

## Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмосферы для расчета потоков солнечной радиации

А.С. Гинзбург<sup>1</sup>, И.Н. Мельникова<sup>2</sup>, Д.А. Самуленков<sup>2</sup>,  
М.В. Сапунов<sup>2</sup>, Л.В. Катковский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия

E-mail: gin@ifaran.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: irina.melnikova@robox.spbu.ru

<sup>3</sup>Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, 220064, Беларусь

E-mail: katkovskyl@bsu.by

Предложены простые оптические модели безоблачной и облачной атмосферы. Рассмотрено четыре варианта содержания атмосферных аэрозолей: полное отсутствие аэрозолей в атмосфере, низкое фоновое содержание ( $500 \text{ см}^{-3}$ ), повышенное содержание ( $2000 \text{ см}^{-3}$ ) и высокое содержание аэрозольных частиц ( $5000 \text{ см}^{-3}$ ). Для облачной атмосферы принята модель внешней смеси, когда твердые аэрозольные частицы находятся между капель воды. В работе рассчитаны значения оптической толщины и альбедо однократного рассеяния для 13 длин волн с учетом полос молекулярного поглощения в коротковолновом диапазоне (0,3–0,9 мкм). Полосы поглощения смоделированы треугольной функцией. Проведено сравнение с оптическими параметрами, полученными из различного рода измерений и восстановлений (лидарные измерения, отборы проб, обработка радиационных измерений). В результате показано, что значения оптических параметров соответствуют величинам, полученным из обработки результатов самолетных измерений полусферических потоков и интенсивностей солнечной радиации на разных уровнях в атмосфере. Для облачной атмосферы приводятся варианты однослойной и двухслойной атмосферы. Получено, что оптические параметры облачности, предложенные в работе для «наружной смеси», хорошо согласуются со значениями, восстановленными из самолетных измерений солнечной радиации. Предложенные оптические модели обеспечивают приемлемую точность при радиационных расчетах и позволяют эффективно исследовать влияние отдельных факторов в атмосфере на потоки и лучистые притоки солнечной радиации в атмосфере и на поверхности, варьируя оптические параметры атмосферы.

**Ключевые слова:** атмосферные аэрозоли, облако, оптическая толщина, альбедо однократного рассеяния, оптическая модель, объемный коэффициент ослабления, объемный коэффициент поглощения, лидарное зондирование

Одобрена к печати: 05.02.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-132-149

### Введение

Дистанционное зондирование – это процедура, которая кроме многих других стадий включает в себя измерение характеристик электромагнитной радиации, испущенной или измененной атмосферой, обработку принятого сигнала, географическую привязку к местности, и в конце – решение обратной задачи для восстановления оптических параметров атмосферы или поверхности. При этом построение той или иной оптической модели атмосферы является необходимым этапом при решении обратной задачи. В последние десятилетия бурное развитие компьютерной техники способствовало усложнению моделей атмосферы с детализацией вертикальных профилей по слоям, учета различных форм неоднородной облачности в широких диапазонах длин волн от УФ до ИК. При этом все чаще применяются численные алгоритмы расчета радиационных характеристик, стремящихся к точным расчетам и уменьшению погрешности. Построены разнообразные компьютерные коды, включающие табличное задание характеристик атмосферного аэрозоля, состояние атмосферы и сложные схемы расчета оптических параметров и радиационных характеристик атмосферы для широтных континентальных и морских зон и разных сезонов. Эти коды очень полезны для решения

прикладных задач (Гинзбург, Романов, Фомин, 2008). Однако в исследовательских задачах часто необходимо анализировать влияние отдельных факторов на радиационные характеристики атмосферы, отвлекаясь от вариаций всей их сложной совокупности. В таких случаях простые модели однородной (для безоблачной атмосферы) или двух-трехслойной атмосферы (для учета горизонтально-однородной облачности) дают возможность оперативно варьировать исследуемые параметры атмосферы, получать результаты, зачастую ненамного уступающие в точности результатам сложных моделей, и эффективно выявлять взаимосвязи ключевых параметров и характеристик атмосферы и солнечной радиации. Такие возможности особенно интересны при построении оптических и радиационных блоков в моделях климата для выявления важности тех или иных факторов, влияющих на формирование радиационного режима системы атмосфера – подстилающая поверхность (Гинзбург, Губанова, Минашкин, 2008). Поэтому в данной работе построена простейшая оптическая модель однородной безоблачной атмосферы для 13 длин волн, основанная на четырех основных оптических параметрах: оптической толщине атмосферы, альбедо однократного рассеяния, параметре индикаторы рассеяния и альбедо подстилающей поверхности. В модели рассмотрено поглощение озона в УФ диапазоне, четыре варианта содержания поглощающих аэрозолей в атмосфере и молекулярное рассеяния для ряда длин волн в коротковолновой области спектра, к которой добавляется два варианта горизонтально однородного, бесконечно протяженного облачного слоя. В рамках настоящей статьи описаны получившиеся модели атмосферы и проанализированы их оптические параметры. В продолжение работы предполагается публикация статьи, посвященной характеристикам радиации, рассчитанным на основании данной модели, анализу влияния оптических параметров на величину радиационных характеристик и сравнению их с измеренными значениями в самолетных экспериментах.

## Оптические параметры атмосферы

При построении оптической модели будем следовать монографии (Радиационные характеристики атмосферы, 1969), в которой содержатся необходимые сведения, а также более современным публикациям (Kondratyev, Varotsos 2000; Ishizaka et al., 2003; Sano et al., 2003; Kim et al., 2009). Рассмотрим вертикально однородную модель атмосферы. При расчете потоков пропущенной радиации подобное приближение вносит ошибку в пределах нескольких процентов (<10%) согласно (Минин, 1988). Будем считать, что в молекулярной консервативно рассеивающей вне полос поглощения атмосфере присутствуют атмосферные аэрозоли. Оптическая толщина атмосферы определяется процессами рассеяния и поглощения и складывается из оптических толщин, сформированных различными компонентами атмосферы: поглощением озоном и другими газами ( $O_2$ ,  $H_2O$ ), атмосферными аэрозолями; а также рассеянием молекулами (флуктуациями плотности), аэрозолями и облачными каплями. Альбедо однократного рассеяния рассчитывается как отношение оптической толщины рассеяния и суммарной оптической толщины. Соответственно, введем следующие величины:

- оптическая толщина атмосферы  $\tau = \tau_{mp} + \tau_{mn} + \tau_{ap} + \tau_{an} + \tau_{obn}$ , где  $\tau_{mp}$  – оптическая толщина молекулярного (рэлеевского) рассеяния,  $\tau_{mn}$  – оптическая толщина молекулярного поглощения: озоном в УФ-области спектра, кислородом и водяным паром в видимой и ближней ИК областях,  $\tau_{ap}$  – оптическая толщина аэрозольного рассеяния,  $\tau_{an}$  – оптическая толщина аэрозольного поглощения,  $\tau_{obn}$  – оптическая толщина чисто рассеивающего облачного слоя (для безоблачной атмосферы  $\tau_{obn} = 0$ );
- альбедо однократного рассеяния (или альбедо частицы, вероятность выживания кванта)  $\omega = (\tau_{mp} + \tau_{ap} + \tau_{obn})/\tau$ ;
- средний косинус угла рассеяния  $g$  (параметр асимметрии индикатрисы рассеяния);
- альбедо подстилающей поверхности  $A$ .

## Безоблачная атмосфера

В модели однородной атмосферы учитывается молекулярное рассеяние, поглощение озоном со средним содержанием 300 DU (Kondratyev, Varotsos 2000), кислородом и водяным паром и рассеяние и поглощение аэрозолями согласно (Радиационные характеристики..., 1969; Ishizaka et al., 2003; Sano et al., 2003; Kim et al., 2009). Были также выполнены оценочные расчеты коэффициентов поглощения и рассеяния для наиболее распространенных аэрозольных составляющих (сажи и пыли) (Kuznetsov et al., 2011; Мельникова, Васильев, Кузнецов, 2008). Далее было выбрано четыре варианта содержания аэрозолей в атмосфере:  $0 \text{ см}^{-3}$  – полное отсутствие аэрозольных частиц,  $500 \text{ см}^{-3}$  – чистая атмосфера,  $2000 \text{ см}^{-3}$  – среднее значение содержания аэрозолей и  $5000 \text{ см}^{-3}$  сильно загрязненная атмосфера (Sano et al., 2003; Kim et al., 2009).

