

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.591.593

В.Е. Зуев, Б.Д. Белан, В.В. Веретенников, Г.О. Задде, М.В. Панченко, Р.Ф. Рахимов

### ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕКОНДЕНСАЦИОННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

В работе на основании экспериментальных данных о микроструктуре и химическом составе облаков неконденсационного происхождения проведены расчеты спектральных коэффициентов ослабления и лидарного отношения. Сопоставление данных расчета коэффициентов рассеяния с результатами непосредственного измерения позволило изменить методику оценки оптических характеристик. Проведенный анализ показывает, что неконденсационные облака могут быть легко обнаружены и идентифицированы средствами многочастотного лазерного зондирования (наиболее эффективно в ближней ИК-области спектра).

Развитие дистанционных оптических методов для исследования атмосферы и земной поверхности и их успешное применение во многом определяется уровнем знания всего диапазона пространственно-временной изменчивости характеристик аэрозоля [1].

В этом аспекте заметный интерес представляют те атмосферно-оптические образования, которые по своим микрофизическим параметрам, а следовательно, и по оптическим проявлениям существенно отличаются от «типичных», т. е. наиболее характерных свойств аэрозольных систем, составляющих основу при моделировании и интерпретации данных наблюдений.

Именно к такого рода ситуациям следует отнести обнаруженные при самолетном зондировании атмосферы облака неконденсационного происхождения [2–4]. Суть этого явления заключается в том, что в условиях ясной сухой атмосферы (относительная влажность воздуха менее 40%) на высотах более 1 км (как правило, в надынверсионном слое), обнаруживаются локализованные области с повышенной концентрацией аэрозоля, с горизонтальным масштабом в несколько десятков километров. Концентрация аэрозоля в таком облаке обычно в 4–10 раз больше, чем в окружающей среде, хотя отмечен и ряд случаев, когда превышение составляло несколько десятков раз (до 60). Вертикальный масштаб подобных образований составляет от нескольких сотен метров до нескольких километров, с достаточно сложным распределением аэрозоля по вертикали.

Как показали наши исследования микроструктуры и химического состава неконденсационных аэрозольных облаков, их характерной особенностью является наличие явно выраженной среднедисперсной фракции частиц с  $d = 1–4$  мкм, имеющих почвенное происхождение [2–4].

Это явление, хотя и сравнительно редкое (1 случай наблюдения примерно на 150 часов полетного времени), в оптическом отношении представляет определенный интерес в силу следующих причин.

Во-первых, ограниченные области пространства, отличающиеся по своим оптическим характеристикам от окружающего воздуха, могут оказывать существенное воздействие на работу оптических приборов и интерпретацию данных оптических наблюдений. В частности, в практике аэрофотосъемки, когда фотографирование проводится в ясную погоду с больших высот ( $H \geq 5$  км), зачастую отмечаются факты выбраковки отснятого материала из-за наличия пространственно локализованных областей, не поддающихся четкому фотометрированию. По-видимому, определенная часть этих случаев может объясняться наличием на трассе съемки аэрозольных неконденсационных облаков, которые ослабляют и рассеивают солнечное излучение, но не всегда в силу небольшой оптической плотности могут быть обнаружены при визуальном наблюдении.

Во-вторых, характер функции распределения частиц по размерам [3, 4] существенно отличает неконденсационные облака от принятых при моделировании оптических свойств атмосферной дымки. Химический же состав, близкий к составу почвенного аэрозоля [4], позволяет считать, что оптические проявления подобного образования будут заметно отличаться от тех, которые обычно задаются в моделях облаков.

Для оценки оптических свойств аэрозольных неконденсационных облаков рассмотрим результаты расчетов оптических характеристик, выполненных в предположении о сферичности и изотропности частиц по данным измерения микроструктуры фотоэлектрическим счетчиком в диапазоне размеров от 0,2 до 5 мкм по радиусу.

