

Т.Г. Адикс

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ МЕТОДАМИ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ)

Проанализированы результаты исследований мнимой части комплексного показателя преломления атмосферных аэрозолей ( $\kappa$ ), полученные с помощью различных методов ИК-спектроскопии. Сделаны минимаксные оценки к городским и природным аэрозолям. Проведено сопоставление экспериментальных и модельных значений  $\kappa$  в области спектра 3–20 мкм.

#### Классификация и основные полосы поглощения аэрозолей различных регионов

Аэрозоль — наиболее изменчивый в пространстве и времени компонент атмосферы. В настоящее время не существует единого подхода к классификации аэрозолей. Вместе с тем реальное разнообразие аэрозолей в наибольшей степени, на наш взгляд, отражает классификация в [1], приведенная ниже, а также табл. 1: 1) пылеподобный; 2) растворимый в воде; 3) сажевый; 4) океанический, морская соль; 5) минеральный, кристаллический; 6) сульфатный; 7) биологический.

Таблица 1

Типы тропосферных аэрозолей [1]

Типы аэрозолей	Компоненты*	Области распространения
(А) Чистый континентальный, континентальный фоновый	2, 1	Большая часть Африки к югу от Сахары, Южная Америка, Азия
(В) Заповедный лес	2, 7, 1	Густые, непроходимые леса Амазонки, Африки, Азии
(С) Средний континентальный	2, 3, 1	Районы, слегка загрязненные продуктами человеческой деятельности
(D) Сельский	2, 1, 7	Сельская местность
(Е) Минеральный (чисто пустынный)	5	Пустыни и полупустыни
(G) Чистый, беспримесный морской	4, 2	Юго-восток Тихого океана, южная экваториальная часть Атлантики и Индийский океан
(Н) Смесь морского с минеральным	4, 2, 5	Северная экваториальная часть Атлантики (район пассатных ветров)
(I) Морской (загрязненные области моря)	4, 2, 3	Средиземное море, северная Атлантика
(J) Чистый полярный	4, 6	Антарктида
(К) Полярный	3, 5, 4	Арктика
(L) Городской, индустриальный	2, 3, 1	Районы с развитой индустрией

\*Нумерация компонентов по приведенной выше классификации аэрозолей.

Следует, однако, отметить, что использованная в [1] терминология требует дополнительных уточнений. В частности, это касается различий между пылеподобным и минеральным (кристаллическим) компонентами, а также состава океанического компонента. Последняя, например, помимо морской соли должна содержать сульфаты, поскольку только в этом случае предложенная в [1] классификация согласуется с хорошо установленными фактами наличия сульфатов в арктическом аэрозоле [2, 3].

Анализ ИК-спектров аэрозолей различных регионов показывает, что спектры практически всех типов аэрозолей за исключением чисто пустынного и чистого морского имеют в ИК-области (3–20 мкм)

общие черты. Они содержат, как правило, не более 5 достаточно интенсивных полос поглощения, центрированных около 3, 6, 7, 9–10 и 16 мкм (табл. 2), относительные интенсивности которых изменяются в зависимости от преобладания тех или иных компонентов в аэрозольной пробе. Это связано как с особенностями спектральных проявлений составляющих аэрозоль частиц, так и с дальним переносом субмикронной фракции аэрозоля, а также газообразных примесей, участвующих в ее образовании, что приводит к определенному выравниванию химического состава аэрозоля по всему земному шару.

Таблица 2

Основные полосы поглощения атмосферных аэрозолей различных регионов

Область спектра		Группы, вносящие преимущественный вклад в поглощение		Примечания
$\lambda$ , мкм;	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	неорганика	органика	
2,8–3,5	3550–2850	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , OH <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub>	Узкие полосы органики на фоне широкой полосы неорганики
5,7–6,25	1750–1600	OH <sup>-</sup>	C=O, C=C, OH <sup>-</sup>	Преобладает поглощение органики
6,7–7,5	1500–1330	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub>	Преобладает поглощение неорганики
8,3–11	1200–910	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SiO <sub>2</sub> , SiCl <sub>4</sub> <sup>1--</sup>	C–O, C–C	Преобладает поглощение неорганики
16,1–16,4	620–610	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	—	—

### Критический анализ некоторых методов определения мнимой части комплексного показателя преломления $m = n - ik$ атмосферных аэрозолей

