

На правах рукописи

Дышлевский Сергей Викторович

**ПЕРЕНОС ПРЯМОГО И РАССЕЯННОГО ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В
ЛИНИИ ЛАЙМАН-АЛЬФА В *D* И *E*-ОБЛАСТЯХ ИОНОСФЕРЫ**

Специальность

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва –2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
«Институт прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова»

**Научный
руководитель** доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией
Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт
прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова»
Беликов Юрий Евгеньевич

**Официальные
оппоненты** доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией
Федерального государственного бюджетного учреждения
«Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета
Криволицкий Алексей Александрович

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Института физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН,
Постыляков Олег Вадимович

**Ведущая
организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер имени академика М.А Садовского
Российской академии наук (ИДГ РАН)

Защита состоится _____ 2022 г. в _____ на заседании диссертационного совета по
защите докторских и кандидатских диссертаций Д327.008.01 в Федеральном государственном
бюджетном учреждении «Институт прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова» по адресу:
129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного
учреждения «Институт прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова» и на сайте
<http://ipg.geospace.ru/dissertation-council/>

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д327.008.01,
кандидат физико-математических наук

Е.Н. Хотенко

Актуальность проблемы

Исследование нижней ионосферы является одной из важных проблем аэрномии. Изменение концентрации электронов $[e]$ в D - и E -областях ионосферы в дневное и ночное время существенным образом влияет на распространение радиоволн в ДВ и СВ диапазонах. При этом источники ионизации днем и ночью могут быть различными.

Общепризнано, что важным ионизирующим агентом в D -области является рассеянное солнечное излучение в линии L_{α} . Повышенная ионизация обычно объясняется увеличением концентрации $[NO]$, а поток в линии L_{α} в большинстве работ, посвящённых D -области, предполагается постоянным в сходных гелиогеофизических условиях.

Считается, что ионизация D -области ионосферы обусловлена, в основном, прямым солнечным потоком излучения в линии водорода L_{α} , что справедливо в дневных условиях, особенно летом, при малых зенитных углах Солнца χ . При этом обычно принимается, что вклад рассеянного излучения в линии L_{α} либо мал по сравнению с прямым потоком, либо оценивается чисто качественно и с большой степенью неопределённости по причине сложности его параметризации. В ночных условиях прямой поток не может вызывать ионизацию, при этом концентрация электронов $[e]$ уменьшается, но не исчезает совсем.

Факт существования D -области в сумеречное и ночное время предполагает возможность наличия источника ионизации. Таким источником может быть многократно рассеянное излучение на атмосферном атомарном водороде в линии L_{α} , и количественная оценка вклада рассеянного излучения в общий поток в линии становится важной задачей.

В E -области ионосферы (90—130 км) ионизация в дневное время обуславливается УФ-излучением в диапазоне 10—102 нм, прежде всего потоками прямого излучения в линиях водорода Лайман-бета ($L_{\beta}=1025,72 \text{ \AA}$) и ионизированного углерода СIII (977 \AA), и мягким рентгеновским излучением в диапазоне 3—10 нм.

Ночью эти источники перестают работать, величина $[e]$ в E -области понижается, но, как и в D -области, никогда не падает до нуля. Предположение о том, что ночная ионизация обусловлена рассеянным УФ-излучением, высказывали разные учёные, при этом допускалось, что основным источником ионизации ночью в E -области ионосферы является излучение в линии водорода L_{β} . Сложности возникали при расчёте величины ионизирующих потоков, поэтому в большинстве случаев давалась лишь качественная, а не количественная оценка влияния рассеянного излучения в линиях Лаймана водорода на D - и E -области ионосферы. Этот факт определяет **актуальность** исследования.

Степень разработанности темы исследования

Исследований, посвящённых влиянию солнечного излучения в линиях водорода L_α и L_β на ионизацию атмосферы на высоте 60—130 км, сравнительно мало. В основном рассматривались прямые потоки УФ-излучения днём. Оценки воздействия излучения на ионизацию ведутся, как правило, по центру линий L_α и L_β ; края линий не рассматриваются. Также мало исследован вопрос вклада кратных эффектов рассеяния в линии L_α в D - и E -областях и в линии L_β в E -области ионосферы. Здесь следует отметить, в первую очередь, работу [Reddmann and Uhl, 2003], в которой расчёты кратных эффектов рассеяния в линии L_α проводились для малых и больших зенитных углов Солнца χ днём методом Монте-Карло на высоте 60—200 км. Было показано, что изменения температуры на этих высотах сильно влияют на величину потока в линии L_α . Другими исследователями высказывались предположения, что рассеянное излучение L_α может быть одним из источников ионизации D -области, однако количественных оценок этого вклада не проводилось.

Что касается сумеречной и ночной ионизации E -области, то большинство исследователей высказывались в пользу ионизации этой области рассеянным излучением в линии водорода L_β .

Цели и задачи диссертационной работы

Диссертационная работа направлена на изучение вариаций прямого и рассеянного потоков излучения в линиях водорода L_α и L_β в зависимости от сезона, времени суток и солнечной активности, а также связанных с ними изменений $[e]$ в D - и E -областях ионосферы.

Цели работы:

- 1) выяснить, насколько многократно рассеянное излучение в линии водорода L_α может поддерживать ионизацию D -области ионосферы в сумеречных и ночных условиях;
- 2) провести оценку взаимосвязи вариаций прямого и рассеянного излучения в линии L_α с зимней аномалией (ЗА) D -области ионосферы;
- 3) определить вклад излучения в линиях водорода L_α и L_β в сумеречную и ночную ионизацию E -области ионосферы в зависимости от сезона, угла погружения Солнца и гелиогеофизической обстановки.

Объект исследования

Объектом исследования являются потоки прямой и рассеянной радиации в D - и E -областях ионосферы в водородных линиях L_α и L_β а также, рассчитанные на основе этих потоков, вариации электронной концентрации в этих областях.

Научные результаты и новизна

1. Проведена адаптация численной модели переноса излучения в сферической атмосфере, основанной на методе последовательных порядков рассеяния, к анализу переноса излучения в водородных линиях L_α и L_β в D - и E -областях ионосферы, а также её верификация, включая сравнение с другими моделями переноса излучения и теоретическими расчетами.

2. Установлено, что многократно рассеянное излучение в линии L_α достаточно глубоко проникает в D -область ионосферы, при этом в сумеречных и ночных условиях рассеянное излучение в линии L_α оказывается основным источником ионизации на высоте 65—85 км, при этом перенос излучения происходит на крыльях линии L_α .

3. Впервые получены количественные данные о вариации потоков рассеянного излучения в линии L_α в сумерки и ночью. Проведённые автором диссертации расчёты прямых и рассеянных потоков в дневных условиях хорошо согласуются с результатами вычислений, представленными в работе [Reddmann, Uhl, 2003]. Оценки профиля $[e]$ в D - и E -областях ионосферы согласуются также с экспериментальными данными и моделями ионосферы.

4. Впервые показано, что потоки в линии L_α в D -области могут изменяться более чем в 2 раза вследствие температурных аномалий в стратосфере и мезосфере (внезапные стратосферные потепления (ВСП) и мезосферные температурные инверсии), что позволяет частично объяснять эффект зимней аномалии.

5. Впервые показано, что в сумеречных и ночных условиях в D - и E -областях ионосферы возникает так называемый сумеречный эффект усиления потока рассеянного излучения в линиях L_α и L_β при больших зенитных углах Солнца.

6. Впервые исследовано изменение потоков излучения в линии водорода L_α в зависимости от солнечной активности. Установлено, что в условиях повышенной солнечной активности ионизирующие потоки в линии L_α в летнее время в области D возрастают в 3—8 раз в зависимости от высоты и зенитного угла Солнца по сравнению с условиями спокойного Солнца.