На основании сведений о химическом составе и с учетом того факта, что это явление наблюдается в условиях низких значений относительной влажности воздуха, комплексный показатель преломления частиц при расчете задавался в соответствии с синтетической моделью [5] для влажности воздуха  $f = 18–25\%$ .

Для анализа спектрального хода коэффициентов аэрозольного ослабления рассмотрим три случая, зарегистрированных 05.02.86, 20.09.85 и 14.05.87 гг. Первая реализация представляет собой наиболее мощное облако (отношение суммарной концентрации частиц в центре облака  $N_0$  к концентрации  $N_n$  на периферии  $N_0/N_n \sim 65$ ); вторая — близкая к наиболее часто повторяющимся ситуациям ( $N_0/N_n \sim 10$ ), а третья — случай слабо выраженного облака ( $N_0/N_n \sim 4$ ). Спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$ , нормированные на значения  $\alpha(0,55 \text{ мкм})$ , рассчитанные для этих реализаций, приведены на рис. 1. Здесь же для сравнения приведен спектральный ход подобной зависимости для фоновой модели атмосферной дымки [6]. В табл. 1 даны количественные значения коэффициентов  $\alpha(\lambda)$ , рассчитанные для центральной части и периферии облаков в этих реализациях.

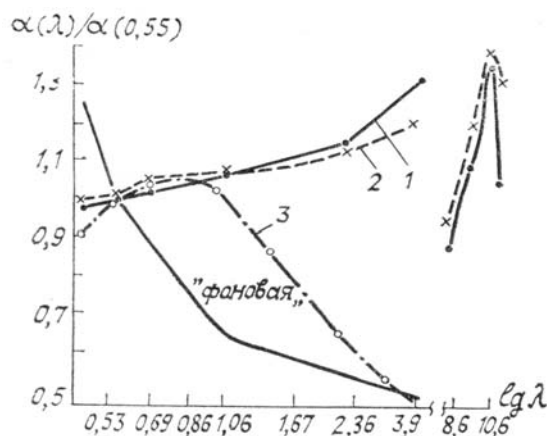


Рис. 1. Нормированный спектральный ход коэффициента аэрозольного ослабления по «фоновой» модели [6] и в неконденсационных облаках: 1 — 5 февраля 1986 г., 2 — 20 сентября 1985 г., 3 — 14 мая 1987 г.

Таблица 1

Коэффициенты аэрозольного ослабления ( $\text{км}^{-1}$ )

Дата	$\lambda$ , мкм				Облако
	0,55	1,06	3,9	10,6	
05.02.86	0,086	0,093	0,113	0,09	центр
05.02.86	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,20 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,08 \cdot 10^{-2}$	периферия
20.09.85	$0,15 \cdot 10^{-1}$	$0,16 \cdot 10^{-1}$	$0,18 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$	центр
20.09.85	$0,39 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,45 \cdot 10^{-2}$	$0,58 \cdot 10^{-2}$	периферия
14.05.87	$0,74 \cdot 10^{-3}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	центр
14.05.87	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	периферия

Как видим из данных рис. 1 и табл. 1, спектральный ход существенно отличает аэрозольные неконденсационные облака от фоновой модели безоблачного неба, причем, как и следовало ожидать, исходя из их микроструктуры, наиболее сильно в ИК-области спектра. Следует отметить и тот факт, что для 1-й и 2-й реализации, где  $\alpha(\lambda)$  различаются более чем на порядок величины, спектральные зависимости  $\alpha(\lambda)/\alpha(0,55)$  оказываются близкими во всем спектральном диапазоне от 0,4–11,6 мкм. В слабовыраженном случае, который, по-видимому, характерен для подобных образований на этапе их распада и исчезновения, и, как следствие этого, уже обеднен крупными частицами, заметные отличия в спектральном ходе  $\alpha(\lambda)/\alpha(0,55)$  от фоновой модели наблюдаются лишь в видимой и ближней ИК-области спектра, а начиная с  $\lambda > 1,06$  мкм, отмечается быстрый спад коэффициентов аэрозольного ослабления. Реализация, зарегистрированная 14.05.87 г., представляет и отдельный интерес, поскольку в этом случае удалось осуществить исследование вертикальной структуры облака. На рис. 2 приведены результаты расчета по данным микроструктуры вертикального разреза аэрозольного неконденсационного облака для трех длин волн  $\lambda = 0,55; 3,9$  и  $10,6$  мкм (изолиниями представлены области равных значений коэффициентов ослабления). Как видим, подобное образование имеет достаточно сложную пространственную структуру, заметно различающуюся в разных участках спектра. Следовательно, при фотометрировании на просвет аэрозольного неконденсационного облака в разных участках спектра его пространственная конфигурация будет существенно различаться. На рис. 3 приведена иллюстрация этого эффекта, в случае, когда за границу облака принято значение коэффициента ослабления на уровне 25% от максимального, наблюдающегося в соответствующем спектральном диапазоне. Учитывая характер спектрального хода коэффициента рассеяния и обратного рассеяния для данных облаков и тот факт, что основное ослабление опре-

