ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 26, 36 - 49, 2020

Поступила в редакцию 21.06.2020 г.
Опубликована 21.08.2020 г.

ISSN 2304-7380

УДК 551.521.31:551.583

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

Ю. Е. Беликов[1], С. В. Дышлевский[1], А. Ю. Репин[1]

[1]Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

Во второй части работы, посвященной эффекту увеличения пропускания солнечного излучения тропосферной облачностью при появлении над ней тонких облаков и/или аэрозольных слоев, показано, что появление тонких рассеивающих слоев над тропосферной облачностью может усиливать перенос солнечного излучения к поверхности земли не только в условиях сумерек, но и при достаточно небольших зенитных углах Солнца, а также способствовать нагреванию и, возможно, разрушению нижней облачности. Этот эффект по мнению авторов играет ключевую роль в климатических изменениях в Арктике и возможно также влияет на климатические изменения в средних широтах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АРКТИКА, КЛИМАТ, ВЫСОКИЕ ОБЛАКА, ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ, РАЗРУШЕНИЕ ОБЛАЧНОСТИ

1. ВВЕДЕНИЕ

В первой части работы [Беликов и др., 2019c] было показано, что появление тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев над оптически плотной тропосферной облачностью в условиях сумерек может увеличивать поток солнечного излучения, поступающего на поверхность Земли, а также усиливать потоки излучения внутри нижней тропосферной облачности.

Этот эффект, по мнению авторов, играет ключевую роль в климатических изменениях, происходящих в последние десятилетия в Арктике.

Согласно гипотезе, предложенной в [Беликов и др., 2018a; Беликов и др., 2018b; Беликов и др., 2018c; Беликов и др., 2018d; Беликов и др., 2017; Беликов и др., 2019a; Беликов и др., 2019b; Беликов и др., 2019d], увеличение тонких высоких облаков и аэрозольных слоев происходит в Арктике в результате уменьшения солнечной активности и увеличения интенсивности космических лучей в последние десятилетия. Это приводит к усилению образования ионных кластеров в стратосфере и верхней тропосфере, которые служат основой для образования частиц облаков при соответствующих условиях влажности и температуры.

Кроме того, на климатические изменения в Арктике влияет также быстрое движение северного магнитного полюса, который в последние десятилетия переместился примерно на 1000 км от берегов Канады к северному географическому полюсу [Беликов и др., 2017; Беликов и др., 2018a; Беликов и др., 2019a; Беликов и др., 2019d]. Особенности фокусировки заряженных частиц в результате такого перемещения приводит к тому, что количество ионных кластеров в стратосфере и верхней тропосфере Арктике существенно увеличилось у берегов Российской Арктики и в море Бофорта, в то время как у

Электронная почта автора для переписки:
Беликов Юрий Евгеньевич e-mail: yury_belikov@mail.ru

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.

берегов Канады их количество уменьшилось или изменилось незначительно. Этот эффект приводит согласно [Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2018a; Беликов и др. 2019a; Беликов и др. 2019d] к неравномерному таянию ледового покрытия Арктики, которое наиболее сильным образом проявляется в зоне Российской Арктики и море Бофорта.

В настоящей части работы основное внимание уделяется анализу влияния тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности и внутрь нижних тропосферных облаков при различных зенитных углах Солнца. Для анализа этих особенностей, как и в первой части работы, использовалось сравнение переноса излучения в однослойной и двухслойной моделях облачности (см. далее). При этом важно было выяснить при каких зенитных углах Солнца пропадает эффект усиления пропускания излучения к поверхности, а также как при этом изменяются потоки излучения внутри нижних облаков. Остаются также важными вопросы, которые анализировались в предыдущей части только для условий сумерек. Это вопросы, связанные с особенностями изменения углового распределения излучения в однослойной и двухслойной модели, которые важны для понимания механизма усиления потоков излучения верхними рассеивающими слоями, а также для экспериментального анализа рассматриваемого эффекта.

Кроме того, очень полезным является анализ вклада многократных эффектов рассеяния и его сравнение с решением уравнения переноса излучения в однократном приближении. Дело в том, что, во-первых, как отмечалось в [Беликов и др. 2019b, Беликов и др. 2019c], расчеты потоков и интенсивностей излучения с учетом вклада многократного рассеяния могут быть связаны с большой затратой компьютерного времени. Поэтому важно оценить возможность анализа рассматриваемого эффекта по результатам расчетов потоков в однократном приближении.

Но еще более важный вопрос, связанный с необходимостью анализа однократно рассеянного излучения, который не был отмечен в предыдущей части статьи, заключается в следующем. Представленные в данной и предыдущей части работы расчеты выполнены для видимой области спектра для длины волны 500 нм, где поглощение атмосферными газами и каплями воды мало. В то же время эти расчеты, как отмечалось в [Беликов и др., 2019c], в определенной мере справедливы и в ближней ИК области спектра вне сильных полос поглощения. Результаты расчетов будут справедливы для других размеров частиц и длин волн, при которых оставалось бы неизменным отношение $2\pi r/\lambda$, где r – радиус частицы, λ – длина волны падающего излучения [Мак-Картни 1979].

В то же время, согласно подробному анализу прохождения излучения в рассеивающей и поглощающей среде, представленному в монографии [Hulst, 1980], присутствие даже небольшого поглощения в рассеивающей среде сильно уменьшает кратность рассеянного излучения. Поэтому однократно рассеянное излучение можно рассматривать как нижнюю границу оценки потоков излучения при наличии поглощения в нижнем облаке. Таким образом, сравнивая результаты расчетов в однократном приближении и с учетом эффектов многократного рассеяния, можно сделать некоторые предварительные оценки насколько сильно наличие поглощения в нижнем слое может влиять на абсолютные эффекты усиления солнечного потока излучения верхним рассеивающем слоем.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

В Арктике тропосферные облака покрывают небо большую часть года, что является характерной особенностью арктической погоды [Schweiger et al., 1999; Wang and Key, 2003]. Причём оптическая плотность этих облаков преимущественно высокая, оптические толщины могут достигать величин порядка ~10–100 и даже более в видимой области спектра, в ближней ИК области оптические толщи несколько меньше по величине, но также весьма значительны.

Для модельных расчётов переноса излучения в арктических условиях авторы использовали двухслойную модель (рис. 1а). Нижний слой соответствует слоистой облачности, состоящей из крупнодисперсного аэрозоля, равномерно расположенный в высотном интервале 0–10 км; оптическая толщина слоя τ=4. Размер частиц облаков в нижней тропосфере различен. Согласно данным, приведённым в монографии [Мак-Картни, 1979], характерные размеры капель или ледяных частиц в слоистых облаках составляют ~1–10 мкм и более. Индикатриса рассеяния для частиц этого слоя должна рассчитываться по теории Ми.

