

Влияние оптических параметров атмосферы на характеристики солнечной радиации

А.В. Васильев, И.Н. Мельникова, С.С. Новиков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mails: irina.melno@yandex.ru; ssn2694ssn@mail.ru

Работа посвящена исследованию зависимостей характеристик солнечной радиации от оптических моделей атмосферы Земли. В статье приведены результаты для отраженного и пропущенного атмосферой полусферических потоков, лучистого притока, доли рассеянной радиации в пропущенном потоке и вклада разных порядков рассеяния в безоблачной и облачной атмосфере. Рассмотрены разные значения оптических параметров атмосферы, альbedo подстилающей поверхности и геометрии освещения. Для расчетов использованы компьютерные коды, составленные для моделей однородной атмосферы и реализующие четыре метода теории переноса: приближение однократного рассеяния, метод Эддингтона, метод Монте-Карло и метод асимптотических формул. В результате выявлены значения параметров, для которых зависимости лучистого притока от зенитного угла Солнца и отраженного потока от оптической толщины минимально слабые и описываются линейными функциями, зависящими от оптической толщины. Предложенные простые линейные аппроксимации зависимостей позволяют легко оценить радиационные характеристики при решении обратных задач дистанционного зондирования — восстановления оптических параметров атмосферы и поверхности, в технических задачах при выборе типов солнечных батарей, при осуществлении интегрирования по зенитному углу солнца.

Ключевые слова: солнечная радиация, полусферический поток, лучистый приток тепла, альbedo подстилающей поверхности, оптическая толщина, вероятность выживания кванта

Одобрена к печати: 29.08.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-285-299

Введение

Исследования влияния выбора оптической модели на рассчитываемые по ней характеристики радиации предпринимались многократно (Сушкевич, 2005; Dong, Ackerman, Clothiaux. 1998; Gao et al., 2008; Коерке et al., 2009), но, однако, они не теряют актуальности ввиду многообразия оптических свойств атмосферы и типа решаемых задач. В упомянутых выше работах были использованы достаточно трудоемкие при реализации методы, требующие точного описания сложных неоднородных оптических моделей атмосферы. Выбор модели может оказывать влияние на рассчитываемое поле радиации в атмосфере. В работе представлены значения отраженного от атмосферы потока солнечной радиации (R), потока пропущенной радиации (T) и лучистого притока (D). Сравнение различных методов, примененных для разных моделей атмосферы, полезно, чтобы понимать, для каких параметров атмосферы подходит тот или иной метод. Результаты работы, в частности предложенные простые аппроксимации, могут найти свое применение как в задачах, использующих решение прямой задачи, например, при проектировании зданий, выборе типа солнечных батарей и т.д., так и в задачах дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности из космоса для восстановления их оптических параметров по измеренным значениям отраженных потоков, учета многократности рассеяния света при лидарном зондировании атмосферы.

Поле солнечной радиации в атмосфере также в большой степени определяется геометрией освещения — зенитным углом солнца (θ). Результаты представлены в относительных единицах потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы F_0 . Для получения

значений радиационных характеристик в абсолютных энергетических единицах их необходимо умножить на F_0 и на $\cos\theta$. В работе расчеты выполнялись с применением компьютерных программ, реализующих четыре метода теории переноса излучения: приближение однократного рассеяния (П1Р), метод Эддингтона (МЭ), метод Монте-Карло (ММК) и метод асимптотических формул МАФ (Марчук, 1988; Минин, 1988; Joseph, Wiscombe, Weiman, 1976; Radiative transfer..., 1990). В статье рассмотрены случаи слабого и сильного поглощения и ряд значений оптической толщины, характерных для безоблачной атмосферы и облака.

1. Модели атмосферы

Модель плоской однородной атмосферы характеризуется оптической толщиной атмосферы (τ), вероятностью выживания кванта, другое название альbedo однократного рассеяния — АОР (ω), индикатрисой рассеяния и альbedo подстилающей поверхности (A). Значения τ рассмотрены в широких пределах — от 0,2, что соответствует чистой безоблачной атмосфере, до 15 — соответствует плотной слоистой облачности, АОР меняем от 0,999 (не загрязненное облако) до 0,75 (очень сильно загрязненная безоблачная атмосфера). Примем аппроксимацию индикатрисы рассеяния функцией Хеньи-Гринстейна (Henyey, Greenstain, 1941), которую можно характеризовать одним параметром асимметрии g .

Таблица 1. Оптические параметры атмосферы и поверхности

τ	ω	g	A
0,2	0,9999	0,2	0
0,5	0,999	0,4	0,5
0,8	0,985	0,55	0,9
3,0	0,98	0,7	
5,0	0,97	0,8	
10	0,75	0,85	

Для исследования влияния индикатрисы рассеяния на характеристики радиации величину g меняли от 0,2 до 0,85. Для анализа было выбрано три значения A : 0; 0,5 и 0,9 (табл. 1), что соответствует отражению от морской поверхности, песка и от свежевывающего снега, а также четыре значения θ : 0; 30; 45 и 60°.

2. Методы расчета и области применимости

Приближение однократного рассеяния. Для интенсивности отраженного и пропущенного солнечного излучения в атмосфере достаточно задать четыре оптических параметра атмосферы и поверхности (τ , ω , g , A) и геометрию задачи. Для рассматриваемого случая однородной атмосферы формулы можно найти в работах (Васильев, Кузнецов, Мельникова, 2008, 2016; Минин, 1988).

Метод Эддингтона (МЭ). МЭ является разновидностью *двухпоточковых аппроксимаций* (Минин, 1988; Harshvardhan, King, 1993; Joseph, Wiscombe, Weiman, 1976; Radiative transfer..., 1985). Двухпоточковые методы в теории переноса излучения основаны на различных аналитических формулах, приближенно описывающих угловое распределение поля восходящей и нисходящей интенсивности на границах плоскопараллельной среды. Выражения для выходящих из атмосферы отраженного и пропущенного потоков (в дальнейшем: *отражения* и *пропускания*) приведены в статьях (Harshvardhan, King, 1993; Radiative transfer..., 1990).

Метод Монте-Карло (ММК). ММК используется в оптике атмосферы для расчета различных характеристик поля излучения. Этот метод радикально отличается от других методов решения уравнения переноса физической наглядностью рассмотрения процесса. Физические основы ММК изложены в работах (Васильев, Кузнецов, Мельникова, 2008; Марчук, 1988). Идея ММК — представление взаимодействия излучения с атмосферой и поверхностью как случайного процесса при цифровом моделировании. Только в ММК можно прямо вычислять энергию излучения, поглощенную в атмосфере, — важнейшую величину для различных задач, в частности климатических моделей, — *лучистый приток солнечной радиации в атмосфере*. Метод также позволяет рассчитывать кратность взаимодействия фотона с атмосферой и (или) поверхностью и, соответственно, распределение по этой кратности вычисляемых величин, что имеет большое значение для исследовательских задач, например, позволяет оценить точность ППР.

Метод асимптотических формул (МАФ). Для R - и T -слоя с τ имеем следующие формулы (Васильев, Кузнецов, Мельникова, 2008; Минин, 1988):

$$T = F^\downarrow(\tau, \eta_0) = \frac{\bar{Q}u(\eta_0)M e^{-k\tau}}{1 - \bar{N}N e^{-2k\tau}}, \quad R = F^\uparrow(0, \eta_0) = a(\eta_0) - \frac{Qu(\eta_0)M\bar{N} e^{-2k\tau}}{1 - \bar{N}N e^{-2k\tau}}, \quad (1)$$

Лучистый приток D в слое с τ рассчитывается по формуле:

$$D = 1 - F^\uparrow(0, \eta_0) - (1 - A)F^\downarrow(\tau, \eta_0) = 1 - a(\eta_0) + \frac{Qu(\eta_0)M e^{-k\tau}}{1 - \bar{N}N e^{-2k\tau}} \left[\bar{N} e^{-k\tau} - \frac{1 - A}{1 - A a_\infty} \right]. \quad (2)$$

Здесь $\eta_0 = \cos\theta$, константы M , N , Q , k и функции $u(\eta_0)$ и $a(\eta_0)$ рассчитываются по формулам из статей (Васильев, Кузнецов, Мельникова, 2008; Минин, 1988), что предусмотрено в применяемых компьютерных кодах с учетом отражения от подстилающей поверхности.