7. Впервые показано, что наряду с излучением в линии L_β важным источником ионизации в E -области ионосферы в сумеречных и ночных условиях является излучение в линии L_α ; причём вклад последнего может достигать 30—50% от вклада в ионизацию излучения в линии L_β .

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты моделирования переноса излучения в линии L_α в D -области ионосферы в сумеречное и ночное время. Установлено, что рассеянное солнечное излучение в водородной линии L_α поддерживает ионизацию D -области практически на протяжении всей ночи, как зимой,

так и летом, при этом электронная концентрация $[e]$ в D -области в течение ночи снижается незначительно вследствие многократного рассеяния солнечного излучения в земной атмосфере.

2. Анализ вариаций излучения в линии L_α в среднеширотной D -области ионосферы в спокойной геофизической обстановке в зависимости от времени суток и сезона. Моделирование показывает, что ряд особенностей проявления эффекта ЗА связаны с вариациями потока излучения в линии L_α . Зимние потоки прямого излучения могут превосходить летние в 3—10 раз в зависимости от высоты и зенитного угла Солнца из-за различия температур зимней и летней мезосферы.

3. Анализ вариаций излучения в линии L_α в D -области ионосферы при различных температурных аномалиях и изменении содержания NO в мезосфере в зимнее время. Внезапные стратосферные потепления (ВСП), приводящие к сильным отрицательным аномалиям температуры в мезосфере, и положительные температурные инверсии в мезосфере, отмечаемые в зимнее время, объясняют значительные колебания $[e]$ в D -области ионосферы. Однако экстремальные изменения $[e]$ в зимнее время на 1—2 порядка, которые связывают с ростом концентрации $[NO]$ от 10^6 до 10^9 см⁻³ в этой области, нельзя объяснить изменениями метеорологических параметров атмосферы.

4. Определение соотношения вкладов в ионизацию E -области ионосферы рассеянной солнечной радиацией в линиях излучения водорода L_α и L_β в сумеречных и ночных условиях. Ионизация E -области ионосферы в сумеречных и ночных условиях обусловлена, главным образом, рассеянной солнечной радиацией в линиях излучения водорода L_α и L_β . Причём, если при малых углах погружения Солнца χ (до $\sim 10^\circ$) основной вклад в ионизацию вносит излучение в линии L_β , то при увеличении χ , а также при повышении солнечной активности вклад в общую ионизацию излучения в линии L_α увеличивается и может достигать от 30 до 50% вклада ионизирующего излучения в линии L_β . Результаты расчётов для E -области ионосферы удовлетворительно согласуются с существующими моделями ионосферы, в частности, с моделью IRI-2016.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты расчетов потоков многократно рассеянной радиации в линиях водорода L_α и L_β показывают, что эти потоки могут рассматриваться как основные источники ионизации областей D и E ионосферы в сумеречных и ночных условиях. Полученные данные о концентрации электронов в нижней ионосфере могут быть использованы для совершенствования прогноза

распространения радиоволн в ДВ и СВ диапазонах. Результаты работы могут быть также использованы для коррекции существующих моделей нейтральных составляющих атмосферы, фотохимических моделей нижней ионосферы и ионосферных моделей электронной концентрации в различных гелиогеофизических условиях.

Личный вклад автора

Автор участвовал в работе по модификации модели переноса рассеянного излучения в приложении к мезосфере и нижней термосфере, лично проводил все расчёты потоков прямого и рассеянного в линиях L_α и L_β для различных сезонов и гелиогеофизических условий. Все результаты, описанные в диссертации и изложенные в опубликованных работах, получены автором самостоятельно либо на равных правах с соавторами.

Достоверность и научная обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются согласием модельных расчётов потоков излучения, выполненных автором, с результатами расчетов, полученных рядом исследователей с использованием других известных численных моделей переноса излучения при решении ряда геофизических задач, а также согласием оценок $[e]$ с измерениями в D - и E -областях ионосферы и ионосферными моделями E -области, в частности, с моделью IRI-2016.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены в докладах на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2017) 27—30 июня 2017 г. в г. Санкт-Петербург-Петергоф и на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2019) 25—27 июня 2019 г. в г. Санкт-Петербург-Петергоф.

Результаты работы были доложены также на семинарах и заседаниях Учёного совета ФГБУ «ИПГ».

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и выводов.

Общий объём диссертации: 136 страниц, включая 54 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 187 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность работы, изложены цели и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту, высказано, в чём заключается новизна исследования, указана практическая ценность результатов и описано содержание работы.

В **Главе 1** представлен обзор результатов исследований, связанных с проблемами ионизации D - и E -областей ионосферы, с проникновением излучения в линиях водорода L_α и L_β в нижнюю термосферу и мезосферу, а также с оценками концентрации окиси азота [NO]. Основная проблема ионизации D -области днём связана с так называемой ЗА – повышенной концентрацией электронов зимой по сравнению с летом. В ночное время проблема ионизации как D -, так E -области до конца не решена; рассматриваются возможные источники ночной ионизации этих областей, но большинство исследователей называют в качестве основного источника ионизации рассеянное солнечное излучение в далёкой ультрафиолетовой области спектра, хотя количественные оценки вклада этого излучения практически отсутствуют.

В **Главе 2** описан принцип так называемого сумеречного эффекта усиления потоков рассеянного излучения в двухслойной атмосфере, приведена методика расчёта поля рассеянного излучения в линиях водорода L_α и L_β с учётом этого эффекта.

Суть сумеречного эффекта, для наглядности приводимая ниже на рис. 1 для случая двухслойной среды, состоит в следующем [Беликов, Дышлевский, Репин, 2019]. При наличии только поглощающей среды достаточно большой оптической толщины излучение практически не проникает в нижележащие слои при больших зенитных углах Солнца. В случае наличия рассеивающего слоя над поглощающим рассеянное излучение частично проходит через нижний поглощающий слой. Этот эффект зависит как от зенитного угла Солнца, так и от оптической толщины рассеивающей и поглощающей сред.

Представленная на рис. 1 схема является идеализированной, но может быть пригодна к реальному распределению рассеивающей и поглощающей сред. Принцип сумеречного эффекта применим не только в двухслойной среде, но и в многослойной сферической атмосфере. В ночных условиях проникновение излучения в нижнюю атмосферу происходит благодаря эффектам многократного рассеяния.

Излучение в линии L_α испытывает рассеяние и поглощение в земной атмосфере. Рассеивающей средой является атомарный водород H, поглощающей – молекулярный кислород O_2 . Атомарный водород обнаруживается только в верхней мезосфере и простирается до высот нескольких тысяч километров (рис. 2a). При этом распределение поглощающей и рассеивающей

сред (рис. 2б), а, значит, и условия распространения излучения в атмосфере похожи на приведенную схему на рис.1.

Водород обуславливает резонансное рассеяние солнечного излучения с большим сечением рассеяния, но в очень узком спектральном интервале $\sim 0.1\text{--}0.15 \text{ \AA}$ [Дышлевский и Беликов, 2018]. Полуширина прямого потока на границе атмосферы в линии L_α почти на порядок величины больше и составляет $\sim 0.8 \text{ \AA}$ (см. ниже рис. 3). Однако именно резонансное рассеяние на водороде приводит к глубокому проникновению излучения в линии L_α в D -область в сумеречных и ночных условиях.

Концентрации $[H]$ и $[O_2]$ задаются по модели MSIS-00 (рис.2а). В сумеречных и ночных условиях вклад прямых потоков в линиях L_α и L_β вследствие увеличения оптической толщины атмосферы ослабевает до нуля, и основной вклад в ионизацию вносит рассеянное излучение.