На рисунке 1б приведены результаты расчетов индикатрис по формулам Ми для характерных размеров частиц 3, 5 и 10 мкм на длине волны 500 нм. На основании этих расчётов построена некоторая

средняя индикатриса нижнего слоя, которая слоя выделена на рис. 1б синей плотной линией. Эта модельная индикатриса использовалась в дальнейшем для вычислений.

Верхний слой состоит из мелкодисперсного аэрозоля, рассеивающего излучение по рэлеевскому закону с оптической толщиной τ=0,2. Этот слой тонкой облачности расположен равномерно в высотном интервале 10–11 км от поверхности.

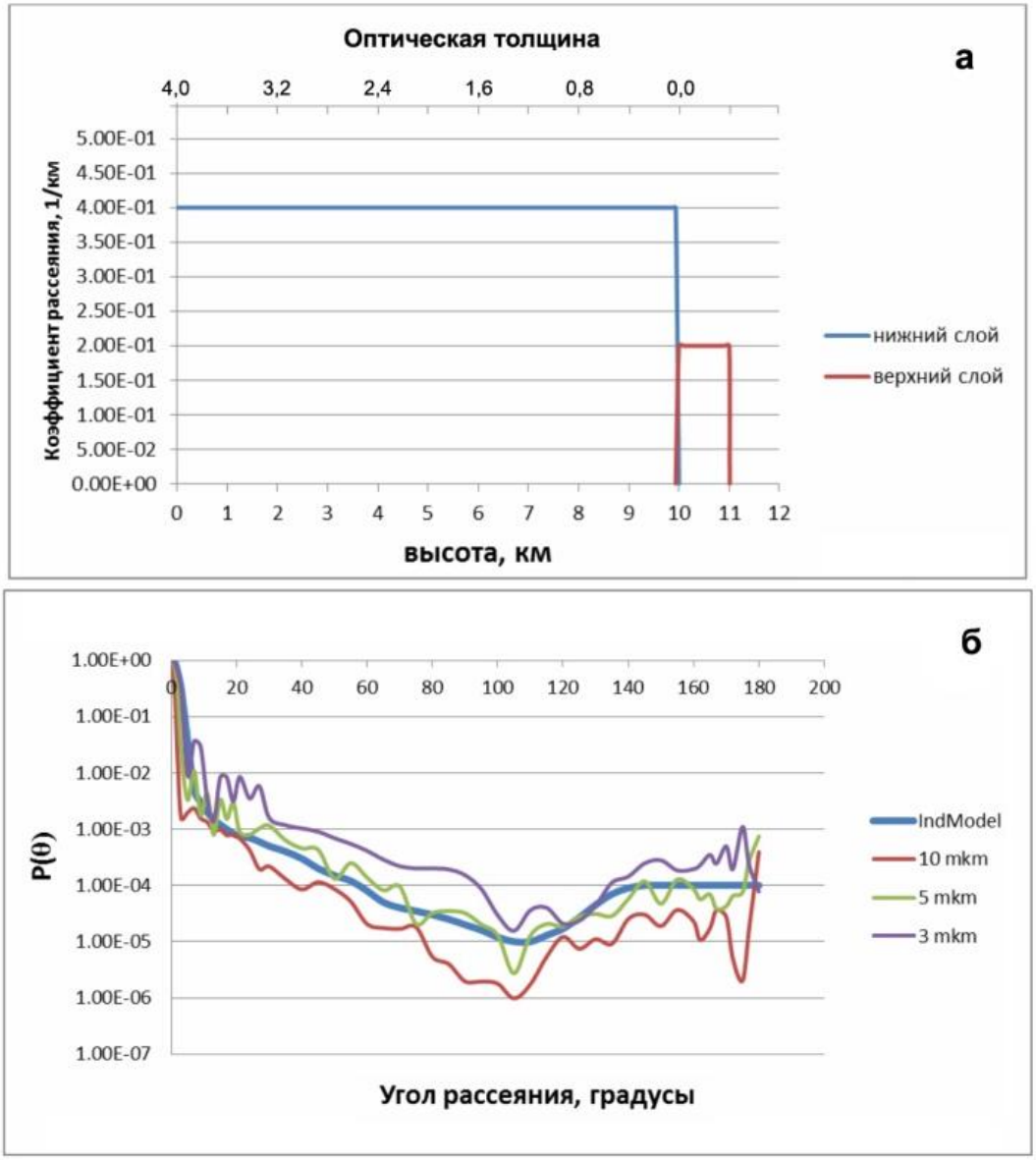

Рис.1. Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта двухслойной рассеивающей атмосферы. (а) Нижний рассеивающий слой имеет оптическую толщину τ=4, индикатриса рассеяния представлена внизу синим цветом. Верхний слой имеет оптическую толщину τ=0.2, индикатриса рассеяния рэлеевская. (б) Показаны рассчитанные по теории Ми индикатрисы рассеяния P(θ) частиц облаков различных размеров, а также модельная индикатриса, соответствующая нижнему слою облачности.

Рассматриваемый случай соответствует реальному распределению облачности, когда низкие облака расположены в нескольких километрах от поверхности, а оптически тонкие облака находятся в верхней тропосфере или нижней стратосфере. В описываемой постановке задачи изменение высотного положения нижнего или верхнего слоя или их геометрической толщины не приводит к каким-либо различиям в результатах вычислений потоков у земной поверхности и внутри нижнего слоя при условии их неизменных оптических толщин. При этом результаты вычислений достаточно привязать

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

к оптической толщине слоя. На рис.1а показано изменение оптической толщины нижнего облака от его верхнего края.

Отметим, что в данных расчетах мы пренебрегаем рассеянием солнечного света на молекулах воздуха. Безусловно молекулярное рассеяние вносит свой вклад в перенос излучения в видимой области спектра, однако его влияние уменьшается в красной и особенно в инфракрасной области спектра которые, по нашему мнению, вносят основной вклад в климатический эффект в Арктике (см. далее).

Вычисления интенсивности излучения, результаты которых приведены ниже, проведены 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 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗЕНИТНЫХ УГЛАХ СОЛНЦА

Согласно общепринятым представлениям, наличие облачности и аэрозольных слоёв в атмосфере должно приводить к уменьшению потоков излучения, поступающего на земную поверхность. Однако эти представления верны не во всех случаях. В ряде наших работ было показано, что в тех случаях, когда оптически тонкие рассеивающие слои появляются над тропосферной облачностью, происходит увеличение потоков излучения на земной поверхности при больших зенитных углах Солнца [Беликов и др. 2018b; Беликов и др. 2018c; Беликов и др. 2018d; Беликов и др. 2017; Беликов и др. 2019a; Беликов и др. 2019b]. Целью данной работы является продолжение детального анализа этого эффекта.