Использованные методы расчета характеристик коротковолновой радиации при распространении в атмосфере обеспечивают разную точность результатов в зависимости от оптических параметров выбранной модели. Метод ППР может применяться в условиях преобладания однократного рассеяния и пренебрежимо малого вклада многократного. Обычно это происходит при небольшой толщине τ или при сильном поглощении радиации в среде. МАФ может применяться в облачной атмосфере в ИК-диапазоне спектра при сильном поглощении радиации. МЭ возможно применять в значительно более широком диапазоне оптических

параметров. Подробно область применимости этого метода рассмотрена в работе (Harshvardhan, King, 1993). ММК эффективно работает в условиях, когда $\tau \leq 10$. Для оптически плотной среды метод требует специальных приемов для ускорения работы и значительного времени расчета по сравнению с другими методами, рассмотренными здесь. И, наконец, МАФ теории переноса излучения используется в условиях оптически плотной атмосферы ($\tau > 5$) и слабого истинного поглощения радиации в атмосфере, и особенно хорошо подходит для расчетов радиации в облачной атмосфере в КВ-диапазоне длин волн. Области применимости некоторых методов пересекаются, поэтому в результатах представлены расчеты, проведенные по нескольким методам, и, таким образом, выполнено сравнение их точности и определена область применимости указанных методов для рассмотренных оптических параметров моделей атмосферы.

3. Отраженный поток радиации

Можно выделить переходные значения ω , где практически отсутствует зависимость от τ для рассматриваемых θ , которые представлены в *табл. 2*.

Таблица 2. Значения ω , для которых отсутствует зависимость R от τ

θ , град	0	30	45	60
ω , $A = 0,5$	0,991	0,987	0,983	0,973
ω , $A = 0,9$	0,9999	0,9994	0,9993	0,9992

На *рис. 1* показаны зависимости R от τ для указанных значений θ . Видно, что если $A > 0$ (в нашем случае $A = 0,5$ и $0,9$), при значениях $\omega = 0,999$ зависимость возрастающая, а при $\omega = 0,75$ — убывающая. Причем переход от возрастания к убыванию зависит от θ .

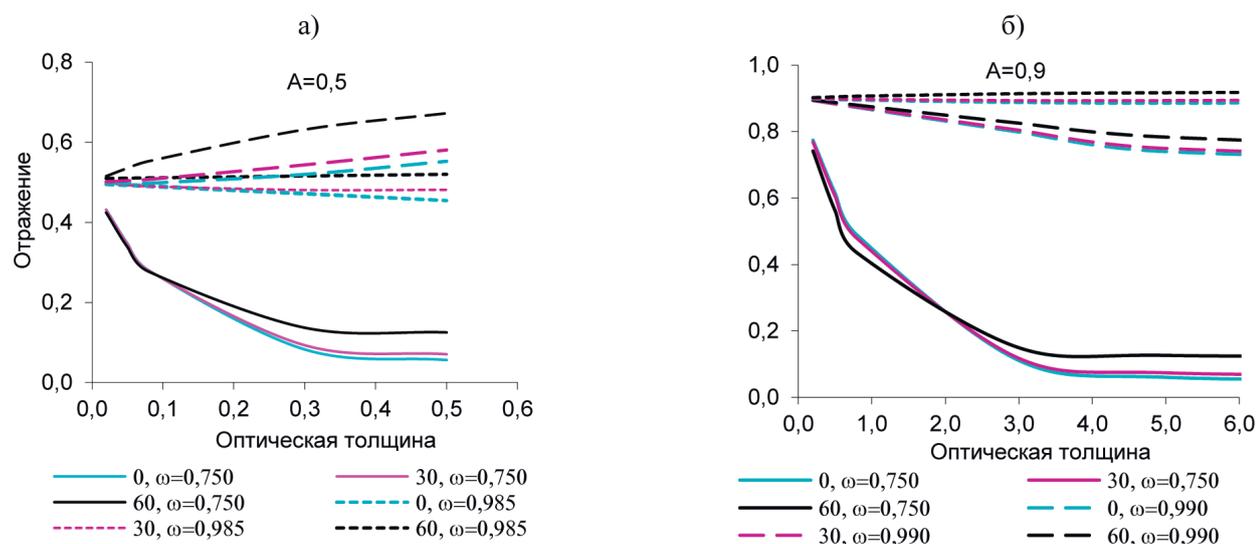


Рис. 1. Зависимость R от τ при $A = 0,5$ и $0,9$. Значения θ в градусах и ω указаны на рисунках

Оптически тонкая атмосфера ($\tau \geq 4$) слабо влияет на зависимость R системой поверхность-атмосфера от ω , в оптически плотной атмосфере R системы заметно меняется при $\omega = 0,75$, по сравнению с $\omega = 0,95$, а также сильнее откликается на вариации θ .

На рис. 2 показаны результаты для R , полученные с применением трех методов расчета: МЭ (сплошные линии), ММК и МАФ. Аппроксимация полученных результатов линейной зависимостью представлена на рисунках для значения $\theta = 0^\circ$. Отметим, что линейная зависимость лучше описывает R при $A = 0,5$ и $0,9$.

