



ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТОНКИХ ВЫСОКИХ ОБЛАКОВ И АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ АРКТИКИ

Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.

На основе модели переноса излучения в атмосфере Земли анализируются сумеречный эффект увеличения пропускания солнечного излучения тропосферной облачностью при появлении над ней тонких облаков и аэрозольных слоев. Этот эффект по мнению авторов играет ключевую роль в климатических изменениях в Арктике. Уменьшение солнечной активности, а также перемещение магнитного полюса в последние десятилетия привело к повышению концентрации заряженных частиц в верхней тропосфере и стратосфере Арктики и соответственно к возрастанию оптической толщины тонких облаков и аэрозольных слоев и их общего количества над тропосферной облачностью. Эти процессы в условиях длительного существования тропосферной облачности привели к увеличению переноса солнечного излучения к поверхности Арктики и усиленному таянию ледового покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АРКТИКА, КЛИМАТ, СУМЕРЕЧНЫЙ ЭФФЕКТ РАССЕЯНИЯ, УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдаются значительные климатические изменения в Арктике результатом которых является сильное уменьшение ледового покрытия в этом регионе. Однако как показывает анализ, уменьшение ледового покрытия в Арктике происходит неравномерно. Основная убыль льда наблюдается в Российской зоне Арктики и в море Бофорта, в то же время вблизи берегов Канады сохраняется значительная доля ледового покрытия, включая многолетние льды [Беликов и др. 2018a].

В работах [Беликов и др. 2018a; Беликов и др. 2018b; Беликов и др. 2018c; Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2019] была выдвинута гипотеза, что такой характер изменения ледового покрытия Арктики связан с влиянием движения магнитного полюса в последние десятилетия, а также с изменением солнечной активности. Магнитный полюс в последние примерно 40 лет, двигаясь с большой скоростью и ускоряясь, переместился примерно на 1000 км от берегов Канады к Северному географическому полюсу.

Основной причиной потепления согласно нашей гипотезе является увеличение пропускания солнечного света в последние десятилетия тропосферной облачностью [Беликов и др. 2018b; Беликов и др. 2018c; Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2019a; Беликов и др. 2019b], которая присутствует в Арктике большую часть времени [Schweiger et al., 1999, Wang and Key, 2003]. Это связано с увеличением образования мелкодисперсного аэрозоля и тонких облаков над тропосферной облачностью из-за увеличения концентрации заряженных частиц в атмосфере Арктики. Повышение концентрации заряженных частиц происходит вследствие уменьшения солнечной активности в последние десятилетия, и соответственно увеличения интенсивности галактического космического излучения.

В то же время, неравномерность в убыли ледового покрытия Арктики связана со смещением от берегов Канады к Северному географическому полюсу зоны повышенной концентрации заряженных частиц. Эта зона движется вместе с магнитным полюсом, что приводит к неравномерному распределению аэрозоля и тонких облаков в атмосфере Арктики. По нашим оценкам горизонтальный размер этой зоны (полуширина) составляет в условиях низкой солнечной активности ~2500-3000 км.

Кроме того, существует еще один механизм увеличения пропускания солнечного света тропосферной облачностью, вклад которого в потепление Арктики может оказаться значительным. Увеличение концентрации ионных кластеров в атмосфере Арктики в последние десятилетия в результате уменьшения солнечной активности приводит к усилению электрических токов в атмосфере в результате работы глобальной электрической цепи [Harrison and Usoskin 2010]. Это в свою очередь приводит к росту концентрации заряженных частиц вблизи горизонтальных границ облаков, что способствует образованию мелкодисперсного аэрозоля на этих границах [Belikov and Nikolayshvily, 2016; Harrison and Carslaw 2003; Srivastava and Tripathi 2010]. Особенно важным является увеличение концентрации мелкодисперсного аэрозоля на верхней границе облаков, что способствует увеличению пропускания солнечного света облачностью [Беликов и др. 2018d].

Обычно появление облачности или аэрозольных слоев в атмосфере связывают с уменьшением потока на земной поверхности. Действительно, прямые потоки солнечного излучения ослабляются облачностью и аэрозолем, но рассеянные потоки излучения при этом могут возрасти. Существуют особые условия, когда появление оптически тонких облаков или аэрозольных слоев над оптически плотной облачностью или поглощающей средой увеличивает пропускание рассеянного солнечного света атмосферой. При этом прямое солнечное излучение практически не достигает земной поверхности.

Важными условиями, от которых зависит пропускание атмосферы, являются зенитный угол Солнца и индикатрисы рассеяния тонких рассеивающих слоев и нижней облачности. Увеличение пропускания атмосферы обычно наблюдается при больших зенитных углах Солнца поэтому этот эффект получил название сумеречного. В Арктике сумерки занимают значительную часть времени года, поэтому сумеречный эффект по-нашему мнению играет значительную роль в климатических изменениях в Арктике.

Сумеречный эффект исследовался в целом ряде работ [Michelageli et al., 1989; Michelageli et al., 1992; Davies, 1993; Tsitas and Yung, 1996; Ожигина и др., 1996; Belikov, 2000], однако он рассматривался только применительно к увеличению пропускания УФ излучения озоновым слоем при выбросах вулканического аэрозоля в стратосферу. В работах с участием авторов статьи впервые рассмотрен сумеречный эффект увеличения пропускания солнечного излучения тропосферными облаками при появлении над ними тонкой облачности и аэрозольных слоев [Беликов и др. 2018b; Беликов и др. 2018c; Беликов и др. 2018d; Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2019a; Беликов и др. 2019b]. При этом пропускание солнечного света может возрасти не только в УФ области спектра, но и в видимой и ближней ИК области спектра. В условиях длительного присутствия тропосферной облачности в Арктике [Schweiger et al., 1999, Wang and Key, 2003] увеличение пропускания облачности в видимой и особенно в ближней ИК области спектра является по нашему мнению основной причиной потепления в арктическом регионе.

В данной работе продолжается исследование сумеречного эффекта увеличения прозрачности атмосферы при появлении тонких облаков и аэрозольных слоев над тропосферной облачностью. Однако в отличие от предыдущих работ здесь будет проведен анализ возникновения сумеречного эффекта на основе моделирования угловых зависимостей интенсивностей и высотных профилей интенсивностей, а также потоков солнечного излучения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

На рисунках 1 и 2 показаны исходные данные для моделирования переноса излучения в условиях, близких к условиям Арктики. Как упоминалось выше, в Арктике большую часть времени в нижней тропосфере присутствует облачность [Schweiger et al., 1999, Wang and Key, 2003], оптическая толщина которой в видимой области спектра может достигать ~10-100 и более. В ближней ИК области спектра эта толщина уменьшается.

Для моделирования сумеречного эффекта в видимой и ближней ИК области спектра мы приняли, что оптическая толщина нижнего слоя облачности составляет 4 и облачность распределена

равномерно на высотах от 0 до 10 км (рис.1). В то же время, верхний слой тонкой облачности расположен на высоте 10-11 км над нижнем слоем (рис.1). Это может быть также и мелкодисперсная фракция аэрозоля на верхней горизонтальной границе облака, созданию которой способствует работа глобальной электрической цепи [Беликов и др., 2018d]. Эта геометрия соответствует также ситуации, когда оптически тонкая облачность или аэрозольный слой находятся на больших высотах в верхней тропосфере или стратосфере.

Индикатриса рассеяния верхнего слоя принималась равной рэлеевской. Индикатриса рассеяния для нижнего слоя вычислялась следующим образом. Размер частиц облаков в нижней тропосфере сильно может сильно различаться. В слоистых облаках этот размер может изменяться от нескольких микрон до 10 мкм и более [Мак-Картни, 1979].