Для получения  $\kappa$  реального аэрозоля можно использовать два пути: 1) измерять поглощение отдельных компонентов аэрозоля с последующим вычислением суммарных значений  $\kappa$ ; 2) измерять поглощение непосредственно аэрозольных проб. Исходным для определения  $\kappa$  является следующее выражение для пропускания  $T$ :

$$T_{\lambda} = \exp(-\alpha_{\lambda}l) = \exp(-4\pi\kappa_{\lambda}l/\lambda); \quad (1)$$

$$\alpha_{\lambda} = 4\pi\kappa_{\lambda}/\lambda, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\lambda}$  — спектральный коэффициент поглощения (СКП) на единицу толщины слоя  $l$ ; вместо  $\alpha_{\lambda}$  используется также  $K_{\lambda}$ , г<sup>-1</sup> · см<sup>2</sup> — СКП на единицу поверхностной плотности пробы  $M$ .

Это выражение в случае реальной аэрозольной пробы, а также дисперсной однокомпонентной среды является неточным, и поэтому такого рода измерения содержат ряд методических ошибок.

1. Неопределенность в интерпретации  $\kappa$  в случае аэрозольной пробы. Например, при  $\kappa = 0,05$  возможны варианты: весь аэрозоль имеет  $\kappa = 0,05$  или 10% его имеет  $\kappa = 0,5$ , а 90%  $\kappa = 0$  и т.д. В этих случаях альbedo однократного рассеяния частиц в атмосфере будет различным. Поэтому при исследовании реальных проб желательнее разделение на фракции: грубодисперсную (ГД)  $r > 1$  мкм, субмикронную (СМ)  $0,1 < r < 1$  мкм и микродисперсную (МД)  $r < 0,1$  мкм, имеющие разный химический состав вследствие различного происхождения, и, кроме того, на растворимый и нерастворимый компоненты. Здесь  $r$  — эффективный радиус аэрозольных частиц.

2. Отсутствие рассеяния, которое предполагает формула (2), что в случае дисперсных сред не всегда можно реализовать. Согласно численному эксперименту [4] пренебрежение рассеянием ведет к завышению измеренных величин по сравнению с истинными в областях слабого поглощения (крылья полос).

3. Ограниченность применимости формулы (2) для аэрозольных частиц (отклонение от линейности). С хорошим приближением формула (2) работает для частиц с  $r_d \leq 0,1\lambda$ , достаточно узкого распределения по размерам  $\sigma_d \leq 1$  и не слишком больших  $n$  и  $\kappa \leq 1$  [4–7]. Численный эксперимент [4] показал, что отклонение от линейности в зависимости  $\alpha_{\lambda}$ , от  $\kappa_{\lambda}$ , в дисперсной среде приводит к занижению измеренных значений  $\kappa_{\lambda}$  в максимумах полос по сравнению с истинными.

Метод КВР-таблетирования развит и наиболее широко применен Фольцем [8–11]. Суть метода — в минимизации рассеяния подбором иммерсионной среды с показателем преломления, близ-

ким к  $n$  аэрозоля. Значение  $\kappa_\lambda$  определяется из измерений пропускания измельченной и запрессованной в KBr-таблетку аэрозольной пробы по формуле

$$\ln(T_\lambda/T_{\lambda a}) = K_\lambda M = \frac{4\pi\kappa}{\rho l}, \quad (3)$$

где  $T_\lambda$  и  $T_{\lambda a}$  — пропускания чистой KBr-таблетки и с аэрозодем соответственно;  $\rho$  — плотность аэрозольных частиц.

Причины, приводящие к отклонению зависимости (2, 3) от линейной (см. выше п. 3), в значительной степени устраняются при повторном  $n$ -кратном дроблении [9]. Фольц [9] добился примерно двухкратного увеличения значений  $\kappa$  по сравнению с однократным дроблением. Таким образом, результаты, полученные методом KBr-таблетирования при однократном дроблении пробы, нуждаются в соответствующей корректировке.

Метод тонких пленок развит и применен Фишером [12–14] для исследования СМ аэрозоля. Проба напыляется тонким слоем  $l$  на движущуюся подложку. Значение  $\kappa_{пл}$  полученной аэрозольной пленки определяется из соотношений:

$$\kappa_{\lambda пл} = \frac{\lambda}{4\pi\Delta l} \ln [I_\lambda(l)/I'_\lambda(l + \Delta l)]; \quad (4)$$

$$\kappa_{\lambda пл}/\rho = \lambda [4\pi(m/S - m'/S')]^{-1} \ln I_\lambda/I'_\lambda, \quad (4')$$

где  $\Delta l$  — разность толщин двух тонких аэрозольных слоев, напыленных последовательно на подложку;  $m, S$  — масса и площадь образцов;  $\rho$  — плотность аэрозоля. В [14] Фишер, используя теорию сплошных сред и дисперсионный анализ, получал формулы для  $\kappa_{\lambda a}$  собственно аэрозольных частиц. Эти величины  $\kappa_a$  оказались примерно на 30% больше  $\kappa_{пл}$ .

