



УДК 551.521.31:551.583+537.291

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

Ю. Е. Беликов¹, С. В. Дышлевский¹, А. Ю. Репин¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

В заключительной части работы, посвященной эффекту увеличения пропускания солнечного излучения тропосферной облачностью при появлении над ней тонких облаков и/или аэрозольных слоев, проведен дополнительный анализ этого эффекта для целого набора зенитных углов Солнца и различных высот над поверхностью земли. При этом показано, что при появлении тонких рассеивающих слоев над тропосферной облачностью возрастают потоки солнечного излучения не только на земной поверхности, но и внутри нижней тропосферной облачности, что может привести к частичному или полному исчезновению нижней облачности. Анализ показывает, что влияние высокой облачности на разрушение нижней облачности может происходить не только в высоких, но и в средних широтах, что подтверждается анализом спутниковых измерений. По мнению авторов, увеличение тонких высоких облаков и аэрозольных слоев в верхней тропосфере и стратосфере Арктики в последние десятилетия, связанное с уменьшением солнечной активности и особенностями фокусировки заряженных частиц при быстром изменении положения северного магнитного полюса, и определяет особенности климатических изменений в Арктике.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей части статьи [Беликов и др., 2020] на основе сферической модели переноса излучения, [Беликов и др., 2018e; Беликов и др., 2018f; Беликов и др., 2018g], были проанализированы условия и причины увеличения потоков излучения на земной поверхности и внутри низкой тропосферной облачности при появлении над ней тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев. С этой целью было проведено сравнение переноса излучения в двухслойной и однослойной атмосфере. Двухслойная атмосфера состоит из нижнего оптически плотного слоя крупных частиц, рассеивающих по теории Ми, и верхнего оптически тонкого слоя мелких частиц, рассеивающих согласно теории Рэлея. В то время как однослойная модель состоит только из одного указанного нижнего слоя (см. [Беликов и др., 2020], рис. 1).

Напомним, что авторы считают, что именно увеличение количества тонких высоких облаков и аэрозольных слоев в последние десятилетия, связанное с понижением солнечной активности и особенностью фокусировки заряженных частиц магнитным полем в условиях быстрого движения северного магнитного полюса, определяют характерные особенности потепления Арктики [Беликов и др., 2018a; Беликов и др., 2018b; Беликов и др., 2018c; Беликов и др., 2017; Беликов и др., 2019a;

Беликов и др., 2019b; Беликов и др., 2019d]. При этом важной особенностью арктического региона является тот факт, что большую часть времени в нем существует низкая тропосферная облачность [Schweiger et al., 1999; Wang and Key, 2003], и, появление тонких рассеивающих слоев увеличивает перенос излучения внутрь облаков и к земной поверхности. Важной особенностью, при которой возможно указанное увеличение потока солнечного излучения является различие индикатрис рассеяния крупных частиц нижней облачности и относительно более мелких частиц тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев.

В работе [Беликов и др., 2020] получены важные особенности переноса излучения не только для сумеречных условий, рассмотренных в работе [Беликов и др., 2019с], но и для небольших зенитных углов Солнца. В частности, для зенитных углов Солнца 80, 60 и 30 градусов и трех высот – на земной поверхности и внутри нижнего облака, получены потоки и угловые распределения интенсивностей излучения, проведен анализ и сравнение переноса излучения в однослойной и двухслойной атмосфере.

В данной работе будет проведен дополнительный анализ переноса излучения в двухслойной и однослойной атмосфере для целого набора высот и зенитных углов, а также будет рассмотрено возможное влияние тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на уменьшение и разрушение нижней облачности, что может существенным образом усилить рассматриваемый механизм влияния верхних рассеивающих слоев на климат Арктики. При этом будут рассмотрены также экспериментальные подтверждения возможности существования этого эффекта.

