



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М.В. Ломоносова





МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

**Материалы
Всероссийской научной конференции
с международным участием
и XI научной молодежной школы**

3–6 декабря 2018 года, Москва



Москва – 2018

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОЙ И ДИСПЕРСНОЙ ФАЗ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ В ЗАДАЧАХ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Москаленко Н.И., Додов И.Р.

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация. Рассматриваются параметризации важнейших радиационных характеристик газовой и дисперсной фаз земной атмосферы и компонентов антропогенных атмосферных выбросов в УФ, видимом и ИК диапазонах спектра. Для расчетов функций спектрального пропускания применяется двухпараметрический метод эквивалентной массы. Оптические характеристики дисперсной фазы атмосферы вычисляются на основе данных по химическому составу и микроструктуре аэрозольных образований. Оптические характеристики облаков вычисляются по их микроструктуре и спектральным зависимостям действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления воды и льда.

Ключевые слова: Радиационный теплообмен, солнечное излучение, солнечные тепловые станции, оптические характеристики дисперсной фазы и облаков, функции спектрального пропускания.

PARAMETRIZATION OF SPECTRAL RADIATION CHARACTERISTICS OF THE GAS AND DISPERSE PHASE OF THE EARTH ATMOSPHERE IN THE PROBLEMS OF SOLAR HEAT AND ELECTRIC POWER ENGINEERING

Moskalenko N.I., Dodov I.R.

Kazan State Power Engineering University

Abstract. Parametrizations of the most important radiation characteristics of the gas and dispersed phases of the earth's atmosphere and components of anthropogenic atmospheric emissions in the UV, visible and IR spectral ranges are considered. To calculate the spectral transmission functions, a two-parameter method of equivalent mass is used. Optical characteristics of the dispersed phase of the atmosphere are calculated on the basis of data on the chemical composition and

microstructure of aerosol formations. The optical characteristics of clouds are calculated from their microstructure and the spectral dependences of the real and imaginary parts of the complex refractive index of water and ice.

Keywords: Radiation heat transfer, solar radiation, solar thermal stations, optical characteristics of the dispersed phase and clouds, spectral transmission functions.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач радиационного теплообмена в солнечных тепловых электрических станциях возникает проблема моделирования оптических характеристик атмосферы и антропогенных атмосферных выбросов, которые в настоящей работе решаются на основе комплексных экспериментальных исследований оптических характеристик газовой и дисперсной фаз атмосферы: функции спектрального пропускания, эффективные сечения поглощения и рассеяния, индикатриса рассеяния для дисперсной фазы атмосферы, включая облачные образования, последнее позволяет рассчитать спектральное альbedo поглощающей и рассеивающей среды распространения излучения.

ФУНКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ТРАССАМ АТМОСФЕРЫ

Для неселективного излучения Солнца разработаны однопараметрический и двухпараметрический методы эквивалентной массы для расчетов функций спектрального пропускания (ФСП) $\tau_{\Delta\nu}$ в многокомпонентной структурно-неоднородной среде распространения излучения:

$$\tau_{\Delta\nu} = \prod_i \tau_{i\Delta\nu}[L(T)], \quad (1)$$

где i –номер газового или аэрозольного ингредиента атмосферы, Δ –спектральное разрешение, L –оптический путь в среде, T –температура. Произведение в соотношении (1) берётся по всем ингредиентам i среды. Параметризация ФСП $\tau_{i\Delta\nu}$ выполняется по двухпараметрическому методу эквивалентной массы, согласно которому

$$\left(\frac{1}{\ln \tau_{i\Delta\nu}} \right)^2 = \left(\frac{1}{\ln \tau'_{i\Delta\nu}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\ln \tau''_{i\Delta\nu}} \right)^2 + \frac{M_i}{\ln \tau'_{i\Delta\nu} \cdot \ln \tau''_{i\Delta\nu}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \left| \ln \tau'_{i\Delta\nu} \right| = \int_L k_{iv}[L(T)] \rho_i(L) dL, \quad (3)$$

$$\left| \ln \tau''_{i\Delta\nu} \right| = \left\{ \beta^{1/m_i} \beta_{iv}(T) \rho_i[L(T)] \cdot P_{i\partial}^{n_i/m_i}(L) dL \right\}^{m_i}, \quad (4)$$

$$\left| \ln \tau_{\Delta\nu} \right| = \sum_i \left| \ln \tau'_{i\Delta\nu}[L(T)] \right|, \quad (5)$$

$$\tau_{\Delta\nu} = \exp \left[- \sum_i \left| \ln \tau_{i\Delta\nu}[L(T)] \right| \right], \quad (6)$$

$$P_{i\partial}^j(L) = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} [L(T)] P_k(L), \quad (7)$$