При этом важно ответить на следующие вопросы: как изменяются потоки прямого и рассеянного излучения внутри облака? Происходит ли при этом возрастание полного потока излучения внутри облака и у земной поверхности? Если это происходит, то как изменяется при этом угловое распределение интенсивности излучения? Вертикальный профиль потоков важен для определения баланса энергии, влияющего на испарение или образование капель внутри облака. Характер углового распределения и его изменение при появлении тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев важен, как отмечалось во Введении, для понимания механизма усиления потоков излучения верхними рассеивающими слоями, а также для экспериментального анализа рассматриваемого эффекта.

В работе [Беликов и др. 2019c], получен целый ряд результатов, который объясняет появление и особенности сумеречного эффекта. Однако остается важным вопрос, как отмечалось выше, о том, как этот эффект зависит от зенитного угла Солнца и возможно ли его возникновение в условиях летней Арктики и в средних широтах.

На рисунке 2 показаны угловые распределения интенсивности рассеянного солнечного света вдоль плоскости солнечного вертикала на земной поверхности при различных зенитных углах Солнца: 80, 60 и 30 градусов. Вычисления для зенитного угла Солнца 80 градусов были проведены авторами ранее и опубликованы в работе [Беликов и др. 2019c].

Угол направления визирования нуль градусов соответствует направлению визирования в надир. Углы 90, 180 и 270 градусов определяют, соответственно, направления визирования вдоль горизонта в солнечном направлении, в зенит и вдоль горизонта в антисолнечном направлении. Единицы измерений интенсивностей и потоков приводятся здесь и далее в единицах потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы. Расчёты потоков проведены в приближении однократного рассеяния (рис. 2а, 2в и 2д) и с учётом многократного рассеяния (рис. 2б, 2г и 2е)

Предполагается, что альбедо поверхности равно нулю, что практически соответствует случаю отсутствия ледяного покрова на морской поверхности. В условиях равенства альбедо поверхности нулю интенсивности рассеянного излучения в диапазонах углов (0-90) и (270-360) градусов равны нулю при наблюдении с земной поверхности (рис.2а, 2б). В то же время вполне обоснованно предположение, что наличие морского льда должно привести к увеличению вклада кратных эффектов рассеяния в расчетные интенсивности и потоки излучения.

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

Анализ углового распределения интенсивности для зенитного угла Солнца 80 градусов для различных высот, как уже отмечалось выше, проводился в работе [1], поэтому мы сосредоточим основное внимание на изменение закономерностей углового распределения интенсивностей в зависимости от зенитного угла Солнца.

Сравнение рисунков 2а–2е позволяет выявить следующие закономерности при изменении зенитного угла Солнца при наблюдении на уровне земной поверхности.

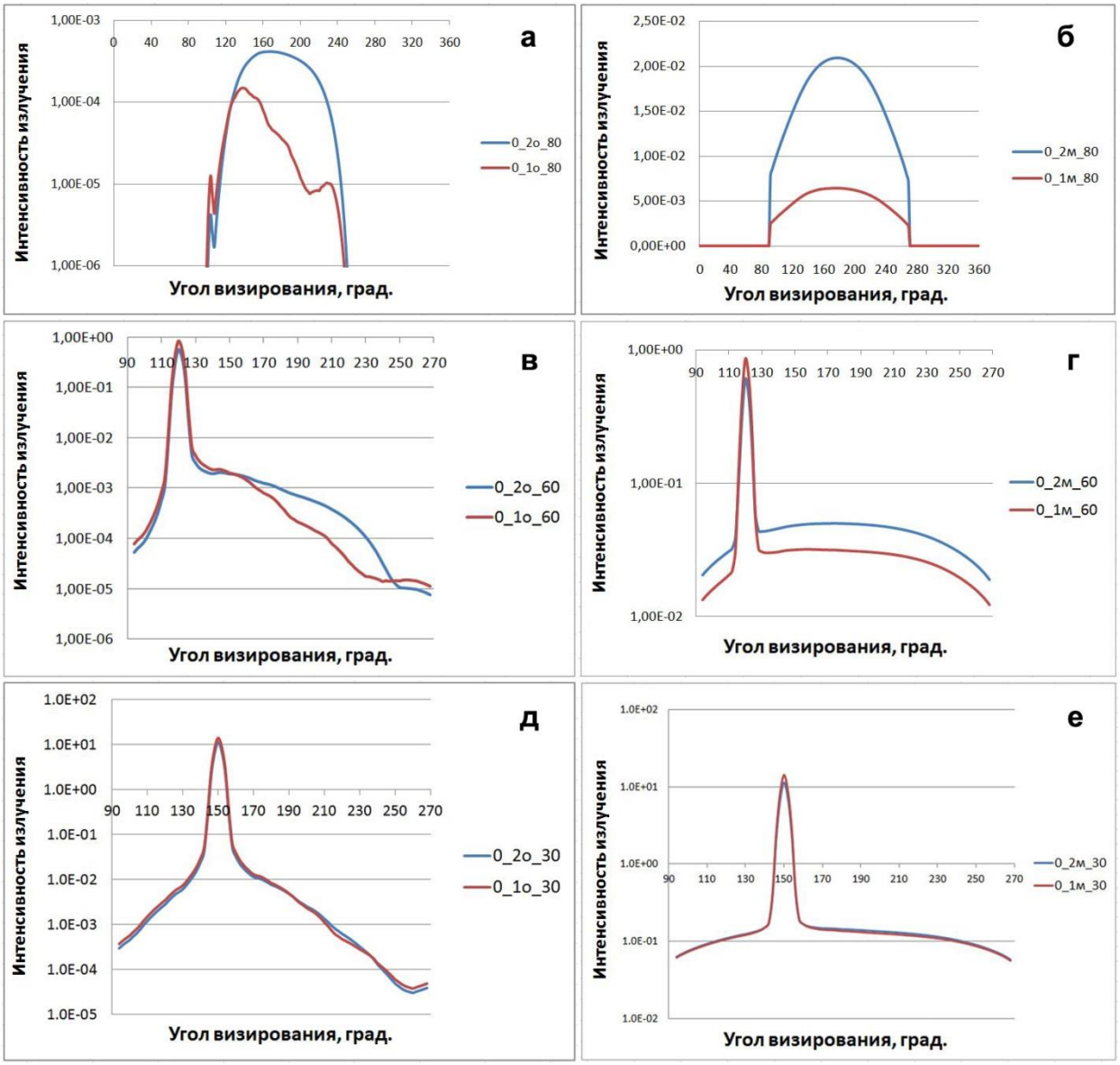

Рис.2.Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения вдоль плоскости солнечного вертикала на земной поверхности для зенитных углов Солнца 80 градусов (а,б), 60 градусов (в,г) и 30 градусов (д,е). Угол визирования отсчитывается от направления в надир. Представлены расчеты для однослойной (красная линия) и двухслойной (синяя линия) атмосферы в приближении однократного рассеяния (слева) и с учетом многократных эффектов (справа).