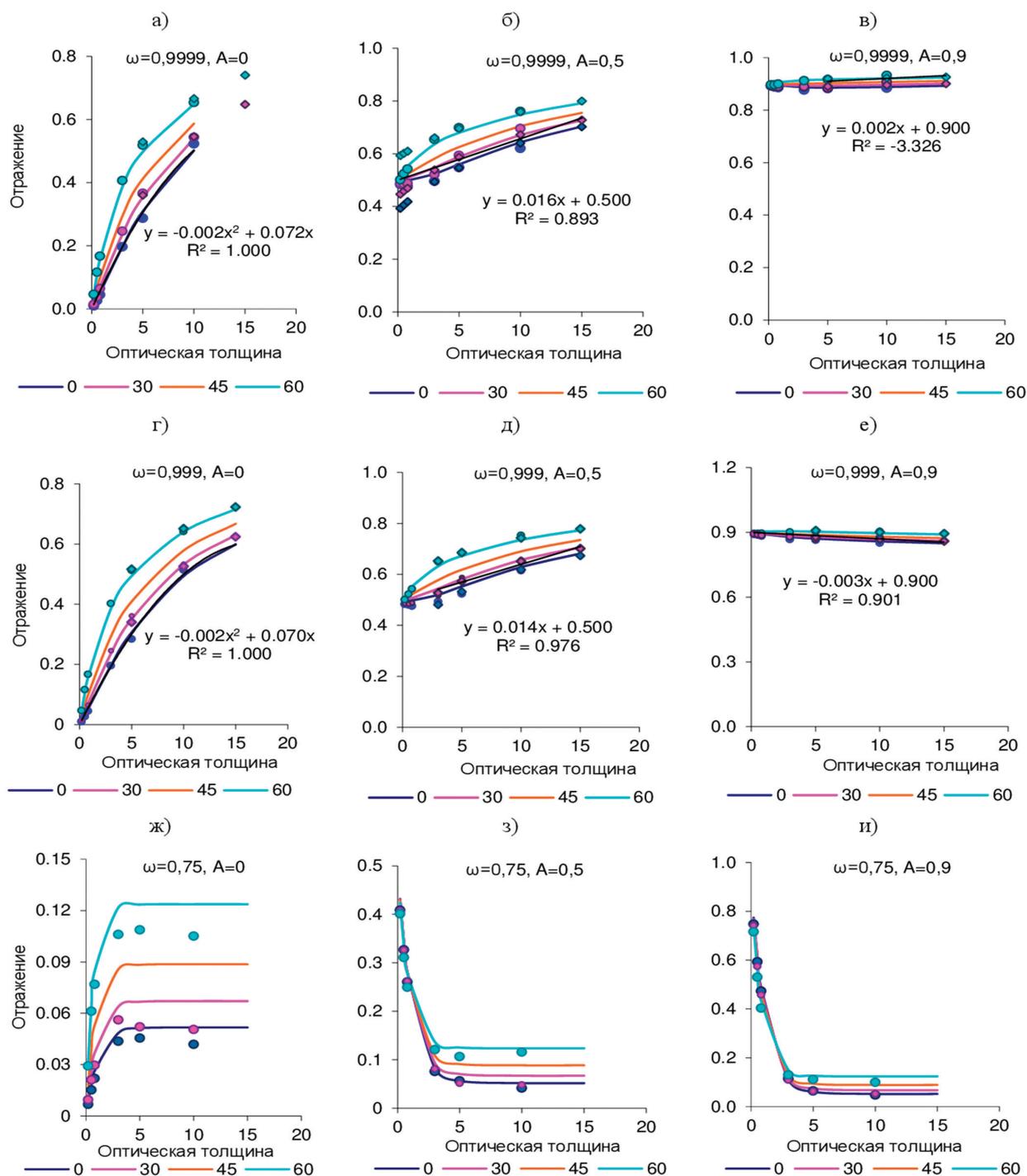


Рис. 2. Зависимость R от τ при четырех значениях θ (на рисунке), $A = 0; 0,5$ и $0,9$ и $\omega = 0,9999; 0,999$ и $0,750$. Символами показаны результаты, ММК (кружки) и МАФ (ромбы)

На рис. 3 представлены зависимости R от параметра g , ω и A . После анализа полученных аппроксимаций можно предложить простые соотношения для оценки отражения: $R=2(1+A)(1-\omega)\tau$ — для слабого поглощения $\omega > 0,9$ и $R=(1+0,1A)(1-\omega)\tau$ — для сильного поглощения $\omega=0,75$ при $\tau \leq 4$. При $\tau > 4$ выражение для отражения $R=3(1+0,15\cos\theta)(1-\omega)\tau$ показывает отсутствие зависимости от A при сильном поглощении $\omega=0,75$. Зависимости R (рис. 3) от оптических параметров атмосферы: параметра g , ω , и A — допускают линейные аппроксимации с хорошей точностью. При этом было зафиксировано $\tau=0,6$ для трех значений θ , указанных на рисунке. Отметим очень слабое влияние θ на зависимость R от ω .

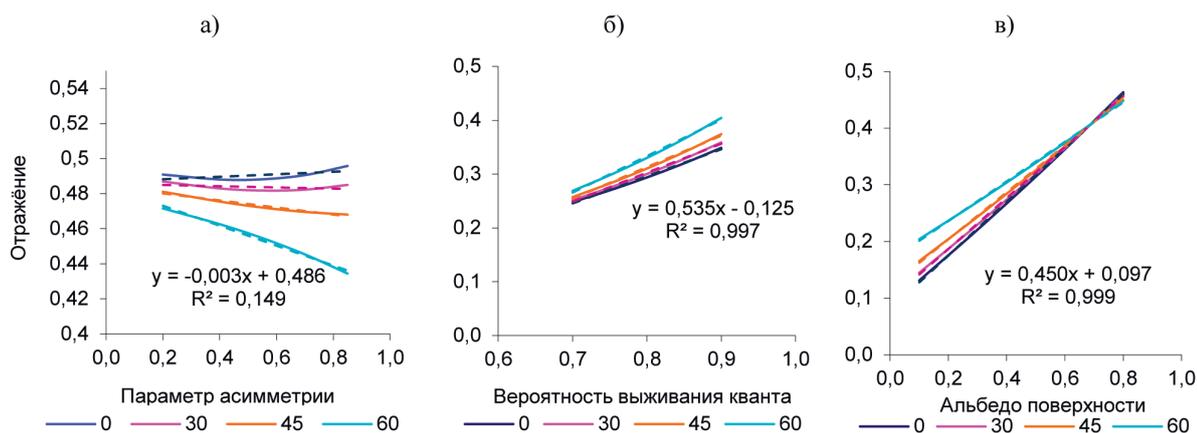


Рис. 3. Зависимость R : а) от g при $A=0,85$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$; б) от ω при $g=0,6$, $\tau=0,6$, $A=0,4$; в) от A при $g=0,3$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$. Прерывистые линии соответствуют линейной аппроксимации

Используемая программа расчета по ММК позволяет определить вклад рассеяния различного порядка в формирование R , который показан на рис. 4 для $\tau=0,2$ и $5,0$; $\omega=0,999$; $\theta=0^\circ$. В случае оптически тонкой атмосферы ($\tau=0,2$) наибольший вклад (60%) в R дает однократное рассеяние.

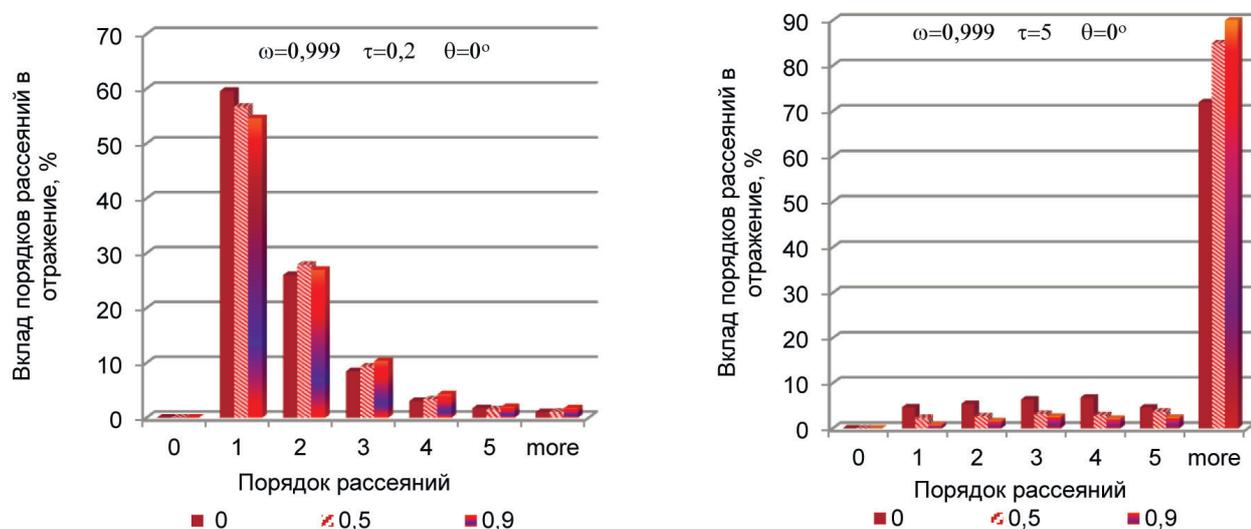


Рис. 4. Вклад различных порядков рассеяния в формирование R для $\tau=0,2$ и 5 , $\omega=0,999$ и при $\theta=0^\circ$. $A=0$; $0,5$ и $0,9$ (указано на рисунке)

Вклады 2-го и 3-го порядков также заметны — 30% и 10%. При этом вклад 1-го порядка уменьшается на 5% с увеличением A от 0 до 0,9, в то время как для более высоких порядков рассеяния вклад несколько растет (на 1–2%). Вклад 5-го и высших порядков незначителен (1,5%). В облачной атмосфере многократное рассеяние порядка выше 5-го дает от 70% до 90% в R (в зависимости от $A=0–0,9$). Малые порядки рассеяния от 1-го до 5-го дают примерно одинаково малый вклад (4–6%). При этом зависимость от A убывает для малых порядков рассеяния и возрастает для высоких порядков.

