядка 200%, а при изменении величины потока F_E с 1 до 10 эрг - порядка 70%.

Проведено сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными результатами работ, в которой исследовалось поведение высотной зависимости эффективного коэффициента рекомбинации, рассчитанного на основе результатов одновременных радарных измерений электронной концентрации и спутниковых данных о параметрах потока высыпающихся электронов. Получено удовлетворительное согласие модельных расчетов с экспериментальными данными.

Пятая глава посвящена методике расчета синтетических спектров оптического излучения в полярных сияниях, анализу зависимости синтетического спектра от вращательной температуры возбужденных молекул и начальных параметров потока высыпающихся электронов. Проведены модельные расчеты синтетических спектров системы полос Лаймана-Берджа-Хопфилда LBH N₂, системы полос Вегарда-Каплана VK N₂, первой положительной системы полос 1PG N₂, второй положительной системы полос

2PG N₂, первой отрицательной системы полос 1NG N₂⁺, системы полос Мейнела N₂⁺.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

III. Основные результаты.

1. Разработана нестационарная физико-химическая модель авроральной ионосферы, описывающая процессы возбуждения электронно-колебательных состояний компонент ионосферной плазмы прямым электронным ударом с последующим перераспределением выделившейся энергии посредством физико-химических реакций, протекающих в области полярных сияний на высотах 95-250 км. Модель включает в себя 56 реакций взаимодействия между составляющими ионосферы. Входными параметрами модели являются модель нейтральной атмосферы и энергетический спектр потока высыпающихся электронов. Во входных параметрах модели заложен учет солнечной и геомагнитной активностей: состав нейтральной атмосферы, вид и интенсивность первичного потока высыпающихся электронов зависят от активности солнечно-земной системы.

а) Модель позволяет:

- проводить детальное исследование процессов взаимодействия аврорального электронного потока с составляющими ионосферы с целью выявления механизмов возбуждения оптических эмиссий и оценки состава ионосферы;

- проводить моделирование ионного состава и электронного содержания ионосферы в зоне авроральных электронных высыпаний, в том числе получать высотные профили концентраций электронов и следующих ионов: O₂⁺, N₂⁺, O⁺(⁴S), O⁺(²D), O⁺, NO⁺, N⁺;

- рассчитывать высотные профили концентрации следующих возбужденных компонент: O(¹D), O(¹S), N(⁴S), N(²D), N(²P), N₂(A³Σ_u⁺), N₂(B³Π_g), N₂(W³Δ_u), N₂(B'³Σ_u⁻), N₂(a¹Π_g), N₂(w¹Δ_u), N₂(a'¹Σ_u⁻);

б) В модели для расчета скоростей образования возбужденных и ионизированных составляющих ионосферы использовался эффективный механизм, связывающий скорость образования с выделившейся в атмосфере энергией прямым соотношением, в котором учтены все рожденные в ионизационных процессах поколения электронов, что существенно упрощает процедуру расчетов и позволяет судить о процессах, происходящих в ионосфере в реальном времени.

с) В модель включен детальный учет электронно-колебательной кинетики триплетных и синглетных уровней возбужденного молекулярного азота, что позволяет получить полную картину образования во время полярных сияний возбужденных атомов и молекул, являющихся источниками аврорального излучения.

2. В области фундаментальных исследований получены следующие результаты:

1) Исследованы эффективности всех известных потенциальных каналов возбуждения 1D состояния атомарного кислорода, являющегося источником эмиссии $\lambda 630.0$ нм. Показано, что влияние процесса дезактивации иона молекулярного кислорода окисью азота $O_2^+ + NO$ приводит к тому, что в области высот $\sim 110 \div 150$ км суммарный вклад источников возбуждения 1D состояния атомарного кислорода $N(^2D) + O$; $N(^2D) + O_2$; $N(^2P) + O_2$; и $N^+ + O_2$ становится вторым по эффективности источником, вносящим вклад в интенсивность излучения эмиссии $\lambda 630.0$ нм.

2) Исследовано влияние окиси азота на относительные вклады различных каналов в возбуждение атомов $O(^1S)$. Показано, что реакция диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{th}$ является значимым источником возбуждения 1S атомарного кислорода и ее вклад в интенсивность эмиссии $\lambda 557.7$ нм составляет $>10\%$, когда концентрация окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{max} < 10^8$ см $^{-3}$. Показано, что основным каналом подавления интенсивности эмиссии 557.7 нм является реакция $O_2^+ + NO$, которая уменьшает вклад диссоциативной рекомбинации иона O_2^+ в формирование 1S состояния атомарного кислорода.

3) Исследовано влияние концентрации окиси азота NO на отношение интенсивностей эмиссий $\lambda 557.7$ нм OI и $\lambda 427.8$ нм $1NG N_2^+$, регистрируемых в полярных сияниях. Показано, что с ростом концентрации NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$ от 10^7 до 3×10^9 см $^{-3}$ отношение $I_{557.7}/I_{427.8}$ уменьшается от 7 до 2, что хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет объяснить наблюдаемую в полярных сияниях переменность отношения интенсивностей $I_{557.7}/I_{427.8}$.