деляется рассеянием на аэрозольных частицах, можно ожидать, что подобная картина будет наблюдаться и в случае отраженного света.

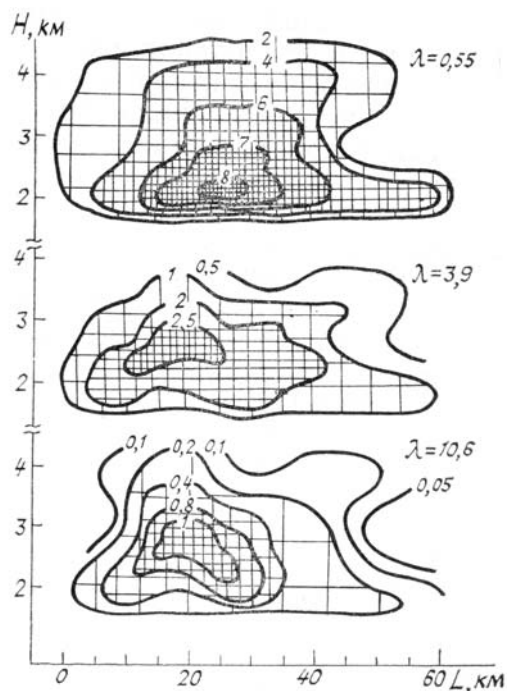


Рис. 2. Результаты расчета вертикального разреза неконденсационного облака (14 мая 1987 г.),  $\alpha(\lambda) \cdot 10^4 \text{ км}^{-1}$

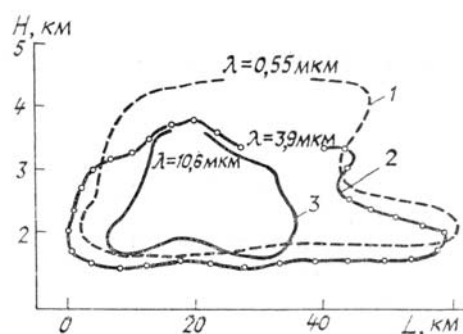


Рис. 3. Вертикальный разрез облака 14 мая 1987 г. для коэффициента аэрозольного ослабления, ограниченного по уровню 0,25 по сравнению с максимальным:  $\lambda = 0,55$  (1); 3,9 (2); 10,6 мкм (3)