2. ОСОБЕННОСТИ ВЫСОТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗЕНИТНЫХ УГЛАХ СОЛНЦА

На рисунке 1 показаны отношения полных потоков излучения в зависимости от зенитного угла Солнца внутри нижнего облака для высот 0, 8, 9, и 9.8 км, что соответствует оптическим толщинам 4, 0.8, 0.4 и 0.08 от верхнего края облака (см. [Беликов и др., 2020], рис. 1). На рисунке 1б указанная зависимость построена для небольших зенитных углов Солнца. Как видно из этих рисунков, для земной поверхности и для высот, меньших примерно 9 км, наблюдается плавное уменьшение отношения потоков излучения с уменьшением зенитного угла Солнца. На высотах более ~9 км проявляется влияние прямых потоков излучения, и рассматриваемая зависимость становится более сложной. В работе [Беликов и др., 2020] был сделан анализ этой зависимости, ниже этот вопрос будет рассмотрен более подробно.

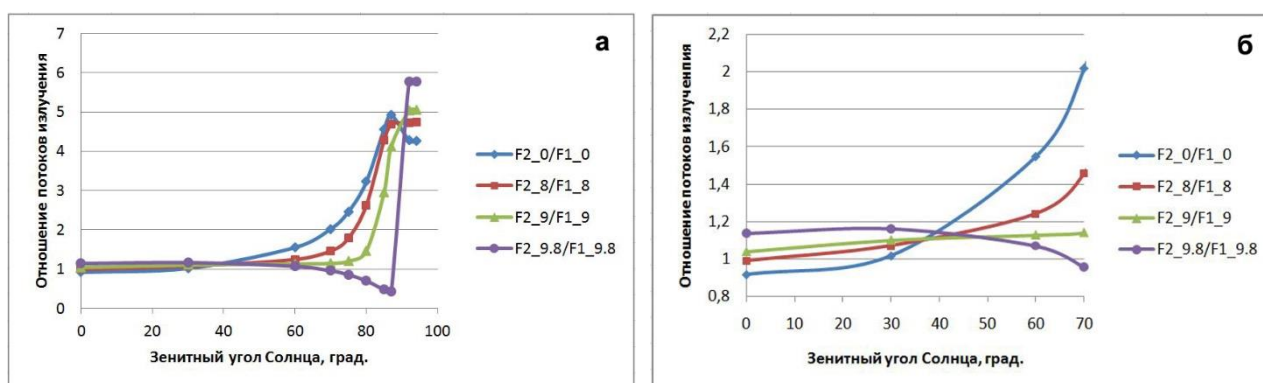


Рис. 1. Отношения полного потока излучения в двухслойной атмосфере к полному потоку в однослойной атмосфере при различных зенитных углах Солнца на высотах 0, 8, 9 и 9.8 км внутри нижнего облака.

В то же время, как отмечалось ранее, разности полных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере для земной поверхности вовсе не уменьшаются при увеличении высоты Солнца. Более того, как видно из рис. 2, в величине разности отмечается максимум в зависимости разности потоков излучения от зенитного угла Солнца на земной поверхности. Этот максимум соответствует зенитному углу Солнца примерно 60 градусов.

Не менее важными представляются результаты, которые свидетельствуют о том, что не только на поверхности, но и внутри нижнего облака на различных высотах внутри него могут возрастать потоки излучения при появлении сверху тонких рассеивающих слоев (рис.2). При этом зависимость от

зенитного угла Солнца не является монотонно убывающей, как для относительного эффекта, показанного на рис. 1, и зависит от высоты или оптической толщины от верхнего края нижнего облака.

На высотах 0–6 км, что соответствует диапазону указанных оптических толщин 4–1,6, максимум рассматриваемой разности потоков приходится на зенитные углы Солнца ~60–70 градусов. Тогда как на высотах, больших ~8–9 км или с оптическими толщинами, меньшими примерно 0,8 от верхнего края нижнего облака, из-за влияния прямых потоков (см. ниже) происходит трансформация кривой, которая приобретает характерный минимум на высотах, близких к поверхности нижнего слоя и больших зенитных углах Солнца (рис. 2).