При зенитном угле Солнца 80 градусов небольшой пик интенсивности излучения, соответствующий околосолнечному направлению наблюдается как в двухслойной, так и однослойной модели в приближении однократного рассеяния. Этот пик возникает вследствие сильного возрастания индикатрисы рассеяния в нижнем слое в этом направлении (рис.2а) и приходится примерно на угол визирования 100 градусов, соответствующий направлению на Солнце.

При учете многократных эффектов этот пик исчезает и сглаживается (рис.2б). В то же время, при зенитных углах Солнца 60 и 30 градусов значительное увеличение интенсивности в околосолнечном направлении существует как в однократном приближении, так и с учетом эффектов многократного рассеяния (рис.2в и 2г, рис.2д и 2е). При этом интенсивности с учетом многократных

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

эффектов в околосолнечном направлении практически совпадают с расчетами в однократном приближении рассеяния. Это означает, что в этом направлении основной вклад дает однократное рассеяние. В то же время вклад многократных эффектов существенен в направлениях отличных от околосолнечных (рис.2в и 2г; рис. 2д и 2е).

Сравнение рисунков 2б, 2г и 2е, показывает, что при учете многократного излучения отношение интенсивностей в двухслойной и однослойной атмосферах за исключением указанной небольшой области околосолнечных углов визирования быстро убывает с уменьшением зенитного угла Солнца. При зенитном угле 30 градусов рассматриваемое отношение близко к 1, интенсивности почти совпадают.

Сравнение интенсивностей в двухслойной и однослойной атмосферах при различных направлениях визирования показывает, что в околосолнечном направлении интенсивности в двухслойной атмосфере меньше, чем в однослойной как в приближении однократного рассеяния, так и с учетом многократных эффектов (рис.2). В то же время вне узкой зоны углов околосолнечного направления интенсивности в двухслойной атмосфере могут быть как больше, так и меньше интенсивностей в однослойной атмосфере в однократном приближении, однако они превышают интенсивности в двухслойной однослойной атмосфере в рассматриваемых направлениях при учете многократного рассеяния (рис.2).

Последний эффект, по всей вероятности, связан с увеличением многократного рассеяния в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной в направлениях, отличных от околосолнечного. Таким образом, многократное рассеяние способствует увеличению солнечного потока на поверхности при появлении тонких рассеивающих слоев над тропосферной облачностью.

Однако, чтобы получить полную оценку этого эффекта, необходимо просуммировать интенсивности рассеянного излучения по всем направлениям, включая потоки прямого солнечного излучения, которое при больших зенитных углах солнца на земной поверхности дает небольшой вклад, однако с уменьшением зенитного угла Солнца становится значимым.

В таблицах 1–3 приведены расчеты рассеянных, прямых и полных потоков солнечного излучения, а также даны сравнения солнечных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на земной поверхности при различных зенитных углах Солнца Z_0.

Таблица 1. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на земной поверхности для однослойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр. к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потоков**	**Сумма многокр. и прямого потоков**
80	3.22E-05	9.05E-03	1.72E-10	2.81E+02	2.81E+02	**3.22E-05**	**9.05E-03**
60	6.48E-04	4.54E-02	3.42E-04	7.01E+01	4.62E+01	**9.90E-04**	**4.57E-02**
30	1.53E-02	2.10E-01	9.88E-03	1.37E+01	8.70E+00	**2.52E-02**	**2.19E-01**

Таблица 2. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на земной поверхности для двухслойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр. к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потоков**	**Сумма многокр. и прямого потоков**
80	1.85E-04	2.91E-02	5.97E-11	1.57E+02	1.57E+02	**1.85E-04**	**2.91E-02**
60	7.15E-04	7.06E-02	2.33E-04	9.87E+01	7.47E+01	**9.48E-04**	**7.08E-02**
30	1.26E-02	2.15E-01	7.90E-03	1.71E+01	1.09E+01	**2.05E-02**	**2.23E-01**

Таблица 3.Сравнение солнечных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на земной поверхности.

Z_0 град.	Отношение рассеян. однокр. 2 сл./1сл.	Отношение рассеян. многокр. 2 сл./1сл.	Отношение прямых потоков 2 сл./1 сл.	Разность рассеян. однокр. 2 сл.-1 сл.	Разность рассеян. многокр. 2 сл.-1 сл.	Разность прямых потоков 2 сл.-1 сл.	**Отношение Полных потоков 2 сл./1 сл.**	**Разность Полных потоков 2 сл.-1 сл.**
80	5.75E+00	3.22E+00	3.47E-01	1.53E-04	2.01E-02	-1.12E-10	**3.22E+00**	**2.01E-02**
60	1.10E+00	1.56E+00	6.81E-01	6.70E-05	2.52E-02	-1.09E-04	**1.55E+00**	**2.51E-02**
30	8.21E-01	1.03E+00	8.00E-01	-2.74E-03	5.91E-03	-1.98E-03	**1.02E+00**	**3.93E-03**

Анализ этих таблиц 1 и 2 подтверждает и дополняет сделанные ранее на основе анализа углового распределения интенсивностей излучения выводы.

Во-первых, с уменьшением зенитного угла Солнца, как для однослойной, так и для двухслойной атмосферы значительно увеличивается вклад однократно рассеянного излучения, в то время как рост многократно рассеянного излучения не столь значителен. Как результат – отношение многократно рассеянного излучения к однократно рассеянному сильно уменьшается при уменьшении зенитного угла Солнца (табл.1 и 2).

Во-вторых, несмотря на то, что наблюдается сильный рост прямых потоков излучения с уменьшением зенитного угла Солнца, вклад прямых потоков излучения в полный поток невелик по сравнению с рассеянным излучением у земной поверхности для всех зенитных углов Солнца.

Анализ таблицы 3 показывает, что у земной поверхности отношение рассеянного потока в двухслойной атмосфере к рассеянному потоку в однослойной атмосфере уменьшается с уменьшением зенитного угла Солнца как в однократном приближении, так и с учетом эффектов многократного рассеяния. При этом если при большом зенитном угле Солнца 80 градусов рассматриваемое отношение больше для потоков излучения в однократном приближении по сравнению с потоками, в которых учитывался вклад многократных эффектов, то при уменьшении зенитного угла Солнца ситуация обратная.