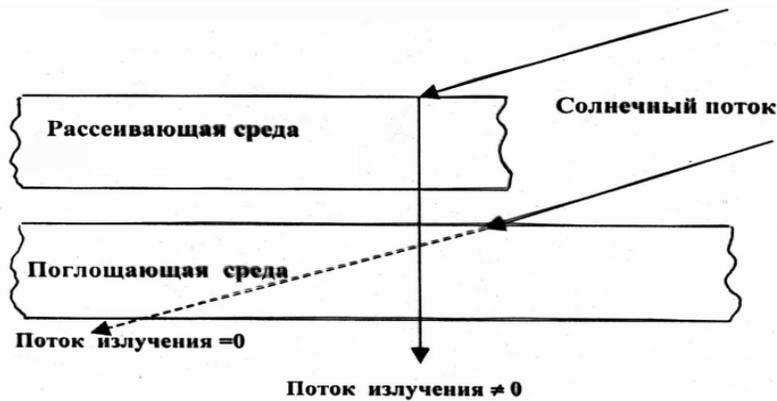


Рис. 1. Механизм проникновения излучения в двухслойной среде. При больших зенитных углах Солнца прямой поток излучения F_{dir} мал по сравнению с рассеянным потоком F_{scat} ($F_{dir} \ll F_{scat}$) [Беликов, Дышлевский, Репин, 2019]. Рассеивающая среда – атомарный водород, поглощающая среда – молекулярный кислород

Вычисления потоков прямого и рассеянного излучения проводились по модели, основанной на численном решении интегрального уравнения радиационного переноса методом последовательных порядков рассеяния, впервые предложенного Ш.С. Николайшвили [Гонгадзе, Микиров, Николайшвили, 1983]. Модифицированная и усовершенствованная Ю.Е. Беликовым модель (скалярный код Николайшвили–Беликова, sN&B) и некоторые результаты описаны в работах [Беликов и др., 1993], [Belikov, Gurvich, 1995], [Belikov, 1996], [Belikov et al., 2000].

Подробное теоретическое описание используемой модели переноса излучения, а также ее тестирование и сравнение с другими моделями переноса излучения приведено в работах [Беликов, Дышлевский., Николайшвили, 2018а, 2018б, 2018в]. Входные данные в модели –

профили коэффициентов рассеяния β_H и поглощения β_{O_2} в диапазоне высот 60—6000 км.

Автором диссертации была проведена модификация модели sN&V для решения уравнения переноса излучения в линиях водорода L_α и L_β в D - и E -областях ионосферы.

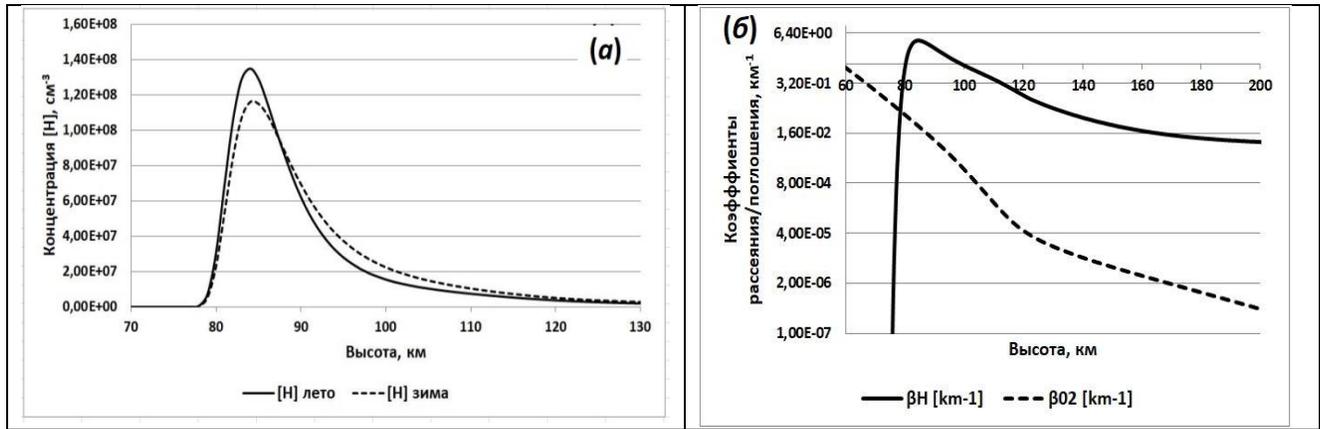


Рис. 2. (а) Профили концентрации атомарного водорода [H] в мезосфере и нижней термосфере согласно модели MSIS-00; (б) Типичные профили коэффициентов поглощения молекулярным кислородом β_{O_2} и резонансного рассеяния атомарным водородом β_H излучения в центре линии Лайман-альфа ($\lambda=\lambda_0=1215,668 \text{ \AA}$) на высотах 60—200 км. Зима, $\varphi=45^\circ$ с.ш.

Концентрация [H] и [O₂] на высотах 0—1000 км для широт Северного полушария 23, 45, 56 и 66° в дни летнего и зимнего солнцестояния задавалась по модели MSIS-00 [Picone et al., 2002]. Концентрация [O₂] и [H] на высоте 1000—6000 км рассчитывалась по формуле высоты однородной атмосферы для газовых компонентов. Показано, что пренебрежение рассеянием и поглощением излучения в экзосфере приводит к недооценке полученных значений потоков в областях D и E ионосферы примерно на 20—25%.

Сечение рассеяния водорода σ_H определялось по формуле, приведённой в работе [Reddmann, Uhl, 2003].

$$\sigma_H = \frac{f_{12} \mu_0 e^2 \lambda_0^2}{4\sqrt{\pi} m_e \Delta\lambda_D} \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_D}\right)^2\right)$$

где f_{12} - сила осциллятора, $f_{12}=0,4163$ в линии L_α и $f_{12}=0,0791$ в линии L_β ; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; e - заряд электрона; m_e - масса электрона; λ - длина волны излучения; λ_0 - центры линий: $\lambda_0=121,5668$ нм для L_α ; $\lambda_0=102,572$ нм для L_β , $\Delta\lambda_D=\lambda_0 v/c$ - величина доплеровского теплового уширения, $v = \sqrt{2kT/m_H}$ - тепловая скорость; k - постоянная Больцмана; T - температура в град. Кельвина; m_H - масса атома водорода, c - скорость света.

На рис. 3а показана форма линии Лайман-альфа после прохождения излучения через геокорону Земли, на рис. 3б – модельный профиль, используемый в вычислениях.