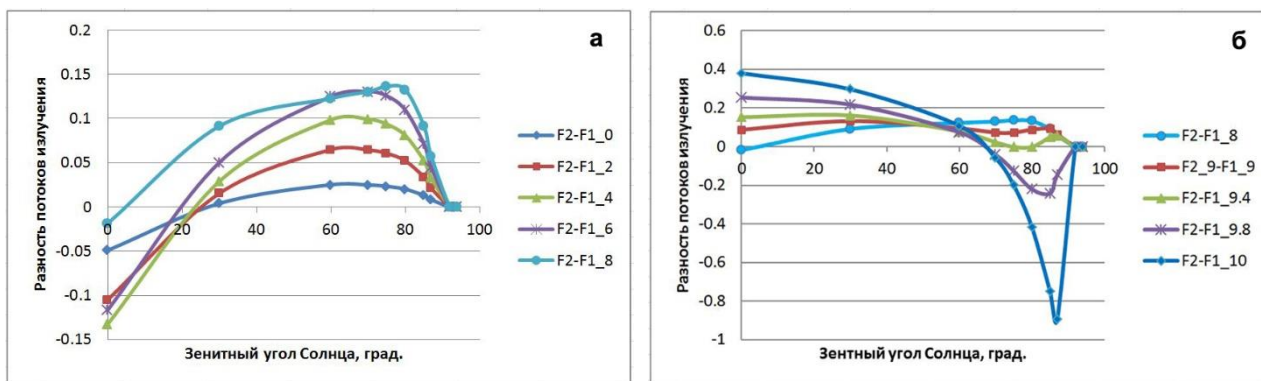


Рис. 2. Разности полного потока излучения в двухслойной атмосфере и полного потока в однослойной атмосфере при различных зенитных углах Солнца на высотах 0, 2, 4, 6, 8, 9, 9.4, 9.8 и 10 км внутри и на верхней границе нижнего облака.

На рисунках 3а и 3б поясняется такое поведение зависимости изменения полных потоков излучения на высотах, близких к верхнему краю нижнего облака. На рисунке 3а приведены рассчитанные разности прямых (красная кривая) и рассеянных (синяя кривая) многократных потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на высоте 9.8 км. Как видно из этого рисунка, разность прямых потоков отрицательна и имеет характерный минимум при зенитном угле Солнца 80 градусов.

Подобная зависимость обусловлена тем, что с увеличением зенитного угла Солнца в двухслойной модели значительно усиливается ослабление прямого солнечного потока верхним тонким облачным слоем (оптическая толщина 0.2) по сравнению с его ослаблением верхней частью нижнего облака (оптическая толщина 0.08). При этом одновременно абсолютные значения рассматриваемых потоков, а значит и их разности, уменьшаются. После захода Солнца за горизонт разность очень незначительна, практически близка к нулю (расчеты сделаны для зенитных углов 92 и 94 градуса – последние две точки на графике). В то же время разность многократных рассеянных потоков излучения на высоте 9.8 км возрастает с уменьшением зенитного угла Солнца (рис. 3а). Результирующая кривая, являющейся суммой двух кривых, представлена на рис. 3б и определяет зависимость рассматриваемого эффекта от зенитного угла Солнца на высотах, близких к поверхности нижнего облака.

На рис. 3в и 3г показаны аналогичные зависимости, как и на рис. 3а и 3б только для высоты 4 км (оптическая глубина 2,4). Как видно из этого рисунка влияние прямых потоков излучения на высоте 4 км невелико. Результирующая кривая, отражающая зависимость полного потока солнечного излучения от зенитного угла Солнца на этой высоте, имеет типичный максимум примерно при 60–70 градусах.

Подобная зависимость наблюдается также на других высотах, соответствующих достаточно большой оптической толщине до верхнего края нижнего облака. При этом эффект усиления потока излучения верхним рассеивающим слоем сохраняется при небольшом зенитном угле Солнца 30 градусов. В то время как при расчетах в приближении однократного рассеяния этот эффект усиления исчезает примерно при зенитном угле Солнца 70 градусов (рис. 3д, рис. 3е). Это еще раз подчеркивает важную роль многократно рассеянного излучения в формировании рассматриваемого эффекта не только на земной поверхности, но и внутри нижнего тропосферного облака.