Как видно из табл. 3, для зенитных углов Солнца 60 и 30 градусов отношение рассеянного потока в двухслойной атмосфере к рассеянному потоку в однослойной атмосфере с учетом эффектов многократного рассеяния превышает это отношение в приближении однократного рассеяния. Однако при этом важно, что при углах 60 градусов и даже 30 градусов рассматриваемое отношение с учетом многократного рассеяния больше единицы. При этом отношение в однократном приближении хотя и больше единицы для 60 градусов, но значительно меньше отношения многократных потоков. При угле 30 градусов указанное отношение становится заметно меньше единицы, в то время как при учете многократных эффектов оно незначительно превышает единицу. Это говорит о важности многократного рассеяния в формировании эффекта увеличения на земной поверхности рассеянных потоков при появлении тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев над низкой тропосферной облачностью.

Отметим, что указанный эффект получил название сумеречного именно из-за сильного уменьшения относительного увеличения потоков рассеянного излучения на земной поверхности с уменьшением зенитного угла Солнца (табл.3). Этот эффект связан с различием индикатрис крупных и мелких частиц, находящихся на разных высотах и, соответственно, с тем фактом, что частицы разных размеров по-разному рассевают свет в направлении подстилающей поверхности. Однако, как отмечалось выше, климатический эффект воздействия излучения зависит не от отношения, а от абсолютной разности интенсивностей, изменение которой зависит от абсолютных величин потоков рассеянного излучения, которые возрастают при уменьшении зенитного угла Солнца (табл. 1 и 2). Поэтому, несмотря на то, что отношение потоков излучения уменьшается с уменьшением зенитного угла Солнца (рис.2 и табл.3), разность потоков излучения многократных и полных потоков излучения при 60 градусах превосходит аналогичную разность при 80 градусах. Даже при угле 30 градусов разность положительна, хотя отношение соответствующих потоков близко к единице (табл. 3).

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Отметим, что указанные особенности наблюдаются только с учетом эффектов многократного рассеяния, в то время как разность рассматриваемых потоков в однократном приближении убывает с уменьшением зенитного угла Солнца, становясь отрицательной при зенитном угле Солнца 30 градусов. Это еще раз указывает на значительную роль многократно рассеянного излучения в формировании описываемого эффекта.

Таким образом, полученные результаты означают, что рассматриваемый эффект не является по сути чисто сумеречным эффектом и может проявляться в Арктике летом, а также в средних широтах. При этом одним из важных факторов проявления этого эффекта при небольших зенитных углах Солнца является вклад многократно рассеянного солнечного излучения.

В то же время, как отмечалось выше, согласно расчетам [Hulst, 1980], присутствие даже небольшого поглощения в рассеивающей среде сильно уменьшает кратность рассеяния. При этом однократно рассеянное излучение можно рассматривать как нижнюю границу оценки потоков излучения при наличии поглощения в нижнем облаке (табл.1-2).

Анализ таблиц 1-3 показывает, что описываемый эффект при сильном поглощении нижнего слоя становиться действительно сумеречным, рассматриваемые отношения и разности потоков излучения в приближении однократного рассеяния быстро уменьшаются с уменьшением зенитного угла Солнца.

Таким образом, по-видимому, рассматриваемый эффект должен проявляться особенно ярко при небольшом поглощении нижнего слоя, когда с одной стороны поглощение существенно, с другой стороны вклад многократных эффектов достаточно велик для абсолютной величины эффекта. По нашему мнению, рассматриваемый эффект максимально будет проявляться в красной области спектра и при переходе к ближней ИК области спектра, где поглощение солнечного излучения водой невелико. В то же время, дополнительный вклад может давать и ближняя ИК область спектра вне сильных линий поглощения. Однако при этом анализе необходимо также учитывать сильное уменьшение внеатмосферного солнечного излучения в ближней ИК области спектра по сравнению с видимой областью спектра [Краснопольский, 1987]. Для уточнения спектральной зависимости влияния высоких верхних облаков и/или аэрозольных слоев на пропускание и поглощение излучения нижней облачностью и определение климатического эффекта необходимо провести дополнительные расчеты с учетом поглощения излучения нижним слоем и, возможно, небольшого поглощения верхним слоем.

Рассмотрим теперь, как влияет появление тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев на угловое распределение и потоки излучения внутри облака на различных высотах. На рисунке 3 показано распределение интенсивностей рассеянного солнечного излучения на высоте 4 км. Сравнение рисунков 3 и 2 показывает, что пик в околосолнечной области чётко проявляется при зенитном угле Солнца 80 градусов при учете эффектов многократного рассеяния, чего не наблюдалось на земной поверхности.

При зенитном угле 60 градусов на высоте 4 км максимальные интенсивности при углах визирования, близких к направлению на Солнце (рис.3в, 3г), примерно на порядок величины превышают значения интенсивности в этих же направлениях у земной поверхности (рис.2в, 2г). При этом не столь значительно, но достаточно сильно увеличиваются интенсивности в других направлениях визирования, отличных от солнечного (рисунки 3в и 3г по сравнению с рисунками 2в и 2г, соответственно).

Сравнение расчетов, сделанных для двухслойной и однослойной атмосферы для 60 градусов, показывает незначительное превышение интенсивностей в однослойной атмосфере над интенсивностями в двухслойной атмосфере в околосолнечной области. В приближении однократного рассеяния превышение интенсивностей в двухслойной модели над интенсивностями в однослойной происходит только в некоторой части углов визирования (рис.3в), а при учете эффектов многократного рассеяния подобное превышение наблюдается при всех углах визирования, за исключением узкой околосолнечной области (рис.3г). Из-за указанных особенностей углового распределения интенсивностей превышение потока для зенитного угла Солнца 60 градусов в однократном приближении в двухслойной модели по сравнению с однослойной ничтожно мало, в то время как при учете эффектов многократного рассеяния эффект это превышение существенно (табл.4-6). Более того, из-за увеличения интенсивности излучения практически во всех направлениях визирования разность потоков излучения при зенитном угле Солнца 60 градусов по сравнению с углом 80 градусов также увеличивается (рис.3 и табл.4-6).