Согласно [4] погрешность в определении  $\kappa$   $\Delta\kappa/\kappa \sim \Delta l/l$ . Таким образом, хорошая точность обеспечивается соотношением  $\Delta l \ll l$ . Это неравенство не соблюдается в работе [15], где  $\Delta l \approx l$ , что ведет к 100%-ной ошибке в измерении  $\kappa$ .

Фишер считает, опираясь на [6, 7], что в его экспериментах ( $\lambda = 2,5–17$  мкм, для частиц с  $r < 1$  мкм и  $\kappa \leq 1,2$ ) формула (2) справедлива с хорошей точностью. На наш взгляд, это не так для области  $\lambda = 2,5–6$  мкм, где нельзя пренебрегать рассеянием. Кроме того, для случая недостаточно узкого распределения по размерам  $\sigma_d \geq 1,5 \div 2$ , которое у Фишера не контролируется,  $K_\lambda$  будет зависеть от радиуса частиц и  $\sigma_d$ , что приведет к занижению  $\kappa_{изм}$  по сравнению с  $\kappa_{ист}$  [5]. Отсюда следует, что в измерениях Фишера значения  $\kappa$  в максимумах полос могут быть занижены.

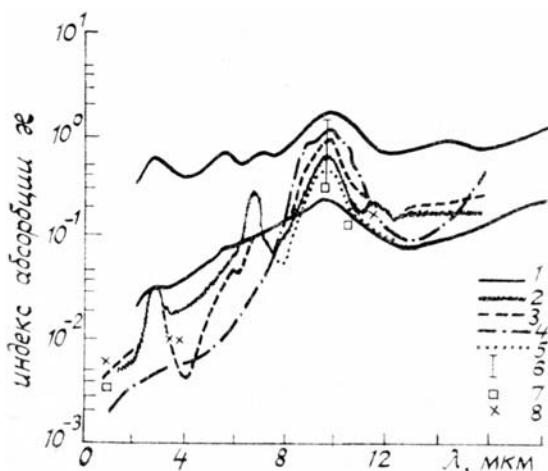


Рис. 1. Индекс абсорбции кристаллического аэрозоля с преобладанием глинистых минералов, а также образцов городского аэрозоля. 1 — пылевой аэрозоль, г. Бедфорд [9]; 2 — почвенный аэрозоль [16]; 3 — сахарная пыль на о. Барбадос [8]; 4 — базальт, отражение от массивного образца [17]; 5 — СМ аридный аэрозоль, метод тонкой пленки [12]; 6 — почвенный аэрозоль [18]; 7, 8 — [19, 20] — почвенный аэрозоль, метод спектрофона; 1–3 и 6 — KBr-техника

На рис. 1, где суммированы результаты измерений спектрального хода кристаллического, почвенного, а также городского аэрозолей, значения  $\kappa_a$  в максимуме полосы около 9,5 мкм, полученные Фишером, близки к минимальным. Более широкое сопоставление данных Фишера и Фольца также показывает, что у Фишера значения  $\kappa_a$  в среднем в 2–3 раза меньше, чем у Фольца.

Метод монослоя применен в работах Любовецовой–Габелко [21, 22] для определения СКП  $\alpha_\lambda$ ,  $\text{км}^{-1}$  аэрозоля *in situ*. Метод предполагает неперекрывание собранных на подложку частиц, причем, согласно расчетам авторов [23], при коэффициенте перекрытия  $2 \leq \eta \leq 0,6$  погрешность составляет 40–80%, а при  $\eta > 2$  метод не применим. При соблюдении условий монослоя

$$\alpha_\lambda = [1 - I/I_0(\lambda)] \frac{s}{QtW}, \quad (5)$$

где  $s$  – площадь светового пучка;  $Q, t$  – скорость и время прокачки воздуха через импактор;  $W$  – коэффициент захвата импактора. Проведенный нами анализ условий сбора проб в [21, 22] показал, что необходимые величины коэффициентов перекрытия не гарантированы ( $\eta = 0,1 \div 9$ ), а по экспериментальным данным поглощение аэрозольного монослоя, полученного на импакторе [21, 22], и регистрируемое на обычном ИК-спектрометре (ИКС–29) не превышает уровня шумов. Поэтому к данным по  $\alpha_\lambda$ , приведенным в [21, 22], следует относиться с известной осторожностью.