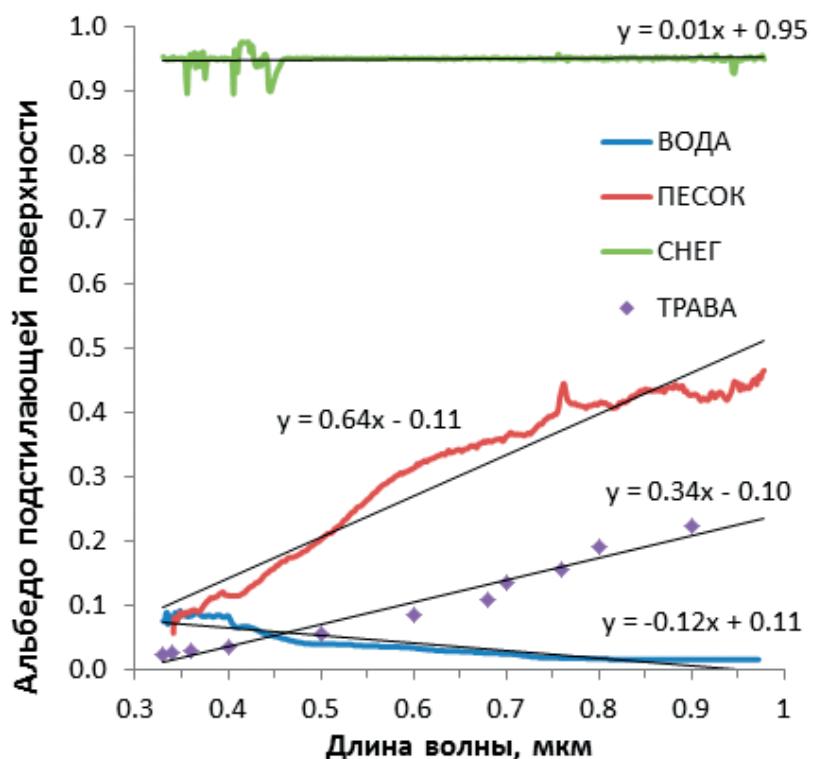
В случае полного отсутствия аэрозолей в атмосфере (обозначено в таблице Aer 0) аэрозольная оптическая толщина равна нулю:  $\tau_{a \text{ scatt}} = \tau_{a \text{ abs}} = 0$ .

Таким образом, аэрозольная суммарная оптическая толщина безоблачной атмосферы в рассматриваемых моделях меняется от 0,0 до 1,2. Следует заметить, что в условиях сильной дымки аэрозольная оптическая толщина может достигать 2,0 (Ishizaka et al., 2003; Sano et al., 2003; Kim et al., 2009), а в период сильного загрязнения атмосферы в Москве летом 2010 г. оптическая толщина безоблачной атмосферы доходила до 4,5 (Чубарова и др. 2011; Chubarova et al., 2012).

Для расчетов интегральных по углу радиационных характеристик в безоблачной атмосфере достаточно задать изотропное рассеяние света ( $g = 0$ ), потому что рэлеевская индикатриса молекулярного рассеяния симметрична в направлениях вперед и назад и не сильно отличается от сферической. Конечно, присутствие аэрозолей приводит к изменению формы индикатрисы, увеличивая ее асимметрию, и в этом случае следует присвоить другое значение параметру асимметрии, например, в зависимости от количества аэрозолей  $g = 0,2; 0,3; 0,5$ . В облачной атмосфере индикатриса сильно вытянута вперед и можно принять значения параметра  $g = 0,85$ , при этом величина  $g$  несколько меняется по спек-

тру, что учитывается в модели (*табл. 3*) согласно (Stephens, 1979; Лобанова, Васильев, Мельникова, 2010).

Для модели системы атмосфера – подстилающая поверхность будем считать поверхность ортотропной и выберем три варианта спектральных значений альбедо, соответствующие морской поверхности – 0, скошенной траве – 0,5, и свежевыпавшему снегу – 0,9. Для более точного учета отражения света поверхностью можно рекомендовать спектральные зависимости альбедо, показанные на *рис. 1*, полученные из анализа результатов самолетных измерений (Радионов, Сакунов, Гришечкин, 1981; Гришечкин, Шульц, Мельникова, 1989; Васильев, Мельникова, 2002), выполненного в работе (Varotsos et al., 2014). Экспериментальные значения альбедо аппроксимированы квадратичными зависимостями, уравнения которых показаны на *рис. 1*. Значения альбедо 4-х подстилающих поверхностей (скошенная трава, вода, песок, снег) по данным (Радиационные характеристики..., 1969; Varotsos et al., 2014) представлены в *табл. 1*.



*Рис. 1. Альбедо водной поверхности (синяя линия), песчаной (красная линия), снежной (зеленая линия) и скошенной травы (лиловые точки) и соответствующие линейные аппроксимации спектральных зависимостей, уравнения которых показаны на рисунке*

Таблица 1. Альбедо подстилающих поверхностей: скошенная трава, песок, морская поверхность и свежевыпавший снег

$\lambda, \text{мкм}$	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,4	0,5	0,6	0,68	0,7	0,76	0,8	0,9
трава	0,020	0,022	0,023	0,028	0,030	0,035	0,056	0,087	0,110	0,136	0,158	0,193	0,225
песок	0,0005	0,015	0,045	0,056	0,080	0,120	0,220	0,300	0,357	0,368	0,400	0,415	0,430
вода	0,112	0,100	0,092	0,082	0,080	0,070	0,040	0,035	0,027	0,026	0,019	0,018	0,017
снег	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950

На рис. 2 и 3 и в табл. 2 представлены спектральные зависимости оптической толщины  $\tau$  и величины единица минус альбето однократного рассеяния (ко-альбето) безоблачной атмосферы. Значения оптической толщины безоблачной атмосферы показаны на рис. 2, начиная с длины волны 0,3 мкм, потому что оптическая толщина поглощения озоном в области длин волн 0,28–0,3 мкм более 30. Эти значения не показаны, чтобы нагляднее продемонстрировать вариации оптической толщины в видимом диапазоне. Оптическая толщина безоблачной атмосферы в области длин волн короче 0,3 мкм определяется поглощением озоном. Для длин волн более 0,5 мкм преобладающим является рассеяние и поглощение атмосферным аэрозолем.

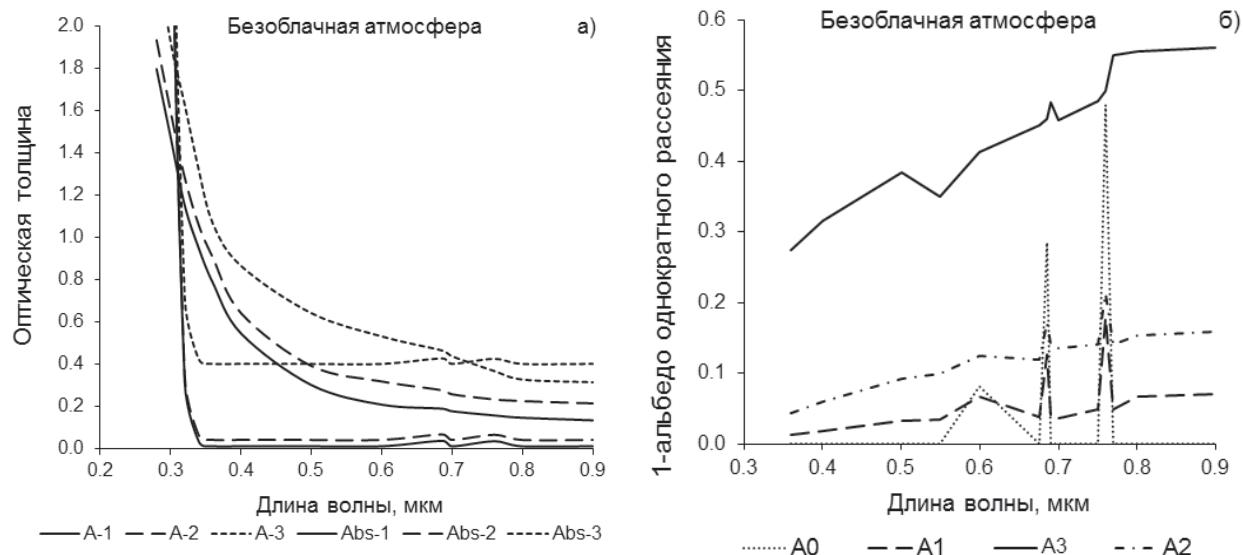


Рис. 2. а) оптическая толщина безоблачной атмосферы. Тонкие линии – оптическая толщина рассеяния, жирные линии – оптическая толщина газового и аэрозольного поглощения. Цифры соответствуют модели содержания аэрозолей.

б) 1-альбето однократного рассеяния безоблачной атмосферы для 4-х моделей содержания аэрозолей, указанных на рисунке

Поглощение другими атмосферными газами (кислородом и водяным паром) приближенно задано на соответствующих длинах волн, следуя (Радиационные характеристики атмосферы, 1969), где для водяного пара принято значение 1,6 см слоя осажденной воды. При желании в модели легко можно усилить или ослабить полосы водяного пара, исходя из его содержания в столбе атмосферы, а также анализировать спектральную зависимость более подробно, рассмотрев больше длин волн.