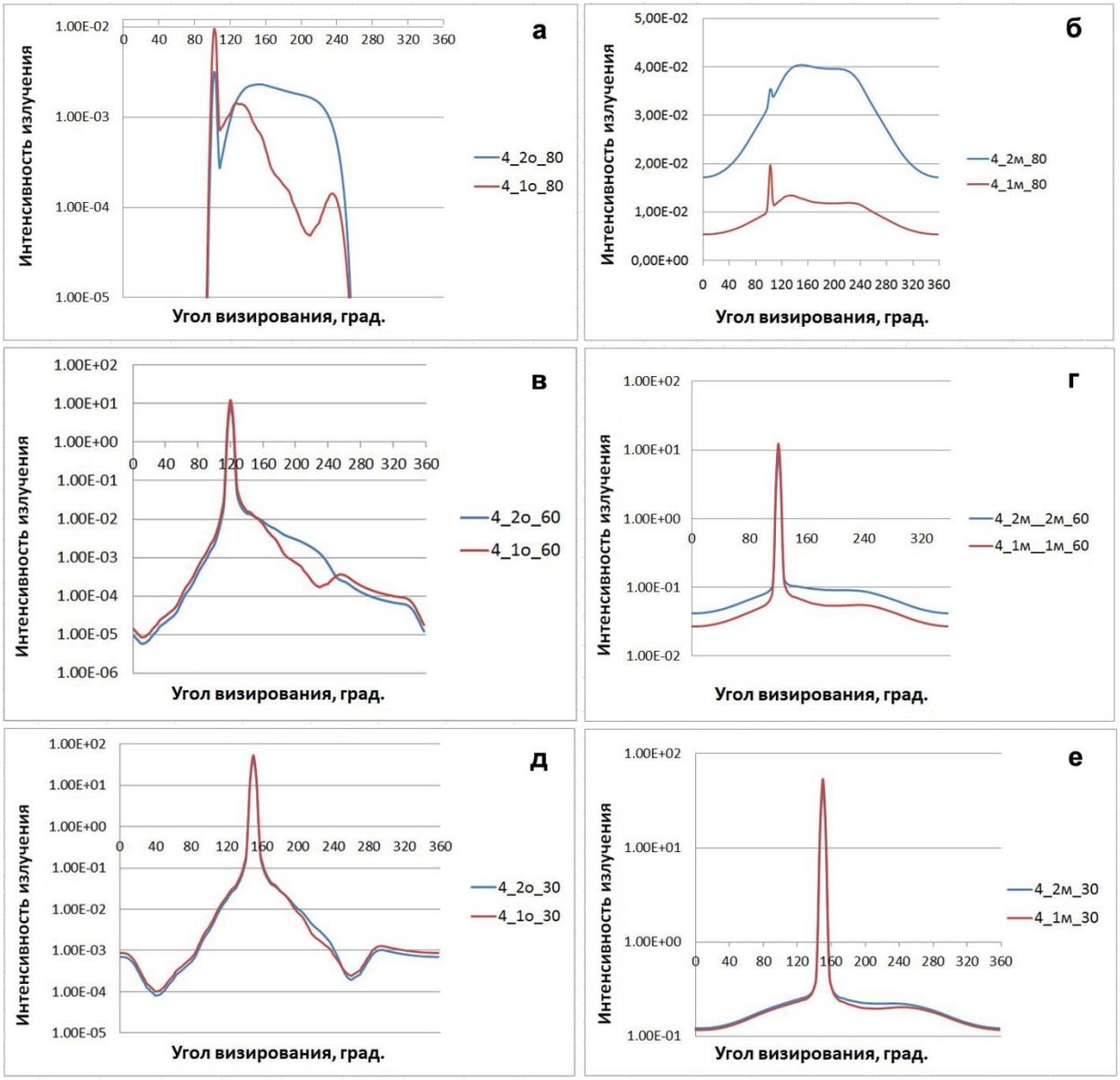

Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, только для высоты 4 км

При зенитном угле Солнца 30 градусов на высоте 4 км наблюдаются закономерности в угловом изменении интенсивностей сходные с теми, что были рассчитаны для зенитного угла Солнца 60 градусов для этой высоты. Несмотря на рост всех значений интенсивности при угле 30 градусов (рис.3в,3г и 3д,3е), разность и отношение интенсивностей в двухслойной и однослойной атмосфере очень незначительны. Однако за счет увеличения абсолютных величин интенсивностей положительная разность остается значимой даже для зенитного угла Солнца 30 градусов (табл.4—6).

Анализ таблиц 4–6 подтверждает те выводы, которые были сделаны выше на основе анализа угловой зависимости интенсивностей внутри нижнего облака на высоте 4 км, что соответствует оптической толщине 2,4 от его верхнего края (рис.1а).

Сравнение таблиц 4–6 с таблицами 1–3 показывает сильное усиление прямых и рассеянных потоков, рассчитанных как в однократном приближении, так и с учетом многократных эффектов для всех рассматриваемых зенитных углов Солнца и это влияет на отношения и разность полных потоков в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной.

Как видно из табл. 1–3 и 4–6 разность потоков излучения как для земной поверхности, так и для высоты 4 км для 60 градусов существенно больше, чем для 80 градусов т.е. рассматриваемый

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

эффект усиливается, несмотря на меньший зенитный угол Солнца. Также обнаружено, что при небольших зенитных углах Солнца на высоте 4 км необходимо учитывать вклад прямого излучения Солнца. При зенитном угле Солнца 60 градусов этот вклад невелик. В то же время при зенитном угле 30 градусов этот вклад существенен и, его необходимо учитывать.

Очевидно, что влияние прямых потоков солнечного излучения ослабляет описываемый эффект – два рассеивающих слоя ослабляют излучение больше, чем один слой, при этом наибольшим образом это влияние проявляется недалеко от верхней границы облака.

Таблица 4. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на высоте 4 км для однослойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр. к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потоков**	**Сумма многокр. и прямого потоков**
80	3.29E-04	3.67E-02	1.22E-06	1.12E+02	1.11E+02	3.30E-04	3.67E-02
60	6.36E-03	1.85E-01	8.28E-03	2.91E+01	1.26E+01	1.53E-02	1.93E-01
30	5.28E-02	7.59E-01	6.26E-02	1.44E+01	7.12E+00	1.15E-01	8.21E-01

Таблица 5. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на высоте 4 км для двухслойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр. к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потоков**	**Сумма многокр. и прямого потоков**
80	1.45E-03	1.18E-01	4.14E-07	8.14E+01	8.12E+01	1.45E-03	1.18E-01
60	6.37E-03	2.86E-01	5.63E-03	4.49E+01	2.43E+01	1.20E-02	2.91E-01
30	4.47E-02	8.00E-01	5.01E-02	1.79E+01	8.97E+00	9.48E-02	8.50E-01

Таблица 6. Сравнение солнечных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на высоте 4 км.