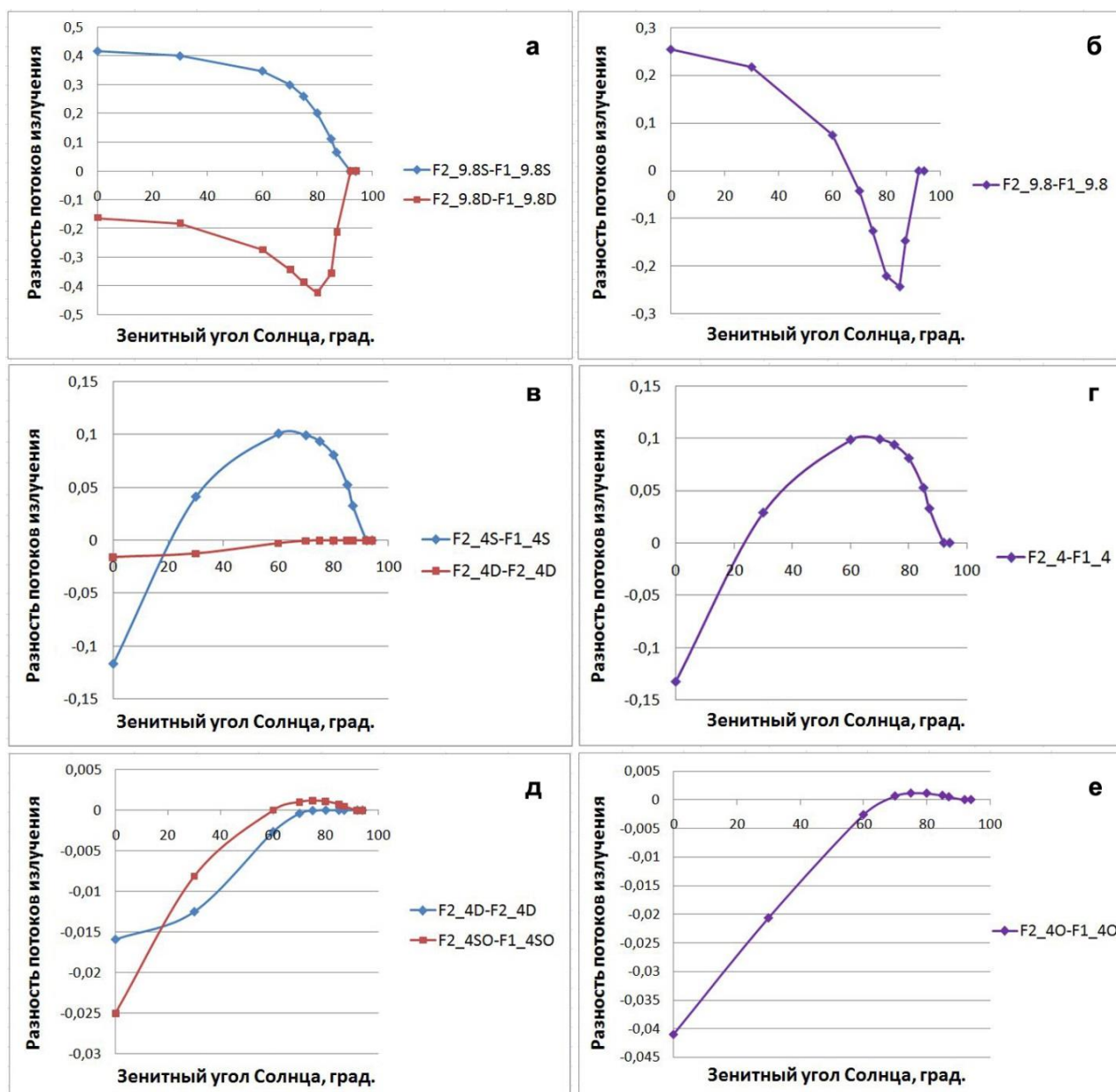


Рис. 3. Показано влияние прямых потоков излучения на формирование разности полного потока излучения в двухслойной атмосфере и однослойной атмосфере на высоте 9.8 (а, б) и 4 км (в, г). Аналогичное влияние прямых потоков излучения при вычислениях в приближении однократного рассеяния на высоте 4 км (д, е).