При $\theta=60^\circ$ вклад рассеяния 1-го порядка уменьшается на 6%, а для более высоких порядков рассеяний вклад увеличивается на 3% в условиях тонкой атмосферы. При $\tau=5$ увеличение θ приводит к увеличению вкладов малых порядков рассеяний до 7,5% и уменьшению вклада многократного рассеяния до 60–75%.

4. Поток солнечной радиации, пропущенной атмосферой

На *рис. 5* представлены зависимости T от τ при рассматриваемых ω , g и A . Видно, что A сильно влияет на величину пропускания и при $\tau \leq 5$ и малых θ . Значение $A=0,5$ приводят к значениям $T > 1$ ($T=1,2$), причем при $A=0,9$ эта особенность сохраняется вплоть до $\tau=10$ и $\theta=30^\circ$.

Сравнение линейных аппроксимаций зависимости T и R от τ : $T=1-0,072\tau$ и $R=0,072\tau$ при слабом поглощении указывает на естественное соотношение между пропусканием и отражением $R=1-T$, строго выполняющееся при чистом рассеянии.

Для оценки зависимости пропускания от других параметров модели можно предложить следующее выражение: $T=0,3(\cos\theta+1,66)+g0,08(1,66-\cos\theta)$, которое следует из анализа *рис. 6*, где представлены зависимости T от g , ω и A . При этом была зафиксирована $\tau=0,6$ для трех значений θ , указанных на рисунке. Видно, что все зависимости хорошо описываются простыми линейными функциями. Отметим слабое влияние g и A . При сильном поглощении $\omega=0,75$ влияние A на пропускание практически отсутствует, а влияние θ незначительно. Очевидно, что при малой τ пропущенное излучение формируется на 80% прямым излучением, однократное рассеяние дает 15%, а рассеяния высших порядков дают вклад ~5%. При этом влияние A уменьшает вклад прямого излучения и рассеяния 1-го порядка и увеличивает вклад высших порядков.

С применением МЭ рассчитано пропускание на вертикальную поверхность (освещенность вертикальной поверхности) с учетом влияния особенностей геометрии освещения, подробно рассмотренных в работе (Kondratyev, Fedorova, 1977) для разных углов наклона поверхности и ориентации. Зависимости освещенности вертикальной поверхности от параметров модели (g , ω и A) показаны на *рис. 7* и хорошо описываются линейными функциями. На *рис. 8* представлена доля рассеянного света в пропускании в зависимости от параметров атмосферы. Видно, что с высокой достоверностью (0,93 и 1,0) зависимости линейные. Формулы линейной регрессии указаны на рисунках для $\theta=30^\circ$.

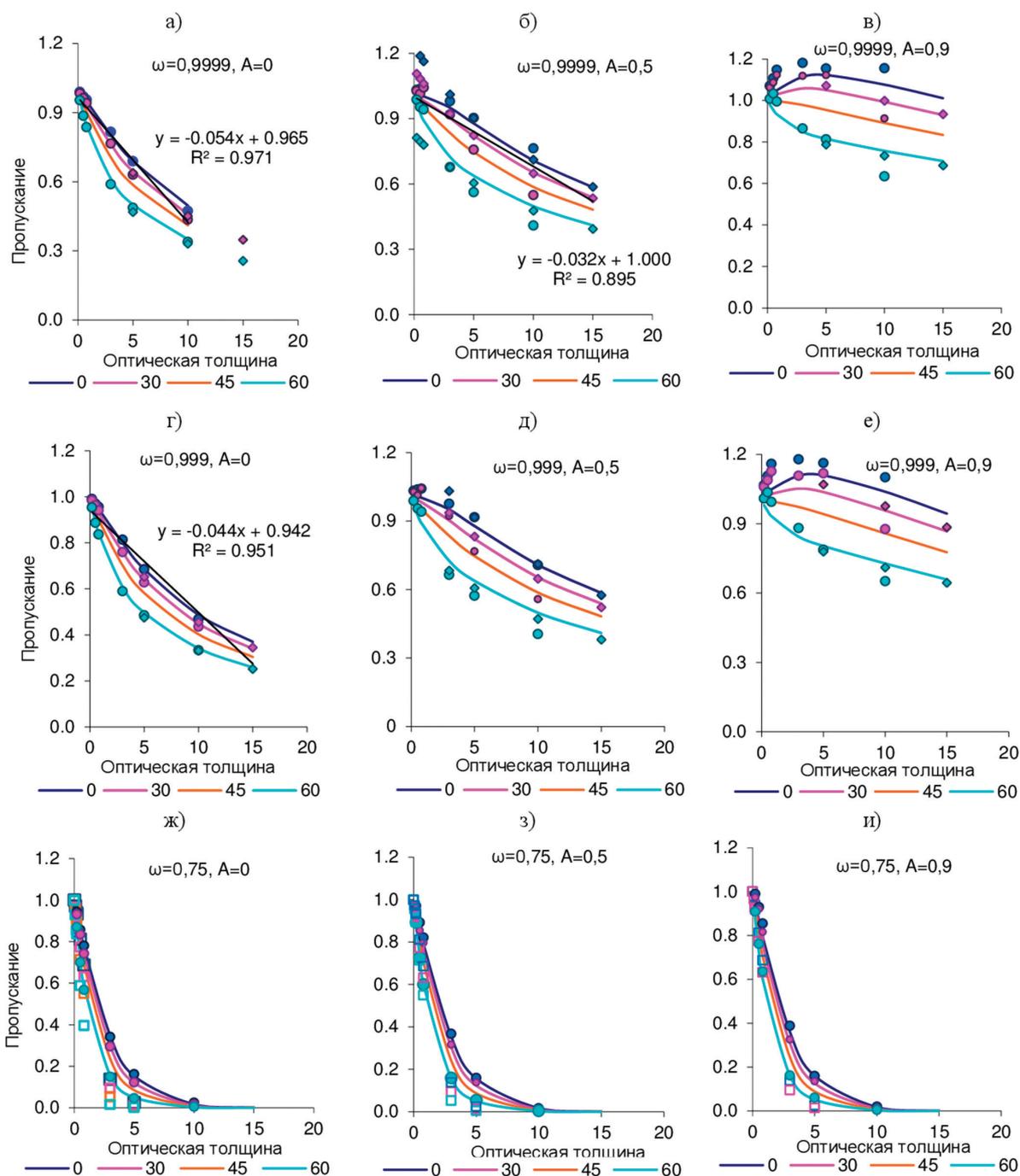


Рис. 5. Зависимость T от τ для четырех значений θ (на рисунке), значений $A=0; 0,5$ и $0,9$ и $\omega=0,9999; 0,999$ и $0,75$. Символами показаны результаты ММК (кружки), МАФ (ромбы) и ППР (квадраты)

Вклад различных порядков рассеяния в формирование пропускания для $\omega=0,999$ двух значений $\tau=0,2$ и 5 и трех значений альбедо $A=0; 0,5$ и $0,9$ показан на рис. 9. Можно отметить, что в случае тонкой атмосферы прямая радиация составляет от 80% ($A=0$) до 75% ($A=0,9$), рассеяние 1-го порядка — 15–13%, а рассеяние высших порядков увеличивается с ростом A , но вклад их остается малым. При $\tau=5$ вклад многократного рассеяния — от 55% ($A=0$) до 75% ($A=0,9$). Вклады порядков от 2-го до 5-го составляют 7–11% и при этом уменьшаются с ростом A . Для $\tau=5$ (не толстое облако, или очень сильно загрязненная атмосфера) вклад рассеяний от 1-го порядка до 5-го составляет ~30%, при этом влияние A на вклад

разных порядков рассеяния тоже неоднозначно: высокое A уменьшает вклад рассеяний порядков от 1-го до 5-го и заметно увеличивает вклад рассеяний высших порядков.