Z_0 град.	Отношение рассеян. однокр. сл./1сл.	Отношение рассеян. многокр. 2 сл./1сл.	Отношение прямых потоков 2 сл./1 сл.	Разность рассеян. однокр. 2 сл.-1 сл.	Разность рассеян. многокр. 2 сл.-1 сл.	Разность прямых потоков 2 сл.-1 сл.	**Отношение полных потоков 2 сл./1 сл.**	**Разность полных потоков 2 сл.-1 сл.**
80	4.40E+00	3.20E+00	3.40E-01	1.12E-03	8.08E-02	-8.04E-07	3.20E+00	8.08E-02
60	1.00E+00	1.55E+00	6.80E-01	1.00E-05	1.01E-01	-2.65E-03	1.51E+00	9.80E-02
30	8.46E-01	1.05E+00	8.00E-01	-8.12E-03	4.13E-02	-1.25E-02	1.04E+00	2.88E-02

Рассмотрим особенности переноса излучения вблизи верхней границы нижнего облака на некотором уровне, где оптическая толщина до верхней границы нижнего облака равна 0.08. Этот уровень соответствует высоте примерно 9.8 км, т.е. расстояние до границы между облаками составит около 200 м.

Анализ рисунка 4 показывает, что на высоте 9,8 км наблюдается сильный рост пиков яркости в околосолнечной области по сравнению с аналогичной областью на высоте 4 км для зенитных углов Солнца 60 и, особенно, 80 градусов.

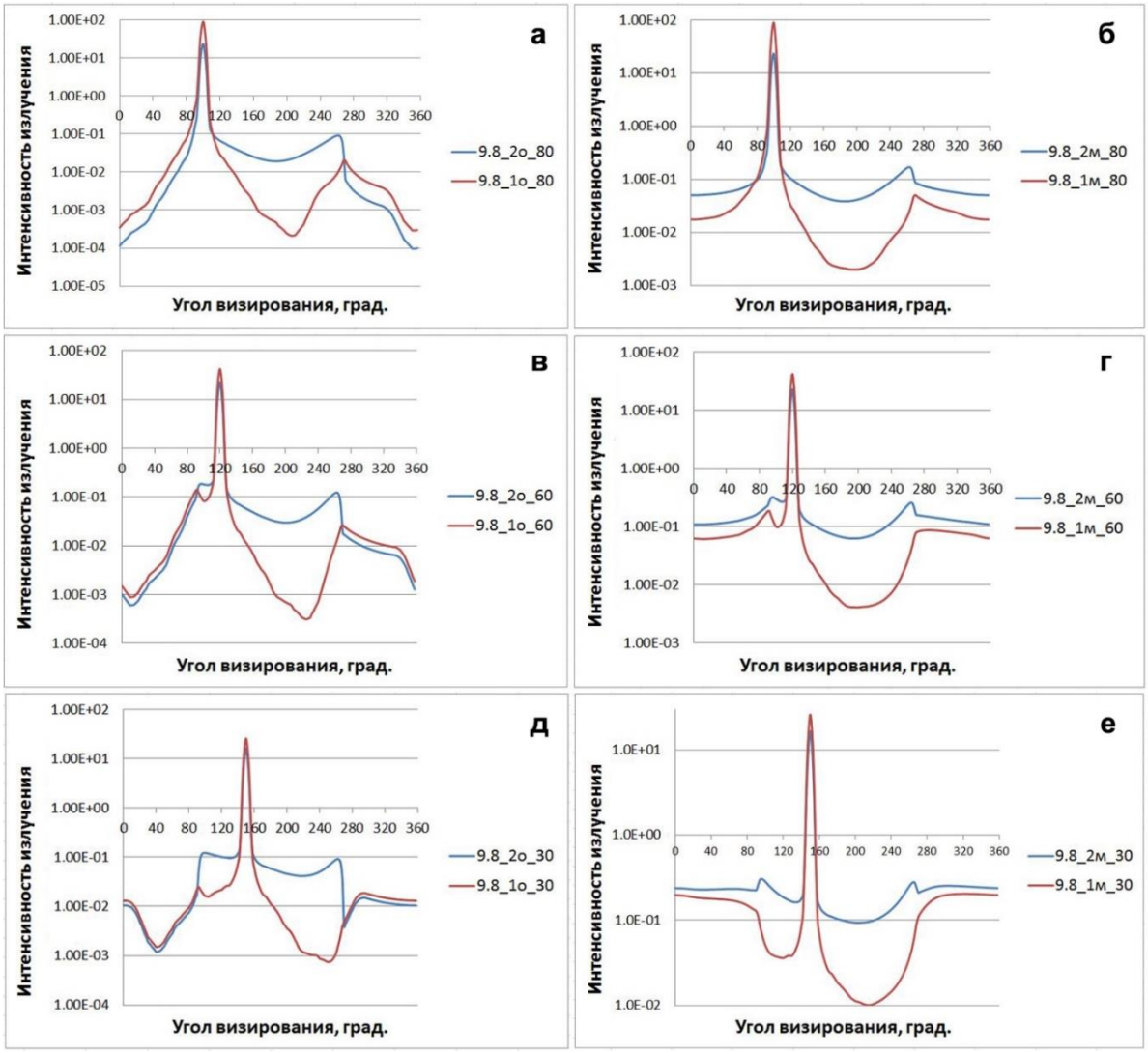

Рис. 4. То же самое, что и на рис. 2, только для высоты 9.8 км

Отметим существенное различие рассеянных потоков излучения на уровнях 9.8 и 4 км в условиях двухслойной атмосферы по сравнению с однослойной при зенитных углах Солнца 60 и, особенно, 30 градусов вне узкой зоны углов визирования в околосолнечной области.

Сравнение рисунков 4в, 4г, 4д, 4е и 3в, 3г, 3д, 3е, соответственно, показывает, что в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной наблюдается существенное увеличение рассеянных потоков излучения в верхней полусфере углов визирования. Причем учет многократных эффектов показывает аналогичное увеличение для всех углов визирования в плоскости солнечного вертикала, кроме направлений, близких к солнечному.

Это увеличение разницы рассеянных потоков излучения по всей вероятности является следствием того, что на высоте 4 км, значительный вклад в поток излучения из верхней полусферы углов рассеяния (90–270 градусов) вносит рассеяние солнечного света верхней частью нижнего облака на высотах 4–10 км. В то время как отражение от нижней части облака невелико из-за характерной индикатрисы рассеяния крупных частиц (рис.1б). Поэтому добавление слоя на высоте 10-11 км, рассеивающего по закону Рэлея, несущественно увеличивает рассеянный поток.

