

Отзыв официального оппонента

Лукьяновой Ренаты Юрьевны

на диссертационную работу

**«Моделирование и дистанционное зондирование ионосферы в области электронных
высыпаний»**

Дашкевич Жанны Владимировны,

**представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.6.18 - Науки об атмосфере и климате**

Диссертация посвящена исследованию структуры высокоширотной ионосферы в области полярных сияний, излучение которых состоит из эмиссий атомарных линий и полос при возбуждении молекул атмосферных газов при воздействии потоков высыпающихся из магнитосферы авроральных электронов. Высыпающиеся частицы инициируют комплекс физико-химических взаимодействий между составляющими ионосферы, что приводит к появлению мелкомасштабных неоднородностей.

Актуальность избранной темы обусловлена тем, что ионосфера, как среда распространения радиоволн, существенным образом влияет на работу различных систем навигации, радиолокации и связи. Именно появление неоднородностей плотности ионосферной плазмы является основной причиной сбоев радиосигнала и источником неопределенности при прогнозировании параметров радиоканала. Наблюдаемые авроральные эмиссии напрямую зависят от характеристик потока высыпающихся электронов, формирующих электродинамическую обстановку в зоне аврорального овала. Научно обоснованная интерпретация результатов спектрофотометрических наблюдений полярных сияний, в том числе с помощью моделирования, важна для корректной диагностики состояния среды как при спокойные, так и в магнито-возмущенные периоды. Представленная диссертационная работа вносит вклад в решение актуальной в настоящее время проблемы мониторинга и прогнозирования космической погоды. Полученные результаты могут быть востребованы в работе перспективной российской орбитальной станции РОС, на борту которой предполагается установить четыре фотометрических датчика.

Целью работы является исследование физико-химических процессов, ответственных за излучение основных эмиссий в полярных сияниях и инициированных высыпающимися в ионосферу авроральными электронами, а также разработка методов диагностики состояния возмущенной ионосферы и восстановления параметров потока авроральных электронов по данным спектрометрических наблюдений. Эти вопросы изучаются

различными научными группами как в России, так и зарубежом на протяжении многих лет. Тематика является традиционной для Полярного геофизического института, где работает соискатель. Опираясь на большой опыт, накопленный в ПГИ, автору удалось внести существенный вклад в дальнейшее развитие фундаментальных исследований в области физики высокоширотной ионосферы. **Новизна исследования** состоит, в первую очередь, в разработке физико-химической модели, описывающей процессы возбуждения электронно-колебательных состояний компонент ионосферной плазмы прямым электронным ударом и последующее перераспределение выделившейся энергии вследствие химических реакций. Входными параметрами модели являются стандартная модель нейтральной атмосферы и энергетический спектр потока высыпающихся электронов. В результате можно получить высотные профили (диапазон 95-250 км) концентраций электронов, ионов и возбужденных компонент в локальной области высыпаний. Подобного рода модели существуют в мире, однако отечественная модель создана впервые. В модели учтен ряд дополнительных процессов и механизмов, что позволило сделать ее более точной и физически обоснованной. Особо надо отметить корректный учет азотных составляющих, которые критически влияют на процессы рекомбинации и возбуждения эмиссий. Большинство **полученных результатов является новыми**. Так, при исследовании с помощью моделирования и фотометрических наблюдений даны новые численные оценки эффективности источников и реакций, контролирующей интенсивность излучения основных эмиссий (630, 557.7 и 427.8 нм) и их соотношение. Впервые показано, что именно величина концентрации окиси азота влияет на отношение вариации интенсивностей эмиссий 557.7 и 427.8 нм, которые часто наблюдаются в полярных сияниях. Разработана новая методика оценки концентрации окиси азота в области полярных сияний по данным фотометрических измерений трех эмиссий. Также показано, что на высотах менее 140 км величина коэффициента рекомбинации определяется только нейтральным составом атмосферы и коэффициентами скоростей химических реакций. Выше 140 км коэффициент рекомбинации сильно зависит от потока энергии и от вида энергетического спектра потока высыпающихся авроральных электронов. Количественно оценены распределения энергетических спектров высыпающихся авроральных электронов в лучистых структурах полярных сияний. Они аппроксимируются суммой двух степенных функций с максвелловским распределением по энергиям. Спектры являются важным параметром для расчета скоростей ионизации в атмосфере. Найдено, что вид энергетического спектра больше всего влияет на коэффициент рекомбинации в слое *F1*. Эти результаты позволяют вывести численное

моделирование и диагностику высокоширотных оптических эмиссий на новый уровень точности.