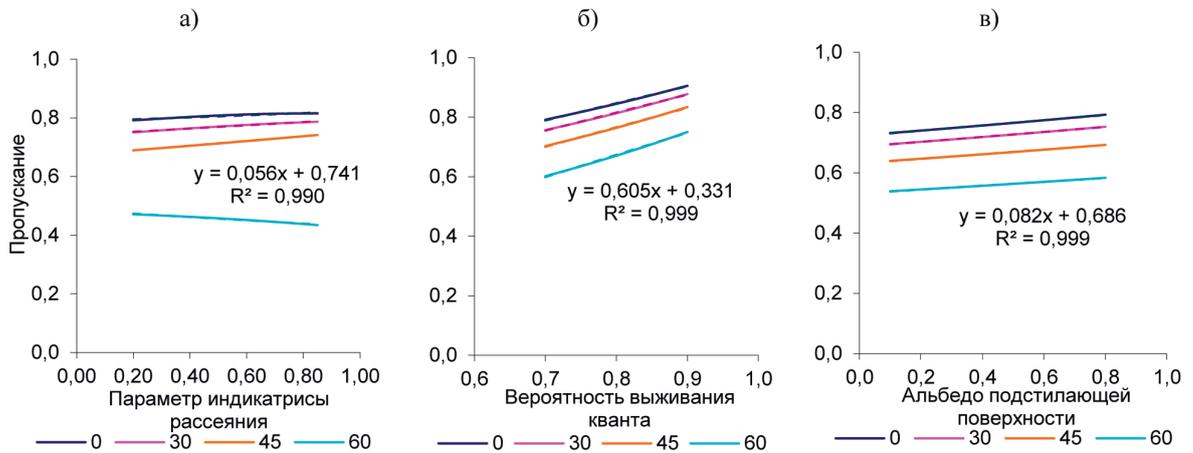


Рис. 6. Зависимость T а) от g при $A=0,85$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$; б) от ω при $g=0,6$, $\tau=0,6$, $A=0,4$; в) от A при $g=0,3$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$. Прерывистые линии соответствуют линейной аппроксимации

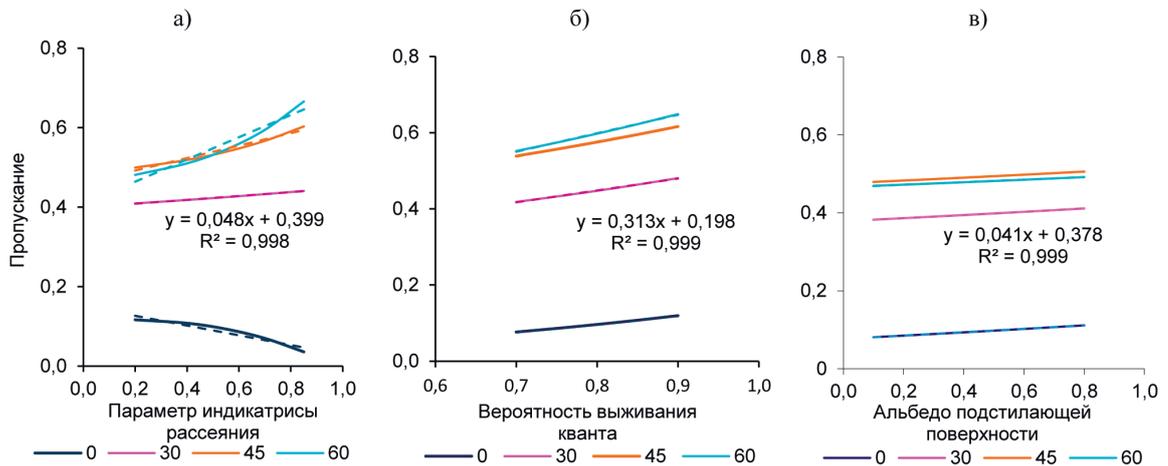


Рис. 7. Зависимость T на вертикальную поверхность: а) от g при $A=0,85$, $\tau=0,6$, $\omega=0,85$; б) от ω при $\tau=0,6$, $g=0,6$, $A=0,4$; в) от A при $g=0,3$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$. Прерывистые линии соответствуют линейной аппроксимации

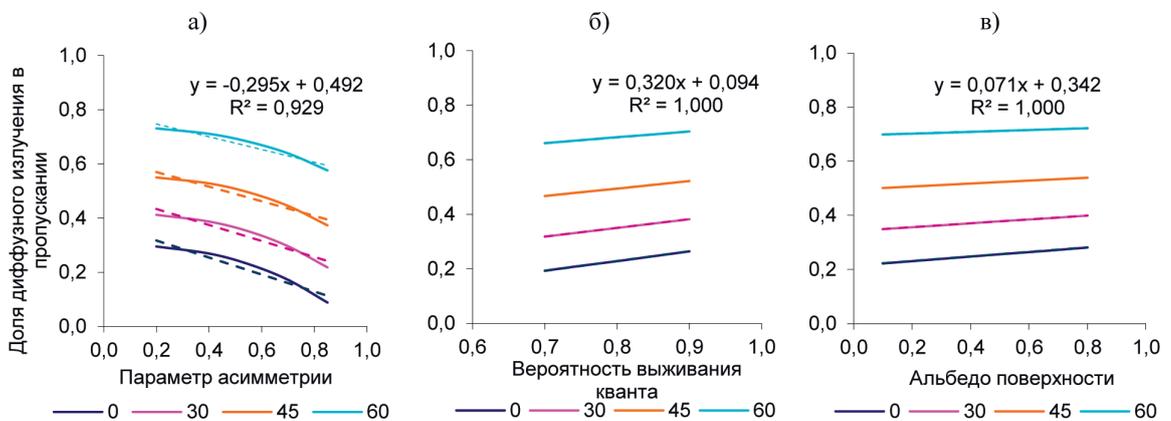


Рис. 8. Зависимость доли рассеянной радиации в пропускании: а) от g при $A=0,85$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$; б) от ω при $g=0,6$, $\tau=0,6$, $A=0,4$; в) от A при $g=0,3$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$. Прерывистые линии соответствуют линейной аппроксимации

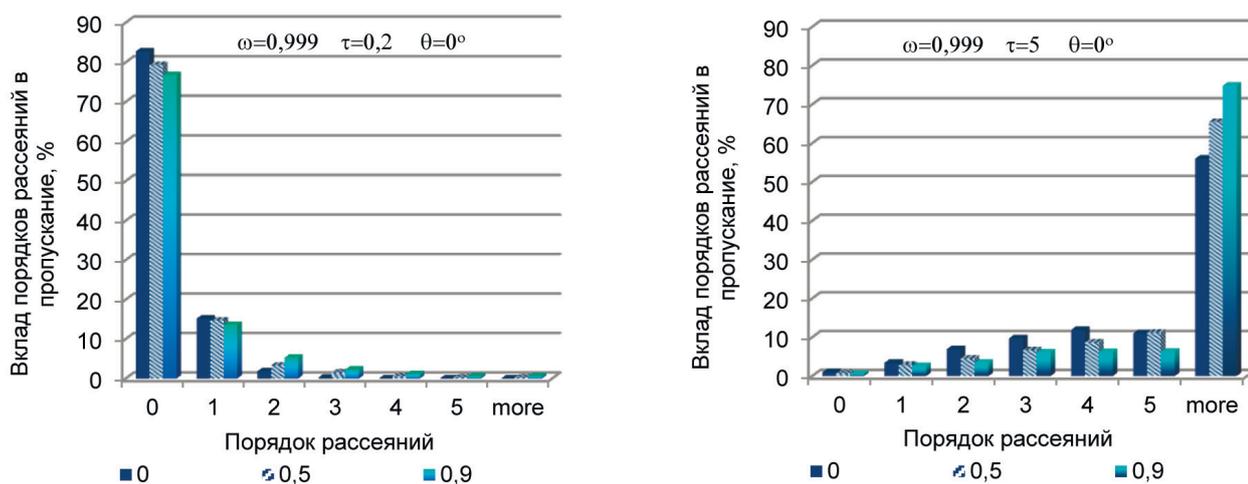


Рис. 9. Вклад различных порядков рассеяния в формирование T для $\tau=0,2$ и 5 , $\omega=0,999$ и при $\theta=0^\circ$. $A=0; 0,5$ и $0,9$ (указано на рисунке)