Таким образом, подтверждается сделанный ранее вывод о том, что так называемый сумеречный эффект усиления переноса солнечного излучения к земной поверхности через нижнюю тропосферную облачность вовсе не является сумеречным, если исходить из абсолютных данных. Не менее важен вывод о том, что не только на поверхности, но и внутри нижнего облака на различных высотах могут возрастать потоки излучения при появлении вверху тонких рассеивающих слоев. При этом усиление потоков излучения внутри облака может означать его нагревание (испарение капель) и даже разрушение, если происходит поглощение этим облаком солнечной энергии.

Анализ рис. 2 показывает, что нагрев нижнего облачного слоя может происходить до зенитных углов ~30 градусов на высотах 0–8 км, что соответствует диапазону изменения оптических глубин от верхнего края нижнего облака 4–0.8. В то же время на самых верхних уровнях нижнего облака на высотах ~9.4–10 км (оптическая толщина от верхнего края облака ~ 0–0.24) при увеличении зенитных углов Солнца до ~70–90 градусов происходит уменьшение потоков, что может приводить к

охлаждению и дополнительному усилению верхнего края облачности. Однако при зенитных углах меньших 60—70 градусов происходит усиление потоков излучения внутри облака, что содействует нагреванию и, возможно, разрушению нижней облачности даже при нулевом зенитном угле Солнца.

Важность этого эффекта нагревания и разрушения нижней облачности заключается в том, что уменьшение нижней облачности, а тем более ее разрушение может значительно увеличить потоки солнечного излучения на поверхности, и этот эффект может быть более значительным, чем эффект усиления излучения на поверхности при неизменной нижней облачности. Он может также действовать не только в зимней, но и в летней Арктике, а также в средних широтах.

Рассмотрим экспериментальные данные, которые подтверждают возможность существования рассмотренного механизма влияния верхних рассеивающих слоев на нагревание и разрушение нижней тропосферной облачности.

3. ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ВЫСОКИХ ОБЛАКОВ И АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЕВ НА НАГРЕВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Как было показано выше, появление тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев над тропосферной облачностью может привести к увеличению потоков излучения, нагреванию и испарению капель нижних облаков, т.е. к разрушению, возможно частичному, нижней тропосферной облачности. Для того, чтобы оценить, насколько значительным может быть рассматриваемый эффект нагревания, предположим, что внутри нижней тропосферной облачности в пределах спектрального интервала 0.5 – 1 мкм происходит небольшое поглощение солнечного излучения, например 5%. Предположим, что при таком небольшом поглощении вклад многократных эффектов рассеяния не изменится.

Из рисунка 2а видно, что превышение потока солнечного излучения в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной внутри и на выходе из нижнего слоя значительно и достигает величины ~0,02 от внеатмосферного солнечного потока в сумеречных и дневных условиях. Внутри нижнего облака эта величина может возрасти в несколько раз (рис.2а). Если сделать оценки потока излучения для спектрального интервала 0,5 – 1 мкм, то поток на поверхности Арктики и внутри облака составит при этом ~10 Вт/м². Можно также оценить изменение температуры внутри тропосферного облака. Предположив, что 5% от указанного потока излучения поглощается внутри тропосферного облака толщиной 1 км, увеличение температуры за 1 месяц составит ~3К. Это величина приблизительно совпадает с оценками повышения температуры тропосферы, составляющей несколько градусов, в годы усиленного таяния ледового покрытия Арктики [Schweiger and Lindsay, 2008].