## Облачная атмосфера

Как показывают результаты восстановления оптической толщины из самолетных измерений потоков рассеянной солнечной радиации (Васильев, Мельникова, 2002; Мельникова, 1992, 2001; Gatebe, Kuznetsov, Melnikova, 2014), оптическая толщина сло-

истой облачности в средних широтах в основном бывает в пределах 5–25, причем в большинстве случаев заметно убывающая с длиной волны. Здесь выберем два значения оптической толщины облачного слоя:  $\tau_{обл} = 5$  и 10, типичных для средних широт. Для корректного учета всех компонентов облачной атмосферы (молекулярная атмосфера, атмосферные аэрозоли и облачные капли или кристаллы) необходимо понимать, в каком состоянии присутствуют в облаке аэрозоли. Обычно рассматривают 2 варианта: *внутренняя смесь* – аэрозоли включены внутрь капли и *внешняя смесь* – аэрозоли находятся между капель. Внутренняя смесь характерна для смачиваемых и растворимых аэрозолей (кристаллики солей, органические частицы), а внешняя смесь осуществляется для несмачиваемых гидрофобных частиц типа пыли или сажи. В общем случае не выяснено, какой случай и в какой степени осуществляется в реальной облачной атмосфере. Видимо, это зависит и от типа аэрозолей, и от его количества в атмосфере, и, скорее всего, в облаке осуществляются оба случая одновременно. Так как наша цель исследовать, какое влияние оказывают на радиационные процессы сильно поглощающие аэрозоли, мы принимаем здесь внешнюю смесь, т.е. в облачной атмосфере облачные капли не взаимодействуют с аэрозольными частицами и оптические толщины каждого компонента просто складываются.

В работе рассмотрены четыре варианта однородного бесконечно протяженного по горизонтали облачного слоя.

Модель **Облако 1** соответствует постоянной по спектру оптической толщине рассеяния, равной  $\tau_{обл}$ , облако просто накладывается на безоблачную атмосферу, оптическая толщина суммируется с оптической толщиной безоблачной атмосферы, параметр асимметрии индикаторы рассеяния принят постоянным по спектру и равным  $g = 0,85$ . На *рис. 3* и в *табл. 3* представлены спектральные значения оптической толщины и величины 1-альбедо однократного рассеяния (ко-альбедо) облачного слоя. Символы (квадраты и треугольники) на *рис. 4а* представляют значения оптической толщины, восстановленной из самолетных измерений рассеянной солнечной радиации НАСА прибором CAR у берегов Юго-Западной Африки и в Калифорнийском заливе, где оптическая толщина оказалась спектрально-зависимой и в ближней ИК области равна 25. Красная кривая соответствует значениям оптической толщины, восстановленных из спектральных самолетных измерений над Ладожским озером 20.04.1985. Оптическая толщина также демонстрирует спектральную зависимость, но ее величина в ближнем ИК диапазоне равна 10.

В модели **Облако 2** рассматривается 2-х слойная атмосфера: нижний слой до высоты 1 км – облако соответствующее по оптическим параметрам модели **Облако 1**, а выше – надоблачный слой. В модели учитывается рассеяние радиации в надоблачном слое, падающей на облако, и отражение радиации вверх от облачного слоя в надоблачный слой. Оптические параметры надоблачного слоя представлены в *табл. 4*.

Модель **Облако 3** основана на оптической толщине облака, убывающей с ростом длины волны, что согласуется с зависимостью, полученной из интерпретации самолет-

ных и спутниковых измерений солнечной радиации. Параметр асимметрии индикатрицы рассеяния принимается зависящим от длины волны (Stephens, 1979; Лобанова, Васильев, Мельникова, 2010). Облако «размазано» по всей атмосфере аналогично модели **Облако 1**. Спектрально-зависимые значения оптических параметров облака представлены в табл. 5.

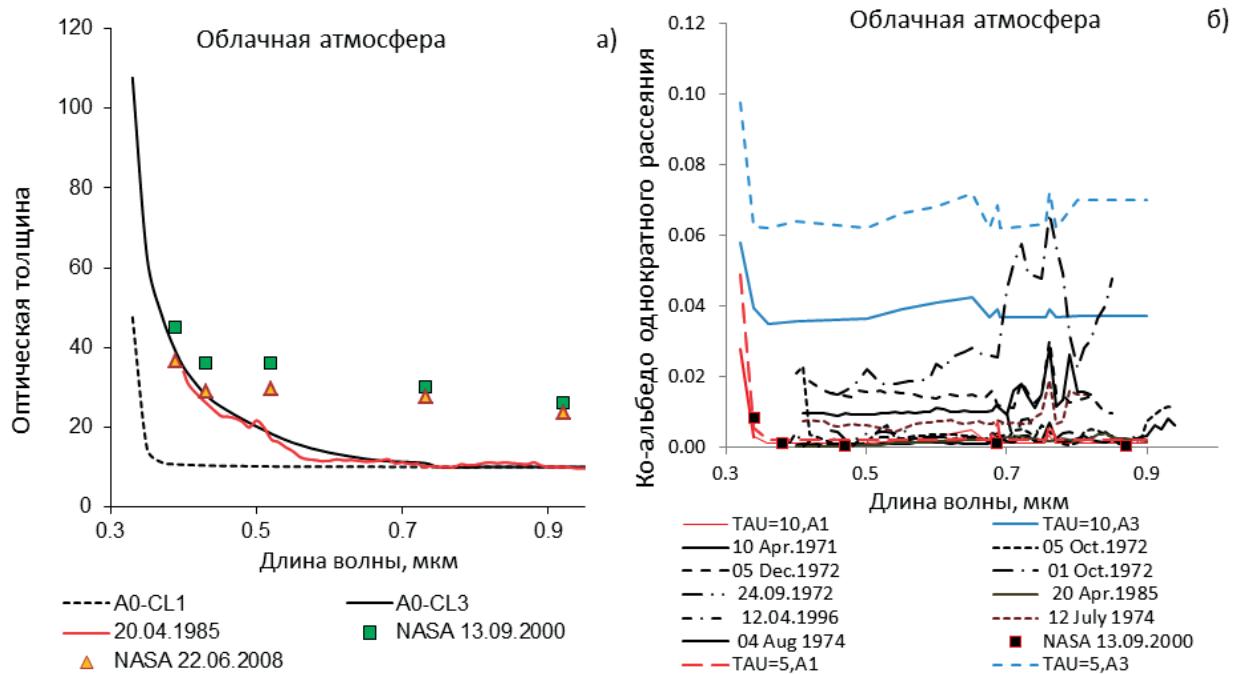


Рис. 3. а) Оптическая толщина облачной атмосферы для моделей Облако 1 (CL1), Облако 3 (CL3) для полного отсутствия аэрозоля A0 и результат восстановления оптической толщины из самолетных измерений потоков солнечной радиации над Ладожским озером 20.04.1985 (красная линия), и над Атлантическим океаном 12.07.1974 и 04.08.1974; б) 1-альбедо однократного рассеяния облачной атмосферы для моделей Облако 1, оптическая толщина 5 и 10 (A1 и A3 – модели содержания аэрозоля) и результаты, восстановленные из данных самолетных радиационных экспериментов (даты указаны на рисунке)

В Модели **Облако 4** принимается спектрально зависимая оптическая толщина облака в соответствии с моделью **Облако 3** и рассматривается 2-х слойная атмосфера аналогично модели **Облако 2**. В этой модели учтено рэлеевское рассеяние молекулами и рассеяние аэрозолем находящимися в слое атмосферы 0–1 км, занимаемой облаком, также как и поглощение аэрозолем и озоном внутри облака, которое рассчитывается отдельно и добавляется к оптической толщине облачного слоя

На рис. 3б показаны спектральные зависимости величины единица минус альбедо однократного рассеяния  $1-\omega$  (ко-альбедо) облачной атмосферы **Облако 1** для 2-х моделей содержания аэрозолей в атмосфере. Использованы следующие обозначения: A0, и A3 – модели содержания аэрозоля, для оптической толщины облачного слоя  $\tau = 5$  и 10. Там же приведены спектральные зависимости ко-альбедо облачной атмосферы, полученные из решения обратной задачи на базе результатов самолетных измерений потоков и интенсивностей рассеянной солнечной радиации в облачной атмосфере

Таблица 2. Оптические параметры безоблачной атмосферы для четырех моделей содержания атмосферных аэрозолей