5. Лучистый приток

На рис. 10 показана зависимость D (иначе радиационного форсинга атмосферы) от τ для значений $\omega=0,9999; 0,999$ и $0,75$, $A=0; 0,5$ и $0,9$ для четырех значений θ . Следует отметить, что D слабо зависит от θ для рассмотренных трех значений A . При слабом поглощении ($\omega=0,9999$) и при сильном поглощении ($\omega=0,75$) зависимость от A также очень слаба. Однако в промежуточном случае $\omega=0,999$ зависимость от A более заметна: коэффициент линейной регрессии возрастает на порядок по сравнению со случаем $\omega=0,9999$. В случае сильного поглощения ($\omega=0,75$) зависимость лучистого притока от оптической толщины при $\tau \leq 4$ линейная и не меняется с A или θ : $D=0,19\tau$, с увеличением τ D оказывается константой ($D=0,9$), не зависящей от θ , A и τ . Случай $\omega=0,75$ можно интерпретировать как «ядерную зиму» — присутствие в атмосфере чрезвычайно большого количества аэрозольных частиц, поглощающих солнечную радиацию, которые могут попасть в атмосферу в результате или ядерных взрывов, или серии сильнейших вулканических извержений. Можно заключить, что упомянутые катаклизмы приведут к сильному нагреванию атмосферы, не зависящему от высоты солнца (т.е. в течение всего светлого времени суток), A (и над сушей, и над океаном в равной степени) и вне зависимости от толщины облачности. Последующее переизлучение радиации в тепловом диапазоне вызовет значительное нагревание поверхности («ядерное лето») (Гинзбург и др., 2008а, б).

Рисунок 11 показывает зависимости D от g , ω и A . В случае D линейные функции, указанные на рисунках для $\theta=30^\circ$, аппроксимируют указанные зависимости с достоверностью выше 99%.

Вклад различных порядков рассеяния в формирование D показан на рис. 12. Ясно, что в оптически тонкой атмосфере ($\tau=0,2$) наибольший вклад в нагревание атмосферы дает рассеяние 1-го порядка. Но обстоятельство, что A влияет так сильно, уменьшая долю

однократного рассеяния в формировании D вдвое при $A=0,5$ и почти в четыре раза при $A=0,9$ и при этом увеличивая долю более высоких порядков рассеяния, не очевидно. При этом влияние ω оказывается незначительно при малых τ .

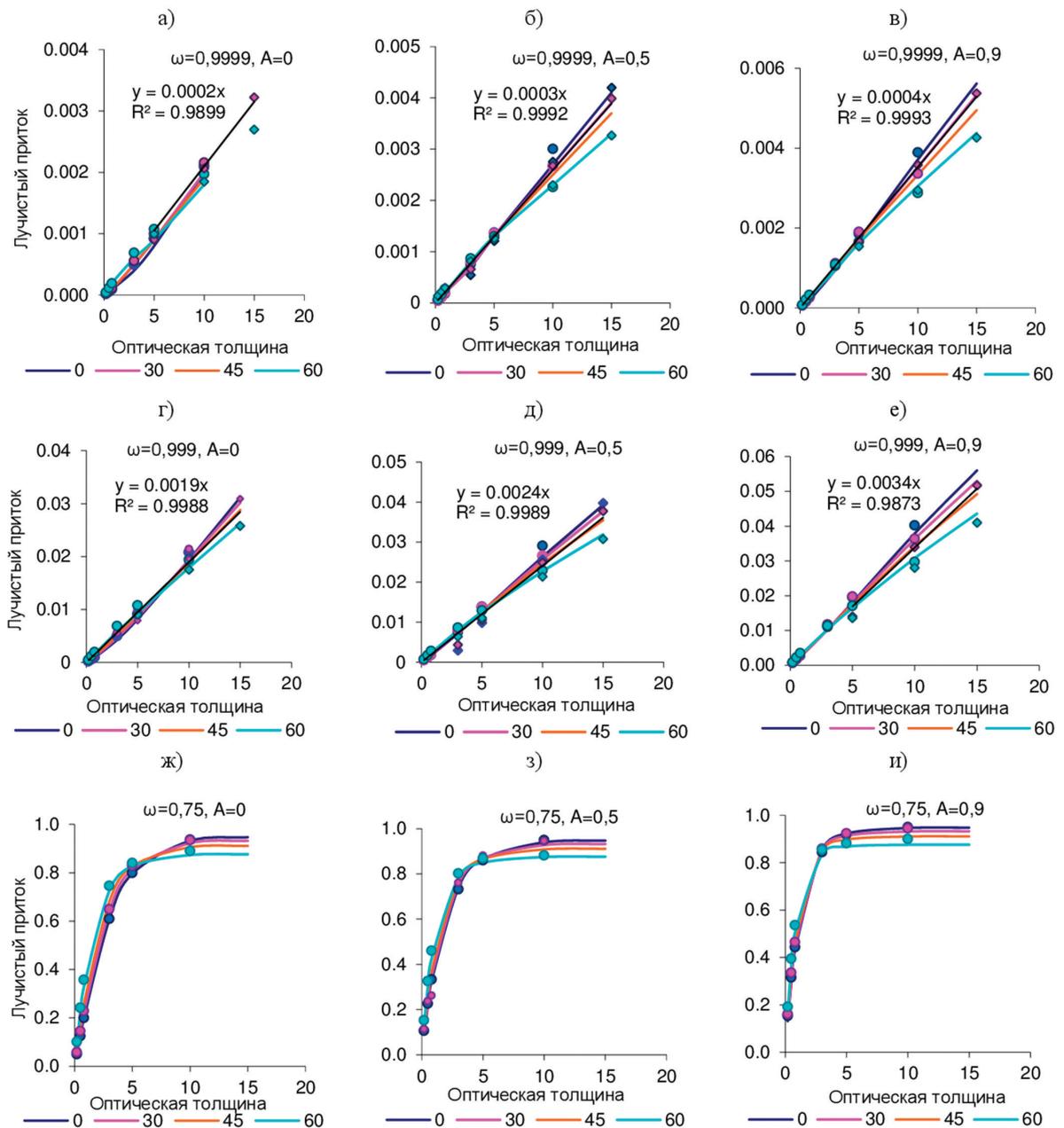


Рис. 10. Зависимость D от τ для четырех значений θ (на рисунке), $A=0; 0,5$ и $0,9$ и $\omega=0,9999; 0,999$ и $0,750$. Символами показаны результаты ММК (кружки) и МАФ (ромбы)

Еще более интересно выглядит иллюстрация вклада разных порядков рассеяния в случае оптически толстой атмосферы, соответствующей тонкой облачности. При слабом поглощении в среде $\omega = 0,999$ вклад однократного рассеяния и рассеяний невысоких порядков от 1-го до 5-го мало изменяется, при этом сохраняя тенденцию уменьшения с увеличением A . Для более высоких порядков рассеяния вклад резко возрастает, а влияние A значительно усиливается. Однако при сильном поглощении $\omega = 0,75$ картина меняется и основным

оказывается вклад низких порядков рассеяния, что объясняется более короткой жизнью кванта и высокой вероятностью его поглощения в среде. Влияние A на вклад разных порядков рассеяния в D оказывается таким же, как и при слабом поглощении.

