

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Дышлевского
Сергея Викторовича «Перенос прямого и рассеянного потоков излучения в
линии Лайман-альфа в D и E областях ионосферы», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы**

Одной из самых сильных линий в солнечном спектре в УФ области является водородная линия Лайман-альфа. Излучение в этой линии может проникать на высоты 60—120 км и быть одним из источников ионизации в областях *E* и *D* ионосферы. Поэтому исследование переноса излучения в водородной линии Лайман-альфа является актуальной задачей при моделировании ионосферы. Во многих работах ранее рассматривалось прямое излучение в линии Лайман-альфа в дневных условиях. В сумерки и ночью прямые потоки исчезают, и в последние десятилетия обсуждается вопрос о вкладе резонансно рассеянного на атомарном водороде излучения в линии Лайман-альфа в ионизацию ночной ионосферы.

Дело в том, что концентрация атомарного водорода, учитывая его небольшой атомный вес, очень медленно убывает с высотой и водород обнаруживается на высотах, сравнимых с радиусом Земли. Поэтому резонансно рассеянное на водороде на таких больших высотах солнечное излучение может проникать на сумеречную и ночную сторону атмосферы Земли в области *D* и *E* ионосферы. Этому процессу благоприятствует относительно незначительное поглощение излучения в линии Лайман-альфа молекулярным кислородом. Фотоны этого излучения неспособны ионизировать основные составляющие атмосферы: молекулярный кислород и азот, однако их энергии достаточно для

ионизации молекул окиси азота NO, от концентрации которой также зависит степень ионизации рассматриваемых областей.

Однако до сих пор детальная проверка этой гипотезы не проводилась в силу сложности задачи, связанной с учетом многократного рассеяния света. Одной из основных целей диссертации является оценка потоков излучения и ионизации не только в дневных условиях, но и при низком солнце, а также вочных условиях в *D*-области ионосферы при различных геофизических условиях. Роль излучения Лайман-альфа в ионизации *E*-области ионосферы, особенно в сумеречных иочных условиях также малоизучена. Все эти факты также подтверждают актуальность направления исследований диссертанта.

Для решения поставленной задачи диссертант использовал известную модель численного решения уравнения переноса излучения, основанную на методе последовательных порядков рассеяния. Эта модель прошла международное тестирования в видимой и ближней УФ области спектра и показала хорошее согласие с результатами вычислений других программ, при этом отличие результатов вычислений не превышало 8%. Диссертант настроил и адаптировал эту программу для переноса излучения в линии Лайман-альфа. При этом он дополнительно провел тестирование этой программы.

Перенос излучения в рассматриваемой диссидентом задаче происходит в общем случае в среде с оптической толщиной рассеяния достигающей ~80 (в центре линии Лайман-альфа), что приводит к необходимости вычислений с учетом высоких порядков многократного рассеяния, которые требуют больших затрат компьютерного времени. Также для вычисления полных потоков излучения необходимо проводить интегрирование по ширине спектральной линии. При этом условия распространения излучения меняются в зависимости от сдвига рассчитываемой длины волны от центра линии, изменяются оптические толщины рассеяния и поглощения и, соответственно, их отношение,

т.е. изменяется альбедо однократного рассеяния. Поглощающей средой является молекулярный кислород, а рассеивающей — атомарный водород, большая часть которого фактически находится над поглощающей средой. Диссертанту для определения актинического потока в линиях Лайман-альфа и Лайман-бета излучения приходится рассматривать перенос излучения более чем в десятке различных атмосфер и суммировать потоки излучения в этих атмосферах при интегрировании по ширине спектральной линии.

Используя описываемую методику, диссертант впервые получил большой массив потоков излучения в линиях Лайман-альфа при различных геофизических условиях в *D*- и *E*-областях ионосферы на высотах 60—120 км. Для условий средних широт получены суточная и сезонная зависимости потоков излучения, а также зависимость от солнечной активности. Автор диссертации провел детальный анализ не только интегральных по спектру потоков излучения, но и выявил особенности спектральных изменений прямых и рассеянных потоков внутри линии Лайман-альфа. Также в *E*-области ионосферы были произведены расчеты потоков не только в линии Лайман-альфа, но и в Лайман-бета для сравнения их вкладов в ионизацию. Эти данные могут быть использованы для обновления фотохимических и ионосферных моделей.

Наиболее значимые результаты, полученные диссидентом, следующие:

- впервые показано, что в сумеречных иочных условиях рассеянное излучение в водородной линии Лайман-альфа является основным источником ионизации области *D* ионосферы;
- получено частичное объяснение эффекта зимней аномалии в *D*-области ионосферы;
- впервые показано, что зимние потоки излучения в линии Лайман-альфа более чем в два раза могут превышать летние, что способствует большей ионизации именно в зимнее, а не в летнее время;

- впервые проведен анализ зависимости потоков излучения в линии Лайман-альфа от солнечной активности в *D*-области ионосферы. Показано, что в летнее время потоки излучения в зависимости от зенитного угла Солнца и высоты могут возрастать в 3—8 раз при увеличении солнечной активности по сравнению со спокойными гелиогеофизическими условиями;

- впервые показано, что важным источником ионизации *E*-области ионосферы в сумеречных иочных условиях наряду с излучением в линии Лайман-бета является излучение в линии Лайман-альфа, при этом вклады этих излучений могут быть сопоставимы.