В то же время, на высоте 9.8 км (оптическая толщина вышележащего слоя 0.08), где практически все нижнее облако находится внизу, рассеяние света в обратном направлении невелико. Добавление верхнего слоя, рассеивающего по закону Рэлея, существенным образом увеличивает рассеянный поток излучения на высоте 9.8 км.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

При анализе полных потоков излучения на рассматриваемой высоте 9,8 км прямые потоки излучения велики, и их необходимо учитывать. При этом очевидно, что в двухслойной модели ослабление прямого солнечного света сильней, чем в однослойной. Для оценки эффекта влияния верхнего рассеивающего слоя на поле излучения необходимо учитывать как рассеянные, так и прямые потоки излучения.

Из таблиц 7 и 8 видно, что рассеянные потоки излучения, как в однократном приближении, так и с учетом многократных эффектов рассеяния в двухслойной атмосфере действительно больше, чем в однослойной атмосфере на высоте 9,8 км. В то же время соответствующие прямые потоки превышают однократно рассеянные и сравнимы с многократно рассеянными потоками на этой высоте (табл.7-9). Поэтому их влияние значительно в отличие от высоты 4 км и тем более 0 км, где прямые потоки существенно меньше рассеянных потоков излучения (табл.1–3 и табл. 4–6).

Как видно из таблицы 9, разность рассеянных потоков в двухслойной и однослойной атмосфере увеличивается с уменьшением зенитного угла Солнца, при этом соответствующая разность прямых потоков излучения отрицательна и также увеличивается с уменьшением зенитного угла Солнца. При зенитном угле Солнца 80 градусов положительный эффект увеличения полного потока за счет рассеянного излучения меньше, чем уменьшение прямого потока излучения при добавлении второго слоя. Как результат разность полных потоков излучения при 80 градусах отрицательна, в то время как для зенитных углов Солнца 60 и 30 градусов эта разность положительна. При этом рассматриваемая разность полных потоков при 30 градусах существенно превышает разность полных потоков при 60 градусах.

Таблица 7. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на высоте 9.8 км для однослойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр. к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потока**	**Сумма многокр. и прямого потока**
80	4.85E-02	1.05E-01	6.30E-01	2.16E+00	1.08E+00	6.79E-01	7.36E-01
60	4.90E-02	1.99E-01	8.52E-01	4.06E+00	1.17E+00	9.01E-01	1.05E+00
30	4.74E-02	1.61E-01	9.12E-01	3.40E+00	1.39E+00	9.59E-01	1.33E+00

Таблица 8. Изменение рассеянных, прямых и полных потоков излучения на высоте 9.8 км для двухслойной атмосферы в единицах внеатмосферного солнечного потока.

Z_0 град.	Рассеян. однокр. поток	Рассеян. многокр. поток	Прямой поток	Отношение рассеян. многокр..к однокр.	Отношение полных многокр. к однокр.	**Сумма однокр. и прямого потоков**	**Сумма многокр. и прямого потоков**
80	9.71E-02	3.08E-01	2.08E-01	3.17E+00	1.69E+00	3.05E-01	5.15E-01
60	1.51E-01	5.47E-01	5.79E-01	3.62E+00	1.54E+00	7.30E-01	1.13E+00
30	1.61E-01	8.19E-01	7.29E-01	5.09E+00	1.74E+00	8.90E-01	1.55E+00

Таблица 9.Сравнение солнечных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на высоте 9.8 км.

Z_0 град.	Отношение рассеян. однокр. 2 сл./1сл.	Отношение рассеян. многокр. 2 сл./1сл.	Отношение прямых потоков 2 сл./1 сл.	Разность рассеян. однокр. 2 сл.-1 сл.	Разность рассеян. многокр. 2 сл.-1 сл.	Разность прямых потоков 2 сл.-1 сл.	**Отношение Полных потоков 2 сл./1 сл.**	**Разность Полных потоков 2 сл.-1 сл.**
80	2.00E+00	2.92E+00	3.30E-01	4.86E-02	2.02E-01	-4.23E-01	7.01E-01	-2.20E-01
60	3.08E+00	2.75E+00	6.79E-01	1.02E-01	3.48E-01	-2.73E-01	1.08E+00	8.00E-02
30	3.39E+00	1.95E+00	8.00E-01	1.13E-01	4.00E-01	-1.82E-01	1.16E+00	2.18E-01

Этот эффект, по всей вероятности, связан с тем, что при большом зенитном угле Солнца дополнительное ослабление прямого потока верхним слоем слишком велико из-за длинного оптического пути солнечных лучей, В результате увеличение рассеяния в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной не компенсирует эффекта ослабления вторым слоем прямого излучения Солнца. В то же время, при уменьшении зенитного угла Солнца (60 и 30 градусов) добавление второго слоя не столь сильно влияет на ослабление прямого потока Солнца по сравнению с возросшим рассеянным излучением. В результате полный поток излучения увеличивается за счет заметного увеличения рассеянного потока излучения. Отметим, что этот эффект достигается в основном за счет многократного излучения.

Более подробно особенности высотного изменения потоков солнечного излучения при различных зенитных углах Солнца мы разберем в заключительной части статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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, 2018a.
http://vestnik.geospace.ru/php/downlod.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, 2018c.
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, 2019a, 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., Репин А.Ю.* Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики. // Гелиогеофизические исследования. Вып. 24.13-19, 2019c.
http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe3d1ff1f111ac75efa02965334726fbd.pdf

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- *Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю.* О возможном влиянии движения магнитного полюса и изменения солнечной активности на климат Арктики // Всероссийская конференция “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблема адаптации и регулирования”, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Москва, 26-28 ноября 2019 г., тезисы доклада, с.30, 2019d. http://ifaran.ru/science/conferences/climate2019/climate2019_theses.pdf
- *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
- *Краснопольский В.А.* Физика свечения атмосфер планет и комет, М: Наука, 1987. – 304 с.
- *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы // М: Мир, 1979. – 421 с.
- *Hulst H. C. van de.* Multiple light scattering (Tables, formulas and applications). − New York: Academic Press,1980, V.1−2. − 739 с.
- *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.
- *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 (CONTINUATION)

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

In the second part the further research of the effect of transmission enhancement of the solar radiation by the tropospheric cloudiness in the presence of thin clouds and/or aerosol layers over it is carried out. It is shown, that emerging of the thin scattering layers over the tropospheric cloudiness can give rise to the enhancement of the solar radiation transfer to the Earth surface not only in the twilight conditions but also at rather small solar zenith angles. It promotes also the heating and probably the decay of the lower clouds. It is the authors’ opinion that this effect plays a key role in the Arctic climatic change and affect probably the climatic change in the midlatitudes.

KEYWORDS: ARCTIC, CLIMATE, HIGH CLOUDS, RADIATION TRANSFER TO THE SURFACE, CLOUDINESS DECAY.