

М.В. Панченко

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА И ПОГЛОЩЕНИЕ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ СУБМИКРОННЫМ АЭРОЗОЛЕМ

В работе рассматривается вопрос о влиянии относительной влажности воздуха на поглощение ИК излучения субмикронной фракцией частиц. Показано, что при неизменном содержании поглощающего вещества основным фактором, обуславливающим увеличение поглощения, является уменьшение действительной части комплексного показателя преломления субмикронных частиц. Приведены оценки коэффициентов поглощения в спектральном интервале 8–12 мкм.

Играя решающую роль в ослаблении света в видимой области спектра (в основном определяемую рассеянием излучения), субмикронная фракция аэрозольных частиц может внести вклад и в ослабление инфракрасной радиации, но уже главным образом за счет поглощения [1–3]. Тем самым задача исследования микрофизических характеристик частиц этого диапазона и их изменчивости под влиянием внешних факторов выходит за круг традиционных проблем, обычно решаемых с использованием информации о субмикронных частицах (проблемы видимости, оценки энергетики приборов, работающих в видимом диапазоне длин волн, и т.п.), и приобретают важное значение в климатическом аспекте [1].

Именно этой причиной обусловлен повышенный интерес исследователей к изучению оптических постоянных субмикронной фракции аэрозоля в инфракрасном диапазоне [4–6].

В то же время в большинстве работ, выполненных в этом направлении, основное внимание уделяется изучению мнимой части комплексного показателя преломления и исследованию вариаций содержания поглощающего вещества в частицах для различных оптикометеорологических ситуаций. Понятно, что содержание и состав поглощающего вещества в субмикронном аэрозоле в первую очередь зависит от свойств конкретной воздушной массы, ее предыстории, времени жизни частиц и других крупномасштабных, длительных процессов, которые необходимо учитывать при прогнозе оптических характеристик.

В настоящей работе рассматривается роль относительной влажности воздуха, как одного из самых динамичных метеорологических факторов, в значительной степени определяющих мгновенное состояние и трансформацию микрофизических параметров аэрозольных частиц в рамках определенной воздушной массы.

Прежде чем приступить к обсуждению этого вопроса, отметим, что при наличии сведений о микрофизических характеристиках среды и корректном задании влияния относительной влажности воздуха расчет оптических характеристик на основе теории Ми обеспечивает совокупный учет изменчивости действительной и мнимой части комплексного показателя преломления и высокую точность оценки вклада субмикронных частиц в поглощение ИК радиации (см. [7]). Но отсутствие раздельного анализа влияния действительной и мнимой части показателя преломления затушевывает понимание механизмов изменчивости поглощающих свойств частиц аэрозоля, что является определенным препятствием при интерпретации экспериментальных данных.

Преследуя цель показать основной процесс, в котором влияние относительной влажности воздуха может сказаться на поглощении ИК радиации субмикронным аэрозолем, сознательно огрубим схему рассуждений.

В качестве основы для количественных оценок воспользуемся интегральными параметрами микроструктуры субмикронной фракции аэрозоля и сведениями об их изменчивости, которые были получены в результате микрофизической интерпретации однопараметрической модели угловых характеристик [3]. Учитывая малость субмикронных частиц по сравнению с длиной волны ИК излучения в области $\lambda = 8\text{--}12$ мкм (модальный радиус распределения изменяется в диапазоне $a_m \sim 0,1\div 0,3$ мкм при изменении метеорологической дальности видимости S_m от 50 до 5 км), пренебрежем рассеянием на этих частицах, а поглощение оценим по формуле Рэлея

$$\alpha_{\text{ав}}(\lambda) = \frac{36\pi n}{[n^2 - k^2 + 2]^2 + 4n^2k^2} \cdot \frac{x}{\lambda} V, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{ав}}$ — коэффициент поглощения; λ — длина волны излучения; n и k — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления частиц для длины волны λ ; V — удельный объем вещества (фактор заполнения).

Из (1) следует, что вариации коэффициента поглощения могут быть обусловлены изменчивостью оптических постоянных n и κ , а также изменением количества поглощающего дисперсного вещества в единице объема атмосферного воздуха.

Согласно однопараметрической микрофизической модели, изменение метеорологической дальности видимости S_M сопровождается изменением фактора заполнения V и оптических постоянных аэрозоля для длин волн видимой области спектра [3]. Проведенный анализ показал, что с ростом замутненности атмосферы происходит увеличение удельного объема субмикронной фракции V от $1,6 \cdot 10^{-9}$ ($S_M = 50$ км) до $V \sim 13 \cdot 10^{-9}$ ($S_M = 5$ км). Причем изменение V обусловлено как увеличением содержания жидкой воды в составе аэрозольных частиц от $V_B \sim 0,6 \cdot 10^{-9}$ ($S_M = 50$ км) до $V_B \sim 9 \cdot 10^{-9}$ ($S_M = 5$ км), так и ростом количества сухого вещества. Соответствующие оценки показывают, что при изменении S_M от 50 до 5 км происходит увеличение удельного объема сухого вещества от $V_C \sim 1 \cdot 10^{-9}$ до $V_C \sim 4 \cdot 10^{-9}$ соответственно [3]. На основании современных представлений о механизмах изменчивости субмикронного аэрозоля понятно, что подобная изменчивость фактора заполнения V в условиях реальной атмосферы обусловлена двумя основными механизмами — конденсацией водяного пара при увеличении относительной влажности воздуха, определяющей повышение содержания воды в аэрозоле, и группой сложных процессов превращения газ—частица, способствующих росту содержания сухого вещества, основным из которых является процесс гетерогенной конденсации [1, 3].