Переход от  $\alpha_\lambda$  к  $\kappa_\lambda$ , так же как и от  $\kappa_\lambda$  к  $\alpha_\lambda$ , осуществлялся в работах [15, 21–27] с помощью формулы Хенела [28]

$$\alpha_\lambda = \frac{12\pi}{\lambda} \frac{\kappa}{\rho} \frac{1}{n^2 + 2} \frac{M}{V}, \quad (6)$$

где  $\frac{M}{V}$  – масса частиц в единице объема воздуха. Формула (6) справедлива для областей спектра  $\lambda = 0,55 \div 2$  и  $9,25 \div 12$   $\mu\text{м}$  и  $\kappa \ll 1$  [28]. Существенные ошибки при ее применении могут возникнуть из-за погрешностей при определении массы поглощающего компонента, если последний мал по сравнению с массой всего аэрозоля. Это имело место, например, при определении в [24]  $\alpha_{\text{орг}}$  органической составляющей из  $\kappa_{\text{орг}}$ .

Значения  $\kappa_{\text{орг}}$ , приведенные в работах [21, 24, 25], получены по литературным данным [29] о молярных коэффициентах поглощения  $\epsilon_{\lambda a}$  различных характеристических групп органических соединений. Величины  $\epsilon_{\lambda a}$  согласно [29] являются «грубо оценочными». На основании этого, а также из результатов проведенного нами анализа данных [21, 24, 25, 29] следует, что значения  $\kappa_{\text{орг}}$  [21, 24, 25], по-видимому, являются лишь ориентировочными. Об этом свидетельствуют, в частности, и достаточно широкие спектральные интервалы, в которых даны  $\kappa_{\text{орг}}$ , тогда как величины  $\epsilon_{\lambda a}$  относятся к максимумам полос поглощения соответствующих характеристических групп, а также значительные вариации самих значений  $\kappa_{\text{орг}}$  (см. рис. 2).

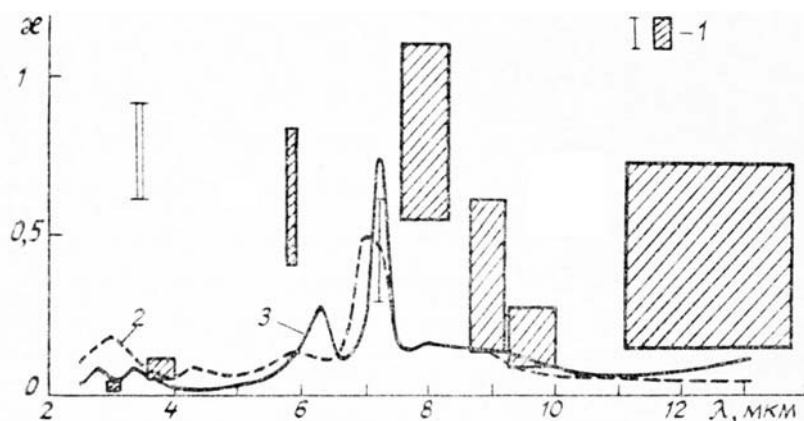


Рис. 2. Спектральный ход индекса абсорбции органической составляющей аэрозоля. 1 –  $\kappa_{\text{орг}}$ , г. Пасадена [21, 25, 26], 2, 3 –  $\kappa_{\text{орг}}$ , г. Майнц [9]

Приведенные в работах [15, 21–22, 24–27] значения  $\kappa_{\text{см}}^{\text{пр}}$  для природы и города рассчитывались с учетом основных поглощающих компонентов СМ фракции: сульфата аммония (с. а), сажи (с) и органики по формуле

$$\kappa_{\text{см}} = \kappa_{\text{орг}} a_{\text{орг}} + \kappa_{\text{с.а}} a_{\text{с.а}} + \kappa_{\text{с}} a_{\text{с}}, \quad (7)$$

где  $\kappa_{\text{с.а}}$  взяты из [4];  $\kappa_{\text{с}}$  – из [30];  $a_i = \frac{m_i}{m_{\text{с.г}}}$  – относительная массовая концентрация  $i$ -й компоненты измерилась в эксперименте.