<b>Model</b>	<b><math>\lambda, \text{мкм}</math></b>	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>	<b>0,76</b>	<b>0,80</b>	<b>0,90</b>
Молек расс	$\tau_{\text{MP}}(z=0)$ $\tau_{\text{MP}}(z=1,0 \text{ км})$	1,545 1,391	1,222 1,100	0,927 0,834	0,717 0,645	0,564 0,508	0,364 0,328	0,140 0,130	0,067 0,060	0,040 0,036	0,036 0,032	0,026 0,023	0,021 0,019	0,013 0,012
Aer 0	$\tau_{\text{ap}} = \tau_{\text{an}}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aer I	$\tau_{\text{ap}} / \tau_{\text{an}}$	0,25 0,01	0,25 0,01	0,23 0,01	0,22 0,01	0,18 0,01	0,16 0,01	0,14 0,01	0,14 0,01	0,13 0,01	0,13 0,01	0,12 0,01	0,12 0,01	0,12 0,01
Aer II	$\tau_{\text{ap}} / \tau_{\text{an}}$	0,39 0,04	0,37 0,04	0,36 0,04	0,34 0,04	0,28 0,04	0,25 0,04	0,25 0,04	0,23 0,04	0,22 0,04	0,21 0,04	0,20 0,04	0,20 0,04	0,20 0,04
Aer III	$\tau_{\text{ap}} / \tau_{\text{an}}$	0,80 0,40	0,70 0,40	0,70 0,40	0,60 0,40	0,50 0,40	0,50 0,40	0,50 0,40	0,50 0,40	0,45 0,40	0,45 0,40	0,40 0,40	0,30 0,40	0,30 0,40
I	$\Sigma \tau_{\text{pad}}(z=0)$	1,795 1,932 2,345	1,472 1,593 1,922	1,150 1,282 1,627	0,947 1,056 1,317	0,784 0,903 1,064	0,544 0,640 0,864	0,300 0,390 0,640	0,207 0,275 0,567	0,188 0,275 0,463	0,166 0,256 0,436	0,156 0,232 0,366	0,141 0,221 0,326	0,133 0,213 0,313
0	$\tau_{\text{MII}}(z=0)$	36,14	3,445	0,306	0,022	0,61(-3)	0,0	0,0	0,005	0,016	0,0	0,024	0,0	0,0
I	$\Sigma \tau_{\text{n}} = \tau_{\text{an}} + \tau_{\text{MII}}$	36,15 36,18 36,54	3,455 3,485 3,845	0,316 0,346 0,716	0,032 0,062 0,422	0,011 0,041 0,401	0,010 0,040 0,400	0,015 0,045 0,405	0,026 0,056 0,416	0,010 0,040 0,400	0,034 0,064 0,424	0,010 0,040 0,400	0,010 0,040 0,400	
II	$\omega$	0,041 0,047 0,047 0,060	0,262 0,299 0,314 0,333	0,755 0,785 0,789 0,694	0,970 0,967 0,945 0,757	0,999 0,987 0,957 0,727	1,0 0,982 0,941 0,684	1,0 0,968 0,907 0,615	0,918 0,932 0,876 0,588	0,714 0,874 0,828 0,541	1,0 0,943 0,865 0,522	0,520 0,821 0,787 0,501	1,0 0,934 0,847 0,445	1,0 0,930 0,842 0,439
0	$\Sigma \tau$ безобл атм	37,595 37,945 38,112 38,885	4,667 4,927 5,078 5,767	1,229 1,466 1,628 2,343	0,739 0,979 1,118 1,739	0,565 0,795 0,944 1,465	0,364 0,554 0,680 1,264	0,14 0,310 0,430 1,040	0,072 0,222 0,362 0,965	0,056 0,206 0,326 0,906	0,036 0,176 0,296 0,836	0,050 0,190 0,300 0,850	0,021 0,151 0,261 0,721	0,013 0,143 0,253 0,713

Таблица 3. Оптические параметры облачной атмосферы для моделей **Облако 1** оптической толщины 5 и 10

<i>Модель</i>	$\lambda, \mu\text{m}$	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,68</b>	<b>0,7</b>	<b>0,76</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
0	$\Sigma \tau (\tau_0=10)$	47,595	14,667	11,229	10,739	10,565	10,364	10,140	10,117	10,066	10,036	10,050	10,021	10,013
1	Облако 1 + вся атмосфера	47,945	14,927	11,466	10,979	10,795	10,554	10,310	10,287	10,216	10,176	10,190	10,151	10,143
II		48,112	15,078	11,628	11,118	10,944	10,680	10,430	10,427	10,336	10,296	10,300	10,261	10,253
III		51,455	15,767	12,343	11,739	11,465	11,264	11,040	11,037	10,916	10,836	10,850	10,721	10,713
0	$\tau_p = \tau_{\text{обл}} + \tau_{\text{обл}} + \tau_{\text{обл}}$	11,545	11,222	10,920	10,717	10,564	10,364	10,160	10,077	10,060	10,036	10,026	10,021	10,013
1	$\tau_{\text{обл}} = 10$	11,795	11,472	11,150	10,947	10,784	10,544	10,300	10,207	10,180	10,166	10,156	10,141	10,133
II	Облако 1 + вся атм.	11,932	11,593	11,282	11,056	10,903	10,640	10,390	10,317	10,270	10,256	10,236	10,221	10,213
III		12,345	11,922	11,627	11,317	11,064	10,864	10,640	10,567	10,490	10,436	10,426	10,321	10,313
0	$\omega (\tau_0=10)$	0,2426	0,7651	0,9725	0,9980	0,9999	1,0	0,9961	0,9994	1,0	0,9976	1,0	1,0	1,0
1	Облако 1	0,2460	0,7685	0,9724	0,9971	0,9990	0,9991	0,9990	0,9922	0,9965	0,9990	0,9967	0,9990	0,9990
II		0,2480	0,7689	0,9702	0,9944	0,9963	0,9963	0,9962	0,9895	0,9936	0,9961	0,9938	0,9961	0,9961
III		0,2399	0,7561	0,9420	0,9605	0,9651	0,9645	0,9638	0,9574	0,9610	0,9631	0,9609	0,9627	0,9627
0	$\Sigma \tau (\tau_0=5)$	42,595	9,667	6,229	5,739	5,565	5,364	5,140	5,117	5,066	5,036	5,050	5,021	5,013
1	Облако 1 + вся атм.	42,945	9,927	6,466	5,979	5,795	5,554	5,310	5,287	5,216	5,176	5,190	5,151	5,143
II		43,112	10,078	6,628	6,118	5,944	5,680	5,430	5,427	5,336	5,296	5,300	5,261	5,253
III		46,455	10,767	7,343	6,739	6,465	6,264	6,040	6,037	5,916	5,836	5,850	5,721	5,713
0	$\tau_p = \tau_{\text{обл}} + \tau_{\text{обл}}$	6,545	6,222	5,920	5,717	5,564	5,364	5,140	5,077	5,060	5,036	5,026	5,021	5,013
1	$\tau_{\text{обл}} = 5$	6,795	6,472	6,150	5,947	5,784	5,544	5,300	5,207	5,180	5,166	5,156	5,141	5,133
II	Облако 1 + вся атм.	6,932	6,593	6,282	6,056	5,903	5,640	5,390	5,317	5,270	5,256	5,236	5,221	5,213
III		7,345	6,922	6,627	6,317	6,064	5,864	5,640	5,567	5,490	5,436	5,426	5,321	5,313
0	$\omega (\tau_{\text{обл}}=5)$	0,0128	0,6436	0,9505	0,9962	0,9999	1,0	1,0	0,9922	0,9988	1,0	0,9953	1,0	1,0
1	Облако 1	0,1582	0,6520	0,9511	0,9947	0,9982	0,9981	0,9849	0,9931	0,9981	0,9935	0,9981	0,9981	0,9981
II		0,1608	0,6542	0,9478	0,9899	0,9932	0,9930	0,9926	0,9797	0,9876	0,9925	0,9880	0,9924	0,9924
III		0,1581	0,6429	0,9025	0,9374	0,9380	0,936	0,9338	0,9222	0,9280	0,9315	0,9275	0,9301	0,9300
g	Облако 1	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
g	Облако Ми	0,860	0,858	0,850	0,852	0,856	0,858	0,853	0,840	0,837	0,817	0,832	0,833	0,811