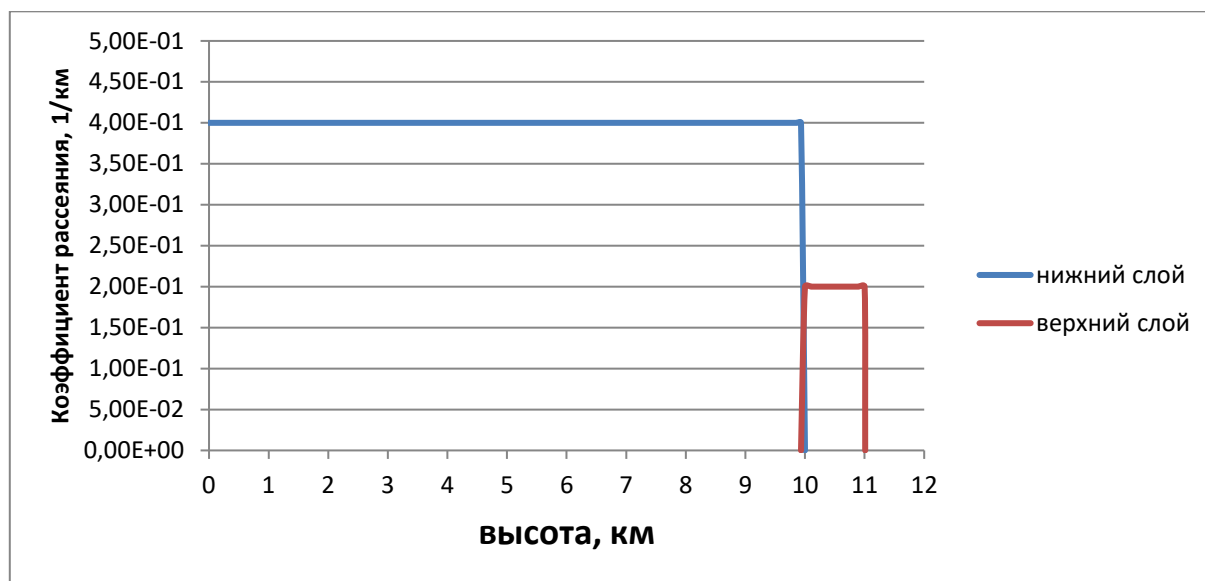


Рис. 1. Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта двухслойной рассеивающей атмосферы. Нижний рассеивающий слой имеет оптическую толщину $\tau=4$, индикатриса рассеяния представлена на рис. 2. Верхний слой имеет оптическую толщину $\tau=0.2$, индикатриса рассеяния рэлеевская.

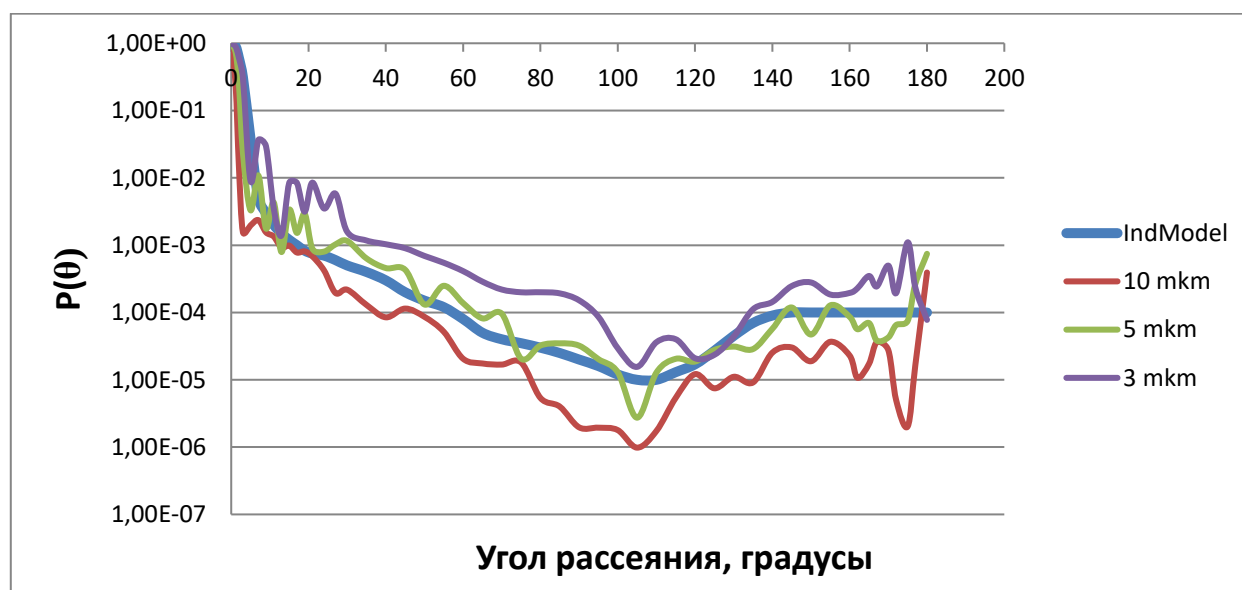


Рис. 2. Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта двухслойной рассеивающей атмосферы. Показаны рассчитанные по теории Ми индикатрисы рассеяния $P(\theta)$ частиц облаков различных размеров, а также модельная индикатриса, соответствующая нижнему слою облачности на рис.1.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов индикатрис согласно теории Ми для размеров частиц 3, 5 и 10 мкм для длины волны 500 мкм. На этом же рисунке показана некоторая средняя индикатриса, которая использовалась для моделирования рассматриваемого эффекта.

В теории Ми расчеты оптических величин инвариантны относительно параметра $2\pi r/\lambda$, где r – радиус частицы, λ – длина волны падающего излучения. Учитывая этот факт, очевидно, что результаты расчетов также будут справедливы для различных длин волн и размеров частиц при неизменном указанном параметре. Например, для длины волны 1 мкм и размерах 6, 10 и 20 мкм результаты расчетов индикатрис будут справедливы и для длины волны 1 мкм в ближней инфракрасной области. Таким образом, проводимые расчеты переноса излучения в двухслойной среде будут также в определенном смысле справедливы и для ближней инфракрасной области вне сильных полос поглощения.

Представленные ниже расчеты сделаны на основе модели переноса излучения в сферической атмосфере с учетом эффектов многократного рассеяния [Беликов и др., 2018e; Беликов и др., 2018f; Беликов и др., 2018g].

3. ОСОБЕННОСТИ УГЛОВОГО И ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как было отмечено выше, обычно появление облаков и аэрозольных слоев связывают с уменьшением потока излучения на земной поверхности, что не всегда верно. Несмотря на то, что в ряде работ был проведен анализ сумеречного эффекта увеличения потока излучения при появлении оптически тонких рассеивающих слоев над тропосферной облачностью [Беликов и др. 2018b; Беликов и др. 2018c; Беликов и др. 2018d; Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2019a; Беликов и др. 2019b], необходимо более детально разобраться в причинах этого явления.

Естественно возникает вопрос, а как изменяются потоки прямого и рассеянного излучения внутри облака и существует ли при этом сумеречный эффект увеличения потока? Высотный профиль потоков важен для определения баланса энергии, влияющего на испарение или образование капель внутри облака.

Другой важный вопрос связан с угловой зависимостью интенсивностей рассеянного солнечного излучения. Предположим, что при появлении тонких облаков и аэрозольных слоев увеличиваются потоки излучения на земной поверхности или внутри облака на определенной высоте. А как изменяются при этом интенсивности рассеянного излучения в различных направлениях, при каких углах рассеяния или азимутальных углах происходит увеличение интенсивностей рассеянного излучения, а при каких возможно их уменьшение. Этот вопрос важен как для понимания сумеречного эффекта, так и для анализа экспериментальных измерений потоков и интенсивностей солнечного излучения в атмосфере Земли в условиях сумерек. В этом вопросе поможет разобраться анализ углового и высотного распределения интенсивностей и потоков излучения.

Наконец мы хотели бы отметить, что расчеты потоков и интенсивностей излучения с учетом вклада многократного рассеяния могут быть связаны с большой затратой компьютерного времени. Поэтому в работе [Беликов и др. 2018d; Беликов и др. 2019b] был рассмотрен вопрос о том, чтобы оценивать возможность сумеречного увеличения потока на основании быстрых расчетов, сделанных в однократном приближении. Сравнение приведенных ниже расчетов выполненных как в однократном, так и в многократном приближении позволит оценить указанную возможность, а также определить вклад многократных эффектов в рассчитываемые величины потоков и интенсивностей.

На рисунке 3 показано угловое распределение интенсивности рассеянного излучения вдоль плоскости солнечного вертикала на земной поверхности для однослойной и двухслойной атмосферы как в приближении однократного рассеяния (рис.3а, рис.3б), так и с учетом вклада многократно рассеяния (рис.3в). Единицы измерений интенсивностей и потоков приводятся здесь и далее в единицах потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы. Обозначения интенсивностей рассеянного излучения следующее: 0_2o и 0_2m – интенсивность на высоте 0 км для двухслойной атмосферы соответственно в приближении однократного рассеяния и с учетом многократных эффектов; 0_1o и 0_1m – аналогичное обозначение интенсивностей для однослойной атмосферы.