В работе [Kay et al., 2008] показано, что во время сильного таяния ледового покрытия Арктики летом 2007 г. наблюдалось увеличение температуры нижней тропосферы примерно на 5 градусов и уменьшение облачности над районами усиленного таяния по сравнению с аналогичными наблюдениями осенью 2006 г. При этом уменьшение ледового покрытия в Арктике в 2006 году не было столь сильным, как в 2007 году. Это изменение температуры нижней тропосферы и повлекло, по нашему мнению, уменьшение облачности в нижней тропосфере. В то же время причиной такого изменения температуры может быть увеличение количества тонких облаков и аэрозольных слоев на высотах верхней тропосферы и стратосферы в 2007г. по сравнению с 2006 г. Об этом косвенно свидетельствует понижение температуры и увеличение относительной влажности верхней тропосферы и нижней стратосферы в 2007 г. по сравнению с 2006 г. [Kay et al., 2008].

Остается еще важный вопрос, насколько глобален рассмотренный эффект, возможно ли влияние тонких высоких облаков на уменьшение и разрушение нижней облачности не только в высоких, но и в более низких широтах?

Рассмотрим анализ спутниковых данных, выполненный в работе [Usoskin et al., 2006]. Этот анализ, по всей вероятности, подтверждает действие рассматриваемого нами эффекта не только в высоких, но также и в средних широтах.

На рисунке 4 представлено географическое распределение коэффициентов корреляции между общим количеством средней+высокой облачности (sum) и низкой облачности (low) [Usoskin et al., 2006]. Как видно из рис. 4 коэффициенты корреляции между средней+высокой облачностью и низкой облачностью отрицательны и имеют высокие значения, достигающие уровня ~0.6–0.7 практически по

всему земному шару за исключением тропической зоны, где коэффициент корреляции может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Вычисления коэффициентов корреляции основаны на спутниковой базе данных ISCCP-D2 International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP (<http://isccp.giss.nasa.gov>), которая позволяет определить ежемесячное и годовое количество облаков за период 1984—2005 гг. (процент покрытия облаками данного типа) в ИК области спектра на географической сетке размером $5^\circ \times 5^\circ$. Низкая облачность в рассматриваемой базе данных соответствует атмосферному давлению $P > 680$ мбар (примерно высота $H < 3,2$ км), средняя соответствует $440 < P < 680$ ($3,2 < H < 6,5$ км) и верхняя $P < 440$ мбар ($H > 6,5$ км).

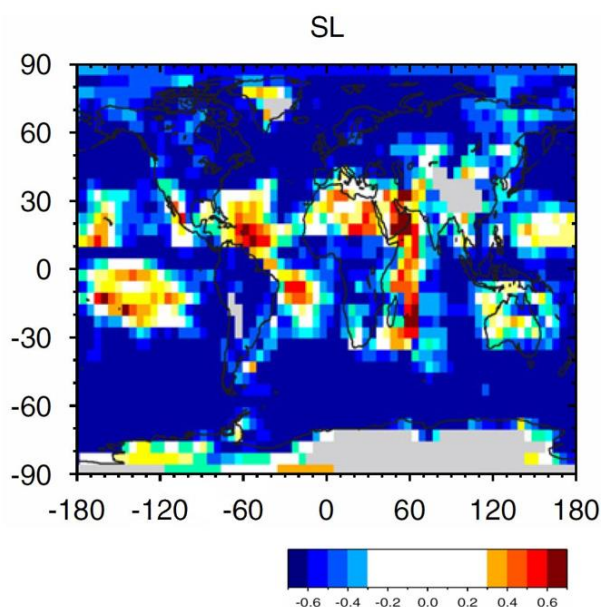


Рис. 4. Географическое распределение коэффициента корреляции между средней+высокой облачностью (sum) и низкой облачностью (low) согласно [Usoskin et al., 2006]. Внизу показана цветовая шкала, отражающая степень корреляции указанных величин. Красный цвет соответствует значительной положительной корреляции, синий цвет значительной отрицательной корреляции.

Отметим, что в данной работе [Usoskin et al., 2006] вычисляются не только прямые коэффициенты корреляции двух рассматриваемых величин, но также проводится анализ с учетом косвенного влияния третьей величин, а именно ионизации космического излучения. Важным является тот факт, что географическое распределение рассматриваемого коэффициента корреляции практически не меняется при учете указанного фактора. Более подробный анализ взаимосвязи этих и других величин можно найти в [Usoskin et al., 2006].