Таблица 4. Оптические параметры в надоблачном слое облаков для модели Облако 2

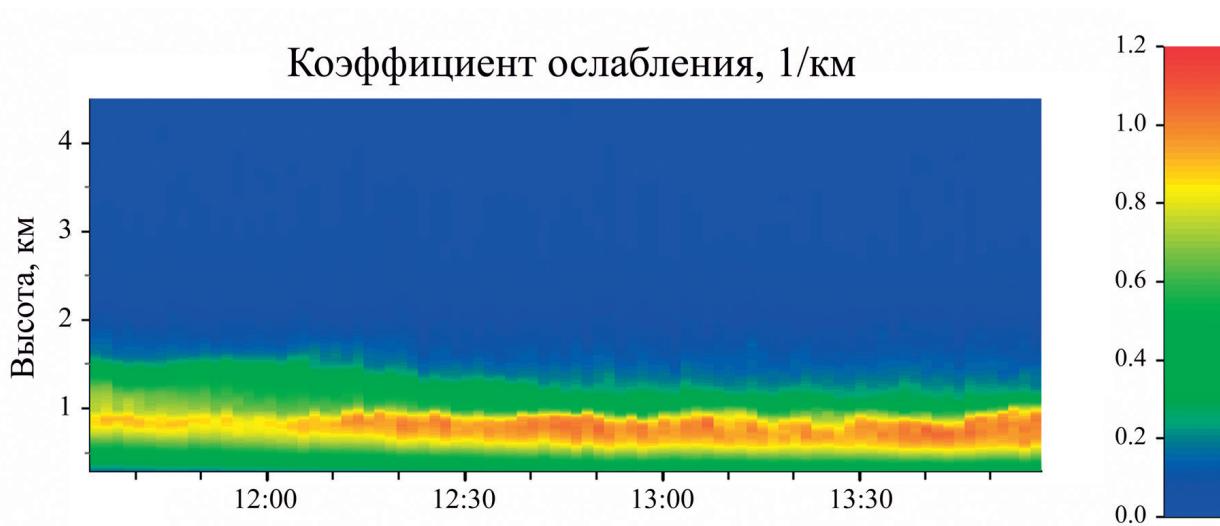
<i>Модель</i>	$\lambda, \mu\text{m}$	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,68</b>	<b>0,7</b>	<b>0,76</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
0	$\Sigma\tau$ над Облаком 2 ( $p_{z=1\text{km}}$ )	37,441 37,791 37,958 38,331	4,545 4,805 4,956 5,645	1,1356 1,380 1,535 2,250	0,667 0,907 1,046 1,667	0,50861 0,7386 0,8876 1,4086	0,328 0,518 0,644 1,228	0,13 0,300 0,420 1,030	0,110 0,215 0,365 0,965	0,062 0,212 0,332 0,912	0,032 0,172 0,292 0,832	0,047 0,187 0,297 0,847	0,019 0,149 0,259 0,719	0,012 0,142 0,252 0,712
1	$\tau_p$ внутри Облака 2 ( $p_{z=1\text{km}}$ )	10,154 10,384 10,634 10,954	10,122 10,352 10,502 10,872	10,093 10,143 10,293 10,703	10,072 10,272 10,442 10,702	10,056 10,266 10,406 10,556	10,036 10,206 10,30 10,48	10,01 10,17 10,30 10,467	10,007 10,147 10,227 10,404	10,004 10,134 10,214 10,404	10,003 10,123 10,203 10,403	10,002 10,122 10,202 10,302	10,001 10,121 10,201 10,251	
II	$\omega$ над Облаком 2 ( $p_{z=1\text{km}}$ )	0,0372 0,0434 0,0468 0,0566	0,2420 0,2810 0,2968 0,3189	0,7344 0,7710 0,7746 0,6818	0,9670 0,9647 0,9407 0,7469	0,9988 0,9857 0,9543 0,7156	1,0 0,9807 0,9379 0,6743	1,0 0,9667 0,9048 0,6117	0,5455 0,9302 0,8493 0,5803	0,5807 0,9419 0,8630 0,5290	1,0 0,8302 0,8012 0,5192	0,48936 0,8182 0,7845 0,4994	1,0 0,9329 0,8456 0,4437	1,0 0,9296 0,8413 0,4382
III														

Таблица 5. Оптические параметры для модели Облако 3 (спектрально-зависимая оптическая толщина)

<i>Модель</i>	$\lambda, \mu\text{m}$	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>	<b>0,76</b>	<b>0,80</b>	<b>0,90</b>
$p_{z=1\text{km}}$	$\tau_{\text{обл}}$	70	58	47	38	32	25	16	12	11	10	10	10	10
	$\tau_{\text{mp}}$	1,391	1,100	0,834	0,645	0,508	0,328	0,13	0,060	0,036	0,032	0,023	0,019	0,012
	$\tau_{\text{мп}}$	36,14	3,445	0,306	0,022	0,61(-3)	0,0	0	0,005	0,016	0	0,024	0	0
0	$\Sigma\tau$ Облако 3+ надобл. слой	107,685 107,791 107,958 108,731	62,667 62,805 62,956 63,645	48,23 48,38 48,535 49,25	38,74 38,907 39,046 39,667	32,565 32,739 32,888 33,409	25,364 25,518 25,644 26,228	16,14 16,3 16,42 17,03	12,072 12,210 12,350 12,96	11,040 11,269 11,393 11,936	10,036 10,172 10,292 10,832	10,024 10,326 10,435 10,923	10,021 10,149 10,259 10,719	10,013 10,142 10,252 10,712
	$\omega_0$	0,6644 0,6646 0,6649 0,6639	0,9450 0,9450 0,9446 0,9396	0,9937 0,9935 0,9929 0,9855	0,9994 0,9992 0,9984 0,9880	1,0 1,0 0,9984 0,9848	1,0 0,9996 0,9988 0,9880	1,0 0,9994 0,9984 0,9848	0,9996 0,9992 0,9976 0,9765	1,0 0,9994 0,9968 0,9691	1,0 0,9990 0,9888 0,9486	1,0 0,9990 0,9807 0,9486	1,0 0,9990 0,9961 0,9627	1,0 0,9990 0,9961 0,9627
	II													
	III													

## Результаты лидарного зондирования

Вертикальный профиль коэффициента ослабления атмосферных аэрозолей получен в результате лидарного зондирования с применением аэрозольного лазера на Васильевском острове в центре Санкт-Петербурга (Донченко и др., 2013; Donchenko, et al., 2014). На *рис. 4* представлены соответствующие результаты, полученные 14.03.2014 по местному времени с 11:30 до 14:00 для спектральных каналов 355 и 532 нм. Значения коэффициента ослабления получены через 7,5 метров до высоты 10 км. Интегрирование по высоте дает оптическую толщину атмосферных аэрозолей над центром Санкт-Петербурга, представленную в *табл. 6*. Увеличение оптической толщины от УФ к видимому каналу аналогична спектральной зависимости отмеченной в работе (Sokolik, Toon, 1999).



*Рис. 4. Динамика вариаций вертикального профиля коэффициента аэрозольного ослабления в спектральном канале 532 нм по измерениям 14.03.2014 в центре Санкт-Петербурга*

Таблица 6. Значения аэрозольной оптической толщины, полученные из измерений

Эксперимент	Длина волны, нм						
	340	355	500	532	675	1020	1064
Санкт-Петербург, В.О. Лидарное зондирование, 14.03.2014	-	0,112	-	0,121	-	-	0,057
AERONET Санкт-Петербург- Петродержец, 14.03.2014	0,107	-	0,087	-	0,079	0,073	-
Ладога, самолетные измерения 29.04.1985	0,15	0,12	0,25	0,30	0,33	-	-
AERONET Москва, Россия, март 2014 г.	0,240	-	0,152	-	0,096	0,059	-
AERONET Тыравере, Эстония, март 2014 г.	0,157	-	0,104	-	0,069	-	-
AERONET, Хельсинки, Финляндия, март 2014 г.	0,057	-	0,037	-	0,026	0,028	-

Результаты восстановления оптической толщины аэрозольной составляющей из самолетных измерений солнечной радиации (Васильев, Мельникова, 2002) также показаны в табл. 6 вместе с данными, полученными в марте 2014 на ближайших станциях AERONET, расположенных в пригороде Санкт-Петербурга – Петродворце, в Финляндии (Хельсинки), Эстонии (Тыравере) и в Москве. Видно, что значения аэрозольной оптической толщины над мегаполисами соответствуют предложенным здесь моделям Аэрозоль 1 и 2 и заметно больше, чем над городами меньших размеров, которые можно описать моделями Аэрозоль 0 и 1.

## Обсуждение результатов

На *рис. 2б* и в *табл. 2* отметим увеличение 1-альбедо однократного рассеяния в безоблачной атмосфере с длиной волны, что объясняется ослаблением молекулярного рассеяния, так как оптическая толщина поглощения аэрозолей в модели практически постоянна по спектру. На *рис. 2* видно, что увеличение содержания поглощающих свет аэрозолей в атмосфере ослабляет значимость поглощения водяным паром и кислородом (полосы поглощения слабо выделены для моделей аэрозоля 3 и 4). В области сильного поглощения УФ полос поглощения озоном присутствие аэрозолей усиливает рассеяние и немножко увеличивает значение  $\omega$ .

Заметим, что значения альбедо однократного рассеяния в УФ-области длин волн согласуется с величинами, полученными в работах (Petters et al., 2003; Kim et al., 2009).

Сравнение наших модельных построений для безоблачной атмосферы с результатами самолетных измерений коэффициентов рассеяния и поглощения *in situ* на длине волны 550 нм у берегов США (Reidmiller, Hobbs, Kahn, 2006), где в самолетных измерениях получены значения  $\omega$  в пределах 0,9–0,98 в эксперименте 17.07.2001 и 0,85–0,95 в измерениях 02.08.2001, дает хорошее согласие с модельными значениями в *табл. 2* для моделей I и II вне газовых полос поглощения. Аналогичные значения альбедо однократного рассеяния приводятся в работе (Dubovik et al., 2001), полученные из измерений в сети AERONET.