Анализ данных [21, 25, 26] показывает, что даже в тех участках спектра, где значения  $\kappa_{\text{орг}}$  превышают или сравнимы с  $\kappa_{\text{с.а}}$  и (или)  $\kappa_{\text{с}}$ , влияние органической компоненты на  $\kappa_{\text{см}}$  из-за малых величин относительных концентраций органики не слишком велико. Это наглядно видно из сравнения данных рис. 2 и 3: при значительных вариациях  $\kappa_{\text{орг}}$  [21, 25, 26] вариации  $\kappa_{\text{см}}$  [21, 25, 26] малы.

Для расчета  $\kappa_{\Sigma} = \kappa_{\text{см}} \frac{m_{\text{см}}}{m_{\Sigma}} + \kappa_{\text{гд}} \frac{m_{\text{гд}}}{m_{\Sigma}}$  в [21, 24–27] использовались значения  $\kappa_{\text{гд}}$  из [16]. При наиболее

типичном, по мнению авторов, соотношении масс  $m_{\text{см}}: m_{\text{гд}} = 2:3$  значения в большинстве участков спектра оказываются примерно вдвое меньше  $\kappa_{\text{см}}$ . Это, с учетом принятого отношения масс  $m_{\text{см}}: m_{\text{гд}}$ , означает, что вкладом  $\kappa_{\text{гд}}$  в  $\kappa_{\Sigma}$  можно пренебречь.

Сопоставление с результатами других авторов позволяет в целом считать приведенные в работах Любовцевой-Габелко значения  $\kappa_{\text{см}}^{\text{п.г}}$  верхней оценкой, а значения  $\kappa_{\text{см}}$  Фишера — оценкой снизу для  $\kappa_{\text{см}}$  континентальных аэрозолей.

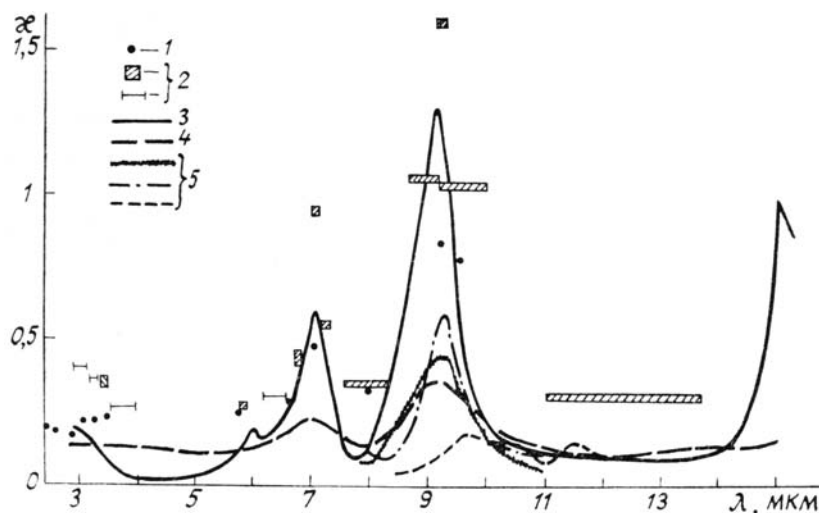


Рис. 3. Спектральная зависимость индекса абсорбции городского СМ аэрозоля  $\kappa_{\text{см}}^{\text{г.р}}$  1—[15], Москва, эксперимент по методу тонких пленок [12]; 2—[21], г. Пасадена, расчет по формуле (7); 3—[9], г. Мешпен, эксперимент КВr-техника; 4—[12], г. Майнц, эксперимент; 5—[14], Майнц, эксперимент, метод [12] плюс дисперсионный анализ

### Сопоставление экспериментальных значений $\kappa$ с некоторыми аэрозольными моделями

При построении аэрозольных моделей важно по возможности адекватно учитывать роль отдельных компонентов и фракций аэрозоля. В известной модели Ивлева—Поповой [31] учитывался только минеральный компонент. Это в свое время встретило возражение со стороны Г.В. Розенберга [32–34]. Однако исследования Андреева—Ивлева [35–37] и Любовцевой—Габелко [21–27] показали, что роль органики в поглощении континентальным субмикронным аэрозолем не является определяющей.

На рис. 4 приведено сравнение значений  $\alpha_{\text{орг}}^{\text{п.г}}$  по данным Ивлева-Андреева и Любовцевой—Габелко с  $\alpha_{\text{минер}}^{\text{г}}$  [31]; видно, что в целом по спектру поглощение минерального компонента действительно преобладает над органическим для природного и городского аэрозолей.