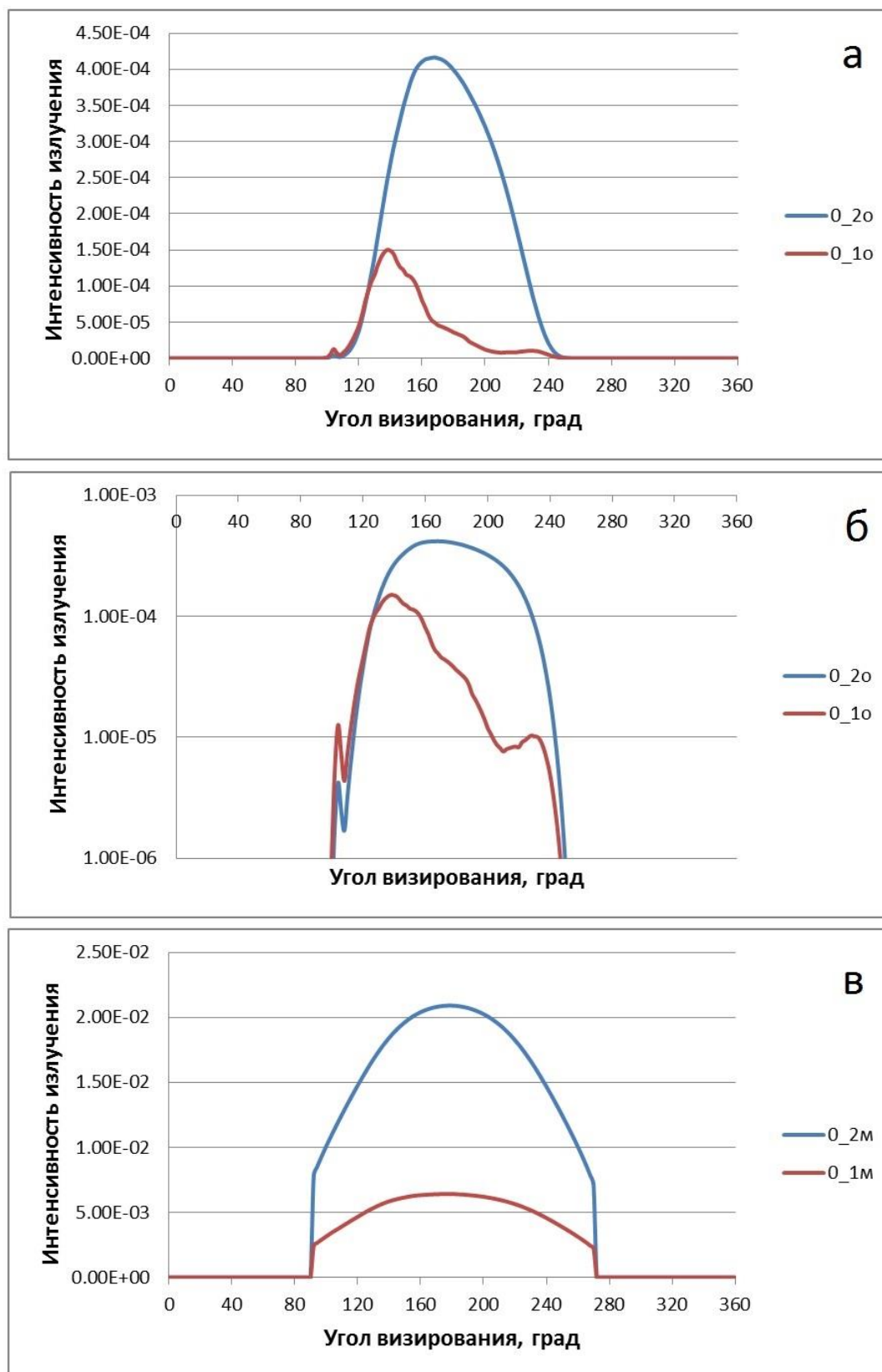


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения вдоль плоскости солнечного вертикала на земной поверхности. Угол визирования отсчитывается от направления в надир. Зенитный угол Солнца составляет 80 градусов. Представлены расчеты для однослойной (красная линия) и двухслойной (синяя линия) атмосферы в приближении однократного рассеяния (а,б) и с учетом многократных эффектов (в) (подробнее см. текст).

Угол нуль градусов соответствует направлению визирования в нади́р. Углы 90, 180 и 270 градусов определяют соответственно направления визирования вдоль горизонта в солнечном направлении, в зенит и вдоль горизонта в антисолнечном направлении. Зенитный угол Солнца при этом составлял 80 градусов.

Расчеты проводились для альбедо поверхности равным нулю, поэтому излучение с нижней полусферы отсутствует. Это означает, что интенсивности рассеянного излучения в диапазонах углов (0-90) и (270-360) градусов равны нулю для случая визирования с земной поверхности (рис.3).

Погрешности расчетов согласно [Беликов Ю.Е., 2018g] лежат в пределах 1-15%.

Анализ рис.3 показывает, что интенсивность излучения двухслойной атмосферы в однократном приближении значительно превышает интенсивность излучения однослойной атмосферы для большинства направлений визирования кроме небольшого диапазона углов визирования вблизи солнечного направления. При этом при угле примерно 100 градусов, соответствующем направлению на Солнце, существует небольшой пик яркости вследствие сильного возрастания индикатрисы рассеяния в нижнем слое в этом направлении (рис.2).

Многократное рассеяние приводит к тому, что интенсивности рассеянного излучения сильно возрастают во всех направлениях в плоскости солнечного вертикала и распределение интенсивности становится симметричным в плоскости солнечного вертикала относительно зенита. Особенно сильное выравнивание интенсивности за счет эффектов многократного рассеяния наблюдается относительно направления в зенит для случая однослойной атмосферы. Это происходит видимо в результате переноса многократного излучения из полусферы углов визирования, соответствующих солнечному направлению в полусферу в антисолнечном направлении.

Анализ рис.3б показывает, что при учете многократного вклада сохраняется значительное превышение излучения двухслойной атмосферы над однослойной практически для всех направлений визирования.

На рисунках 4-6 показаны те же зависимости, что и на рис.3 только для высот соответственно 4, 8, 9.8 км. В отличие от рис.3 на этих рисунках интенсивность рассеянного излучения в нижней полусфере углов визирования не равна нулю.

Анализ рисунков 4-6 показывает, что с увеличением высоты растет вклад потока излучения в околосолнечном направлении. Указанный эффект наблюдается как в однократном приближении, так и с учетом многократного рассеяния.

При этом в узкой области углов визирования околосолнечного направления интенсивности для случая однослойной атмосферы превышают интенсивности, соответствующие двухслойной атмосфере. В то же время, вне этого узкого диапазона углов визирования интенсивности в двухслойной атмосфере больше соответствующих интенсивностей в однослойной атмосфере (рис.4-6). Поэтому полный поток рассеянного излучения в двухслойной атмосфере для рассматриваемых высот превосходит соответствующие потоки для однослойной атмосферы (см. далее).

На рисунке 7 показана угловая зависимость интенсивностей над нижним слоем на высотах 10.3 и 10.8 км. Как видно из рисунка 7, угловое распределение интенсивностей вдоль плоскости солнечного вертикала является в значительной степени симметричным относительно направления в зенит как в приближении однократного рассеяния, так и с учетом многократного вклада. Это является следствием того факта, что рассеяние в верхнем слое определяется рэлеевским рассеянием и индикатриса рассеяния является достаточно гладкой функцией с небольшой асимметрией относительно направления в зенит при зенитном угле Солнца 80 градусов.

При этом существенное влияние на угловое изменение наряду с индикатрисой оказывает изменение зенитного угла направления визирования. При визировании вблизи горизонта интенсивности рассеянного излучения значительно возрастают. Как видно из рис. 7в на высоте 10.8 км расстояния между пиками, соответствующим визированию вблизи горизонта в солнечном и антисолнечном направлении, увеличивается по сравнению с расстоянием между пиками, соответствующим высоте 10.3 км. Это происходит вследствие уменьшения оптической толщины на большей высоте и увеличения прозрачности атмосферы вблизи горизонта.