Необходимо отметить, что в ряде работ указывается, что спутниковые данные ISCCP могут быть не очень надежными из-за влияния верхней облачности на регистрацию нижней и наоборот [Schweiger and Lindsay, 2008; Usoskin et al., 2006]. Верхняя облачность может затенять нижнюю, и, с другой стороны, на фоне слишком ярких низких облаков могут быть неразличимы менее яркие верхние облака. По этому поводу ведутся дискуссии. Работа [Usoskin et al., 2006] как раз и посвящена вопросу, насколько можно доверять спутниковым измерениям. Анализ авторов [Usoskin et al., 2006] показывает, что вряд ли маскировка верхними облаками нижних доминирует в спутниковых измерениях. Дело в том, что маскировка должна мгновенно влиять на

распределение нижней облачности, однако анализ показывает, что это далеко не так.

Анализ образцов распределения облачности по земному шару в отдельные сезоны показывает, что на распределение нижней облачности по земному шару большое влияние оказывают материки, над которыми количество облачности меньше, а над океанами больше. В отличие от нижней облачности, распределение верхней и средней облачности скорее зональное [Usoskin et al., 2006]. При этом отмечается запаздывание во влиянии верхней и средней облачности на нижнюю, что возможно, связано с метеорологическими условиями [Usoskin et al., 2006]. Как отмечалось выше, маскировка таким образом действовать не может. Это указывает на достаточную надежность спутниковых данных измерений и выводов, которые можно сделать из ее анализа. Авторы [Usoskin et al., 2006] уверены, что существует физический механизм воздействия верхней облачности на нижнюю.

Проведенный нами выше анализ показывает, что таким механизмом может быть усиление переноса излучения верхними и средними облаками к земной поверхности и внутрь низких облаков. Увеличение температуры поверхности и нижних слоев атмосферы приводит к усилению испарения капель внутри нижнего облака и его частичному или полному разрушению. При этом одним из основных условий такого влияния высокой облачности на нижнюю, как показывает наш анализ, является различный состав частиц верхних и нижних облаков, а именно нижние облака должны состоять из более крупных частиц по сравнению с частицами, из которых состоит верхнее облако.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе решения уравнения переноса излучения проведен анализ особенностей влияния тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев на пропускание солнечного излучения тропосферной облачностью при различных зенитных углах Солнца. Для анализа этих особенностей использовалось сравнение переноса излучения в однослойной и двухслойной моделях облачности.

Вычисления показали, что отношение потока в двухслойной атмосфере к потоку в однослойной атмосфере значительно больше единицы в сумеречных условиях и уменьшается с уменьшением зенитного угла Солнца. В то же время, абсолютные разности потоков излучения в двухслойной и однослойной атмосфере на земной поверхности и внутри нижнего облака положительны в сумеречных условиях. При этом они увеличиваются с уменьшением зенитного угла Солнца, достигая максимальных значений при зенитных углах Солнца 60—70 градусов и уменьшаясь при дальнейшем уменьшении зенитного угла Солнца. Исключение из этой закономерности проявляется на высотах, близких к верхней границе нижнего облака, где из-за влияния прямых потоков излучения разности полных потоков в двухслойной и однослойной атмосфере отрицательны при больших зенитных углах Солнца и становятся положительными при зенитных углах Солнца, меньших ~70 градусов.

Таким образом, потоки излучения в двухслойной атмосфере могут превышать соответствующие потоки излучения однослойной атмосферы на земной поверхности и внутри большей части нижнего слоя облачности не только в сумеречных условиях, но и при небольших зенитных углах Солнца. При этом диапазон зенитных углов Солнца, в котором проявляется рассматриваемый эффект составляет ~30—96 градусов. Основную роль в существовании этого эффекта при небольших зенитных углах Солнца играет многократно рассеянное излучение, которое, как показывает исследование углового распределения интенсивностей излучения, дает основной вклад в направлениях отличных от околосолнечных направлений визирования.