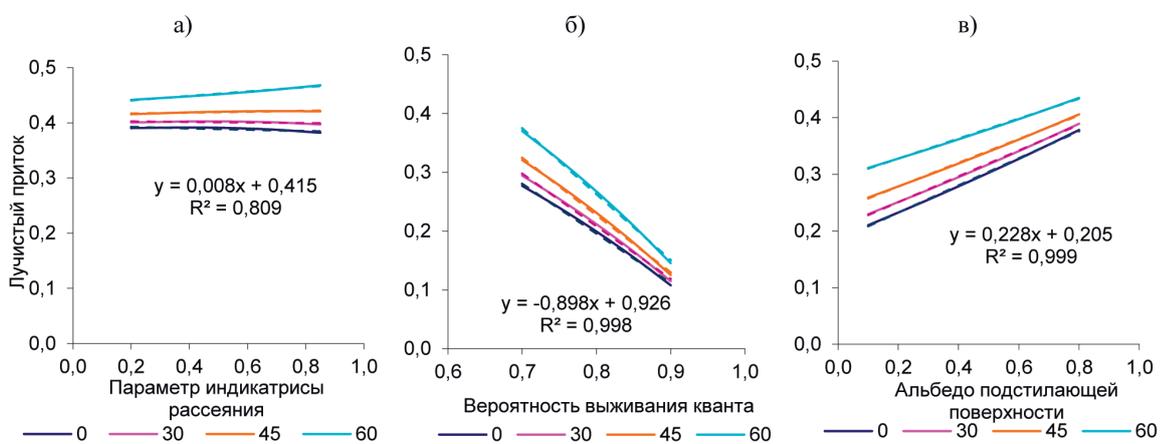


Рис. 11. Зависимость D : а) от g при $A=0,85$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$; б) от ω при $g=0,6$, $\tau=0,6$, $A=0,4$; в) от A при $g=0,3$, $\tau=0,6$, $\omega=0,7$. Прерывистые линии соответствуют линейной аппроксимации

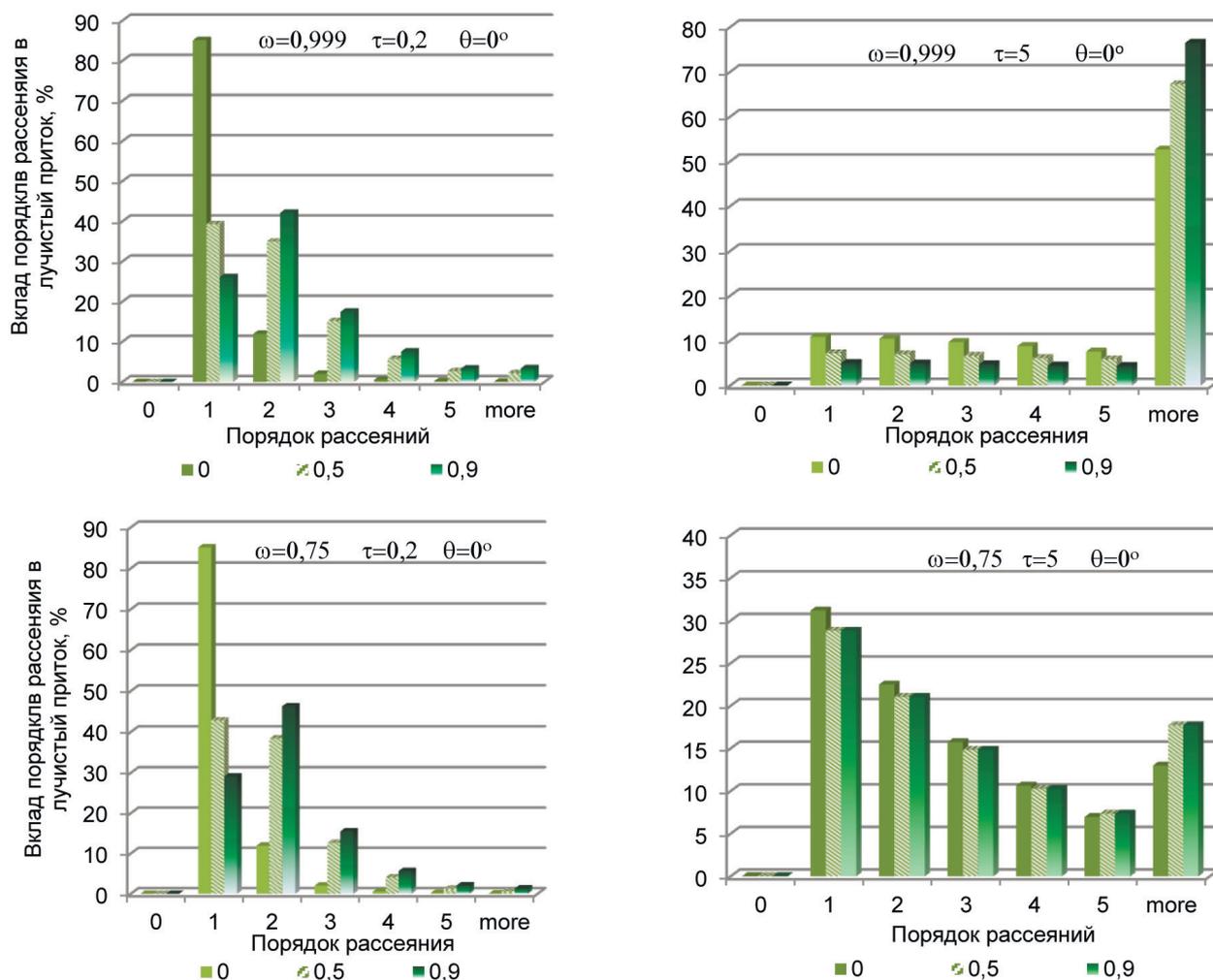


Рис. 12. Вклад рассеяния различных порядков в формирование D для $\tau=0,2$ и 5 , $\omega=0,999$ и $0,75$, при $\theta=0^\circ$. $A=0$; $0,5$ и $0,9$ (указано на рисунке)

Выводы

В работе проведено сравнение четырех методов расчета характеристик солнечной радиации в атмосфере: МЭ, ММК, МАФ и П1Р. Уточнены области применимости методов для выбранных оптических моделей. Рассмотрены зависимости R и T атмосферой полусферических потоков солнечной радиации и D от τ для случаев слабого и очень сильного поглощения в слое ($\omega = 0,9999$ и $0,75$). Изменение A влияет на все радиационные характеристики и меняет характер зависимости от τ . Расчеты проводились для четырех значений θ . Получено, что для рассмотренных значений оптических параметров ω сильно влияет на R и D . Были найдены такие значения ω , при которых отсутствует зависимость R от τ . Зафиксирована слабая зависимость D от θ .

Рассчитан вклад разных порядков рассеяния в формирование радиационных характеристик в разных рассмотренных оптических моделях. Обнаружено, что A слабо влияет на вклад разных порядков рассеяния в R и T в случае оптически-тонкой атмосферы, но оказывает значительное воздействие на вклад разных порядков рассеяния в D , причем с разным знаком на 1-й порядок и на более высокие порядки. В случае большой τ влияние A заметнее на все характеристики, причем с разным знаком на разные порядки рассеяния. В случае сильного поглощения ($\omega = 0,75$) и $\tau = 5$ вклад первых пяти порядков превосходит вклад многократного рассеяния высших порядков, так как фотон не «доживает» до высокого порядка, а поглощается раньше.

В результате численного анализа получены простые линейные аппроксимации зависимостей радиационных характеристик от оптических параметров атмосферы, которые могут оказаться полезными при дистанционном зондировании и в технических задачах при оценках поля радиации в атмосфере. В определенных случаях простые линейные регрессии полезны в комбинации с точными математически строгими методами расчета (Prasolov, 2016).