где $\rho_i(L)$ – концентрация оптически активного ингредиента i на оптическом пути L , $\rho_{i\partial}(L)$ – эффективное давление для оптически активного ингредиента i на оптическом пути L , B_{ik} – фактор уширения спектральных линий для столкновений молекул i - k , T – температура, $k_{iv}(T)$, $\beta_{iv}(T)$, m_i , n_i – параметры ФСП $\tau_{i\Delta\nu}$ в аппроксимациях слабого и сильного поглощения, M_i – параметр, определяющий скорость перехода ФСП от аппроксимации слабого поглощения к аппроксимации сильного поглощения. Параметры $k_{iv}(T)$, $\beta_{iv}(T)$, m_i , n_i , M_i , B_{ik} определены по данным выполненных экспериментальных исследований. Для континуального поглощения излучения крыльями СЛП и индуцированного давлением поглощения $m = n = 1$, $M = -1$. Для условий смазанной вращательной структуры спектра $m = 1$, $n = 0$, $M = -1$. Для различных газовых ингредиентов i $M_i \in \{0, -1\}$.

ФСП безоблачной атмосферы определяется выражением

$$\tau_\lambda = \tau_{\lambda n} \cdot \tau_{\lambda \text{aэp}} \cdot \tau_{\lambda \text{мp}},$$

где $\tau_{\lambda n}$ – пропускание, обусловленное молекулярным поглощением радиации атмосферными газами; $\tau_{\lambda \text{aэp}}$ – пропускание, обусловленное аэрозольным ослаблением; $\tau_{\lambda \text{мp}}$ – пропускание, обусловленное молекулярным рассеянием. Эмпирические параметры ФСП получены для водяного пара, CO_2 , N_2O , CH_4 , O_3 , O_2 , N_2 , NH_3 , HNO_3 , SO_2 , NO_2 , NO , CO

по данным лабораторных измерений и использованы для расчетов спектральной прозрачности атмосферы [1] для сферической модели Земли. На рис. 1 представлены ФСП земной атмосферы для модели среднеглобальной атмосферы ARDC при различных зенитных углах визирования $\theta(z_1 = 0) \in \{0, 90^\circ\}$ в спектральной области $0.3 \div 9$ мкм. Аэрозольное ослабление учтено по эмпирической методике [2] при метеорологической дальности видимости на уровне моря $S_m = 10$ км.

В случае применения в качестве приёмников излучения фотоэлектрических модулей воспринимаемый поток солнечного излучения (СИ) преобразуется в электрическую энергию солнечных батарей и определится соотношением

$$W = \int_{\Delta\lambda} F_{\lambda\Gamma} \downarrow \cdot \delta_{\lambda a} \cdot \eta_{\lambda} d\lambda, \quad (8)$$

где $F_{\lambda\Gamma} \downarrow$ – спектральный поток СИ на внешней границе атмосферы, η_{λ} – спектральная зависимость коэффициента преобразования солнечной радиации в электрическую энергию, $\Delta\lambda$ – спектральный диапазон чувствительности фотоэлементов.

В случае безоблачной атмосферы для расчетов потоков СИ целесообразно использовать метод разложения решения по кратности рассеяния, позволяющим учесть поглощение излучения в рассеивающей излучение атмосфере по аналитическим ФСП [3]. Для облачной атмосферы наиболее надёжно применение метода многопоточкового приближения в расчетах потоков нисходящего излучения $F \downarrow$. Прямые засветки СИ $F \downarrow_{\Pi}$ приёмных площадок учитываются по спектрам прозрачности $\tau_{\lambda}(\theta)$ атмосферы [1]:

$$F \downarrow_{\Pi} = \int_{\Delta\lambda} F_{\lambda C}(\theta) \downarrow \cdot \tau_{\lambda}(\theta) d\lambda, \quad (9)$$

где $F_{\lambda C} \downarrow$ – спектральная облученность Солнцем внешней границы атмосферы; θ – зенитный угол.

Для примера в таблицах 1, 2 приведены зависимости спектральных альбедо $\delta_{\lambda a}$ в спектральном диапазоне $0.3\text{--}0.8$ мкм для различных зенитных углов Солнца θ безоблачной атмосферы. Суточные вариации θ от времени суток вычисляются по онлайн калькулятору для любого места земного шара.