Предварительный анализ показывает, что появление тонких высоких облаков и/или аэрозольных слоев над тропосферной облачностью может не только увеличивать потоки солнечного излучения на земной поверхности, но также при наличии поглощения внутри нижней тропосферной облачности приводить к нагреванию и испарению капель тропосферных облаков. В результате происходит уменьшение и, возможно, даже исчезновение нижней облачности. Естественно, что уменьшение, и, тем более, исчезновение облачности приведет к резкому увеличению потока излучения на земную поверхность. Оценки показывают, что при появлении тонких облаков над тропосферной облачностью с оптическими характеристиками, близкими к рассмотренным, поток солнечного излучения на земной поверхности и внутри нижнего облака может достигнуть ~10 Вт/м². При этом если, предположить существование небольшого поглощения ~5% в нижнем облаке, то его температура может возрасти примерно на несколько градусов, что может увеличить испарение капель и привести к уменьшению облачности.

В то же время, приводимые в настоящей работе результаты получены для случая чисто рассеивающей атмосферы. Анализ показывает, что при наличии поглощения в нижнем слое кратность рассеивающего излучения сильно уменьшается, что должно приводить к уменьшению или исчезновению рассматриваемого эффекта при небольших зенитных углах Солнца. Этот вывод основан на сравнении расчетов с учетом многократного рассеяния и в приближении однократного рассеяния. Поэтому при больших зенитных углах Солнца рассматриваемый эффект должен проявляться как в ближней ИК области спектра, включая полосы поглощения, так и в красной области спектра с небольшим поглощением. Однако при уменьшении зенитных углов Солнца эффект исчезает при сильном поглощении нижнего облака, т.е. в ближней ИК области спектра внутри полос поглощения. Для более точной оценки рассматриваемого эффекта необходимо провести дополнительные расчеты и анализ переноса излучения в красной и ближней ИК области спектра.

Анализ экспериментальных данных подтверждает существования механизма влияния верхних облаков и средних облаков на уменьшение количества нижней облачности. При этом географическое распределение коэффициента корреляции между средней+высокой облачностью (sum) и низкой облачностью (low) согласно [Usoskin et al., 2006] показывает, что наиболее сильное проявление этого механизма существует в высоких и средних широтах.

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, 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., 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., Репин А.Ю. Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики. // Гелиогеофизические исследования. Вып. 24.13-19, 2019с.
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe3d1ff1f11ac75efa02965334726fbd.pdf>
- Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю. Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики (продолжение). // Гелиогеофизические исследования, 2020, (см. настоящий выпуск).
- 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, 2018е.
<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, 2018г. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe11eaf48d83f189c910ebd5575972e52.pdf>
- Kay J.E. et. al. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum, GRL, 2008, v.35, L08503, doi:10.1029/2008GL033451
- 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.
- Schweiger A.J. and Lindsay R.W., 2008: Relationships between Arctic Sea Ice and Clouds during Autumn // J. Climat. doi: 10.1175/2008JCLI2156.1
- Usoskin I.G., Voiculescu M., Kovaltsov G.A., Mursula K. Correlation between clouds at different altitudes and solar activity: Fact or Artifact? // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 68. 2006. P. 2164–2172.
- 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 (CONCLUSION)

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

In the final part on the investigation 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 an additional analysis was carried out of this effect for a number of solar zenith angles and altitudes above the Earth surface. It is shown that in a case of thin high clouds and aerosol layers emerging over the tropospheric cloudiness the solar radiation fluxes increase both at the Earth surface and inside the lower tropospheric clouds. This process can bring to the partial or complete decay of the cloudiness. The analysis shows that the high clouds effect on the lower cloudiness decay can occur not only in the high latitudes, but also in the midlatitudes, and this fact is confirmed by the satellite observations. It is the authors' opinion that it is a decrease of the solar activity and peculiarities of the charged particles focusing due to the rapid motion of the North magnetic pole cause the increase of thin high clouds and aerosol layers amount in the upper troposphere define the specifics of the climatic change in the Arctic.

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