На рис. 5 сопоставлены значения  $\kappa_{\text{модель}}^{\text{модель}}$  [31] с рядом значений  $\kappa_{\text{а}}^{\text{эксп}}$ . Заметное превышение  $\kappa_{\text{см}}^{\text{эксп}}$  над модельным в областях 3–4 и 5,5–6,5 мкм не удается полностью объяснить неучетом органики в [31], если использовать данные по  $\kappa_{\text{орг}}$  и  $m_{\text{орг}}$  из [21, 25].

В развитие модели [31] Андреев и Ивлев предложили эмпирические модели для  $\kappa$  МД, СМ и ГД фракций аэрозоля [38]. На рис. 6 эти данные сопоставлены с  $\kappa_{\text{см}}^{\text{эксп}}$  [21, 25] и  $\kappa_{\text{гд}}^{\text{эксп}}$  [16]. Видно, что  $\kappa_{\text{см}}^{\text{мод}}$  [38] хорошо описывает  $\kappa_{\text{гд}}^{\text{эксп}}$  [16], а  $\kappa_{\text{мд}}^{\text{мод}}$  [38] —  $\kappa_{\text{см}}^{\text{эксп}}$  [21, 25];  $\kappa_{\text{гд}}^{\text{мод}}$  [38] не описывает реальный ГД аэрозоль.

В книге Кондратьева—Москаленко [2] приводятся модельные значения  $\kappa$  для растворимой и не растворимой в воде фракций аэрозоля, практически совпадающие с аналогичными значениями  $\kappa$  из [39]. На рис. 7 значения  $\kappa$  из [2, 39] сопоставляются с экспериментальными данными Фольца [9] для  $\kappa_{\text{см}}^{\text{раств}}$  и Паттерсона [16] для  $\kappa_{\text{гд}}$ . Последние характеризуют почвенный аэрозоль и состоят в основном из нерастворимых в воде компонентов. Из рис. 7 следует, что практически по всему спектру экспериментальные значения  $\kappa$  превосходят соответствующие модельные (от 1,5 до 10 раз). Исключение составляют области около 4,5 мкм для водорастворимого и около 12 мкм для нерастворимого компонента.

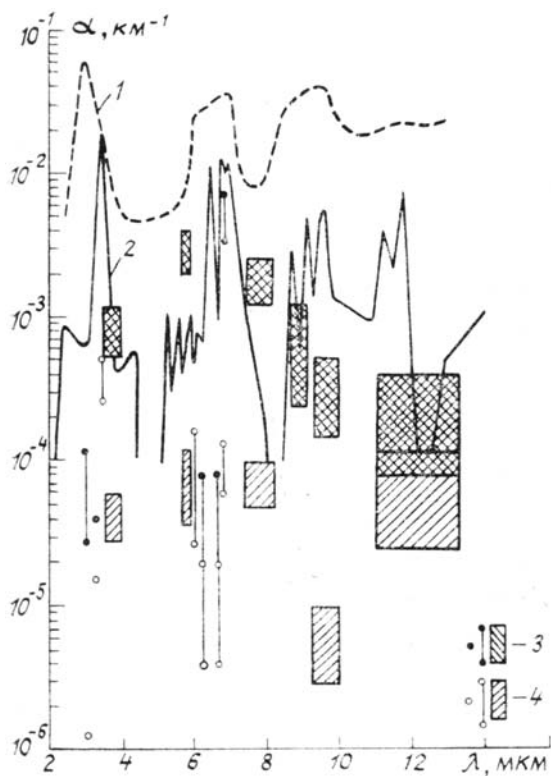


Рис. 4. Спектральные коэффициенты поглощения  $\alpha$ ,  $\text{км}^{-1}$  органической и минеральной составляющей городского и природного аэрозоля 1 —  $\alpha_{\text{минер}}^{\text{орг}}$  [31], 2 —  $\alpha_{\text{орг}}^{\text{орг}}$  [36, 37], 3 —  $\alpha_{\text{орг}}^{\text{орг}}$  [21, 25], 4 —  $\alpha_{\text{орг}}^{\text{прир}}$  [21, 25]