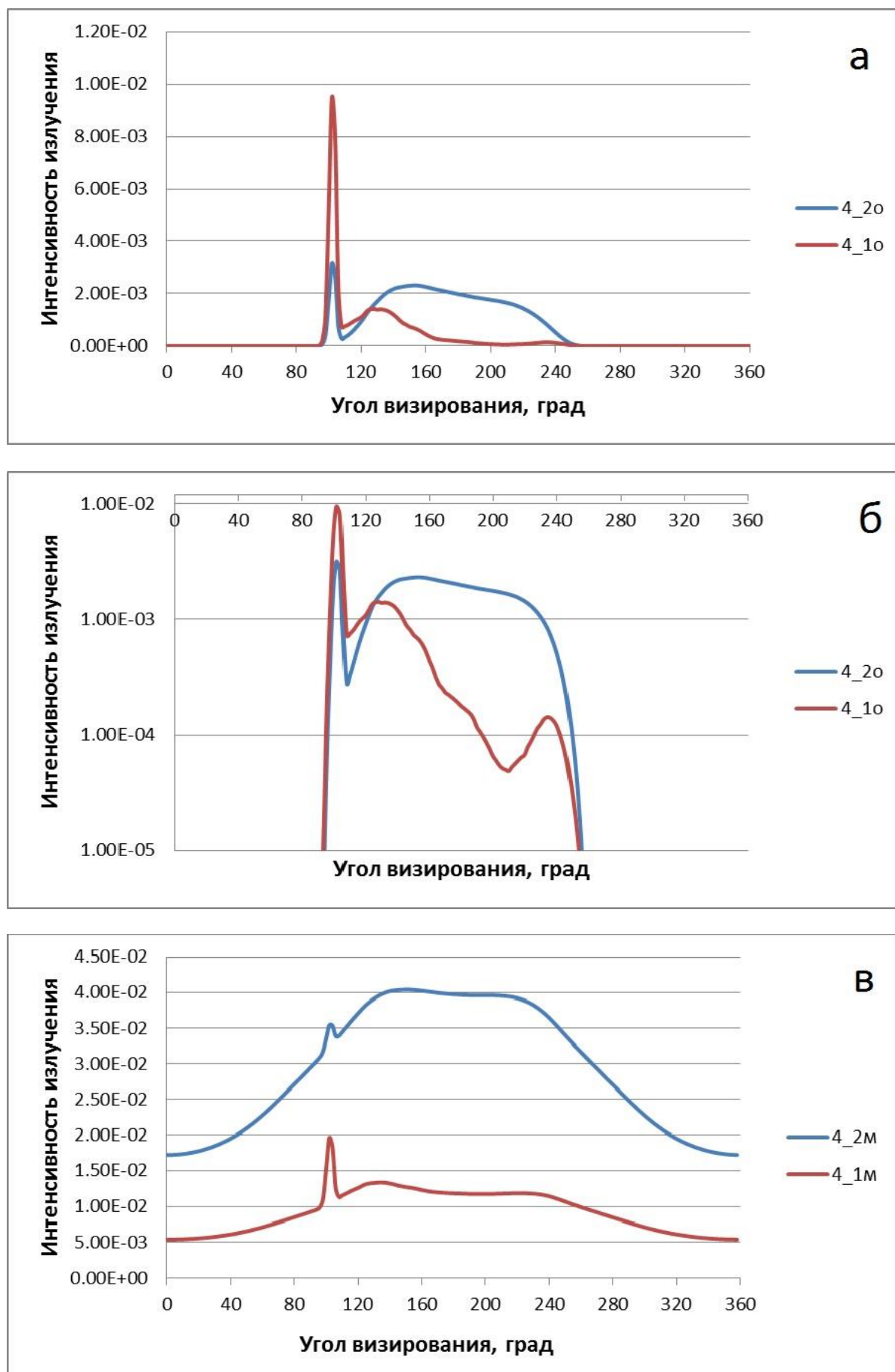


Рис.4. То же самое, что и на рис.3, только для высоты 4 км

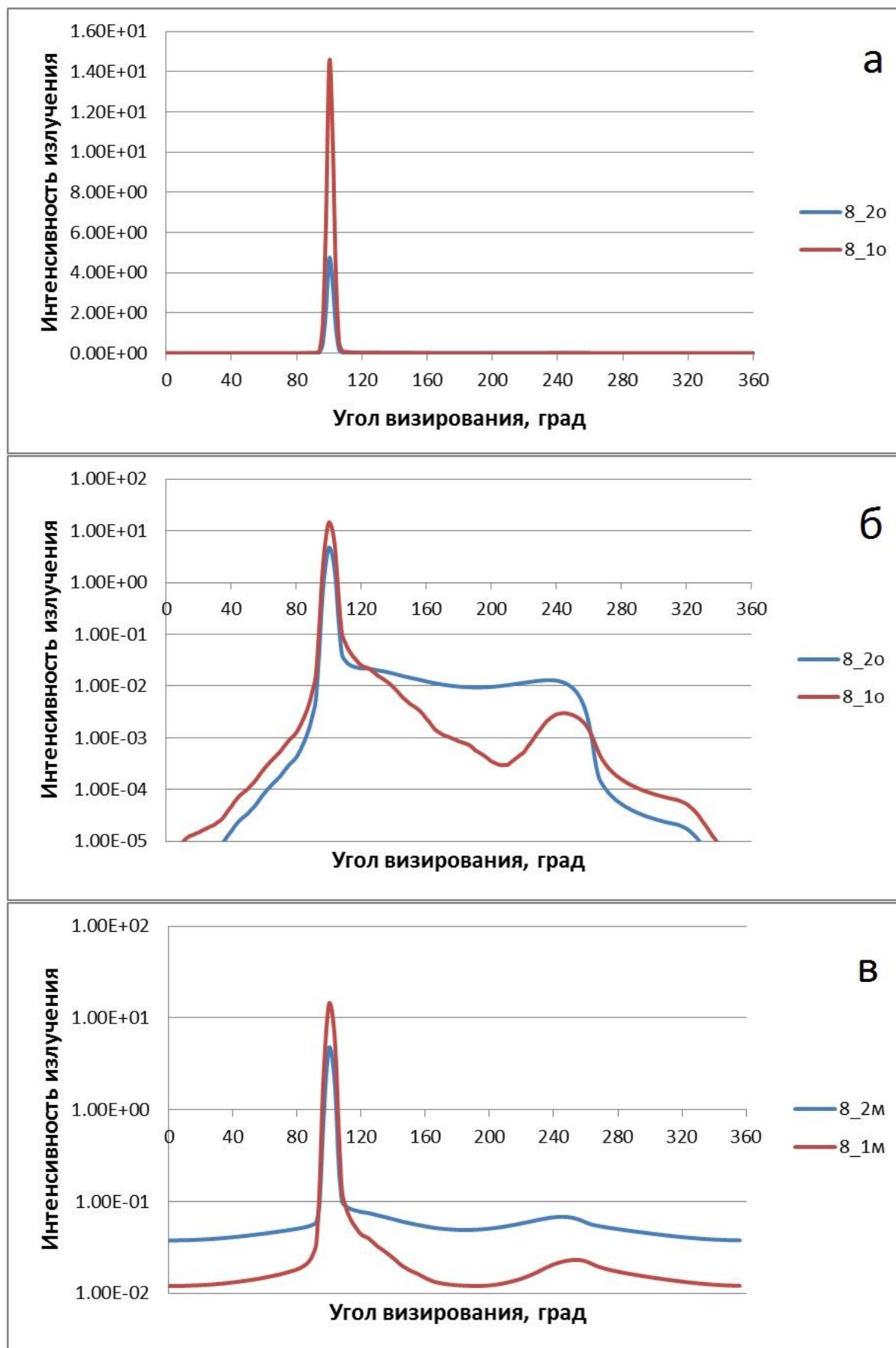


Рис.5. То же самое, что и на рис.3, только для высоты 8 км

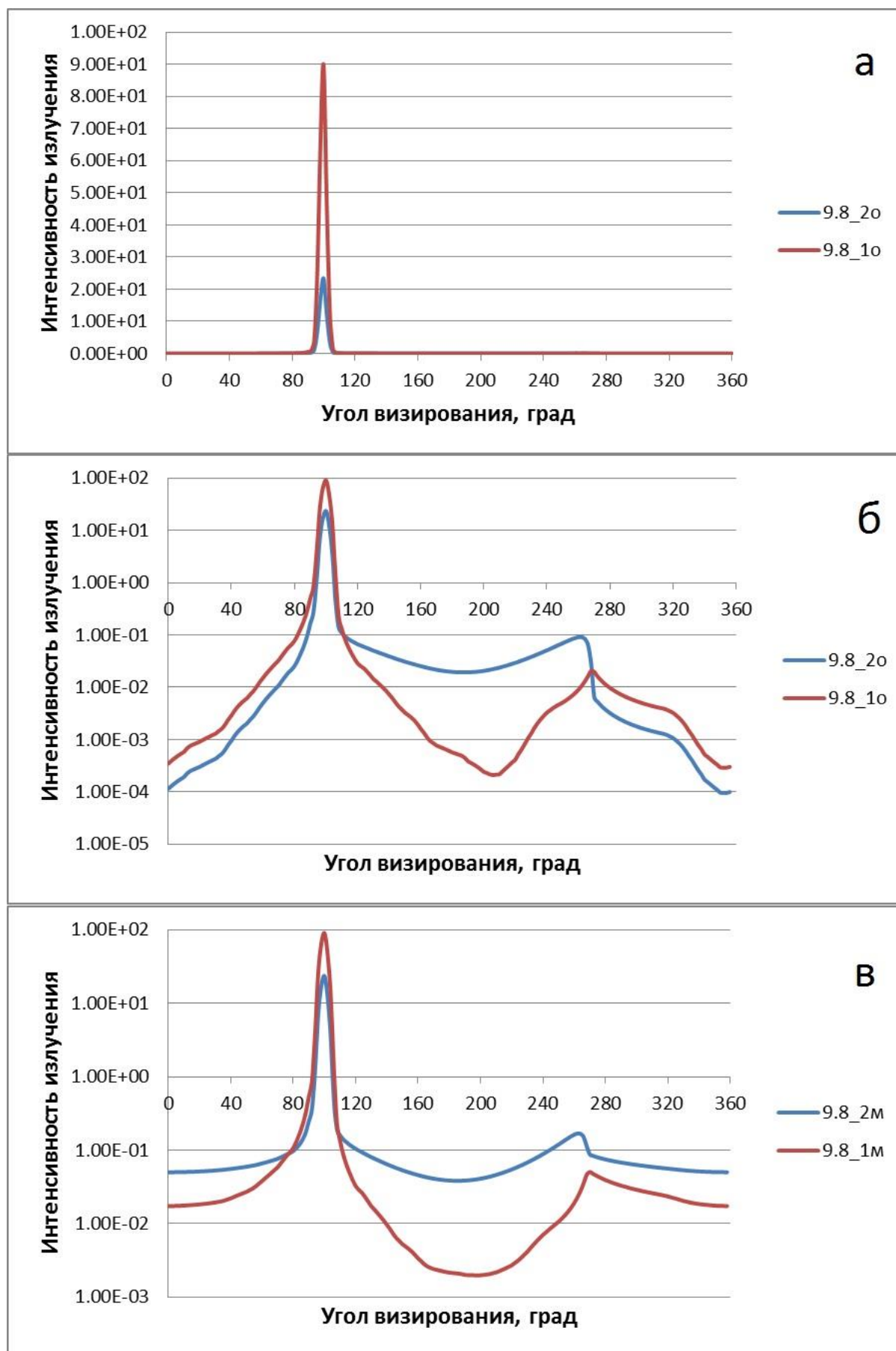


Рис.6. То же самое, что и на рис.3, только для высоты 9.8 км

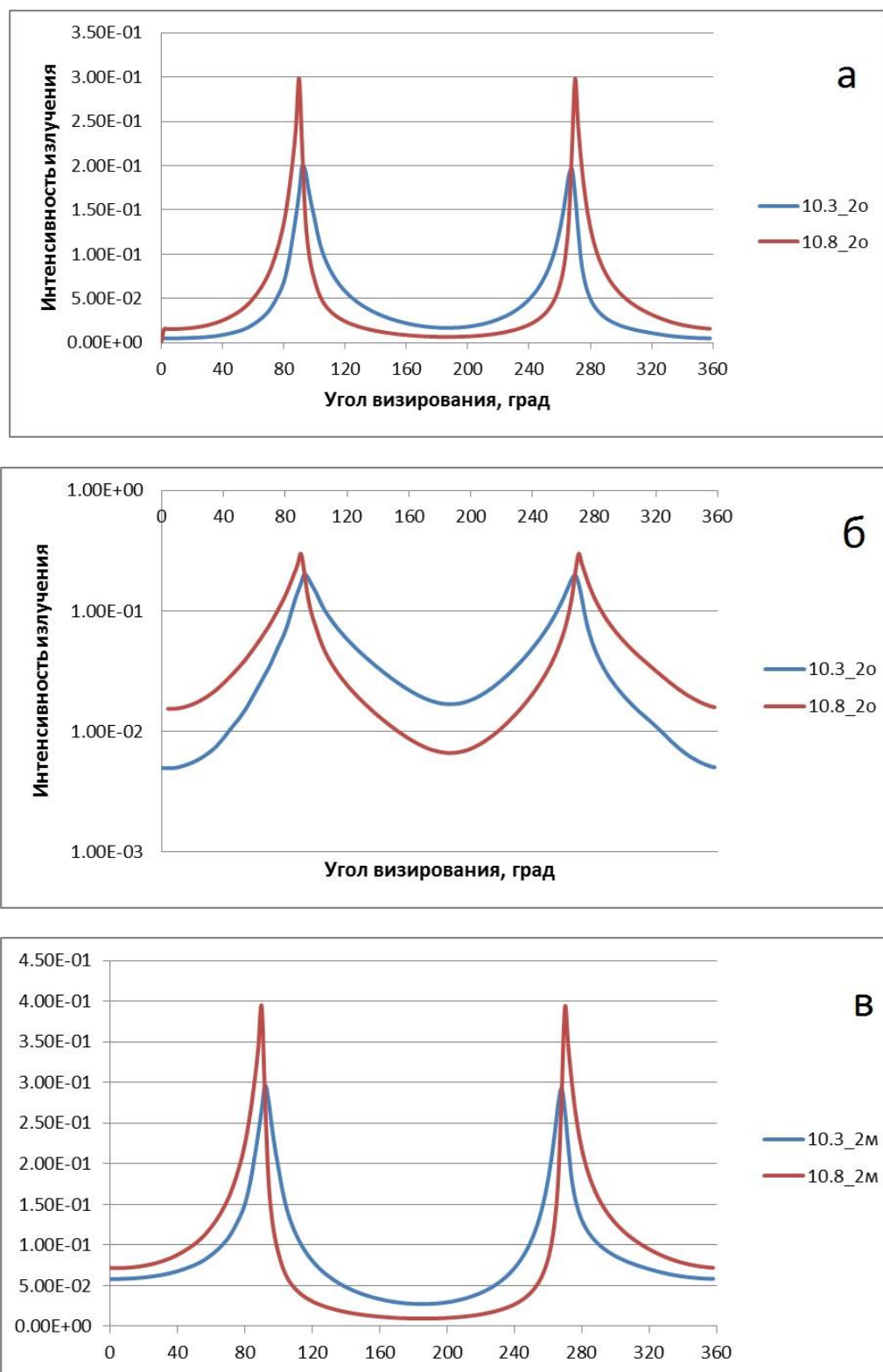


Рис.7. Угловая зависимость интенсивностей излучения над поверхностью нижнего слоя на высотах 10.3 и 10.8 км в приближении однократного рассеяния (а,б), и с учетом вклада многократного рассеяния (в).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рисунке 8 представлены результаты расчетов потоков излучения на различных высотах для однослойной (а) и двухслойной (б) атмосферы. Как видно из этого рисунка, потоки излучения с учетом многократного вклада существенно превышает потоки излучения в приближении однократного рассеяния особенно вблизи земной поверхности. При этом прямой поток сравнивается с рассеянным потоком только на высотах, превышающих 8-9 км, т.е. около верхней границы нижнего слоя.