Полученные **результаты можно считать обоснованными и достоверными.** Достоверность физико-химической модели для энергетических процессов в области электронных высыпаний, и предложенных методик диагностики опирается 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. Результаты неоднократно представлялись на российских и международных научных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 30 работ, из них 14 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, 12 статей в трудах международных конференций, 4 статьи в сборниках трудов Кольского научного центра РАН и ПГИ. Количество зачетных статей соответствует требованиям пункта 13 действующего «Положения о присуждении ученых степеней». При этом хотелось бы видеть большей доли публикаций в международных журналах с высоким рейтингом.

Диссертация написана автором самостоятельно, логически выстроена и обладает внутренним единством. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. **Первая и вторая главы** посвящены теоретическому исследованию оптического излучения полярных сияний с анализом эффективности соответствующих физико-химических механизмов. В главе 1 описана разработанная нестационарная физико-химическая модель, описывающая процессы возбуждения электронно-колебательных состояний компонент ионосферной плазмы прямым электронным ударом и последующее перераспределение выделившейся энергии для заданного энергетического спектра высыпающегося потока авроральных электронов. В главе 2 представлены результаты сравнения модельных расчетов с опубликованными ранее измерениями во время ракетно-спутникового эксперимента. Модель показала удовлетворительное согласие с результатами прямых измерений. **Третья глава** также является теоретической. Она посвящена исследованию механизмов, приводящих к излучению ряда основных эмиссий в полярных сияниях, исследованию характеристик излучения линий и полос сияния, расчету ионного состава и характеристик временной динамики выхода на стационарный режим концентраций возбужденных и образованных во время электронных высыпаний компонент ионосферной плазмы. **В четвертой главе** рассмотрен круг вопросов, связанный с задачами диагностики состояния среды в области сияний по данным спектро-фотометрических наблюдений. Экспериментальным

материалом послужили данные триангуляционных наблюдений оптическими камерами и результаты проведенного в ПГИ эксперимента по оптической томографии. Представлены методики, разработанные для оценки параметров потока высыпающихся электронов в области сияний и восстановления высотных профилей энерговыделения и концентрации окиси азота и других газовых составляющих. Также предложена методика моделирования планетарного распределения интенсивностей свечения и полной электронной концентрации в области сияний по данным эмпирических моделей электронных высыпаний. **Пятая глава** содержит описание результатов модельных расчетов для спектро-оптического излучения в сияниях и зависимостей спектра от вращательной температуры возбужденных молекул и параметров потока высыпающихся электронов. В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Автореферат отражает содержание диссертации и включает в себя положения, выносимые на защиту, сформулированные результаты, сведения о их новизне, достоверности и апробации, краткое изложение глав и список публикаций автора по теме диссертации.

При общем положительном впечатлении от диссертационной работы Дашкевич Ж.В. к ее содержанию есть несколько **замечаний**.

- 1) Очень краткая обзорная часть. Поскольку докторская диссертация предполагает кроме решения проблем, которым посвящена работа, еще и широкое обобщение, то следовало бы уделить больше внимания описанию современного состояния вопроса оптических измерений полярных сияний с Земли и из космоса, спектральных характеристик потоков энергичных частиц, теории физико-химических взаимодействий в высокоширотной ионосфере, подходов к моделированию и, возможно, других сопряженных тем. Автор отмечает, что проводились многолетние исследования, опирающиеся на результаты спектрофотометрических наблюдений, и что в литературе существует ряд противоречий в результатах. Однако, критический обзор предыдущих исследований не приводится. Лишь перечислены четыре задачи, которые, по мнению автора, остались нерешенными (с. 8). Раздел «Введение» есть не в каждой главе, и даже там, где он есть, приведенной информации явно недостаточно для того, чтобы вписать проделанную работу и полученные результаты в общий контекст тематических научных исследований.
- 2) Отсутствует описание программного средства, реализующего разработанную модель. Судя по приведенным рисункам, реальные расчеты параметров едва ли проводились вручную. Вероятно, была написана, отлажена и протестирована