Оптическая модель для облачной атмосферы (*рис. 3* и *табл. 3*) показывает значимость атмосферных аэрозолей на формирование оптических параметров облачной атмосферы. Результаты, полученные на основе экспериментальных данных (Мельникова, 1992), совпадают с модельными значениями для аэрозольных моделей A0 – A2, а также указывают на то, что аэрозольная модель A3 не реализовывалась при проведении рассмотренных в работах (Мельникова, 1992; Васильев, Мельникова, 2002) самолетных экспериментов.

Напомним, что для облачной атмосферы здесь рассматривается *внешняя смесь*, где аэрозольные частицы находятся между каплями. Из *табл. 3* и 5 следует, что в таком облаке альбедо частицы можно принять равным единице вне молекулярных полос **только** при полном отсутствии атмосферных аэрозолей (модель A0). В всех других случаях величина  $\omega$  весьма значительно отличается от единицы, т.е. рассеяние в облаке в большинстве случаев не консервативно. А именно: в облачной атмосфере имеют место следующие величины:

для модели A1  $\omega = 0,999$ , для A2  $\omega = 0,996$  и для A3  $\omega = 0,960$  при оптической толщине облака 10, что достаточно близко значениям, приведенным в оптической модели слоистой облачности (Мельникова, 2001), а также к результатам, восстановленным из радиационных измерений (Васильев, Мельникова, 2002; Мельникова, 1992; Gatebe, Kuznetsov, Melnikova, 2014). В облаках с меньшей оптической толщиной ( $\tau = 5$ ) вклад рассеяния, естественно, меньше, и значения альбедо частицы еще сильнее отличаются от единицы (роль поглощения аэрозолями возрастает). Можно заключить, что аэрозоли в реальных облаках, изучаемых в работах (Васильев, Мельникова, 2002; Мельникова, 1992; Gatebe, Kuznetsov, Melnikova, 2014), представлены в виде внешней смеси. К заключению о том, что значения альбедо частицы значительно отличаются от единицы для любого содержания аэрозоля, отличного от 0, пришли также авторы работ (Васильев, Ивлев, 2002; Ивлев и др., 2003 ).

Если допустить некоторое содержание в атмосфере сажевых частиц и слабокислую среду, то эффект поглощения солнечной радиации аэрозольными частицами будет еще сильнее. В работе (Михайлов, Власенко, 2007) было экспериментально смоделировано взаимодействие с солнечной радиацией сажевых частиц во влажной нейтральной и кислой среде и показано, что сажевые частицы увеличиваются в размере, причем особенно заметно – в присутствии кислот, при этом роль аэрозольного поглощения становится более значительной.

Отметим, что авторы многочисленных работ, посвященных оптическим моделям облачной атмосферы и расчетам коротковолновой радиации в облаке, в большинстве случаев принимают значения альбедо частицы  $\omega = 1,0$  и предполагают консервативное рассеяния радиации в облаке вне полос поглощения газовой составляющей (Kokhanovsky et al., 2006; Arking, 1996; Ackerman, Flynn, Marchand, 2003; Taylor et al., 1996). Это обстоятельство в конце прошлого столетия породило мнение о том, что коротковолновая радиация в облаке не поглощается, и инициировало бурную дискуссию об *аномальном* коротковолновом поглощении солнечной радиации, обнаруженному в экспериментах в облачной атмосфере. Из приведенных здесь результатов ясно видно, что консервативное рассеяния реализуется в облаке только в случае полного отсутствия атмосферных аэрозолей, и даже малое их содержание в атмосфере (модель A1) приводит к заметному отличию альбедо частицы от единицы и значительному влиянию аэрозолей на радиационный режим атмосферы.

В нашей работе рассмотрена также модель **Облако 3** со спектрально-зависимой оптической толщиной, потому что в последние годы был опубликован ряд результатов, указывающий на увеличение коэффициента рассеяния в облаке (а, значит, и оптической толщины) в коротковолновой области спектра (Mayer et al., 1998; Marshak et al., 2008; Lindfors, Arola, 2009; Asano, 1994). Из теории рассеяния света следует, что для крупных частиц (что соответствует каплям облака) коэффициент рассеяния (и, следовательно, оптическая толщина) не зависят от длины волны. С другой стороны, результаты решения обратной задачи (Васильев, Мельникова, 2002; Мельникова, 1992; Gatebe, Kuznetsov, Melnikova, 2014) на основе спектральных измерений потоков и интенсивностей рассеянной солнечной радиации (Радионов, Сакунов, Гришечкин, 1981; Гришечкин, Шульц, Мельникова, 1989; Васильев, Мельникова, 2002) обнаруживают явную зависимость оптической толщины и коэффициента рассеяния от длины

волны, что видно, в частности, на *рис. 3*. Модель **Облако 3** учитывает обнаруженный эффект. В настоящей статье мы не ставим цель обсуждать причины этого явления, некоторые сопротивления можно найти в работах (Васильев, Мельникова, 2002), (Мельникова, 2001).

## Заключение

В данной работе представлены простые оптические модели безоблачной и облачной атмосферы и проведен анализ влияния поглощающих и рассеивающих компонент атмосферы на формирование оптической толщины и альбедо однократного рассеяния. Оказалось, что в облачной атмосфере влияние атмосферных аэрозолей достаточно существенно. Сравнение с результатами решения обратной задачи при обработке натурных измерений показывает хорошее соответствие полученных значений. Из результатов нашего простого моделирования оптических параметров атмосферы следует, что проблема «аномального» поглощения в облачной атмосфере однозначно решается в пользу его существования и, поскольку в этом ничего аномального не усматривается, логичнее назвать поглощение в облаке «избыточным». Еще раз необходимо подчеркнуть необходимость более аккуратного учета атмосферных аэрозолей в оптических моделях облачной атмосферы.

Работа была выполнена с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ. Авторы выражают благодарность за поддержку работы в соответствии с Соглашением №14.577.21.0056 о представлении субсидии от 05 июня 2014 г. (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0056) в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы".

## Литература

1. *Васильев А.В., Ивлев Л.С.* Об оптических свойствах загрязненных облаков // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 2. С. 157–159.
2. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Интерпретация. Измерения. СПб.: НИИХ СПбГУ. 2002. 388 с.
3. *Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. ДИ Менделеева). 2008. Т. 52. № 5-С. С. 112–119.
4. *Гинзбург А.С., Романов С.В., Фомин Б.А.* Использование радиационно-конвективной модели для оценки температурного потенциала парниковых газов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 324–331.
5. *Гришечкин В.С., Шульц Э.О. Мельникова И.Н.* Анализ спектральных радиационных характеристик. ЛГУ // Проблемы физики атмосферы. 1989. Вып. 20. С. 32–42.
6. *Донченко В.К., Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Чугреев А.В.* Лазерные системы Ресурсного Центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 10. № 3. 2013. С. 122–134.
7. *Ивлев Л.С., Васильев А.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Терпугова С.А.* Оптико-микрофизические модели городских аэрозолей // Третья международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Ред. Л.С. Ивлев. СПб.: НИИ Химии СПбГУ. 2003. С. 161–170.