Сравнение потоков излучения для однослойной и двухслойной атмосферы приведены на рис.9. При этом на рис. 9а сравниваются как прямые, так и рассеянные потоки излучения, в то время как на рис.9б приводится сравнение полных потоков излучения. Анализ рис.9 показывает, что прямой поток излучения для однослойной атмосферы превышает прямой поток для двухслойной атмосферы. Несмотря на это, рассеянные и полные потоки излучения для двухслойной модели превышают потоки излучения для однослойной атмосферы практически во всем нижнем слое.

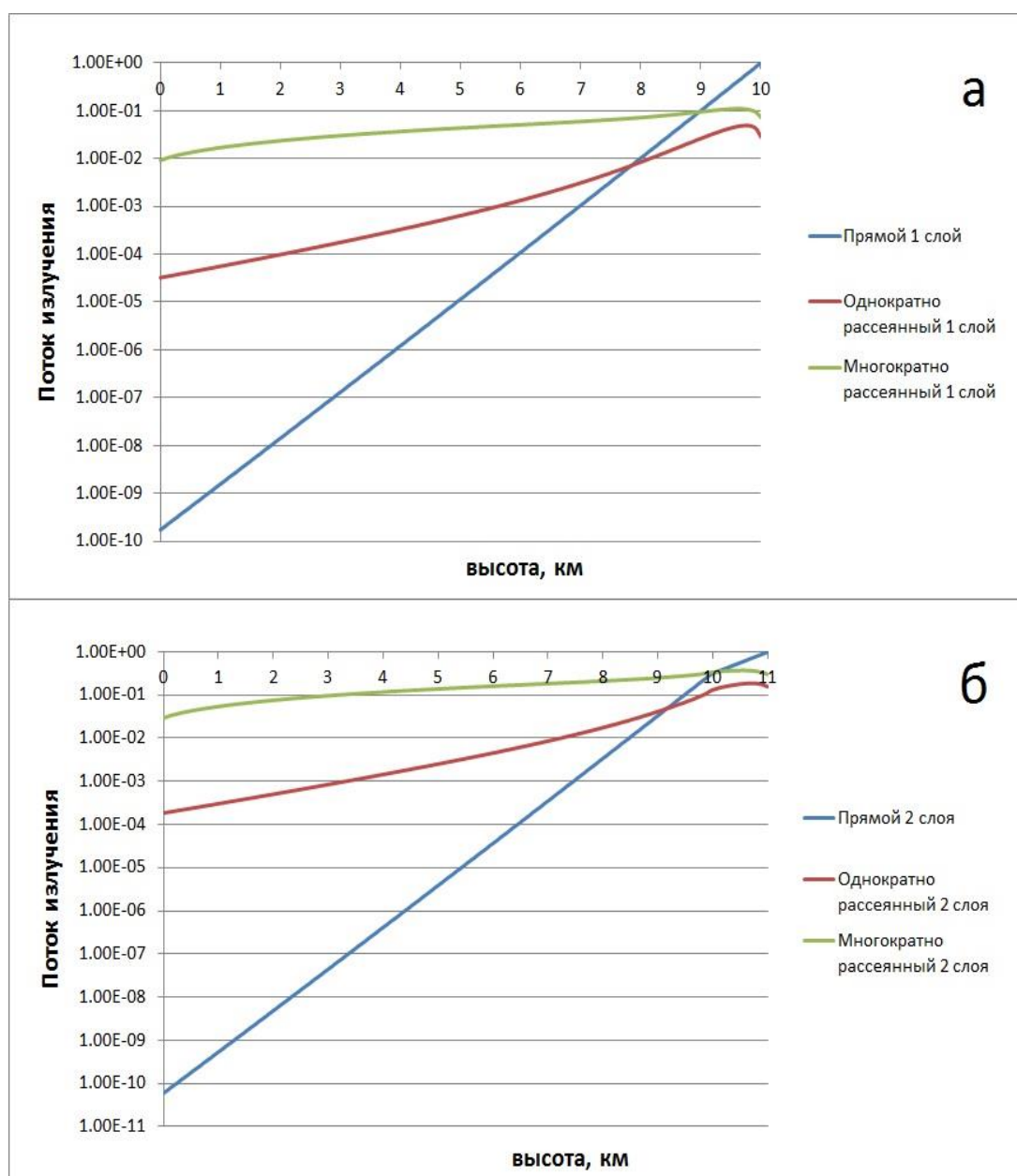


Рис. 8. Потоки излучения для однослойной (а) и двухслойной модели атмосферы (б) на различных высотах в приближении однократного рассеяния и с учетом вклада многократного рассеяния. Зенитный угол Солнца 80 градусов.

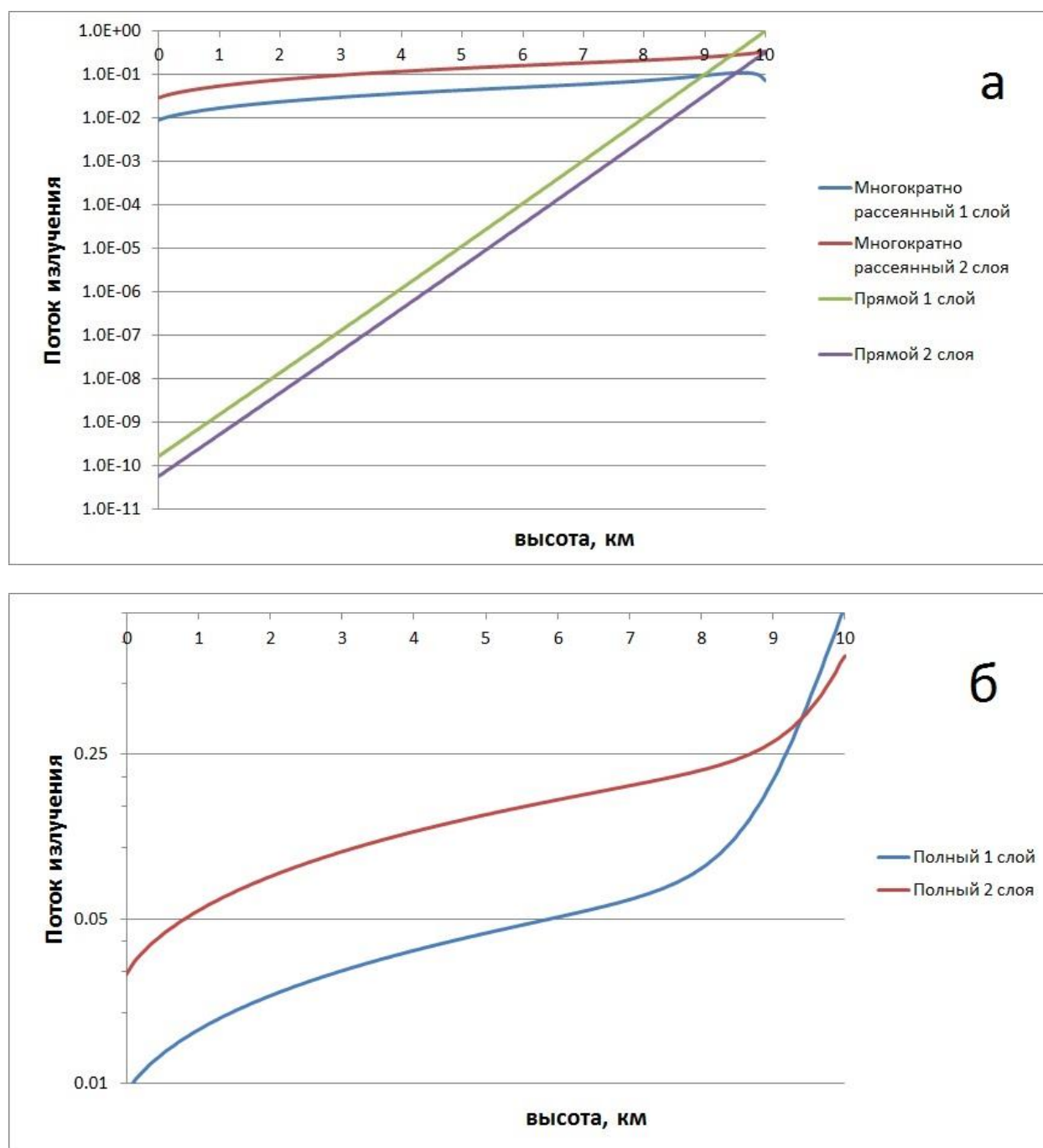


Рис. 9. Сравнение потоков излучения с учетом многократного рассеяния для однослойной и двухслойной модели атмосферы. Показаны высотные профили прямых и рассеянных потоков излучения для соответствующих моделей атмосферы (а). Также показаны высотные профили полных потоков излучения для однослойной и двухслойной модели атмосферы с учетом многократного рассеяния (б).