В соответствии с таким представлением о составе аэрозольного вещества можно оценить оптические постоянные частицы по правилу смеси

$$n = (n_c - n_B) \frac{V_c}{V} + n_B; \quad \kappa = (\kappa_c - \kappa_B) \frac{V_c}{V} + \kappa_B, \quad (2)$$

где n , κ — значения оптических постоянных частиц для определенной λ ; n_c , κ_c , n_B , κ_B , V_c , V_B — оптические постоянные и факторы заполнения сухого вещества и воды соответственно; $V = V_c + V_B$ — общий удельный объем аэрозольных частиц.

Для того чтобы выявить роль оптических постоянных в изменении поглощения ИК излучения субмикронным аэрозолем под действием относительной влажности воздуха, проведем оценку влияния только увеличения доли воды в аэрозоле, не сопровождающейся изменением содержания сухого вещества ($V_c = \text{const}$). В этом случае изменение удельного объема V может быть описано формулой типа Кастена—Хенела [8].

$$V = V_c (1 - r)^{-\gamma}, \quad (3)$$

где r — значение относительной влажности воздуха; γ — параметр конденсационной активности.

В интересующей нас области спектра $\lambda = 8 - 12$ мкм сухая фракция субмикронных частиц по данным работы [5] имеет значение компонент комплексного показателя преломления $n_c \sim 1,6$ и $\kappa_c \sim 1$, в то время как для воды в этом же спектральном диапазоне $n_B \sim 1,2$ и $\kappa_B \sim 0,1$ [9]. С учетом этих значений из (2) видно, что увеличение содержания жидкой воды в аэрозоле, обусловленное повышением относительной влажности воздуха, приводит к снижению значений n и κ субмикронных частиц для длин волн инфракрасной области спектра.

Для упрощения схемы анализа предположим, что вода в этом спектральном диапазоне не поглощает, т.е. $\kappa_B = 0$. В этом случае из (2) следует $\kappa = \kappa_c V_c / V$. Учитывая, что в процессе конденсационного роста относительное содержание воды в аэрозоле возрастает в несколько раз, а κ становится заметно меньше 1, отбросим в (1) члены, содержащие κ^2 и получим

$$\alpha_{\text{аб}}(\lambda) = 36\pi \frac{n}{(n^2 + 2)^2} \frac{\kappa_c V_c}{\lambda}. \quad (4)$$

При сделанных нами предположениях $\kappa_c V_c = \text{const}$ в (4) остается только один переменный член, содержащий действительную часть показателя преломления, который при уменьшении значений n с ростом влажности возрастает примерно пропорционально $1/n$. Отсюда следует, что увеличение содержания чистой воды в составе субмикронной фракции аэрозольных частиц, происходящее с ростом относительной влажности воздуха, обуславливает снижение действительной части комплексного показателя преломления для длин волн инфракрасной области спектра и тем самым, оказывая своего рода иммерсионное действие, определяет рост истинного поглощения ИК излучения.

На основании подобного рассмотрения легко показать, что наличие спектральных зависимостей $n_B(\lambda)$ и $\kappa_B(\lambda)$ для воды в инфракрасной области спектра определит и появление особенностей в спектральном ходе коэффициента поглощения. В этом случае даже при независимых от λ значениях n_c и κ_c для сухой фракции аэрозоля спектральный ход $\alpha_{\text{аб}}$ будет тем больше отличаться от λ^{-1} и тем ярче

будут выражены особенности спектрального хода в области максимумов и минимумов $n_b(\lambda), \kappa_b(\lambda)$ для воды, чем большее количество воды будет содержаться в субмикронных частицах. (Учитывая относительную малость κ_b в этой области, основным фактором в этом случае будет являться спектральный ход действительной части n_b комплексного показателя преломления).

Для иллюстрации такого рода процессов воспользуемся данными расчета спектральных коэффициентов поглощения α_{ab} , приведенными на рис. 1 и 2.