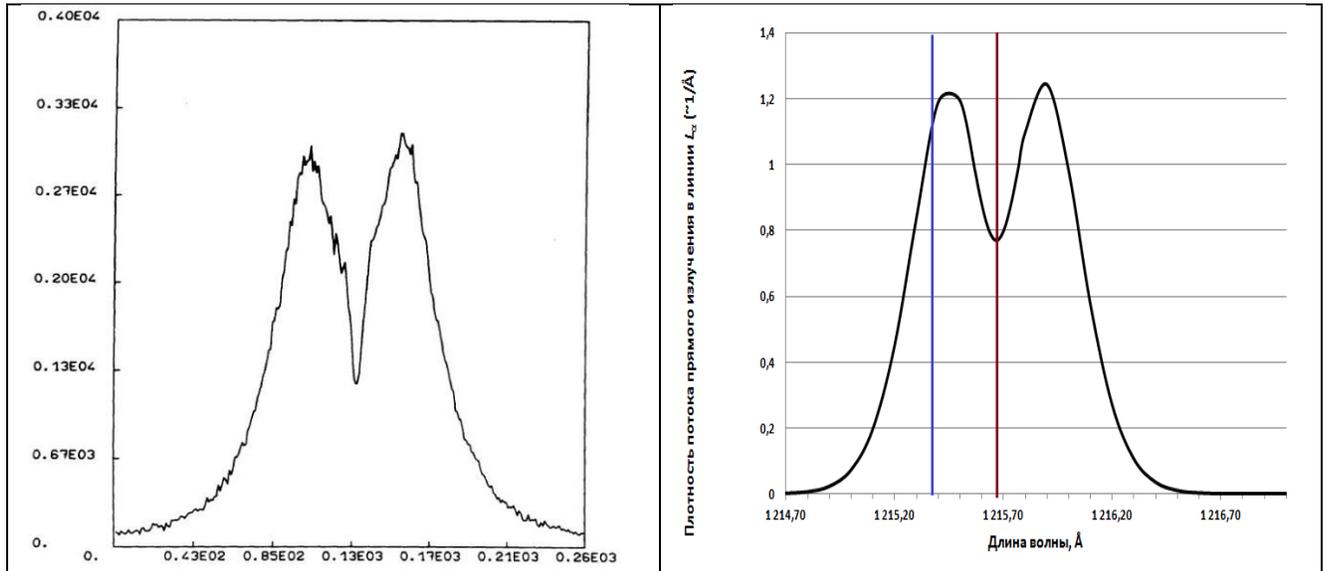


Рис. 3. Профиль солнечного излучения в водородной линии L_{α} в открытом космосе (слева) на границе земной атмосферы в относительных единицах по данным спутника OSO-8 [Lemaire et al., 1978] и профиль линии L_{α} , используемый при модельных вычислениях (справа). Вертикальными линиями отмечены центр линии ($\lambda_0=1215,668 \text{ \AA}$) и граница «фиолетового» склона профиля ($\lambda \leq 1215,338 \text{ \AA}$), используемая в некоторых калибровках излучения.

Сечения поглощения σ_{O_2} в линии водорода L_{α} рассчитывались на основании работы [Lewis et al., 1983] методом линейной интерполяции и квадратичной экстраполяции. На рис. 4 показана зависимость величины σ_{O_2} от длины волны вблизи линии L_{α} для четырех значений температуры атмосферы по данным [Lewis et al., 1983] и [Carver et al., 1977].

Трудности в решении задачи переноса излучения связаны с необходимостью затрат большого количества машинного времени для расчетов не только прямого, но и многократно рассеянного излучения для различных длин волн с последующим интегрированием потоков по всей ширине линии L_{α} . Фактически это означает проведение расчетов для целого ряда атмосфер с различным высотным распределением оптических параметров – коэффициентов рассеяния σ_H и поглощения σ_{O_2} , которые являются функциями не только длины волны, но и температуры.

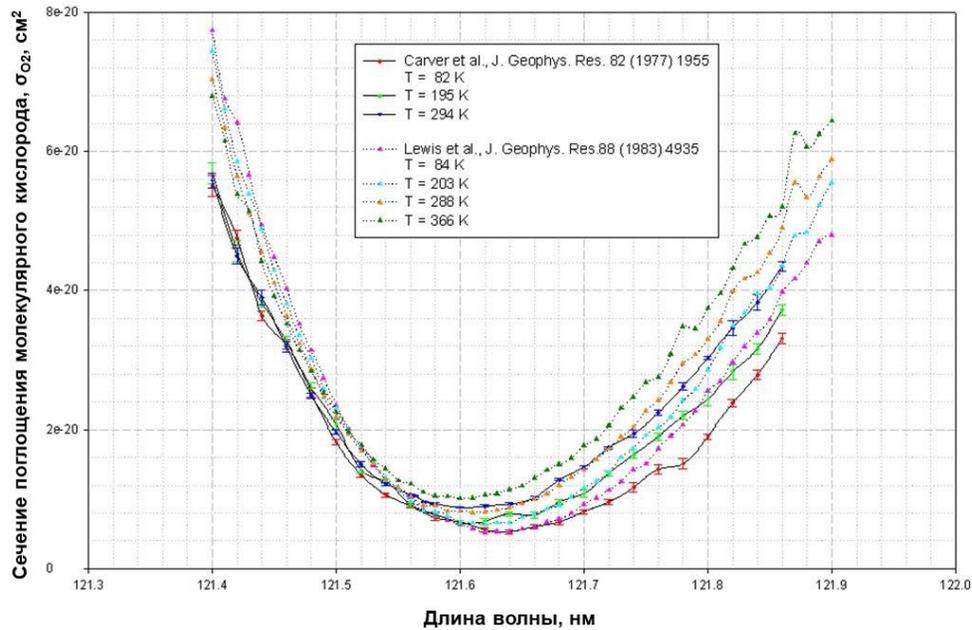


Рис. 4. Зависимость сечения поглощения O_2 в окрестностях линии L_α от длины волны и температуры согласно указанным литературным источникам.

Сечение поглощения кислорода σ_{O_2} в области линии L_β задавалось по таблицам [Conway, 1988]. Внеатмосферные потоки принимались равными $3 \cdot 10^{11}$ фотон \cdot см $^{-2}$ \cdot сек $^{-1}$ и $6 \cdot 10^{11}$ фотон \cdot см $^{-2}$ \cdot сек $^{-1}$ в линии L_α и $3 \cdot 10^9$ фотон \cdot см $^{-2}$ \cdot сек $^{-1}$ и $6 \cdot 10^9$ фотон \cdot см $^{-2}$ \cdot сек $^{-1}$ в линии L_β для условий спокойного и возмущённого Солнца, соответственно. В линии L_α сечение ионизации окиси азота $\sigma_{iNO} = 1,84 \cdot 10^{-18}$ см 2 [Laštovička, 1976], в линии L_β $\sigma_{iNO} = 9,8 \cdot 10^{-18}$ см 2 [Sullivan, Holland, 1966]. Для линии L_α расчёты потоков излучения проводились в интервале длин волн 1214,7—1217,0 Å, для линии L_β – в интервале 1025,62–1025,85 Å с различными шагами по длине волны.

Предварительная верификация модифицированной модели проводилась [Беликов, Дышлевский, Николайшвили, 2018в] по таблицам Ван-де-Хюлста [Hulst, 1980].

Детальное сравнение модели переноса sN&B для широкой области спектра представлено в работе [Postylyakov et al., 2001] с вычислениями по методу Монте-Карло, векторному и скалярному кодам Постылякова и скалярному коду Розанова. Расхождение между результатами вычислений по всем моделям и модели sN&B не превысило 5—8%.

Модель sN&B позволяет в средах с большой оптической толщиной методом последовательных итераций проводить вычисления до очень высокой степени кратности

рассеяния – до нескольких тысяч итераций, необходимость которых возникает в условиях оптических толщин τ больше 20—30. Необходимое число итераций определяется по сходимости вычислений потоков, когда результаты последующей итерации не отличаются от результатов предыдущей. Точность сходимости задавалась не хуже 1%. Для расчетов в центре линии L_α (1215,668 Å) для получения такой точности требуется до 1500 итераций. При отклонении от центра линии число необходимых итераций резко падает. Для длин волн 1215,64 Å и 1215,69 Å, где происходит основной перенос рассеянного излучения, достаточно всего 3—7 итераций. Для длины волн короче 1215,69 Å и длиннее 1215,75 Å можно ограничиться первым порядком рассеяния. Следует отметить, что расчёты вблизи центра линии требуют значительных затрат машинного времени.

Для линии L_β объём вычислений рассеянных потоков оказывается много меньше, чем для линии L_α . Это связано, прежде всего, с тем, что излучение гораздо сильнее поглощается в линии L_β по сравнению с линией L_α . Ван-де-Хюлст [Hulst, 1980] указывал, что при увеличении поглощения кратность рассеянного излучения снижается.

Расчёты концентрации электронов $[e]$ в D - и E -областях ионосферы для высот 80 км и выше проводились по формулам:

$$[e] = \sqrt{F[\text{NO}] \sigma_i / \alpha_{\text{NO}^+}}$$

$$[e] = \sqrt{F_\beta[\text{O}_2] \sigma_{\text{IO}_2} / \alpha_{\text{O}_2^+}}$$

где σ_i – сечение ионизации молекулы NO; σ_{IO_2} – сечение ионизации молекулы O₂, α_{NO^+} и $\alpha_{\text{O}_2^+}$ – коэффициенты рекомбинации ионов NO⁺ и O₂⁺.