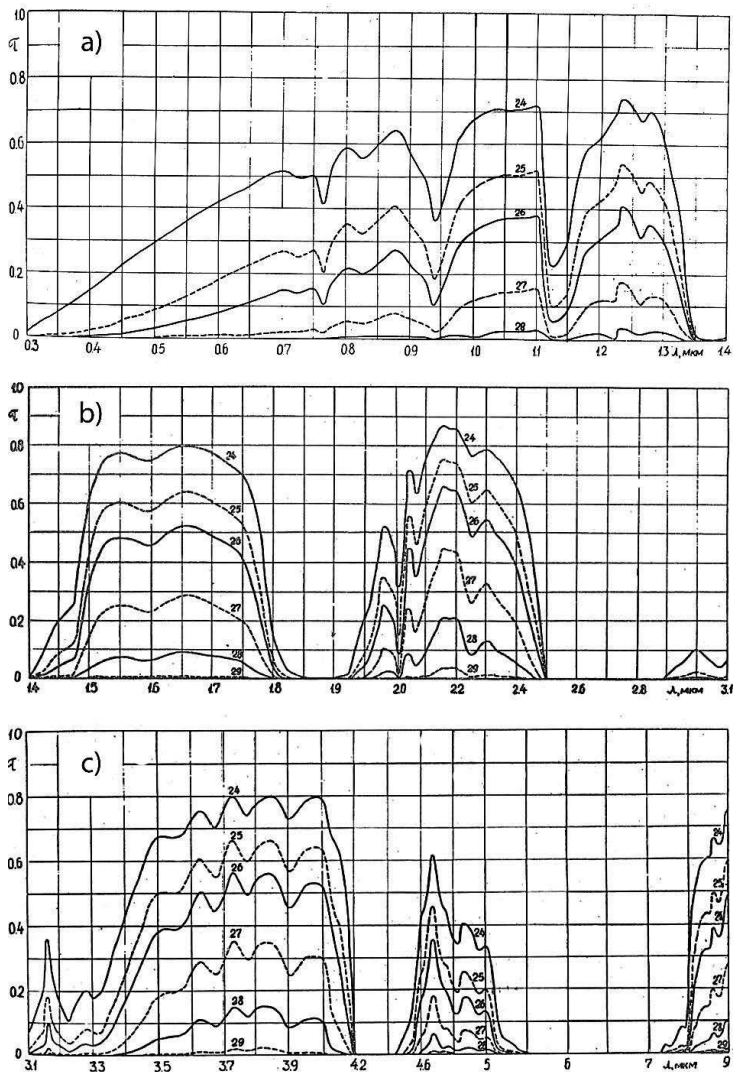


Рис. 1. Спектральная прозрачность атмосферы в области спектра 0.3–9 мкм с высотами $z_1=0$ км при зенитных углах визирования $\theta(z_1)$: 24–0°, 25–60°, 26–70°, 27–80°, 28–85°, 29–88°, 30–90°. Модель атмосферы I. а–область спектра 0.3–1.4 мкм; б–область спектра 1.4–3.1 мкм; с–область спектра 3.1–9 мкм

ТАБЛИЦА 1
СПЕКТРАЛЬНОЕ АЛЬБЕДО БЕЗОБЛАЧНОЙ ФОНОВОЙ АТМОСФЕРЫ
ПРИ НАБЛЮДЕНИИ С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
(θ –ЗЕНИТНЫЙ УГОЛ СОЛНЦА, λ –ДЛИНА ВОЛНЫ)

θ , град	λ , мкм							
	0,300	0,347	0,400	0,500	0,550	0,600	0,694	0,800
0,0	0,01758	0,2504	0,1722	0,08648	0,06246	0,04898	0,03587	0,02494
5,0	0,01708	0,2640	0,1845	0,09867	0,07251	0,05850	0,04273	0,03099
10,0	0,01658	0,2775	0,1967	0,1109	0,08256	0,06802	0,04958	0,03705
15,0	0,01608	0,2911	0,2006	0,1137	0,09262	0,07754	0,05643	0,04310
30,0	0,01457	0,3138	0,2193	0,1263	0,1036	0,08701	0,06326	0,04843
45,0	0,01197	0,3563	0,2555	0,1506	0,1240	0,1045	0,07654	0,05883
60,0	0,008280	0,4306	0,3241	0,1994	0,1652	0,1402	0,1046	0,08109
75,0	0,005156	0,5532	0,4632	0,3161	0,2652	0,2293	0,1809	0,1440
80,0	0,005111	0,6006	0,5360	0,3934	0,3325	0,2919	0,2422	0,1977
85,0	0,005066	0,6335	0,6127	0,5015	0,4253	0,3844	0,3613	0,3139

ТАБЛИЦА 2
СПЕКТРАЛЬНОЕ АЛЬБЕДО БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ
С ГОРОДСКОЙ ДЫМКОЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ПРОТИВОИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (θ –ЗЕНИТНЫЙ УГОЛ СОЛНЦА,
 λ –ДЛИНА ВОЛНЫ)