- впервые предложен так называемый сумеречный эффект рассеяния для объяснения прохождения излучения в водородной линии Лайман-альфа в *D*-область ионосферы, когда наличие дополнительного рассеивающего слоя над поглощающим приводит к увеличению прозрачности атмосферы, несмотря на рост оптической толщины.

Научная и практическая значимость работы определяется полученным автором массивом данных о потоках излучения в *D*- и *E*-областях ионосферы при различных геофизических условиях и рассчитанными на основе этих потоков плотностями электронной концентрации. Эти данные могут использоваться как в фотохимических, так и ионосферных моделях, и кроме того, изменение электронной концентрации в *D*-области ионосферы должно влиять на распространение радиоволн в средне- и длинноволновом диапазонах. Поэтому особенности изменений электронной концентрации при различных геофизических условиях, которые рассмотрел автор в своей диссертации, необходимо будет учитывать при радиопередачах в указанных волновых диапазонах.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждаются согласием расчетов потоков излучения, полученных автором диссертации, с модельными расчетами других исследователей, а также

согласием вычисленных плотностей электронной концентрации в *D*- и *E*-областях ионосферы с ионосферными моделями.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в ИПГ Росгидромета, ИДГ РАН, ИФА им. А.М.Обухова РАН, ЦАО Росгидромета, НПО Тайфун, ГУ НИЦ «Планета», ИСЗФ СО РАН, ИОА им. В.Е.Зуева СО РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова и других учреждениях РФ.

Замечания по диссертационной работе

1) Согласно информации автора на стр. 54 при расчетах переноса излучения используется модель сферической индикатрисы рассеяния на водороде земной атмосферы в линиях Лайман-альфа и Лайман-бета. Однако, автором не обсуждается влияние такой аппроксимации индикатрисы на точность расчетов.

2) Из описания, приведенной автором, следует, что в разностную сетку численной модели переноса излучения входит ряд параметров, от которых зависит точность вычислений. В частности это число слоев, на которые разбивается атмосфера, а также набор углов в местной и земной системе координат. Автор на стр. 56 диссертации пишет, что частота разностной сетки определяется возможностями компьютера, не уточняя конкретных параметров разностной сетки. Согласно проведенному тестированию и валидации модели, подобранная разностная сетка позволяет с высокой степенью точности проводить вычисления потоков излучений, тем не менее, следовало бы более подробно сделать описание разностной сетки, используемой в модели.

3) Автор диссертации вычисляет потоки излучения при различных оптических толщинах атмосферы. Наибольшая оптическая толщина приходится на центр линии Лайман-альфа и может достигать, как следует из данных, представленных автором, ~80. В таких условиях приходится суммировать

длинные ряды получаемых промежуточных результатов, соответствующих различным порядкам рассеяния. Согласно автору в центре линии число слагаемых может достигать ~ 1700 . Как правило, такие длинные ряды плохо сходятся, и точность результатов вычислений во многом зависит от критерия сходимости, определяющего остановку вычислений. Этот критерий было бы желательно привести в диссертации.

4) При сравнении плотности потоков излучения в водородной линии Лайман-альфа на различных высотах с работой [Reddmann, Uhl, 2003] (стр. 92 диссертации) желательно было бы отметить, что вычисления в этой работе, согласно её авторам, были выполнены на основании метода Монте-Карло в плоскопараллельной атмосфере, поэтому наряду с другими причинами возможны некоторые расхождения с результатами, полученными в сферической атмосфере для зенитного угла 83,5 градуса.

5) В диссертационной работе обнаружено небольшое количество опечаток и грамматических ошибок.

Указанные замечания не подвергают сомнению основные выводы и положения диссертации и не снижают высокую научную ценность диссертационной работы. Диссертационная работа С.В. Дышлевского представляет собой законченное целостное самостоятельное исследование. Автореферат отражает содержание диссертации, положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных статьях, в том числе в изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК. Автор диссертации участвовал в 2 международных конференциях, материалы диссертации рассматривались на семинарах и заседаниях Ученого совета Института прикладной геофизики.

Диссертация выполнена на высоком научно-методическом уровне и удовлетворяет всем требованиям пунктов 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 с изменениями на 11 сентября 2021 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Дышлевский Сергей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросфера».

[Signature]

О.В. Постыляков

кандидат физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М.
Обухова РАН)

119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3
Тел.: (495) 951-55-65, факс: (495) 953-16-52
E-mail: oleg-postylyakov@yandex.ru

Подпись О.В. Постылякова заверяю:

29. August 2022



Членый секретарб
ИРА им. А.М. Обухова РАН
К.Г.Н. Л.Д. Краснокутская