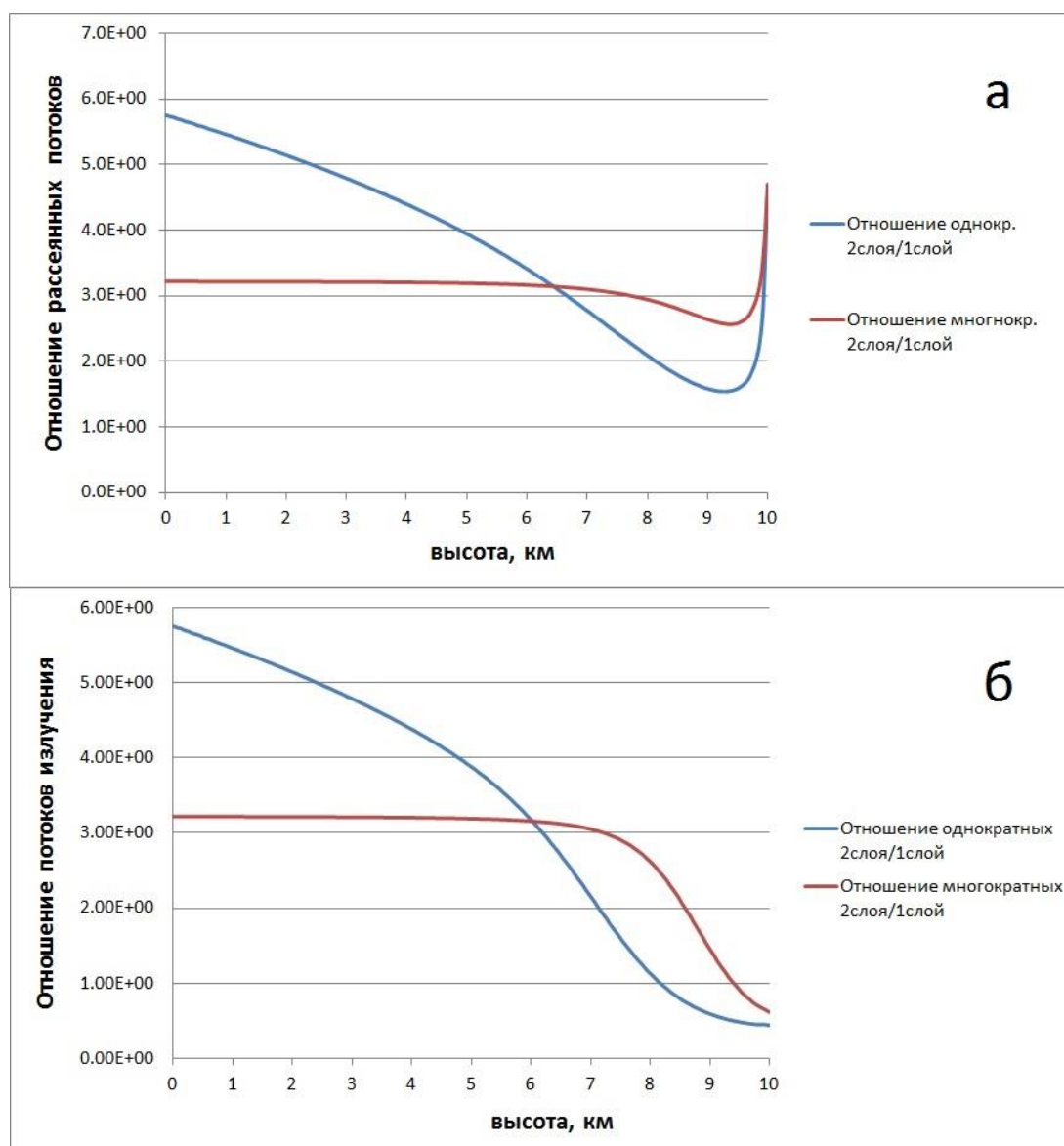


Рис.10. Изменение с высотой отношения рассеянных (а) и полных (б) потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на различных высотах. Показаны расчеты для двух случаев: в приближении однократного рассеяния и с учетом многократных эффектов.

На рисунке 10 показано отношения рассеянных и полных потоков излучения в двухслойной атмосфере к аналогичным потокам в однослойной атмосфере для различных высот, как в приближении однократного рассеяния, так и с учетом многократного вклада.

Анализ рисунка 10а показывает, что отношение рассеянных потоков, как в однократном приближении, так и с учетом многократного рассеяния внутри нижнего облака превышает единицу. Это означает, что добавление второго верхнего слоя увеличивает потоки рассеянного излучения в нижнем слое. При этом значительный рост рассматриваемых отношений наблюдается вблизи верхней границе нижнего слоя. Учет многократного излучения уменьшает отношение соответствующих рассеянных потоков в нижней части атмосферы на высотах ~0-6.5 км, в то время как происходит увеличение этого отношения на высотах ~6.5-10 км.

Прямой поток в двухслойной атмосфере вблизи границы нижнего слоя меньше соответствующего прямого потока в однослойной атмосфере (рис. 9а). Поэтому вблизи границы второго слоя отношение полных потоков излучения существенно меняется по сравнению с рассеянными потоками излучения. Тем не менее, отношение соответствующих полных потоков излучения превышает единицу в значительной части нижнего слоя, как в приближении однократного рассеяния, так и с учетом многократного вклада.

Из рисунка 10б видно, что за исключением тонкого полукилометрового слоя, практически во всем нижнем слое и на земной поверхности, полные потоки излучения для двухслойной атмосферы превышают полные потоки излучения для однослойной атмосферы при учете многократного рассеяния.

При учете многократного рассеяния аналогично, как и для рассеянных потоков (рис. 10а), отношение соответствующих полных потоков в нижней части атмосферы на высотах ~0-6.2 км уменьшается, в то время как происходит увеличение этого отношения на высотах ~6.2-10 км (рис. 10б).

В таблице приведены прямые и рассеянные потоки излучения для однократного приближения и с учетом вклада многократного излучения для различных высот внутри и на выходе нижнего слоя. Как видно из этой таблицы для зенитного угла Солнца 80 градусов, полные потоки излучения, включая прямые потоки, для двухслойной атмосферы, как отмечалось выше, практически во всем высотном диапазоне превышают соответствующие потоки в однослойной атмосфере.

Таблица. Изменение с высотой прямых, рассеянных и полных потоков излучения для однослойной и двухслойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Высота, км	Рассеянный 1	Прямой 1	Сумма 1	Рассеянный 2	Прямой 2	Сумма 2
0	9.05E-03	1.72E-10	9.05E-03	2.91E-02	5.97E-11	2.91E-02
0.2	1.10E-02	2.67E-10	1.10E-02	3.54E-02	9.26E-11	3.54E-02
1	1.69E-02	1.55E-09	1.69E-02	5.42E-02	5.37E-10	5.42E-02
2	2.36E-02	1.42E-08	2.36E-02	7.57E-02	4.87E-09	7.57E-02
3	3.01E-02	1.31E-07	3.01E-02	9.66E-02	4.47E-08	9.66E-02
4	3.67E-02	1.22E-06	3.67E-02	1.18E-01	4.14E-07	1.18E-01
5	4.35E-02	1.15E-05	4.35E-02	1.39E-01	3.88E-06	1.39E-01
6	5.08E-02	1.09E-04	5.09E-02	1.61E-01	3.67E-05	1.61E-01
7	5.94E-02	1.05E-03	6.04E-02	1.84E-01	3.51E-04	1.84E-01
8	7.18E-02	1.02E-02	8.20E-02	2.11E-01	3.40E-03	2.15E-01
9	9.48E-02	1.00E-01	1.95E-01	2.50E-01	3.33E-02	2.83E-01
9.8	1.05E-01	6.30E-01	7.36E-01	3.08E-01	2.08E-01	5.15E-01
10	7.23E-02	1.00E+00	1.07E+00	3.39E-01	3.17E-01	6.56E-01

Отметим, что хотя в данной работе не рассматривается поглощение в нижнем слое атмосферы, анализ показывает, что наличие поглощения в этом слое усиливает относительный эффект увеличения потока излучения для двухслойной атмосферы по сравнению с однослойной в условиях сумерек [Беликов и др., 2019b]. Из этого следует важный вывод о том, что появление тонких облаков и аэрозольных слоев над тропосферной облачностью может приводить к нагреванию и, возможно к испарению капель нижних тропосферных облаков, т.е. к исчезновению нижней облачности и усилению потепления в Арктике.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе решения уравнения переноса излучения в сферической атмосфере показаны особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на пропускание солнечного излучения тропосферной облачностью в сумеречных условиях. Для анализа этих особенностей использовалось сравнение переноса излучения в однослойной и двухслойной модели облачности.

