

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу Дашкевич Жанны Владимировны
«МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ИОНОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ»,**

представленную на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 1.6.18 - Науки об атмосфере и климате

Актуальность темы диссертации обусловлена важностью исследований высокоширотной ионосферы как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения. Высыпания в эту область энергичных заряженных частиц приводят к интенсивным мелкомасштабным неоднородностям концентрации электронов, что отрицательно влияет на работу связи, точность глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и спутникового зондирования характеристик атмосферы. В частности, в эти периоды на высоких геомагнитных широтах регистрируется высокий уровень амплитудных и фазовых мерцаний в ГНСС, наибольшее количество случаев неправильного определения полного электронного содержания, возрастание неопределенностей восстановления профилей характеристик атмосферы (например, температуры и концентрации водяного пара) по данным GPS зондирования. Кроме того, высыпания энергичных заряженных частиц приводят к локальным (по времени) возмущениям нейтральной газофазной химии на высотах верхней мезосферы, в частности, к уменьшению концентрации озона и увеличению NO_x . Кроме того, эти процессы способствуют возрастанию NO на 90-120 км, который в зимнее время транспортируется вниз, на высоты верхней стратосферы (вплоть до 30 км), где участвует в каталитических циклах разрушения озона. Теоретические и экспериментальные исследования этих процессов начаты много десятилетий назад, однако до сих пор остается нерешенным широкий спектр вопросов, что можно видеть по заметному количеству относительно свежих публикаций в ведущих зарубежных научных журналах. Поэтому тема работы является, конечно, актуальной.

Новизна исследования и полученных результатов, на мой взгляд, определяется взаимосвязанностью и взаимодополняемостью довольно заметного числа решаемых задач,

включающих в себя детальное моделирование всех основных процессов, инициируемых потоком авроральных электронов, и анализ различных данных измерений, в том числе применение модели для восстановления неизмеряемых характеристик по измеренным данным.

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав и заключения.

Во **введении** сформулировано обоснование актуальности цели диссертации и решаемых задач, а также представлены все стандартные разделы, соответствующие правилам подготовки диссертаций.

В **первой** главе представлено довольно подробное описание модели, позволяющей рассчитать возмущение ионизированных и возбужденных компонент ионосферы на высотах 95-250 км в процессе авроральных высыпаний электронов и возникновение множественных свечений. На мой взгляд, важная особенность этой модели заключается в возможности определения профилей всех основных эмиссий (за счет переходов возбужденных O, N₂ и N₂⁺) во время авроральных событий.

Во **второй** главе модель применена для анализа данных довольно давнего совместного ракетно-спутникового эксперимента, где одновременно были измерены профили сразу нескольких характеристик и эмиссий. Представленные в этой главе результаты, а также поиск по базам публикаций, цитирующих исходные статьи авторов данных этого эксперимента, позволяют сделать вывод, что, по-видимому, в диссертации впервые удалось достичь удовлетворительного соответствия между всеми измеренными и модельными профилями.

В **третьей** главе с помощью построенной модели и экспериментальных данных проведено детальное исследование (1) отдельных эмиссий возбужденного атомарного кислорода с целью выделения основных механизмов их формирования в процессе авроральных высыпаний, (2) их вариаций в зависимости от параметров потока электронов и профилей атомарного кислорода и NO, (3) особенностей распределений заселенности колебательных уровней различных возбужденных состояний молекулярного кислорода в сравнении с различными лабораторными и натурными данными, (4) профилей и общего содержания различных ионов в зависимости от средней энергии электронов и NO. Кроме того, в данной главе получены оценки характерного времени установления равновесия различных компонент модели после начала высыпания электронов.

В **четвертой** главе, используя разработанную модель ионосферы, предложены новые

методы восстановления характеристик спектра потока электронов и высотных профилей энерговыделения по данным различных эмиссий. Применение этих методов к результатам наземных фотометрических измерений для ряда случаев лучистых структур свечений позволило определить спектры высыпавшихся электронов, в которых четко прослеживается степенная зависимость в области низких энергий. По данным трех пространственно-разнесенных наземных фотометров восстановлены и исследованы двумерные распределения объемной скорости эмиссии внутри полосы полярного сияния, в том числе определены спектры высыпаний электронов. Созданы методики расчета глобального распределения интенсивностей свечения и полной электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний для широкого диапазона энергетических спектров потока электронов. По данным измерений определены характерные отношения интенсивностей различных эмиссий O и N₂, а также разработан метод оценки NO по данным фотометрических измерений этих эмиссий. Результаты обработки наземных данных позволили получить оценки характерных концентраций в максимуме профиля NO, близкие к данным ракетных измерений. Кроме того, исследовано влияние параметров потока электронов на величину эффективного коэффициента диссоциативной рекомбинации в зависимости от высоты.

В пятой главе разработаны алгоритмы расчета синтетических спектров различных эмиссий молекулярного азота во время полярных сияний. Рассчитанные в этой главе спектры неплохо (как качественно, так и количественно) соответствуют имеющимся экспериментальным данным.

Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати, в частности, в 14-ти реферируемых статьях в известных российских и зарубежных журналах, а также были представлены на ведущих российских и международных конференциях. Помимо апробации путем публикаций и докладов, диссертация демонстрирует уровень анализа, обеспечивающий высокую обоснованность и достоверность полученных результатов. Тем не менее, работа не свободна от недостатков:

1. На мой взгляд, в главе 1 было бы уместно представить краткое сопоставление основных особенностей построенной модели возмущений ионосферы во время авроральных событий с современными зарубежными моделями (например, Sodankylä Ion Chemistry Model [Verronen et al. 2005, doi:10.1029/2004JA010932] или представленными в обзоре [Mironova et al. Space Science Reviews, 2015, doi:10.1007/s11214-015-0185-4]), а

также с российскими моделями (например, модель ионосферы ЦАО [Геомагнетизм и Аэрномия, 2013, том 53, № 1, с. 78–90], модель ГСМ ТИП [Геомагнетизм и аэрномия, 2018, том 58, № 1, с. 53–65] и др.), используемыми для моделирования различных возмущений ионосферы. Прямого аналога модели, построенной в диссертации, в статьях других российских ученых я не нашел, поэтому, если это действительно так, этот факт было бы важно подчеркнуть как одно из достоинств диссертации.

2. В Таблице 1.1 представлен список реакций и их констант, учитываемых в модели. С удивлением обнаружил, что значительная часть значений констант соответствует литературе, опубликованной более 40-50 лет назад. В то же время, в работе (Grubbs et al., JGR 2018, <https://doi.org/10.1002/2017JA025026>), цитируемой в диссертации, представлен похожий список реакций и констант модели Modified GLobal AirglOW (ModGLOW), см. Appendix A. Непосредственное сравнение констант из двух списков показывает, что примерно 85% констант модели диссертации отличаются от более свежих данных, которые в (Grubbs et al., JGR 2018) берутся из различных обзоров и работ: Duff et al. (GRL, 2003), Pavlov (Surveys in Geophysics, 2014), Pandya and Joshipura (JGR, 2014), Sinnhuber et al. (Surveys in Geophysics, 2012), Zettergren (PhD Thesis, 2009), Thirupathaiah and Singh (ASR, 2014), Strickland et al. (JQRST, 1999), Richards and Voglozin (JGR, 2011), Bhardwaj and Raghuram (Astrophys. J., 2012). Некоторая часть констант (например, реакции 7, 8, 19, 25, 28, 29, 31, 34, 50 в Таблице 1.1) отличается примерно на 10-20%, другая группа (например, реакции 17, 30, 38, 41, 49, 55) – в разы и более, оставшиеся имеют заметные отличия с точки зрения температурной зависимости или каналов протекания реакций. В частности, реакция $N(^2D)+O_2$, основной источник образования NO на рассматриваемых высотах, в новой редакции имеет существенную температурную зависимость: $6.2 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{T_n}{300}$, где T_n - температура нейтралов. Эта зависимость получена в прецизионных лабораторных экспериментах Duff et al. (GRL, 2003). На первый взгляд, эти несоответствия констант не должны существенно повлиять на полученные в диссертации результаты, по крайней мере, с качественной точки зрения. Тем не менее, последующее уточнение модели в этом плане необходимо.

3. Насколько я понял, изначально (в главе 1) NO рассматривается в качестве динамической переменной модели, т.е. самосогласованным образом, однако, в последующих главах эта компонента выступает фактически как параметр в силу сравнительно большого времени жизни NO и, соответственно, релаксации к некоему

мгновенно-равновесному профилю. Об этом, в частности, говорит исследование эмиссий возбужденного атомарного кислорода в зависимости от профиля NO, проведенное в главе 3. На мой взгляд, это обстоятельство не совсем четко описано в самом начале диссертации, что затрудняет понимание.

4. В главе 4 представлены оценки NO, полученные по данным фотометрических измерений эмиссий, в сравнении с довольно давними данными ракетных измерений. На мой взгляд, здесь было бы уместно еще привести данные NO сравнительно недавних или действующих спутниковых кампаний (SCIAMACHY, MIPAS, Odin SMR, SOFIE и др.)

5. В диссертации есть неудачные обороты и опечатки. Например:

Стр. 14: «...аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер и максвелловское распределение по энергиям...»

Стр. 48: «...флуктуации полярное сияния были незначительны.»

Стр. 161: «...экспериментально измеренна величина выделившейся энергии»

Стр. 246: «Получено, что высота светящегося слоя ~ 40 км...» Видимо, 140 км?

Несмотря на сделанные замечания, мое мнение о диссертации - самое высокое. Автореферат правильно отражает структуру, методы, подходы и результаты диссертации, дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертация Дашкевич Жанны Владимировны является законченной научно - квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям (пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.18 - Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

заведующий лабораторией атмосферных исследований,

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Куликов Михаил Юрьевич

28.01.2025

Контактные данные:

телефон: +79103819028, e-mail: kulm@ipfran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы (1.6.18 - Науки об атмосфере и климате)

Адрес места работы:

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

телефон: +7 (831) 436-62-02, e-mail: dir@ipfran.ru

Подпись сотрудника ИПФ РАН М.Ю. Кузнецова, удостоверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.



И.В. Корюкин

28.01.2025