В **Главе 3** приводятся результаты вычислений.

Показано, что при больших зенитных углах Солнца перенос излучения в линии происходит в основном на крыльях линии L_α в диапазонах 1214,9—1215,62 Å и 1215,72—1216,4 Å.

С отклонением от центра линии интенсивность рассеянного излучения, как и прямого излучения, сначала растёт, однако в силу конечности ширины линии при длине волн короче $\lambda < 1215,61$ Å и длиннее $\lambda > 1215,71$ Å интенсивность потока рассеянного излучения резко падает. Возникает характерная двугорбая структура с двумя ярко выраженными максимумами вблизи длин волн 1215,64 Å и 1215,69 Å, независимо от зенитного угла Солнца (рис. 5а).

Прямое излучение при больших зенитных углах Солнца в центре линии L_α до высот D -области не проникает. Однако прохождение прямого излучения возможно на краях линии. На рисунке 5б показано изменение профилей прямых потоков по ширине линии L_α на высотах

70—120 км летом и зимой при зенитном угле Солнца $\chi=82^\circ$. Зимой величина прямого потока на высоте 80—85 км выше, чем летом, что обусловлено различием концентрации $[O_2]$ и зависимостью коэффициента поглощения β_{O_2} от температуры.

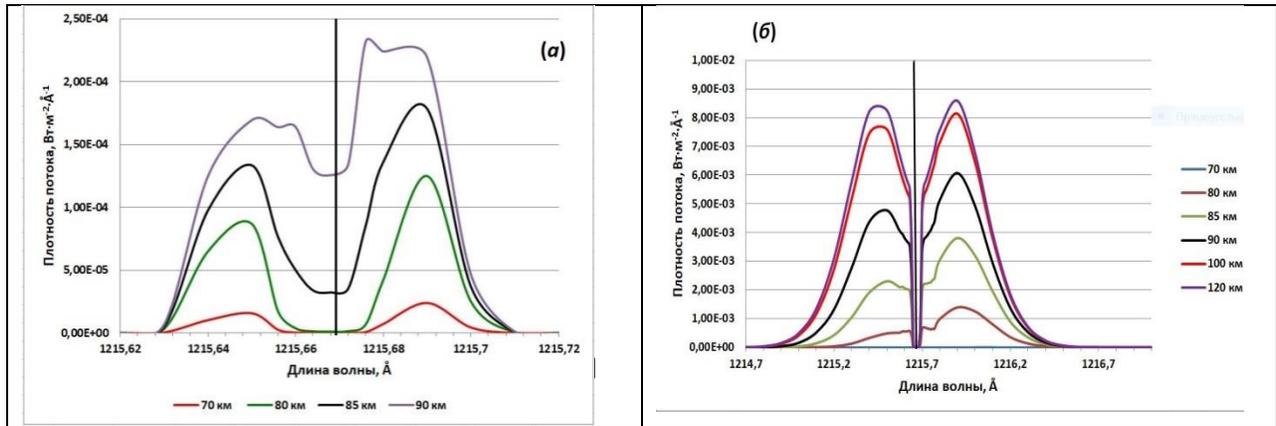


Рис. 5. (а) Двугорбая структура плотности потока рассеянного излучения в линии L_α в D -области ионосферы в сумерки ($\chi=101^\circ$); (б) Профили плотности прямого потока излучения в линии L_α на высотах $h=70$ — 120 км, $\chi=82^\circ$. Зима, спокойные гелиогеофизические условия, $\phi=45$ с.ш. Вертикальной линией в середине графиков отмечен центр профиля линии L_α ($1215,668 \text{ \AA}$)

При увеличении χ прямой поток практически исчезает ниже 80 км. Однако рассеянный поток проникает ниже, вплоть до высоты 60 км. Для потока рассеянного излучения в E -области в линии L_β характерная для линии L_α в D -области двугорбая структура проявляется очень слабо и видна только на высоте 100—110 км. При малых зенитных углах Солнца структура профилей излучения L_β определяется прямыми потоками (рис. 6а), а при больших зенитных углах — исключительно рассеянными потоками (рис. 6б).

На высоте 120 км ослабление излучения в линии L_β по сравнению с внеатмосферным потоком происходит в значительно меньшей степени, чем для излучения в линии L_α на той же высоте. Однако с уменьшением высоты ослабление излучения в линии L_β происходит гораздо быстрее, чем в линии L_α , и на высоте 95 км практически не обнаруживается. Несмотря на отличия, характер изменения прямого потока с высотой в линии L_β имеет некоторую схожесть с изменением с высотой потока в линии L_α , т.е. в центре профиля отмечается вполне ожидаемый «провал» (рис. 6а).

Днём вклад излучения в линии L_α в общую ионизацию E -области ионосферы незначителен — результаты подтверждают выводы других исследований, частности, Titheridge [1997]. При

увеличении χ и повышении солнечной активности вклад излучения в линии L_α увеличивается и может достигать 30—50% от ионизации излучением L_β .

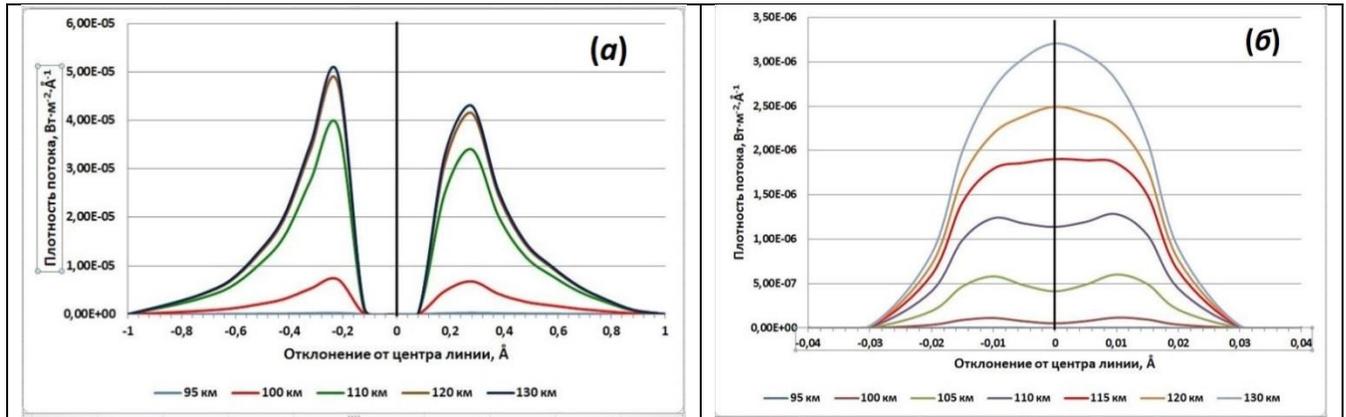


Рис. 6. Эволюция профилей потоков в линии L_β на высоте $h=95$ — 130 км от дня к ночи. (а) Профили потоков излучения в линии L_β , $\chi=22^\circ$; (б) Структура рассеянного излучения в линии L_β , $\chi=101^\circ$. Спокойно Солнце, $\varphi=45$ с.ш., лето. Вертикалью отмечен центр линии Лайман-бета.

На рис. 7 показано распределение спектральной плотности полного потока (прямой+рассеянный) согласно [Reddmann, Uhl, 2003] и расчётам автора диссертации для $\chi=83,5^\circ$ в зимнее время. Внеатмосферный поток F нормирован к 1, а плотность потока на разных высотах выражена в единицах $F/\text{нм}$. По оси абсцисс на графиках отложено отклонение в нанометрах от центра линии L_α .

Не только качественное, но и количественное согласие результатов вычисления потоков, приводимых в работе [Reddmann, Uhl, 2003] и полученных автором диссертации, является дополнительным подтверждением обоснованности применяемой модели sN&B для расчётов.