8. Лобанова М.А., Васильев А.В., Мельникова И.Н. Зависимость параметра индикаторы рассеяния т характеристик среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 147–157.
9. Мельникова И.Н. Оптическая модель облачности, полученная из самолетных спектральных измерений коротковолновой солнечной радиации // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 710–721.
10. Мельникова И.Н. Оптическая модель однородной атмосферы для расчета характеристик солнечной радиации в условиях безоблачной и облачной атмосферы // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сб. статей. Санкт-Петербург, 2011. С. 210–221.
11. Мельникова И.Н. Спектральные оптические параметры облачных слоев. Приложение к экспериментальным данным. Часть II // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 2. С.178–185.
12. Мельникова И.Н., Васильев А.В., Кузнецов А.Д. Практикум по учебным дисциплинам: «Дистанционное зондирование окружающей среды из космоса», «Теория переноса электромагнитного излучения в атмосфере». Изд-во БГТУ «Военмех», 2008.
13. Михайлов Е.Ф., Власенко С.С. Структура и оптические свойства сажевых аэрозолей во влажной атмосфере: 2. Влияние гидрофильности частиц на коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 221–233.
14. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. Ред. К.Я. Кондратьев. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 564 с.
15. Радионов В.Ф., Сакунов Г.Г., Гришечкин В.С. Спектральное альбедо заснеженной поверхности по измерениям на дрейфующей станции СП-22. Первый глобальный эксперимент ПИГАП. 2. Полярный аэрозоль, протяженная облачность и радиация. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С. 89–91.
16. Чубарова Н.Е., Горбаченко Е.В., Неваль Е.И., Шиловцева О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 790–804.
17. Ackerman T.P., Flynn D.M., Marchand R.T. Quantifying the magnitude of anomalous solar absorption // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. D9. P. 4273–4396. doi:10.1029/2002JD002674.
18. Arking A. Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between a model and observations // Science. 1996. Vol. 273. P. 779–782.
19. Asano S. Cloud and Radiation Studies in Japan. Cloud Radiation Interactions and Their Parametrization in Climate Models // WCRP-86 WMO/TD No. 648. Geneva. WMO. 1994. P. 72–73.
20. Chubarova N. , Nezval' Ye., Sviridenkov I. , Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmos. Meas. Tech. 2012. Vol. 5. No. 3. P. 557–568. doi:10.5194/amt-5-557-2012.
21. Donchenko V., Melnikova I., Samulenkov D. First results of lidar sounding of the atmosphere in the Sankt-Petersburg State University // 3rd Joint ACTRIS WP2 / WP20 and EARLINET Workshop Cyprus University of Technology. Limassol. Cyprus. 2013.
22. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanré D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. Vol. 59. No. 3. P. 590–608.
23. Gatebe Ch., Kuznetsov A., Melnikova I. Cloud optical parameters from airborne observation of diffuse solar radiation accomplished in USA and USSR in different geographical regions. International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. No. 15. 2014. P. 5812–5829. doi:10.1080/01431161.2014.945000.
24. Ishizaka Y., Adhikari M., Kazaoka R., Khatri P., Minda H., Aryal D., Takahashi T., Takasu K., J Jansen B., Gras J. L., Okada K. The effect of air-pollutants on the microphysical properties of clouds over the sea off the southwest of Kyushu in Japan // Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003. JST/CREST/APEX 2003 Interim Report. Tokyo, 2003. P. 103–116.
25. Kim Y.M., Kim Jh., Cho H.K., Lee Y.G., Koo J.H., Kim Y.J. The dependence of the surface solar irradiance on cloud and Aerosol // Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS 2008). Ed. by T. Nakajima and M. A. Yamase. American Institute of Physics. 2009. P. 545–548.
26. Kokhanovsky A.A., von Hoyningen-Huene W., Rozanov V.V., Noël S., Gerilowski K., Bovensmann H., Bramstedt K., Buchwitz M., Burrows J.P. The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY II. The application to MERIS and SCIAMACHY data // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2006. Vol. 6. No. 12. P. 1813–1840.
27. Kondratyev K.Ya., Varotsos C. Atmospheric Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health and Ecosystems. Springer-Praxis, Chichester, UK, 2000. 617 p.
28. Lindfors A., Arola A. On the wavelength-dependent attenuation of radiation in the UV-visible range by a homogeneous cloud layer // Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS 2008): Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). AIP Publishing, 2009. Vol. 1100. No. 1. P. 61-64.
29. Marshak A., Wen G., Coakley Jr.A.J., Remer A.L., Loeb G.N., Cahalan F. A simple model for the cloud adjacency effect and the apparent bluing of aerosols near clouds // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. No. D14. P. 17. doi:10.1029/2007JD009196.
30. Mayer B., Kylling A., Madronich S., Seckmeyer G. Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation. // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. No. D23. P. 31241–31254.
31. Kuznetsov A., Melnikova I. Pozdnyakov D., Seroukhova O., Vasilyev A. Remote Sensing of the Environment and Radiation Transfer. An Introductory Survey. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011.
32. Petters J. L., Saxena V. K., Slusser J. R., Wenny B.N., Madronich S. Aerosol single scattering albedo retrieved from measurements of surface UV irradiance and a radiative transfer model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. D9. P. 4288. doi:10.1029/2002JD002360.
33. Ramanathan V., Subasilar B., Zhang G.J., Conant W., Cess R.D., Kiehl J.T., Grassl G., Shi L., Warm Pool Heat Budget and Shortwave Cloud Forcing: a Missing Physics? // Science. 1995. Vol. 267. No. 5197. P. 500–503.
34. Reidmiller D.R., Hobbs P.V., Kahn R. Aerosol Optical Properties and Particle Size Distributions on the East Coast of the United States Derived from Airborne In Situ and Remote Sensing Measurements // J. Atmos. Sci. 2006. Vol. 63. No. 3. P. 785–814.

35. Sano I., Mukai S., Okada Y., Takamura T., Holben B. N. Optical properties of aerosols over Japan during APEX experiments // Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003. JST/CREST/APEX 2003 Interim Report. Tokyo, 2003. P. 75–85.
36. Sokolik I.N., Toon O.B. Incorporation of mineral composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. No. D8. P. 9423–9444.
37. Stephens G.L. Optical properties of eight water cloud types // Technical Paper of CSIRO. Atmosph. Phys. Division. Aspendale. Australia. 1979. No. 36. P. 1–35.
38. Taylor J.P., Edwards J.M., Glew M.D., Hignett P., Slingo A. Studies with a flexible new radiation code. II. Comparison with aircraft short-wave observations // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1996. Vol. 122. No. 532. P. 839–861.
39. Varotsos C.A., Melnikova I.N., Cracknell A.P., Tzanis C., Vasilyev A.V. New spectral functions of the near-ground albedo derived from aircraft diffraction spectrometer observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. No. 13. P. 6953–6965.

## Simple optical model of clear sky and cloudy atmosphere for calculation of solar irradiance

A.S. Ginzburg<sup>1</sup>, I.N. Melnikova<sup>2</sup>, D.A. Samulenkov<sup>2</sup>, M.V. Sapunov<sup>2</sup>, L.V. Katkovsky<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia, E-mail: gin@ifaran.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia

E-mail: irina.melnikova@pobox.spbu.ru

<sup>3</sup>A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University  
Minsk 220064, Belarus, E-mail: katkovskyl@bsu.by

Simple optical models of cloudless and cloudy atmosphere are proposed. Four versions of atmospheric aerosols content are considered: a complete lack of aerosols in the atmosphere, low background concentration ( $500 \text{ cm}^{-3}$ ), high concentrations ( $2000 \text{ cm}^{-3}$ ) and high content of particles ( $5000 \text{ cm}^{-3}$ ). In a cloud scenario, the model of external mixture is assumed: solid aerosol particles are between water droplets. The values of optical thickness and single scattering albedo for 13 wavelengths are calculated with regard to the molecular absorption bands in the short wavelength range of  $0.3\text{--}0.9 \mu\text{m}$ . Molecular bands are simulated with triangle function. A comparison of the proposed values of optical parameters with results of the various measurements and retrieval (lidar measurement, sampling, processing radiation measurements) is accomplished. It is shown that the values of optical parameters correspond to the values obtained from processing the results of airborne observations of the irradiance and radiance of solar radiation at different altitudes in the atmosphere. For a cloudy atmosphere models for single-layer and two-layer atmosphere are presented. It is found that cloud optical parameters assumed for the “external mixture” agree well with values obtained from airborne observations and retrievals. The proposed optical models provide acceptable accuracy, which is clear from comparisons between the measured and retrieved values of optical parameters.

**Keywords:** atmospheric aerosols, cloud, optical thickness, single scattering albedo, optical model, volume extinction coefficient, volume absorption coefficient, lidar sounding

Accepted: 05.02.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-132-149

## References

1. Vasil'ev A.V., Ivlev L.S., Ob opticheskikh svoistvakh zagryaznennykh oblakov (To optical properties of polluted clouds), *Optika atmosfery i okeana*, 2002, Vol. 15, No. 2, pp. 157–159.
2. Vasil'ev A.V., Melnikova I.N., *Korotkovolnovoe solnechnoe izluchenie v atmosfere Zemli. Raschety. Interpretatsiya. Izmereniya* (Short-wave solar radiation in the atmosphere of the Earth. Calculation. Interpretation. Measurements), Saint-Petersburg: NIIKh SPbGU, 2002, 388 p.
3. Ginzburg A.S., Gubanova D.P., Minashkin V.M., Vliyanie estestvennykh i antropogennykh aerozolei na global'nyi i regional'nyi klimat (Impact of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleva)*, 2008, Vol. 52, No. 5-C, pp. 112–119.
4. Ginzburg A.S., Romanov S.V., Fomin B.A., Ispol'zovanie radiatsionno-konvektivnoi modeli dlya otsenki temperaturnogo potentsiala parnikovykh gazov (The Radiation-convection model for estimation of the temperature potential of greenhouse gases), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2008, Vol. 44, No. 3, pp. 324–331.
5. Grishechkin V.S., Shul'ts E.O. Melnikova I.N., Analiz spektral'nykh radiatsionnykh kharakteristik (Analysis of spectral radiative characteristics), *LGU. Problemy fiziki atmosfery*, 1989, Iss. 20, pp. 32–42.