При этом показано, что в сумеречных условиях для зенитного угла 80 градусов потоки излучения в двухслойной атмосфере превышают соответствующие потоки излучения однослойной атмосферы не только на земной поверхности, но и внутри большей части нижнего слоя облачности за исключением небольшого диапазона высот вблизи верхней границы нижней облачности.

Этот эффект при наличии поглощения в нижней облачности по мнению авторов может приводить к нагреванию и испарению капель тропосферных облаков, т.е. к исчезновению облачности и таким образом к значительному потеплению Арктики и таянию ледового покрытия.

Анализ угловых распределений интенсивности для различных высот внутри нижнего слоя показывает, что интенсивности излучения в двухслойной атмосфере превышают интенсивности излучения в однослойной атмосфере практически при всех углах визирования в плоскости солнечного вертикала. Исключение составляет небольшой диапазон углов вблизи солнечного направления, в котором интенсивность в однослойной атмосфере может превышать интенсивность в двухслойной атмосфере. В основном это проявляется в верхней части нижнего слоя.

Причиной такого распределения интенсивностей и соответственно возникновения сумеречного эффекта является сильное ослабление нижним слоем однократно рассеянного излучения в антисолнечном направлении, которое близко горизонтальному.

При рэлеевском рассеянии излучение более равномерно распределено по углам рассеяния, что позволяет формировать источники кратного рассеяния на большей глубине в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной. Это приводит к увеличению потоков излучения в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной не только на уровне Земли, но и внутри большей части нижнего облака.

Сравнение рассеянных потоков излучения в однократном приближении с потоками, где учитывалось многократное рассеяние, показывает, что однократное приближение переоценивает сумеречный эффект в нижней части облака и недооценивает в верхней части тропосферного облака. При этом рассеянные потоки излучения на всех высотах внутри тропосферного облака в однократном приближении, также как и потоки с учетом многократного излучения увеличиваются в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной. Поэтому на основе расчетов в однократном приближении можно быстро оценивать возможность существования сумеречного эффекта. Этот предварительный вывод необходимо в дальнейшем уточнить.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №18-05-00812-а.

ЛИТЕРАТУРА

- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 1 // Гелиогеофизические исследования. Вып. 19, 1–14, 2018а.
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFf0419ce08313bb812959eb7e555cbf9c.pdf>
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 2 // Гелиогеофизические исследования. Вып. 19, 15 – 24, 2018b.
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFef4210139ca567a36a294e4ccce1d0e7.pdf>
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 3 // Гелиогеофизические исследования. Вып. 19, 25 – 31, 2018с.
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLF2abce35218731ef26bce25a68993e493.pdf>
- Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю. Возможное влияние работы глобальной электрической цепи на структуру облаков и их прозрачность в условиях сумерек // Гелиогеофизические исследования. 2018d. Вып. 19. С. 32-40.
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFaed4ad69cd2b39e2df36794bc695b888.pdf>
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б. Сумеречный эффект влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на прозрачность атмосферы и климат. Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД – 2017) 27-30 июня 2017 г. С. Петербург – Петродворец, тезисы доклада, с.175-177, <http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard17/thesis.pdf>
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Влияние движения магнитного полюса и изменения солнечной активности на прозрачность атмосферы и климат Арктики. . Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД – 2019) 25-27

- июня 2019 г. С. Петербург – Петродворец, тезисы доклада, с.186-187, 2019а, <http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard19/thesis.pdf>
- 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 2019b // Оптика атмосферы и океана, т.32, № 10, 844-847, 2019b.
 - Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 1. Гелиогеофизические исследования выпуск 17, 77-86, 2018e. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe3371719b186369bf3dcbe9e8106823d.pdf>
 - Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 2. Гелиогеофизические исследования, выпуск 18, 18-31, 2018f. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLF80dc9597df5aa58bb8ecbc02fb50f50e.pdf>
 - Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 3. Гелиогеофизические исследования выпуск 18, 32-39, 2018g. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe11eaf48d83f189c910ebd5575972e52.pdf>
 - Мак-Картни Э. Оптика атмосферы // М: Мир, 1979. – 421 с.
 - Ожигина Н.А., Е.В. Розанов, И.Л. Кароль. Роль стратосферного аэрозоля в формировании потока ультрафиолетовой радиации при больших зенитных углах Солнца // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 1996. Т. 32. №4. с. 456—463.
 - Belikov Yu.E. Dependence of Solar Radiation in the Polar Stratosphere on the Distribution of Ozone and Stratospheric Aerosol // Phys. Chem. Earth (B). 2000. V. 25. No. 5—6. p. 423—426.
 - Belikov Yu., Nikolayshvili S. The Role of the Dipole Interaction of Molecules with Charged Particles in the Polar Stratosphere // Journal of Earth Science and Engineering. 2016. V. 6 P. 115—149, doi: 10.17265/2159-581X/2016.03.001
 - Davies R. Increased transmission of ultraviolet radiation to the surface due to stratospheric scattering // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. No. D4. p. 7251—7253.
 - Harrison R.G., Usoskin I. Solar modulation in surface atmospheric electricity// Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2010, V.72, Issues 2-3, p.176-182.
 - Harrison, R. G., and Carslaw, K. S. 2003. “Ion-Aerosol-Cloud Processes in the Lower Atmosphere.” Review of Geophysics 41 (3): 1012.
 - Michelangeli D.V., Allen M., Yung Y.L. The effect of El Chichon volcanic aerosols on the chemistry of the stratosphere through radiative coupling // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. p. 18429—18443.
 - Michelangeli D.V., Allen M., Yung Y.L., Shia R.-L., Crisp D., Eluszkiewicz J. Enhancement of atmospheric radiation by an aerosol layer // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. p. 865—874.
 - Schweiger A.J., Lindsay R.W., Key J.R., Francis J.A. Arctic clouds in multilayer satellite data sets // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26(13). p. 1845—1848.
 - Srivastava, A. K., and Tripathi, S. N. 2010. “Numerical Study for Production of Space Charge within the Stratiform Cloud.” J. Earth Syst. Sci. 119 (5): 627-38.
 - Tsitas S.R., Yung Y.L. The effect of volcanic aerosols on ultraviolet radiation in Antarctica // Geophys. Res. Lett. 1996. V.23. p. 157—160.
 - Wang X., Key R.J. Recent trends in arctic surface, cloud, and radiation properties from space // Science. 2003. V. 299 (5613). p. 1725—1728.

THE SPECIFIC FEATURES OF THE EFFECT OF THIN HIGH ALTITUDE CLOUDS AND AEROSOL LAYERS ON THE RADIATION TRANSFER TO THE EARTH SURFACE IN ARCTIC

Belikov Yu.E., Dyshlevsky S.V., Repin A.Yu.

The transfer radiation model is used for the simulating the twilight effect of the radiation transmission enhancement by the tropospheric cloudiness in the presence of thin clouds and aerosol layers over it. It is suggested that the twilight effect plays a key role in the climatic change in Arctic. The decrease of the solar activity as well as the magnetic pole motion

during last decades brought to the charged particles concentration rise in the Arctic upper troposphere and stratosphere and consequently to the thin clouds and aerosol layers optical depths rise and the total thin clouds amount increase over the tropospheric cloudiness. These processes under the conditions of the long-term existence of the tropospheric cloudiness caused the solar radiation transmission enhancement to the Arctic zone surface and accelerated sea ice cover loss.

KEY WORDS: ARCTIC, CLIMATE, TWILIGHT SCATTERING EFFECT, RADIATION ANGULAR DISTRIBUTION