Зимняя аномалия

В D -области ионосферы наблюдается повышенная концентрация электронов зимой по сравнению с летом, так называемая «зимняя аномалия» (ЗА). Выделяются три проявления ЗА: а) превышение средних зимних значений $[e]$ над летними; б) значительная нестабильность области D зимой, выражающаяся в разбросе значений $[e]$ в 2—3 раза относительно средних значений; в) очень высокие значения $[e]$ — на 1—2 порядка выше относительно средних значений в отдельные дни зимой.

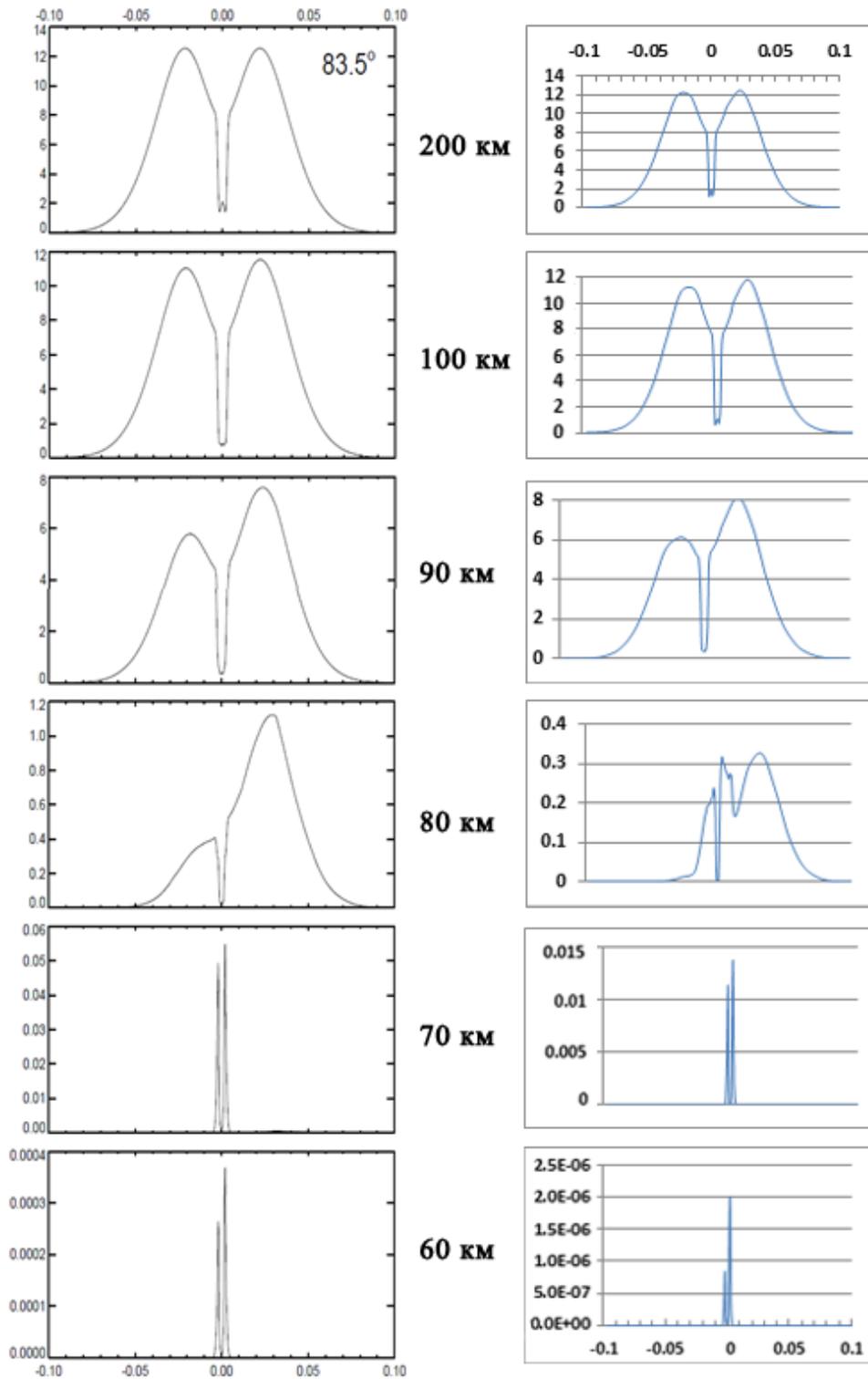


Рис. 7. Эволюция спектра плотности полного потока по высоте в линии водорода L_α для $\chi=83,5^\circ$ по данным [Reddmann, Uhl, 2003] (слева) и модельным вычислениям автора диссертации (справа)

Вариации $[e]$ в D -области ионосферы объясняются изменением концентрации $[\text{NO}]$. Согласно существующим представлениям, наблюдаемые величины $[\text{NO}]$ в средних широтах не могут быть объяснены с точки зрения фотохимических процессов, необходимо привлекать динамические процесс переноса [Данилов, 1981]. Однако автор диссертации не исследует процессы, приводящие к высоким значениям $[\text{NO}]$ в D -области, а рассчитывает потоки ионизирующего излучения на основании ряда теоретических и экспериментальных данных о величине $[\text{NO}]$ в D -области.

Проведенные автором диссертации вычисления показали следующее.

1). Расчёты по модели sN&V подтверждают наблюдаемое превышение зимних значений $[e]$ над летними.

2). Значительный разброс значений $[e]$ в D -области ионосферы зимой нельзя объяснить на основании MSIS-00 либо другой атмосферной модели, но объяснение возможно с привлечением таких явлений, как внезапные стратосферные потепления (ВСП) и мезосферные инверсии.

В работах по изучению влияния ВСП на атмосферу в целом обнаружена тесная корреляция между повышением температуры в стратосфере и падением температуры в мезосфере. В среднем, повышение температуры в стратосфере составляет 30 К, что приводит к падению температуры вблизи мезопаузы на 20 К [Медведева и др., 2011].

Мезосферные положительные температурные инверсии связаны с планетарными волнами Россби. Это явление наблюдается, главным образом, в умеренных широтах в зимнее время. Максимальные изменения отмечаются зимой, достигая на широте 45° значений порядка 45 К в январе. Рост температуры начинается на высоте от 65—75 км; высота слоя инверсии достигает 15 км, т.е. потепление охватывает значительную часть мезосферы.

На рис. 8 показаны три профиля зимней температуры мезосферы и нижней термосферы (a), которые были использованы в модельных вычислениях электронной концентрации $[e]$ (b).

Вариации $[e]$ при одинаковых зенитных углах Солнца, соответствующие условиям ВСП и мезосферной инверсии, на высоте 80 км отличаются между собой в 2,3—2,4 раза. Летом подобных различий не наблюдается. Для объяснения высокой дисперсии величин $[e]$ в зимнее время не требуется привлекать механизмы изменения $[\text{NO}]$.