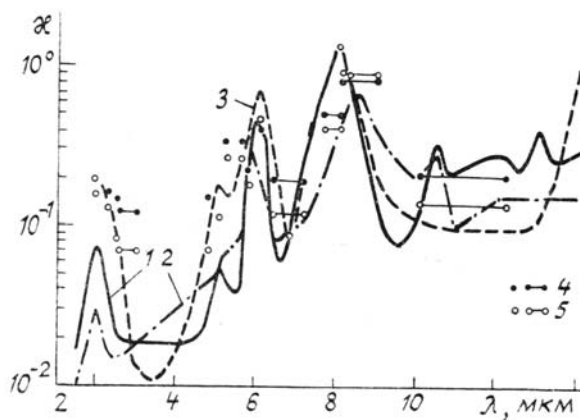


Рис. 5. Спектральные зависимости индекса абсорбции различных типов аэрозолей. 1 —  $x_{\text{минер}}^{\text{расчет}}$  [31]; 2–5 — эксперимент: 2 —  $x_{\text{гд}}$  [16] — почвенный аэрозоль; 3 —  $x_{\text{см}}^{\text{орг}}$  [9] — растворимая в воде фракция, 4, 5 —  $x_{\Sigma}^{\text{орг}}$ ,  $x_{\Sigma}^{\text{прир}}$  [21, 25]

Таким образом, для описания реальных континентальных аэрозолей (городских и природных) наиболее пригодной следует признать модель Ивлева-Поповой [31], с учетом погрешностей измерений величин  $\kappa$ , а также вариаций химического состава различных фракций аэрозоля. В то же время следует иметь в виду [4], что подход, при котором сначала осредняются оптические константы, а затем из них выводятся оптические свойства (альbedo однократного рассеяния, индикатриса, эффективное сечение ослабления, поглощения и др.) правомерен только в том случае, когда оптические свойства линейны относительно оптических констант. В частности, для многокомпонентных частиц не могут быть усреднены ни оптические константы связанных веществ, ни их оптические свойства [4].

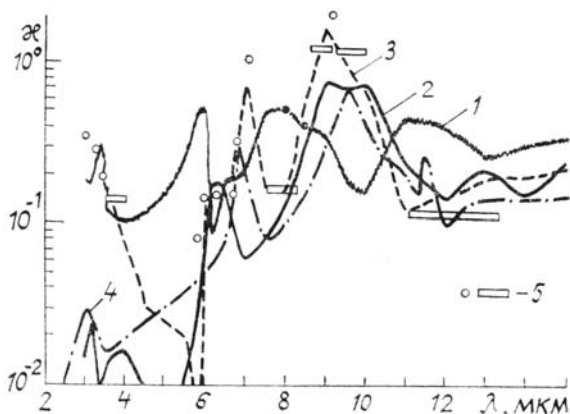


Рис. 6. Спектральный ход индекса абсорбции к различным фракциям природного аэрозоля по данным: [38] — 1 (ГД), 2 (СМ), 3 (МД); [16] — 4 (ГД); [21, 25] — 5 (СМ)

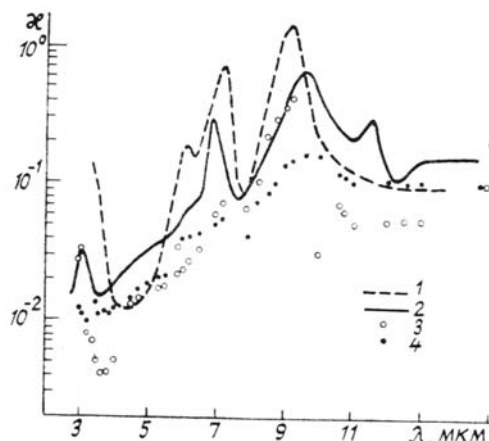


Рис. 7. Сравнение полученных в эксперименте (1, 2) и модельных (3, 4) значений  $\kappa$  растворимой и нерастворимой в воде фракций аэрозоля. 1 — растворимая в воде СМ фракция городского аэрозоля [9], 2 — кристаллический почвенный аэрозоль [16]; 3, 4 — растворимая и нерастворимая в воде фракция соответственно [2, 39]