4) Получены численные оценки содержания окиси азота NO в полярных сияниях, сделанные на основе наземных фотометрических измерений интенсивности излучения в эмиссиях $\lambda 427.8$ $1NG N_2^+$, $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм OI в полуночном секторе аврорального овала. Показано, что концентрации NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{max}$ лежат в интервале $(1 \div 3.3) \times 10^8$ см $^{-3}$, что хорошо согласуется с результатами прямых измерений.

5) Восстановлены и исследованы энергетические спектры высыпающих электронов $f(E)$, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях. Показано, что в поведении $f(E)$ наблюдаются две характерные особенности. В области энергий $E \sim 500 \div 1000$ эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \leq 250$ эВ величина дифференциального потока электронов демонстрирует резкое возрастание с уменьшением энергии близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$. Показано, что полученные распределения $f(E)$ хорошо аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер и максвелловское распределение по энергиям.

6) На основе данных оптической томографии исследованы особенности двумерного распределения объемной интенсивности излучения внутри полосы полярного сияния. Реконструкции двумерного распределения интенсивностей эмиссий $\lambda 557.7$ нм ОI и $\lambda 427.8$ нм 1NG N_2^+ выполнены на основе данных измерений, полученных на меридиональной цепочке из трех сканирующих фотометров. Показано, что характерной особенностью распределения вдоль меридиана объемной интенсивности излучения и средней энергии потока авроральных электронов является структура, имеющая вид перевернутого «V» и соответствующее «V»-образное распределение высоты максимальной интенсивности свечения.

7) Исследовано влияния параметров потока высыпающих электронов на эффективный коэффициент рекомбинации. Показано, что на высотах $h < 140$ км величина эффективного коэффициента рекомбинации не зависит от параметров потока высыпающих электронов и определяется нейтральным составом атмосферы и коэффициентами скоростей реакций, протекающих в ионосферной плазме. В области высот $h > 140$ км эффективный коэффициент рекомбинации демонстрирует сильную зависимость как от потока энергии, так и от вида энергетического спектра потока высыпающих авроральных электронов, что позволяет объяснить наблюдаемые высотные профили электронной концентрации, получаемые по данным радаров некогерентного рассеяния.

3. Разработаны и предложены методики дистанционной диагностики параметров потока высыпающих электронов и состояния ионосферной плазмы в области полярных сияний по данным спектрофотометрических наблюдений:

1) методики оценки параметров потока высыпающих электронов по данным измерений интенсивности излучения LBH полос молекулярного азота, полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота и эмиссии 630.0 нм атомарного кислорода;

2) методика восстановления высотных профилей энерговыделения, сформированных потоками высыпавшихся электронов, на основе триангуляционных наблюдений структур полярных сияний камерами с приемниками, регистрирующими излучение в широком диапазоне длин волн 380.0 ÷ 580.0 нм;

3) методика оценки высотных профилей концентрации окиси азота NO в полярных сияниях по данным измерения интенсивностей излучения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм;

4) методика для моделирования планетарного распределения интенсивностей свечения и полной электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний, включающих в себя планетарное распределение потоков энергии и средней энергии высыпавшихся авроральных электронов и не требующая каких либо априорных предположений о форме энергетического спектра потока высыпавшихся электронов;

5) представлен алгоритм для расчета синтетических спектров полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота (1NG N_2^+), полос первой и второй положительной системы молекулярного азота (1PG и 2PG N_2), полос системы Вегарда-Каплана (VK N_2) и полос системы Лайман-Бердж-Хопфилда (LBH N_2). Входными параметрами являются энергетический спектр потока высыпавшихся электронов, модель нейтрально атмосферы и характеристики регистрирующего прибора

IV. Публикации.

- категория K1

1. Dashkevich Z.V., Sergienko T.I., Ivanov V.I. The Lyman-Birge-Hopfield bands in aurora // Planet.Space.Sci. 1993. V.41. №1. P.81-87.

2. Дашкевич Ж.В., Зверев В.Л., Иванов В.Е. Отношения интенсивностей эмиссий $I_{630.0}/I_{427.8}$ и $I_{557.7}/I_{427.8}$ в полярных сияниях // Геомагнетизм и аэроном. 2006ю Т.46. №3. С.366-370ю

3. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Khudukon B.Z.. Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral tomography// Annales Geophysicae. 2007. V. 25.№5. P. 1131-1139.

4. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космические исследования. 2017. Т.55. №2. С.94-106. doi:10.7868/S0023420617020029

5. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка концентрации NO в области полярных сияний по интенсивностям эмиссий 391.4, 557.7 и 630.0 нм //

Космические исслед. 2018. Т.55. №5. С.337-341. 2017.
doi:10.7868/S0023420617050028

6. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Влияние электронных высыпаний на эффективный коэффициент рекомбинации // Геомагнетизм и аэроном. 2018. Т.58. №2. С. 304-308. doi:10.7868/S0016794018020177

7. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка содержания окиси азота в полярных сияниях по данным наземных фотометрических наблюдений. // Солнечно-Земная физика.2019. Т.5. № 1.С.77-81. doi: 10.12737/szf-51201908

8. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // Космические исслед. 2021. Т.59. С. 355-360. doi: 10.31857/S0023420621050034

9. Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // Космические исслед. 2021. Т.59, С. 267-274. doi: 10.31857/S0023420621040038

10. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Диагностика интенсивностей излучения и электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей высыпаний // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 61-66. doi: 10.12737/szf-82202208

11. Дашкевич Ж.В. Иванов В.Е. Анализ источников эмиссии 630.0 нм в полярных сияниях // Космические исслед. 2022. Т. 60. № 5. С. 368–376. doi: 10.31857/S0023420622050016

12. Иванов В.Е., Дашкевич Ж.В., Ягодкина О.И. Эффективности возбуждения эмиссий и формирования электронной концентрации в полярных сияниях // Известия РАН. Серия физическая. 2023.Т.87. №2. С. 285-289. doi:10.31857/S0367676522700508

13. Иванов В.Е., Дашкевич Ж.В. Влияние концентрации NO на отношение $I_{557.7}/I_{427.8}$ в полярных сияниях // Солнечно-земная физика. 2024. Т.10. № 1. С. 31–36. doi:10.12737/szf101202404

- **категория К2**

14. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Потoki авроральных электронов в высокоширотной атмосфере: диагностика по оптическим наблюдениям // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Выпуск 662: Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. 2018. С.78-81.

- **без категории**

15. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка эффективности каналов возбуждения атомов $O(^1S)$ и $O(^1D)$ в полярных сияниях // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. вып.5. С.69-75. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.69-75

16. Иванов В.Е., Дашкевич Ж.В. О возможности исследования спектров высвобождающихся электронов с помощью оптических наблюдений системой MAIN // Труды Кольского научного центра РАН, серия «Гелиогеофизика». 2019. вып. 5. С. 28-34. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.28-33

17. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Методика расчета синтетических спектров излучения триплетных состояний молекулярного азота в полярных сияниях // Труды Кольского научного центра РАН. 2023. т.2. с.58-69. doi: 10.37614/2949-1185.2023.2.2.007

18. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. Синтетические спектры системы Лаймана-Берджа-Хопфилда молекулярного азота // Приборы и методика геофизического эксперимента. КНЦ РАН. 1997. С.133-140.

19. Dashkevich Zh. V., Korotkov V.G., Leontyev S.V., Roldugin A.V., Sergienko T.I., Evstafiev O. Reconstruction of characteristics of auroral ionosphere and thermosphere using the method of optical tomography // Proceeding XXIII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomana". 2000. Apatity. P.65-68.

20. Dashkevich Zh. V., Ivanov V.E., Leontyev S.V., Khudukon B.Z., Evstafiev O., Korotkov V.G., Roldugin A.V., Sergienko T.I. The luminosity dynamics and precipitated particle flux characteristics during an optical tomography experiment in February 1999 // Proceeding XXIV Annual Seminar "Physics of Aurora IPhenomana". 2001. Apatity. P. 107-110.

21. Dashkevich Zh. V., Ivanov V.E. Some features of meridional dependence of electron flux parameters inside auroral arcs // Proceeding XXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomana". 2002. Apatity. P. 99-102.

22. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Модель возмущенной полярной ионосферы // Proceeding 38 Annual seminar: Physics of Auroral Phenomena. 2015. Apatity. С.119-122.

23. Дашкевич Ж.В., Козелов Б.В. Синтетические спектры излучения некоторых систем полос сине-зеленой области спектра // Proceeding 38 Annual seminar: Physics of Auroral Phenomena. 2015. Apatity. P.123-126.

24. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. О влиянии концентрации окиси азота на интенсивность эмиссии 557.7 нм // Proceeding 39 Annual seminar: Physics of Auroral Phenomena. 2016. Apatity. P.112-114.

25. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Sergienko T.I., Kozelov B.V. Time dependent physicochemical model of the auroral ionosphere // Book of Proceedings

of 10 Workshop Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere. 2018. P.156-161. doi:10.31401/WS.2018.proc

26. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E. The effect of auroral electron precipitation on the effective recombination coefficient// Book of Proceedings of 10 Workshop Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere. 2018. P.162-166. doi:10.31401/WS.2018.proc

27. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка концентрации NO в области полярных сияний по данным наземных фотометрических наблюдений // Proceeding 42 Annual seminar: Physics of Auroral Phenomena. Apatity. 2018. P.126-129. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.126-128

28. Dashkevich Zh.V, Ivanov V.E. The nitric oxide density in the polar region from ground-based photometer data / Proceeding of 11 Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”. 2019. P. 129-133. doi:10.31401/WS.2019.proc

29. Dashkevich Zh.V, Ivanov V.E. The efficiencies of O(¹S) and O(¹D) excitation mechanisms in aurora / Proceeding of Eleventh Workshop “Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”. 2019. P. 134-138. doi:10.31401/WS.2019.proc

30. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Kozelov B.V. The features of precipitating electron spectra in the rayed auroras.// Proceeding 44-th Annual seminar: Physics of Auroral Phenomena. Apatity. 2021. P. 118-122.