6. Donchenko V.K., Samulenkov D.A., Melnikova I.N., Boreisho A.S., Chugreev A.V., Lazernye sistemy Resurs-nogo Tsentr SpbGU. Vozmozhnosti, postanovka zadach i pervye rezul'taty (Laser complexes of the Resources Center of St. Petersburg State University. Problem statement and first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 122–134.
7. Ivlev L.S., Vasil'ev A.V., Belan B.D., Panchenko M.V., Terpugova S.A., Optiko-mikrofizicheskie modeli gorodskikh aerozolei (Optical-microphysical models of urban aerosols), *Tret'ya mezhdunarodnaya konferentsiya "Estestvennye i antropogennye aerozoli"* (The third international conference "Natural and anthropogenic aerosols"), Ed. L.S. Ivlev, Saint-Petersburg: NII Khimii SPbGU, 2003, pp. 161–170.
8. Lobanova M.A., Vasil'ev A.V., Melnikova I.N., Zavisimost' parametra indikatrisy rasseyaniya ot kharakteristik sredy (Dependence of the phase function parameter on medium characteristics), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 4, pp. 147–157.
9. Melnikova I.N., Opticheskaya model' oblachnosti, poluchennaya iz samoletnykh spektral'nykh izmerenii korotkovolnovoi solnechnoi radiatsii (Optical model of cloudiness obtaining from airborne spectral observations of short-wave solar radiation), *Optika atmosfery i okeana*, 2001, Vol. 14, No. 8, pp. 710–721.
10. Melnikova I.N., Opticheskaya model' odnorodnoi atmosfery dlya rascheta kharakteristik solnechnoi radiatsii v usloviyakh bezoblachnoi i oblachnoi atmosfery (Optical model of homogeneous atmosphere for calculation of characteristics under condition clear and cloudy atmosphere), In: *Estestvennye i antropogennye aerozoli* (Natural and anthropogenic aerosols), Saint-Petersburg, 2011, pp. 210–221.
11. Melnikova I.N., Spektral'nye opticheskie parametry oblachnykh sloev. Prilozhenie k eksperimental'nym dannym. Chast' II. (Spectral optical parameters of cloud layers. Application to the experimental data. Part II), *Optika atmosfery i okeana*, 1992, Vol. 5, No. 2, pp. 178–185.
12. Mel'nikova I.N., Vasil'ev A.V., Kuznetsov A.D., *Praktikum po uchebnym distsiplinam: "Distantsionnoe zondirovanie okruzhayushchei sredy iz kosmosa"*, "Teoriya perenosa elektro-magnitnogo izlucheniya v atmosfere" (Workshop manuals: "Remote Sensing of the Environment from Space", "The theory of electromagnetic radiation transfer in the atmosphere"), Voenmehk, 2008.
13. Mikhailov E.F., Vlasenko S.S., Struktura i opticheskie svoistva sazhevnykh aerozolei vo vlazhnoi atmosfere: 2. Vliyanie gidrofil'nosti chastits na koefitsienty oslableniya, rasseyaniya i pogloshcheniya (Structure and optical properties of soot aerosols in humid atmosphere: 2. Impact of hydrophilic particles on coefficients of extinction, scattering and absorption), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 43, No. 2, pp. 221–233.
14. Radiatsionnye kharakteristiki atmosfery i zemnoi poverkhnosti (Radiation characteristics of the atmosphere and earth surface), Ed. K. Ya. Kondrat'ev, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969, 564 p.
15. Radionov V.F., Sakunov G.G., Grishechkin V.S., Spektral'noe albedo zasnezhennoi poverkhnosti po izmereniyam na dreifuyushchey stantsii SP-22 (Spectral albedo of snow surface from observations at drifting Arctic station), *Pervyi global'nyi eksperiment PIGAP. 2. Polyarnyi aerozol', protyazhennaya oblachnost' i radiatsiya* (First global experiment PIGAP. 2. Polar aerosol, extended cloud cover and radiation), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, pp. 89–91.
16. Chubarova N.E., Gorbarenko E.V., Nezval' E.I., Shilovtseva O.A., Aerozol'nye i radiatsionnye kharakteristiki atmosfery vo vremya lesnykh i torfyanykh pozharov v 1972, 2002 i 2010 gg. v Podmoskov'e (Aerosol and Radiative characteristics of the atmosphere during forest and peat fires in 1972, 2002 and 2010 years in Moscow suburbs), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 6, pp. 790–804.
17. Ackerman T.P., Flynn D.M., Marchand R.T., Quantifying the magnitude of anomalous solar absorption, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. D9, pp. 4273–4396, doi:10.1029/2002JD002674.
18. Arking A., Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between a model and observations, *Science*, 1996, Vol. 273, pp. 779–782.
19. Asano S., Cloud and Radiation Studies in Japan. Cloud Radiation Interactions and Their Parametrization in Climate Models, *WCRP-86 WMO/TD*, Geneva. WMO, 1994, No. 648, pp. 72–73.
20. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., Smirnov A., Slutsker I., Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010, *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, Vol. 5, No. 20, pp. 557–568, doi:10.5194/amt-5-557-2012.
21. Donchenko V., Melnikova I., Samulenkov D., First results of lidar sounding of the atmosphere in the Sankt-Petersburg State University, *3rd Joint ACTRIS WP2/WP20 and EARLINET Workshop Cyprus University of Technology*, Limassol, Cyprus, 2013.
22. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanré D., Slutsker I., Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, 2002, Vol. 59, No. 3, pp. 590–608.
23. Gatebe Ch., Kuznetsov A., Melnikova I., Cloud optical parameters from airborne observation of diffuse solar radiation accomplished in USA and USSR in different geographical regions, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5812–5829. DOI:10.1080/01431161.2014.945000.
24. Ishizaka Y., Adhikari M., Kazaoka R., Khatri P., Minda H., Aryal D., Takahashi T., Takasu K., J Jansen B., Gras J. L., Okada K., The effect of air-pollutants on the microphysical properties of clouds over the sea off the southwest of Kyushu in Japan, *Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003, JST/CREST/APEX 2003 Interim Report*, Tokyo, 2003, pp. 103–116.
25. Kim Y.M., Kim Jh., Cho H.K., Lee Y.G., Koo J.H., Kim Y.J., The dependence of the surface solar irradiance on cloud and Aerosol, *Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS 2008)*, Ed. by T. Nakajima and M. A. Yamashoe, American Institute of Physics, 2009, pp. 545–548.
26. Kokhanovsky A.A., von Hoyningen-Huene W., Rozanov V.V., Noël S., Gerilowski K., Bovensmann H., Bramstedt K., Buchwitz M., Burrows J.P., The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY II. The application to MERIS and SCIAMACHY data, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2006, Vol. 6, No. 12, pp. 1813–1840.
27. Kondratyev, K.Ya., Varotsos C., *Atmospheric Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health and Ecosystems*, Springer-Praxis, Chichester, UK, 2000, 617 p.
28. Lindfors A., Arola A., On the wavelength-dependent attenuation of radiation in the UV-visible range by a homogeneous cloud layer, *Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS 2008)*, Ed. T. Nakajima and M. A. Yamashoe, 2009, American Institute of Physics, pp. 61–63.

29. Marshak A., Wen G., Coakley, Jr. A. J., Remer A. L., Loeb G. N., Cahalan F., A simple model for the cloud adjacency effect and the apparent bluing of aerosols near clouds, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, No. D14, pp. 17, doi:10.1029/2007JD009196.
30. Mayer B., Kylling A., Madronich S., Seckmeyer G., Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation, *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, No. D23, pp. 31241–31254.
31. Kuznetsov A., Melnikova I., Pozdnyakov D., Seroukhova O., Vasilyev A., *Remote Sensing of the Environment and Radiation Transfer. An Introductory Survey*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011.
32. Petters J.L., Saxena V.K., Slusser J.R., Wenny B.N., Madronich S., Aerosol single scattering albedo retrieved from measurements of surface UV irradiance and a radiative transfer model, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. D9, pp. 4288. doi:10.1029/2002JD002360.
33. Ramanathan V., Subasilar B., Zhang G.J., Conant W., Cess R.D., Kiehl J.T., Grassl G., Shi L., Warm Pool Heat Budget and Shortwave Cloud Forcing: a Missing Physics? *Science*, 1995, Vol. 267, No. 5196, pp. 500–503.
34. Reidmiller D.R., Hobbs P.V., Kahn R., Aerosol Optical Properties and Particle Size Distributions on the East Coast of the United States Derived from Airborne In Situ and Remote Sensing Measurements, *J. Atmos. Sci.*, 2006, Vol. 63, No. 3, pp. 785–814.
35. Sano I., Mukai S., Okada Y., Takamura T., Holben B.N., Optical properties of aerosols over Japan during APEX experiments, *Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003*, JST/CREST/APEX 2003 Interim Report, Tokyo, 2003, pp. 75–85.
36. Sokolik I.N., Toon O.B., Incorporation of mineral composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 1999, Vol. 104, No. D8, pp. 9423–9444.
37. Stephens G.L., Optical properties of eight water cloud types, *Technical Paper of CSIRO. Atmosph. Phys. Division*, Aspendale, Australia, 1979, No. 36, pp. 1–35.
38. Taylor J.P., Edwards J.M., Glew M.D., Hignett P., Slingo A., Studies with a flexible new radiation code. II. Comparison with aircraft short-wave observations, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1996, Vol. 122, No. 532, pp. 839–861.
39. Varotsos C.A., Melnikova I.N., Cracknel A.P., Tzanis C., Vasilyev A.V., New spectral functions of the near-ground albedo derived from aircraft diffraction spectrometer observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, Vol. 14, No. 13, pp. 6953–6965.