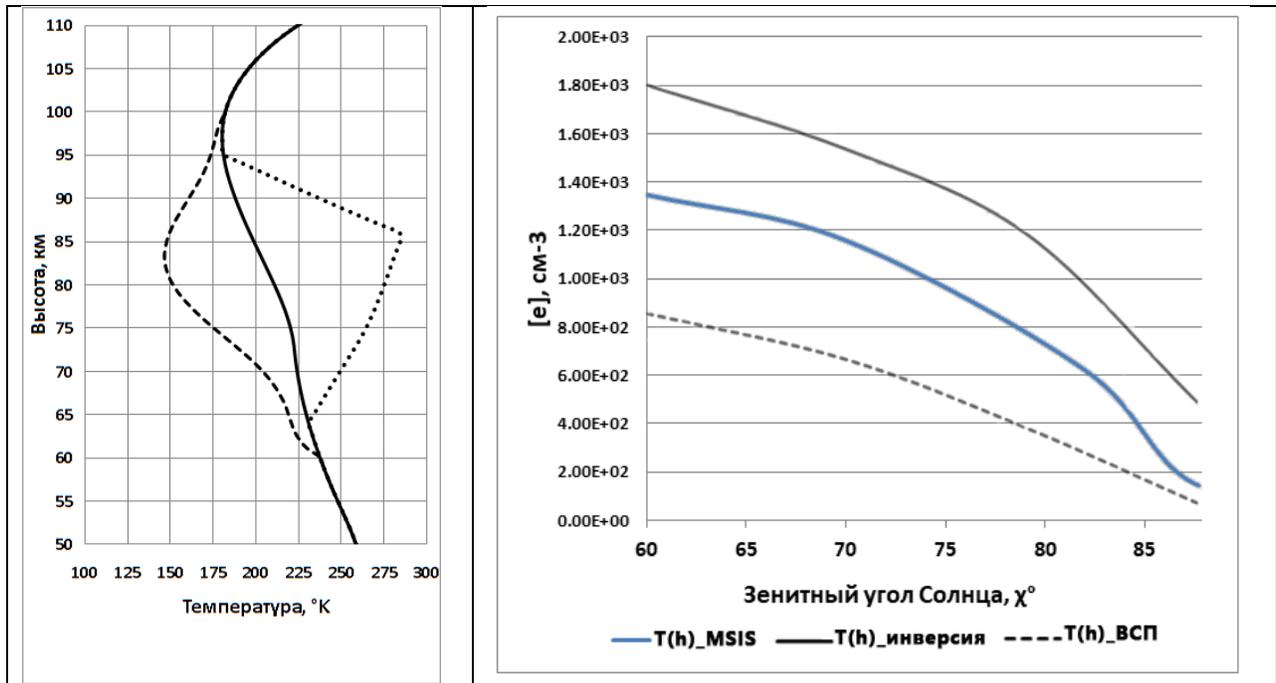


Рис. 8. Профили зимней температуры мезосферы и электронной концентрации (сплошная толстая средняя линия – по MSIS-00, пунктирная – при ВСП, точечная на левом графике и тонкая сплошная на правом – при мезосферной инверсии)

3) Наиболее яркое проявление ЗА, связанное со скачками $[e]$ на 1—2 порядка величины, нельзя объяснить изменением температуры и плотности атмосферы при расчётах по модели последовательных порядков рассеяния. Высокие значения $[e]$ может вызвать рост $[NO]$ вследствие переноса окиси азота либо из полярных областей в умеренные широты, либо вертикальным переносом из E -области ионосферы, либо в результате других механизмов, которые в диссертации не рассматриваются.

Рост потоков рассеянного излучения в сумеречных условиях при повышенной солнечной активности может приводить к росту $[e]$ в D -области в 1,5—2 раза. Даже в условиях глубокой ночи $\chi \geq 120^\circ$ рассеянное излучение в линии L_α продолжает оставаться основным источником ионизации.

С целью проверки гипотезы, высказанной в Strobel et al. [1980], о возможности ионизации E -области излучением звёзд автором диссертации была проведена оценка этого воздействия. Показано, что звёздный свет оказывает незначительное влияние на ионизацию E -области ионосферы.

Обсуждение полученных результатов представлено в **Главе 4**.

D-область ионосферы практически непрозрачна как для прямого, так и рассеянного излучения вблизи центра линии водорода L_α . Однако прямое излучение в линии L_α проходит до высоты примерно 75 км на крыльях линии, ширина которой составляет $\sim 1 \text{ \AA}$, вследствие доплеровского уширения линии. Глубина проникновения зависит как от $[\text{O}_2]$, так и от температуры. При этом мезопауза действует как «температурные ворота»: проникновение прямого излучения L_α зависит от температуры мезопаузы. Рассеянное излучение проходит вплоть до 60 км, при этом спектральный профиль рассеянного излучения проявляет двугорбую структуру с максимумами плотности потоков вблизи $\lambda=1215,64 \text{ \AA}$ и $1215,69 \text{ \AA}$ (рис. 5), независимо от χ . На этих длинах волн рассеянные потоки значительно превосходят прямые как зимой, так и летом при $\chi > 50\text{--}60^\circ$. В целом рассеянный поток превышает прямой при углах $\chi > \sim 87\text{--}88^\circ$ на высоте 80 км.

Результаты расчётов $[e]$ в *D*-области согласуются с данными измерений и должны учитываться в современных фотохимических моделях, в том числе в моделях, включающих ионы-связки.

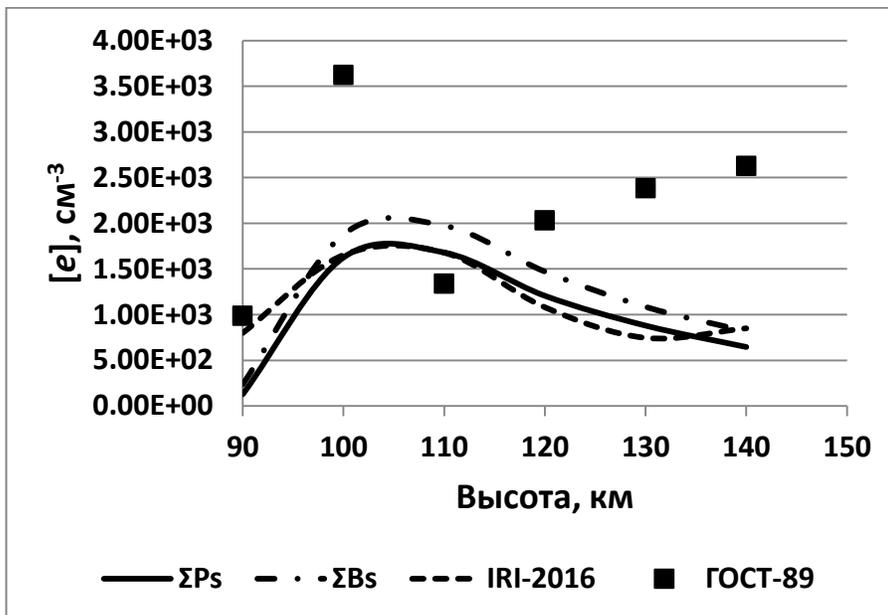


Рис. 9. Профили $[e]$ на основании расчётов автора ΣB_w и ΣP_w (сумма потоков в линиях L_α и L_β при значениях коэффициента рекомбинации α_{NO^+} по данным Biondi [1969] (ΣB_w), Pettrignani et al. [2005] (ΣP_w), соответственно) и по модели IRI-2016 в *E*-области ионосферы в спокойных гелиогеофизических условиях. Зима, $\varphi=45^\circ$ с.ш., $\chi=101^\circ$.

Одним из возможных приложений полученных результатов могут быть оценки влияния потоков в линии L_α на ионизацию NO в D -области для внесения корректив в существующие модели атмосферы. В частности, используемая модель MSIS-00 не учитывает такие явления, как ВСП или мезосферные инверсии, что приводит к существенным ошибкам и неопределённости в оценке таких важных параметров, как электронная концентрация $[e]$ в D -области ионосферы.

Наиболее значимый вывод проведенного исследования для E -области ионосферы: рассеянное излучение в линии L_α при больших углах погружения Солнца χ может оказывать существенный вклад в ионизацию E -области ионосферы наряду с излучением в линии L_β .

Полученные в настоящем исследовании профили $[e]$ сопоставлялись с ионосферными моделями. Результаты согласуются количественно с данными модели IRI-2016 при углах погружения Солнца $\sim 10^\circ$, а также для высоты больше 120 км (рис. 9).

Основным источником неопределённости при расчётах электронной концентрации в E -области ионосферы в сумеречных и ночных условиях является, по всей видимости, разброс в оценках коэффициента рекомбинации α_{NO^+} .