Расчет α_{ab} проводился по формуле (1) при следующих предположениях: $\kappa_c = 1$, $n_c = 1,6$ для всего спектрального диапазона, значения $n_b(\lambda)$ и $\kappa_b(\lambda)$ взяты по данным работы [9]; количество сухого вещества определено из однопараметрической модели $V_c = 1,6 \cdot 10^{-9}$, что в рамках модели соответствует ситуациям при метеорологической дальности видимости $S_M = 30$ км. Динамика изменения общего удельного фактора заполнения (а соответственно и приращение воды в аэрозоле) при росте относительной влажности воздуха рассчитывалась по формуле (3), в которой параметр конденсационной активности 7 равен 0,5, что вполне соответствует имеющимся экспериментальным данным [10].

Как видно из рис. 1, увеличение относительной влажности воздуха действительно приводит к заметному росту поглощения ИК радиации в области $\lambda = 8-12$ мкм. Приведенный на рис. 2 спектральный ход коэффициентов поглощения для разных диапазонов относительной влажности иллюстрирует, что уже при значениях $r = 50\%$ зависимость $\alpha_{ab}(\lambda)$ заметно отличается от λ^{-1} (пунктирные прямые). При 90%-ной влажности на спектральном ходе коэффициента поглощения отчетливо выявляется возрастание $\alpha_{ab}(\lambda)$ с ростом длины волны в области $\lambda \sim 12$ мкм, которая соответствует минимуму $n_b(\lambda)$ и максимуму $\kappa_b(\lambda)$ воды для этого спектрального диапазона.

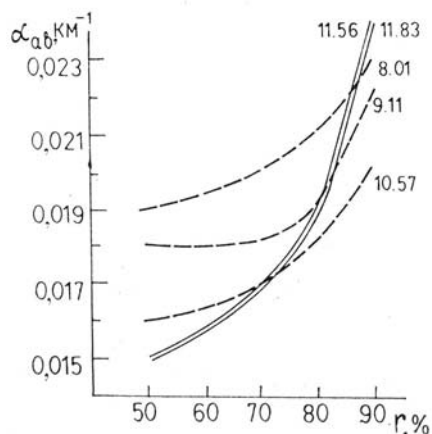


Рис. 1. Влияние относительной влажности воздуха на поглощение ИК излучения для разных длин волн

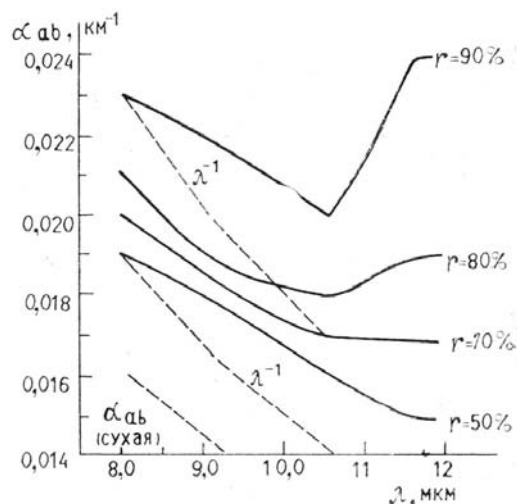


Рис. 2. Спектральный ход коэффициентов поглощения для различных диапазонов относительной влажности воздуха

Несмотря на схематичность рассуждений и приближенные оценки, проведенный анализ позволяет считать, что вариации относительной влажности воздуха, которые играют основную роль в изменчивости коэффициентов рассеяния в видимой области спектра в рамках определенной воздушной массы, могут заметным образом сказаться и в поглощении инфракрасного излучения субмикронными частицами аэрозоля.

Автор выражает признательность С.Д. Творогову за полезное обсуждение работы.

1. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любивцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля. — Физика атмосферы и проблемы климата. — М.: Наука, 1980, с. 216—257.
2. Влияние аэрозоля на перенос излучения: возможные климатические последствия/Кондратьев К.Я., Васильев О.Б., Ивлев Л.С. и др. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. — 266 с.
3. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис — Изв. АН СССР. ФАО, 1986, т. 22, № 10, с. 1042—1050.
4. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. — М.: Наука, 1973, с. 99—104.
5. Габелко Л.В., Любовцева Л.С. Показатель поглощения аэрозоля в ИК области спектра. — Изв. АН СССР. ФАО, 1984, т. 20, № 8, с. 715—723.
6. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. — 360 с.
7. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 198 с.

8. Hänel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with surrounding moist air. — Adv. in Geophys., 1976, v. 19, p. 73–188.
9. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. — М.: Радио и связь, 1981. — 288 с.
10. Горчаков Г. И., Сидоров В. Н., Свириденков М. А. О конденсационной активности фоновозного аэрозоля. — Изв. АН СССР. ФАО, 1982, т. 18, № 9, с. 997–999.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск¹

Поступила в редакцию
11 января 1988 г.

М. В. Панченко. Relative Humidity and Infrared Radiation Absorption by Submicron Aerosol.

The effect of relative humidity on infrared radiation absorption by submicron aerosol is examined. It is shown that for a fixed absorber content the major factor accounting for increased absorption is the decrease of the real part of the complex refractive index for the submicron aerosol fraction as the humidity rises. Estimated absorption coefficients for a 8–12 μm spectral range are reported.