θ , град	λ , мкм							
	0,300	0,347	0,400	0,500	0,550	0,600	0,694	0,800
0,0	0,0175	0,1250	0,1111	0,0624	0,0519	0,0411	0,0301	0,0216
5,0	0,0169	0,1321	0,1245	0,0692	0,0611	0,0584	0,0369	0,0274
10,0	0,0161	0,1392	0,1353	0,0784	0,0713	0,0599	0,0428	0,0314
15,0	0,0159	0,1462	0,1405	0,0795	0,0801	0,0694	0,0459	0,0336
30,0	0,0141	0,1519	0,1654	0,0899	0,0824	0,0782	0,0541	0,0386
45,0	0,0111	0,1532	0,1896	0,1154	0,1114	0,0899	0,0614	0,0486
60,0	0,0081	0,2163	0,2511	0,1610	0,1433	0,1198	0,0812	0,0649
75,0	0,0050	0,2281	0,3214	0,2594	0,2141	0,1508	0,1622	0,0999
80,0	0,0049	0,3003	0,4192	0,3114	0,2645	0,2251	0,1914	0,1391
85,0	0,0048	0,3167	0,4853	0,4153	0,3664	0,3116	0,2863	0,2342

В расчетах спектрального альбеда использовалась многокомпонентная модель атмосферного аэрозоля, построенная по [3] с применением электронной базы данных спектральных оптических характеристик различных видов атмосферного и антропогенного сажевого золя различной микроструктуры при относительной влажности $r \in \{0, 10\}$ среди распространения излучения [4,5].

Зависимость альбеда δ от массовой концентрации сажи рассмотрена в [5]. На коагуляцию частиц аэрозоля сильное влияние оказывают электрические свойства частиц.

Отношения эффективности функционирования солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) в условиях антропогенно возмущенной атмосферы и атмосферы с учетом воздействия городской дымки определяются соотношением [5]:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{f_1 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{e\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda + \int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \tau_{e\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right) + f_2 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{0e\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right)}{f_1 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda + \int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \tau_{\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right) + f_2 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{0\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right)} \quad (10)$$

где k_{λ} – спектральная зависимость коэффициента преобразования СИ; f_1 – вероятность безоблачного состояния атмосферы; f_2 – вероятность перекрытия небосвода облачностью, $f_1 + f_2 = 1$.

Сравнение спектральных облученностей СИ для фоновой модели атмосферы и атмосферы возмущенной антропогенными выбросами показывает, что антропогенные воздействия на атмосферу в условия городской дымки занижают поток СИ на тепловоспринимающую поверхность в среднем на 24–30 %, снижая эффективность работы СФЭУ. Более значительное влияние оказывает загрязнение облаков сажевым промышленным аэрозолем на облученность приемника СИ солнечной энергетической установки (СЭУ). Например, при толщине чистого облачного покрова $\tau_0 = 5$ рассеянное СИ, достигающее тепловоспринимающей поверхности, составляет 45 % от потока СИ W_{II} на внешней границе атмосферы, в то время как уменьшение вероятности выживания кванта до значения $\omega_0 = 0.98$ вследствие захвата частицами облака сажевого золя приводит к снижению облученности СИ на тепловоспринимающей поверхности до значения 27 % от W_{II} . Снижение эффективности функционирования СФЭУ составит при этом 40 %. В связи со значительным влиянием антропогенных возмущений на

эффективность работы СЭУ их необходимо размещать за пределами городской черты. С увеличением оптической толщины облака снижается поток СИ на тепловоспринимающую поверхность и, следовательно, снижается эффективность функционирования СЭУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Н.И. Москаленко, С.О. Мирумянц. Атлас спектров прозрачности по произвольно ориентированным трассам атмосферы. М: ЦНИИ и ТЭИ. 1979. 494 с.
- [2] В.Л. Филиппов, А.С. Макаров, В.П. Иванов. Оптическая погода в нижней атмосфере. Казань. Дом печати. 1998. 183 с.
- [3] К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, В.Д. Поздняков. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 224 с.
- [4] Н.И. Москаленко, Я.С. Сафиуллина, М.С. Хамидуллина. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. II. Пылевые и дымовые выносы в тропосферу // Изв. Вузов. Проблемы энергетики». № 7–8. Казань: 2014. С. 3–13.
- [5] Н.И. Москаленко, М.С. Хамидуллина, Я.С. Сафиуллина. Влияние антропогенных воздействий на работу солнечных электрических и тепловых станций // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 29–39.
- [6] Н.И. Москаленко, Я.С. Сафиуллина, М.С. Хамидуллина. Зональное моделирование парникового эффекта атмосферы и антропогенных изменений климата // Альтернативная энергетика и экология. № 3(143). 2014. С. 48–59.
- [7] К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 264 с.