Основные результаты и выводы

1. Проведена верификация модели переноса излучения и ее адаптация для решения уравнения переноса солнечного излучения в водородных линиях L_α и L_β в D - и E -областях ионосферы. Результаты подтверждают, что основным источником ионизации D -области ионосферы в сумеречных и ночных условиях выступает рассеянное излучение в линии водорода L_α как зимой, так и летом.

2. Выявлена сезонная изменчивость потоков излучения в линии L_α в дневное время в D -области среднеширотной ионосферы: согласно модельным расчётам, зимние потоки прямого излучения могут превосходить летние в 3—10 раз в зависимости от высоты и зенитного угла Солнца. Это связано с тем, что летом мезосфера холоднее, чем зимой.

3. Оценены изменения потоков излучения и электронной концентрации в зимнее время при внезапных стратосферных потеплениях (ВЗП) и мезосферных температурных инверсиях, которые приводят к изменению температуры атмосферы и плотности кислорода в D -области ионосферы. Эти колебания температуры и плотности в D -области могут приводить к изменению ионизирующего потока излучения в линии L_α водорода примерно в 2 раза на высоте 80 км и, как следствие, к вариациям концентрации $[e]$ примерно в 1,5 раза, частично объясняя известную концепцию метеорологического контроля области D .

4. Моделирование переноса излучения в ночной и сумеречной E -области ионосферы показывает, что ионизация в этих условиях связана, главным образом, с УФ-излучением в линиях водорода L_α и L_β . При этом вклад излучения в линии L_α в общую ионизацию E -области растёт при увеличении угла погружения Солнца и росте солнечной активности и может составлять до 30—50% ионизации излучением L_β . Результаты расчётов [e] для E -области ионосферы удовлетворительно согласуются с существующими моделями ионосферы, в частности, с моделью IRI-2016.

БИБЛИОГРАФИЯ

Беликов Ю.Е., Николайшвили Ш.С., Перадзе Р.К. Модель рассеяния солнечного света на искусственном сферическом газодисперсном облаке в верхней атмосфере Земли // Космические исследования, 1993, т. 31, № 1, с. 135-142.

Гонгадзе Ю.А., Микиров А.Е., Николайшвили Ш.С. К расчёту пространственных и угловых распределений рассеянного излучения атмосферы Земли // Тбилиси: Тбилисский госуниверситет, Институт прикладной математики им. И.Н. Векуа, 1983. – 77 с.

Данилов А.Д. Фотохимия области D // Ионосферные исследования. № 34. С. 6—35. 1981.

Медведева И.В., Белецкий А.Б., Перминов В.И., Семёнов А.И., Черниговская М.А., Шефов Н.Н. Вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы в периоды стратосферных потеплений по данным наземных и спутниковых измерений в различных долготных секторах // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса // 2011, т.8, № 4, с. 127—135.

Belikov Yu.E. Modelling of the twilight sky brightness using a numerical solution of the radiation transfer equation. // J. of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1996, vol.58, No.16, pp.1843—1848.

Belikov Yu. E., Gurvich A.V. Images of optical thick artificial aerosol clouds in the near-Earth space // Adv. Space Res., 1995, v. 15, No. 12, p. (12)103-(12)106.

Belikov Yu., Romanovsky Yu., Nikolaishvili Sh., Peradze R. Numerical model of scattering radiation in the Earth atmosphere for scientific investigations and Applications // Phys. Chem. Earth (b), 2000, v. 25, No. 5—6, pp. 427—430.

Carver J.H., Gies H.P., Hobbs T.I., Lewis B.R., McCoy D.G. Temperature dependence of the molecular oxygen photoabsorption cross section near the H Lyman α line // J. Geophys. Res., 1977, v. 82, No. 13, pp. 1955—1960.

Conway R.R. Photoabsorption and photoionization cross section of O, O₂, and N₂ for photoelectron production calculation: A compilation of recent laboratory measurements // NRL Mem Rep. 6155, Nav. Res. Lab. Washigton, D.C. 1988—81 p.

Hulst, Van de H.C. Multiple light scattering. Tables, Formulas, and Applications. // Academic Press, N.Y., 1980. – Vol.1 – 300 p.; vol. 2. – 439 p.

International reference ionosphere (IRI-2016) // https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php.

Laštovička J. On some sources of uncertainty in the Lyman- α ionization rate calculations // Studia geoph. et geod., 1976, v. 20, pp. 273—283

Lemaire, P., Charra, J., Jouchoux, A., Vidal-Madjar, A., Artzner, G. E., Vial, J., Bonnet, R. M., and Skumanich, A.: Calibrated full-disk H I Lyman- α and Lyman- β profiles // Astrophys. J., 1978, v. 223, L55-L58.

Lewis B.R., Vardavas I.M., Carver J.H. The aeronomic dissociation of water vapor by solar H Lyman α radiation // J. Geophys. Res., 1983, v. 88, pp. 4935—4940.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res., 2002, v. 107, No.A12, 1468.– 16 p.; doi:10.1029/2002JA009430.

Postylyakov O.V., Belikov Yu.E., Nikolaishvili Sh.S., Rozanov A. A. Comparison of radiation transfer algorithms for modelling of the zenith sky radiance observations used for determination of stratospheric trace gases and aerosol // IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 2001, pp.885—888.

Reddmann T, Uhl R. The H Lyman- α actinic flux in the middle atmosphere // Atmos. Chem. Phys., 2003, v. 3, pp. 225–231.

Strobel D.F., Opal C.B., Meier R.R. Photoionization rates in the night-time E- and F-region ionosphere // Planet. Space Sci., v. 28, N 11, pp.1027-1033, November 1980, doi:10.1016/0032-0633(80)90050-1

Sullivan J.O., Holland A.C. A congeries of absorption cross-sections for wavelengths less than 3000 // NASA CR-37, Tech. Rep. No. 60-20-N, 1966.—170 p.

Публикации по теме диссертации:

1. Дышлевский С.В., Беликов Ю.Е. Особенности переноса излучения в водородной линии Лайман-альфа и их возможная связь с изменениями электронной концентрации в *D*-области

ионосферы // Геомagnetизм и аэрономия, 2020, т. 60, № 3, с. 1—11. (англ. вариант: Dyshlevsky S. V., Belikov Yu. E. Specific Features of Radiation Transfer in the Hydrogen Lyman-alpha Line and Their Possible Relationship with Changes in the Electron Concentration in the Ionospheric *D* Region // Geomagnetism and Aeronomy, 2020, V. 60, No. 3, pp. 325–334, doi: 10.1134/S0016793220030056.)

2. Дышлевский С.В., Беликов Ю.Е. Вариации потоков излучения в водородной линии Лайман-альфа в *D*-области ионосферы // Гелиогеофизические исследования, 2018, вып. 17, с. 64—76.

3. Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 1 // 2018, Гелиогеофизические исследования, вып. 17, с. 77—86 (2018а).

4. Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 2 // Гелиогеофизические исследования, 2018, вып. 18, с. 18—31 (2018б).

5. Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 3 // Гелиогеофизические исследования, 2018, вып. 18, с. 32—39 (2018в).

6. Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю. Влияние тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос солнечного излучения к поверхности Земли в условиях сумерек // Оптика атмосферы и океана, 2019, т.32, № 10, с. 844—847.

7. Дышлевский С.В. Особенности сумеречной и ночной ионизации *E*-области в средних широтах // Гелиогеофизические исследования, 2020, вып. 27, с. 9—22.

Доклады на конференциях:

1. Дышлевский С.В., Беликов Ю. Е. Особенности вариаций потоков излучения в водородной линии Лайман-альфа в *D*-области ионосферы / Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2017) 27—30 июня 2017, г. С.-Петербург-Петергоф.

2. Дышлевский С.В., Беликов Ю. Е. Влияние солнечной активности на распространение солнечного излучения в линии Лайман-альфа в *D*-области ионосферы / Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2019) 25—27 июня 2019, г. С.-Петербург-Петергоф.