Прежде чем перейти к анализу спектрального хода лидарного отношения, которое в большей степени, чем  $\alpha(\lambda)$  зависит от микрофизических характеристик аэрозольных частиц, рассмотрим несколько методических моментов. Все приведенные выше результаты были получены расчетом непосредственно по данным о микроструктуре аэрозольных частиц, измеренных фотоэлектрическим счетчиком в диапазоне размеров от 0,2 до 5 мкм по радиусу. Учитывая характер микрофизических параметров и предполагаемую природу подобных аэрозольных образований (см. [4]), следует подчеркнуть, что данные расчетов иллюстрируют оптические проявления частиц наиболее характерных для аэрозольных неконденсационных облаков, но не могут претендовать на полное описание их оптического образа, поскольку нельзя исключить из рассмотрения тот факт, что в момент регистрации в атмосфере присутствуют частицы, размер которых находится вне диапазона измерений фотоэлектрического счетчика. Для оценки их вклада в табл. 2 проведено сравнение расчетных значений коэффициентов ослабления для  $\lambda = 0,55$  мкм с данными одновременного измерения коэффициентов рассеяния с помощью нефелометра  $\lambda = 0,53$  мкм. Видим, что расчетные величины коэффициентов ослабления оказываются гораздо меньше измеренных значений коэффициентов рассеяния. Следует отметить, что этот результат не является неожиданным, он достаточно типичен для большинства попыток прямого сопоставления оптических характеристик, полученных расчетным путем по микроструктурным данным фотоэлектрических счетчиков АЗ-5 и непосредственно измеренных коэффициентов ослабления или рассеяния. Это расхождение, как правило, обусловлено следующими причинами: ограниченным диапазоном спектра размеров частиц, измеряемых фотоэлектрическим счетчиком ( $r \geq 0,2 - 5$ ), и влиянием относительной влажности воздуха, изменяющей показатель преломления частиц в процессе их конденсационного роста или осушки [7].

Таблица 2

Коэффициенты аэрозольного ослабления ( $\text{км}^{-1}$ ), рассчитанные и измеренные ( $\lambda = 0,55$  мкм) в аэрозольном неконденсационном облаке 14.05.1987 г.

Высота	1800 м	2800 м	4000 м
Теория	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
Эксперимент	$2,66 \cdot 10^{-2}$	$8,87 \cdot 10^{-3}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$

В нашем случае вторым аспектом без большого ущерба для точности оценки можно пренебречь, поскольку неконденсационные облака наблюдаются в условиях низких значений относительной влажности воздуха, когда показатель преломления сухих частиц (см. анализ химического состава в [3]) близок к показателю преломления частиц, которыми калибруются фотоэлектрические счетчики. Следовательно, для дальнейшего анализа необходимо учесть вклад частиц с радиусом менее 0,2 мкм, которые играют существенную роль в формировании оптических характеристик в видимой области спектра. Для этой цели был использован метод оценки весовых содержаний различных фракций по данным о микроструктуре, развитый в работе [6].

Таблица 3

		Временной разрез облака, зарегистрированного 05.02.86 г.								
Время	Показания нефелометра, $\text{км}^{-1}$	Коэффициент ослабления, $\text{км}^{-1}$								
		$\lambda$ , мкм								
		0,53	0,69	0,86	1,06	1,07	2,36	3,39	5,3	10,6
22 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup>	0,020	0,0166	0,0144	0,0130	0,0119	0,0105	0,0095	0,0089	0,0064	0,0065
23 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup>	0,045	0,0499	0,0499	0,0492	0,0489	0,0495	0,0451	0,0382	0,0203	0,0201
23 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup>	0,14	0,160	0,164	0,166	0,171	0,179	0,165	0,140	0,174	0,072
23 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	0,3	0,595	0,621	0,637	0,668	0,722	0,676	0,572	0,268	0,270

В табл. 3 приведены результаты расчета коэффициентов ослабления наиболее мощного аэрозольного облака, зарегистрированного 5.02.86 г., полученные по методике [6]. Здесь же для сравнения во втором столбце таблицы представлены данные синхронных нефелометрических измерений для  $\lambda = 0,53$  мкм.

Близость расчетных и экспериментальных данных в видимом диапазоне спектра дает основание считать, что в этом случае удастся более корректно осуществить оценки оптических характеристик аэрозольных неконденсационных облаков. В этом варианте спектральный ход  $\alpha(\lambda)/\alpha(0,53)$  остается близким к нейтральному в диапазоне длин волн от 0,4 до 3,9 мкм, а затем наблюдается быстрый спад этой величины, которая по характеру спектральной зависимости в области  $\lambda > 5$  мкм уже слабо отличается от фоновой модели.