1. D'Almeida G. A., Коерке Р. // *J. Aeros. Sci.* 1986. V. 17. № 3. P. 249–253.
2. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Поздняков Д. В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
3. Виноградова А. А., Малков И. П. и др. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1987. Т. 23. № 5. С. 519–524.
4. Toon O. B., Pollack J. B., Khare B. N. // *J. Geoph. Res.* 1976. V. 81. № 33. P. 5733–5748.
5. Jennings S. G., Pinnick R. G., Gillespie J. B. // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 9. P. 1368–1371.
6. Bergstrom R. W. // *Contr. Atm. Phys.* 1973. V. 46. № 3. P. 198–203.
7. Bergstrom R. W. // *Ibid.* P. 223–234.
8. Volz F. E. // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. № 3. P. 564–568.
9. Volz F. E. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 23. P. 3690–3700.
10. Volz F. E. // *J. Geoph. Res.* 1972. V. 77. № 6. P. 1017–1031.
11. Volz F. E. // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. № 4. P. 755–759.
12. Fischer K. // *Appl. Opt.* 1975. V. 14. № 12. P. 2851–2856.
13. Fischer K., Grassi H. // *Tellus.* 1975. V. 27. № 5. P. 522.
14. Fischer K. // *Tellus.* 1976. V. 28. № 3. P. 266–274.
15. Габелко Л. Б., Любовцева Ю. С. // VIII Всесоюз. симп. по лазерному зондированию атмосф. (Тезисы докл. Ч. 1). Томск, 1984. С. 292–294.
16. Patterson E. M. // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. № C4. P. 3236–3246.
17. Volz F. E. // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. № 3. P. 564–568.
18. Flanigan D. F., DeLong H. P. // *Appl. Opt.* 1971. V. 10. № 1. P. 51–57.
19. Schleusner S. A. et al. // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. P. 2546–2550.
20. Lindberg J. D. // *Opt. Quant. Electr.* 1975. V. 7. P. 131–139.
21. Любовцева Ю. С., Габелко Л. Б., Яскович Л. Г. // *Оптика атмосферы и аэрозоль/Под редакцией Е. М. Фейгельсон. М.: Наука, 1986. 224 с.*
22. Андрюков В. П., Габелко Л. Б., Любовцева Ю. С. // III Всесоюз. совещ. по распростр. лазерного излучения в дисперсной среде (Тезисы докл. Ч. 1). Обнинск: ИЭМ, 1985. С. 62–65.
23. Габелко Л. Б. Аэрозольное поглощение в ИК-области спектра и его учет в задачах дистанционного зондирования. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат наук. М.: ИКИ АН СССР, 1986. 17 с.
24. Галкина Л. Б., Любовцева Ю. С. и др. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1983. Т. 19. № 7. С. 683–695.
25. Любовцева Ю. С., Габелко Л. Б., Яскович Л. Г. // *Комплексный советско-амер. эксперимент по исследованию фоновых аэрозолей. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 91–99.*
26. Габелко Л. Б., Любовцева Ю. С. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1984 Т. 20 № 8. С. 715–724.
27. Любовцева Ю. С., Габелко Л. Б. // Всесоюз. совещание по актинометрии и атм. оптике (Тезисы докл. Ч. 1). Томск, 1983. С. 70–72.
28. Hänel G., Gluge R. // *Tellus.* 1977. V. 29. № 1. P. 75–83.
29. Наканиси К. Спектры и строение органических соединений М.: Мир, 1965. Гл. I, II, III. С. 1–78.
30. Mc Clatchey R. A., Boble A. J. // Report of the JAMAP Radiation Commission Working group on a Standart Radiation Atmosphere. Wash. USA, 1974.
31. Ивлев Л. С., Попова С. И. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1973. Т. 9. № 10 С. 1034–1043.
32. Розенберг Г. В. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1979. Т. 15. № 12. С. 1280–1292.
33. Розенберг Г. В. и др. // *Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука 1980. С. 216–257.*
34. Розенберг Г. В. // I-е Всесоюз. совещание по атмосферной оптике (Тезисы докл.). Томск, 1976. С. 108.
35. Андреев С. Д., Ивлев Л. С. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1980. Т. 16. № 9 С. 907–916.
36. Андреев С. Д. // *Проблемы физики атмосферы. Вып. 17. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. С. 135–141.*
37. Андреев С. Д., Ивлев Л. С. // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1982. Т. 18. № 7. С. 727–731.
38. Ивлев Л. С., Андреев С. Д. // *Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986, 359 с.*
39. Deepak A., Gerber H. E. // *Research programm, 1983.*

Институт физики атмосферы АН СССР,  
Москва

Поступила в редакцию  
2 октября 1989 г.

#### T. G. Adiks. IR-Spectroscopic Studies of the Atmospheric Aerosols Absorption Characteristics.

The results of various IR-spectroscopic investigations of the atmospheric aerosols refraction index ( $\kappa$ ) are analyzed. The minimum and maximum estimates of the  $\kappa$  values are performed for the urban and rural aerosols. The comparison is made of the experimental and model  $\kappa$  values in the spectral range from 3 to 20  $\mu\text{m}$ .