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.586.21.0023, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58615X0023).

Литература

1. Васильев А.В., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н. Дистанционное зондирование окружающей среды из космоса: практикум. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2008. 133 с.
2. Васильев А.В., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н. Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния // Ученые записки. 2016. № 42. С. 94–104.
3. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. (2008а) Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журн. 2008. Т. 52. № 5 С. 112–119.
4. Гинзбург А.С., Романов С.В., Фомин Б.А. (2008б) Использование радиационно-конвективной модели для оценки температурного потенциала парниковых газов // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 324–331.
5. Марчук Г.И. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1988. 263 с.
6. Минин И.Н. Теория переноса излучения в атмосферах планет. М.: Наука, 1988. 264 с.

7. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005. 601 с.
8. Dong X., Ackerman T.P., Clothiaux E.E. Parameterizations of the microphysical and shortwave radiative properties of boundary layer stratus from ground-based measurements // J. Geophysical Research. 1998. Vol. 103. No. D24. P. 31681–31693.
9. Gao R.S., Hall S.R., Swartz W.H., Schwarz J.P., Spackman J.R., Watts L.A., Fahey D.W., Aikin K.C., Shetter R.E., Bui T.P. Calculations of solar shortwave heating rates due to black carbon and ozone absorption using in situ measurements // J. Geophysical Research. 2008. Vol. 113. No. D14203. P. 1–11.
10. Harshvardhan, King M.D. Comparative accuracy of diffuse radiative properties computed using selected multiple scattering approximations // J. Atmospheric Sciences. 1993. Vol. 50. P. 247–259.
11. Henyey L., Greenstain J. Diffuse radiation in Galaxy // Astrophysical J. 1941. Vol. 93. No. 1. P. 70–83.
12. Joseph J.H., Wiscombe W.J., Weiman J.A. The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer // J. Atmospheric Sciences. 1976. Vol. 33. P. 2452–2459.
13. Koepke P., Hess M., Bretl S., Seefeldner M. UV irradiance on the human skin: Effects of orientation and sky obstructions // Current Problems in Atmospheric Radiation. Proc. Conf. IRS 2008. 2009. P. 53–56.
14. Kondratyev K.Ya., Fedorova M.P. Radiation regime of inclined surfaces. WMO Techn. Note No. 152. Geneva, 1977. 82 p.
15. Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: Standard Computational Proc. / ed. Lenoble J. Hampton, Virginia, USA: A. DEEPAK Publishing, 1985. 314 p.
16. Prasolov A.V. Some Quantitative Methods and Models in Economic Theory. N.Y.: Nova Science Publishers, 2016. 284 p.

Influence of atmospheric optical parameters on the characteristics of solar radiation

A.V. Vasilyev, I.N. Melnikova, S.S. Novikov

St. Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia
E-mails: irina.melno@yandex.ru; ssn2694ssn@mail.ru

The work investigates the dependencies of solar radiation characteristics on optical models of the Earth's atmosphere. The article presents results for the reflected and transmitted hemispherical fluxes, radiative divergence, proportion of the scattered radiation in the transmitted flux, the contribution of different scattering orders in cloudless and cloudy atmospheres. Different values of atmospheric optical parameters, surface albedos and lighting geometries are considered. Computer codes, used for models of a homogeneous atmosphere, implement four methods of transfer theory: single scattering approximation, Eddington method, Monte Carlo method and method of asymptotic formulas. Values of the parameters, for which the dependence of radiative divergence from solar zenith angle and reflected flux on optical thickness is minimal weak, and described by a linear function, are identified. The proposed simple linear approximations of the flux dependence from atmospheric parameters and solar zenith angle allow fast and easy estimation of radiation characteristics when solving inverse problems of remote sensing, namely, retrieving atmospheric and surface optical parameters from satellite observations, or integrating radiative characteristics over solar zenith angle, or in technical applications, for example, when choosing the type of solar cell batteries for houses.

Keywords: solar radiation, hemispherical flux, radiative divergence, surface albedo, optical thickness, probability of quantum survival, surface albedo

Accepted: 29.08.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-285-299

References

1. Vasilyev A.V., Kuznetsov A.D., Melnikova I.N., *Distantionnoe zondirovanie okruzhayushchei sredy iz kosmosa: Praktikum* (Remote sensing of Environment from the Space: Practical course), Saint Petersburg: Izd-vo BGTU "Voenmekh", 2008, 133 p.
2. Vasilyev A.V., Kuznetsov A.D., Melnikova I.N., *Approksimatsiya mnogokratno rasseyannogo solnechnogo izlucheniya v ramkakh priblizheniya odnokratnogo rasseyaniya* (Approximating multiple scattered solar radiation in range of single scattering), *Uchenye zapiski*, 2016, No. 42, pp. 94–104.

3. Ginzburg A.S., Gubanova D.P., Minashkin V.M. (2008a), Vliyaniye estestvennykh i antropogennykh aerozolei na global'nyy i regional'nyy klimat (Impact of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate), *Russian chemical journal*, 2008, Vol. 52, No. 5, pp. 112–119.
4. Ginzburg A.S., Romanov S.V., Fomin B.A. (2008b), Ispol'zovanie radiatsionno-konvektivnoi modeli dlya otsenki temperaturnogo potentsiala parnikovyykh gazov (Application of the radiative-convective simulation for estimating the temperature potential of greenhouse gases), *Izv. RAN, ser. Fizika atmosfery i okeana*, 2008, Vol. 44, No. 3, pp. 324–331.
5. Marchuk G.I., *Metod Monte-Karlo v atmosfernoj optike* (The Monte-Carlo approach in the atmospheric optics), Novosibirsk: Nauka, 1988, 263 p.
6. Minin I.N., *Teoriya perenosa izlucheniya v atmosferakh planet* (Radiation transfer theory in planet atmospheres), Moscow: Nauka, 1988, 264 p.
7. Sushkevich T.A., *Matematicheskie modeli perenosa izlucheniya* (Mathematical models of the radiation transfer theory), Moscow: BINOM, Laboratoriya znaniy, 2005, 601 p.
8. Dong X., Ackerman T.P., Clothiaux E.E., Parameterizations of the microphysical and shortwave radiative properties of boundary layer stratus from ground-based measurements, *Journal of Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, No. D24, pp. 31681–31693.
9. Gao R.S., Hall S.R., Swartz W.H., Schwarz J.P., Spackman J.R., Watts L.A., Fahey D.W., Aikin K.C., Shetter R.E., Bui T.P., Calculations of solar shortwave heating rates due to black carbon and ozone absorption using in situ measurements, *Journal of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, No. D14203, pp. 1–11.
10. Harshvardhan, King M.D., Comparative accuracy of diffuse radiative properties computed using selected multiple scattering approximations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, Vol. 50, pp. 247–259.
11. Henyey L., Greenstain J., Diffuse radiation in Galaxy. *Astrophysical J.*, 1941, Vol. 93, No. 1, pp. 70–83.
12. Joseph J.H., Wiscombe W.J., Weiman J.A. The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer, *J. Atmospheric Sciences*, 1976, Vol. 33, pp. 2452–2459.
13. Koepke P., Hess M., Bretl S., Seefeldner M., UV irradiance on the human skin: Effects of orientation and sky obstructions, *Current Problems in Atmospheric Radiation*, Proceedings of IRS 2008, 2009, pp. 53–56.
14. Kondratyev K.Ya., Fedorova M.P. *Radiation regime of inclined surfaces*, WMO Techn. Note, No. 152, Geneva, 1977, 82 p.
15. *Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures*, Hampton, Virginia, USA: A. DEEPAK Publishing, 1985, 314 p.
16. Prasolov A.V. *Some Quantitative Methods and Models in Economic Theory*, New York, Nova Science Publishers, 2016, 284 p.