На рис. 4 приведены рассчитанные спектральные зависимости лидарного отношения в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4 - 2,6$  мкм для различных моментов прохождения аэрозольного неконденсационного облака. Обращает на себя внимание факт устойчивости спектральных зависимостей лидарного отношения для всех данных, полученных внутри облака, хотя количественные значения коэффициентов ослабления и обратного рассеяния различаются более чем в 10 раз. По абсолютной величине лидарное отношение в диапазоне 0,4-2 мкм заметно превышает те значения, которые используются в фоновой модели аэрозоля и моделях конденсационных облаков.

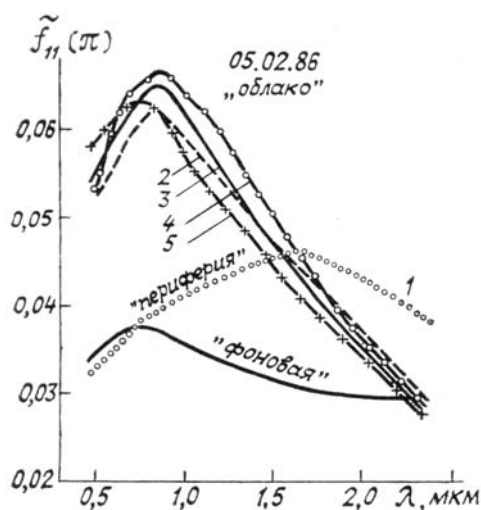


Рис. 4. Изменение лидарного отношения при пересечении неконденсационного облака 5 февраля 1986 г.: 1 - 22<sup>h</sup>57<sup>m</sup>; 2 - 23<sup>h</sup>04<sup>m</sup>; 3 - 23<sup>h</sup>17<sup>m</sup>; 4 - 23<sup>h</sup>21<sup>m</sup>; 5 - 23<sup>h</sup>26<sup>m</sup>

Суммируя результаты проведенного анализа расчетных и экспериментальных данных, следует отметить, что аэрозольные неконденсационные облака по своим оптическим проявлениям достаточно специфичны и имеют характерные отличия по ряду спектральных признаков от атмосферной дымки и жидкокапельных облаков.

В зависимости от мощности и вертикальной протяженности такого вида облака могут играть заметную роль в ослаблении солнечной радиации во всем спектральном диапазоне. При слабой выраженности, будучи визуально неразличимыми на фоне освещенного неба, эти образования тем не менее дают повышенный вклад в ослабление излучения в видимой и инфракрасной области спектра на отдельных участках фотометрируемого пространства. В то же время проведенный анализ показывает, что неконденсационные облака могут быть легко обнаружены и идентифицированы средствами многочастотного лазерного зондирования (наиболее эффективно в ближней ИК-области спектра).

1. Зуев В.Е. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 1. С. 5.
2. Белан Б.Д., Задде Г.О. // ДАН СССР. Т. 290. № 6. С. 1328.
3. Белан Б.Д., Задде Г.О., Ковалевский В.К. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 67.
4. Белан Б.Д., Задде Г.О., Панченко М.В. // Метеорология и гидрология. 1988. № 8. С. 39.
5. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
6. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. 294 с.
7. Козлов В.С., Панченко М.В., Полькин В.В., Пхалагов Ю.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1987. № 3. С. 286.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
22 ноября 1988 г.

V.E. Zuev, V.D. Belan, V.V. Veretennikov, G.D. Zadde, M.V. Panchenko,  
R.F. Rakhimov. **Optical Effects of Noncondensation Aerosol Clouds.**

The paper presents the calculational results on spectral behavior of the extinction coefficients and lidar ratio obtained using the experimental data on microstructure and chemical composition of noncondensational clouds. The comparison made between the calculated values of scattering coefficients and measurement data allowed the modification of the technique for assessing the optical characteristics to be made. The analysis made in the paper showed that the noncondensational clouds can be easily detected and identified by a multifrequency technique (better in the near IR region).