

УДК 551.510.42

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

ЗУЕВ В. Е., БЕЛАН Б. Д., ЗАДДЕ Г. О., ПАНЧЕНКО М. В.,
РАССКАЗЧИКОВА Т. М., ТЕРПУГОВА С. А., ТОЛМАЧЕВ Г. Н.,
ТУМАКОВ А. Г., ФАДЕЕВ В. Я.

По данным самолетного зондирования атмосферы анализируется внутренняя структура обнаруженных недавно аэрозольных неконденсационных облаков. Показано, что ведущую роль в их образовании играет среднедисперсная фракция аэрозоля, имеющая почвенное происхождение. На основании полученных фактов формируется гипотеза о происхождении облаков такого вида.

Развитие и совершенствование средств оперативной оптической диагностики свойств атмосферного аэрозоля приводят к необходимости исследования не только наиболее типичных его состояний, но и тех ситуаций, в которых аэрозоль проявляется по-особенному. Одна из таких ситуаций — зарегистрированные во время регулярных полетов над территорией СССР самолета-лаборатории ИОА СО АН СССР области повышенной концентрации аэрозоля с горизонтальным масштабом порядка 10–20 км, наблюдающиеся при низких значениях относительной влажности. Авторы [1, 2], не располагая достаточными сведениями о природе, микрофизике и химическом составе этих аэрозольных образований и ориентируясь на их характерную горизонтальную и вертикальную протяженность, для их названия ввели термин «мезомасштабные аэрозольные облака», или «облака неконденсационного происхождения».

Расширение географии, длительности и регулярности полетов самолета-лаборатории в течение 1985–1987 гг. позволило увеличить количество зарегистрированных случаев наблюдения таких аэрозольных образований до 22. В ряде полетов удалось зарегистрировать не только пространственное распределение общей счетной концентрации аэрозольных частиц ($r \geq 0,2$ мкм)¹ и коэффициента рассеяния для $\lambda = 0,5$ мкм, но осуществить измерения функции распределения частиц по размерам и определить элементный состав аэрозольных частиц. Это позволяет перейти в настоящей работе к анализу внутренней структуры аэрозольных облаков и сделать предварительные выводы о их происхождении.

Измерения выполнялись в основном тем же комплексом аппаратуры, что описан в [1, 2]. Отличия заключаются в том, что в состав комплекса был введен фотоэлектрический аэрозольный нефелометр ФАН с устройствами термо- и гигрометрии, а выход модернизированного фо-

¹ Указываемый размер частиц соответствует значениям диапазона ФЭС А3-5, показания которого зависят не только от размера, но и от комплексного показателя преломления вещества частиц. Счетчик калибровался частицами, имеющими значение $n=1,6$, $\chi=0$, следовательно, для иных значений показателя преломления частиц фактический размер может отличаться от измеренного. В то же время с учетом почвенно-го происхождения частиц неконденсационных облаков (см. ниже) в условиях низких значений относительной влажности воздуха можно полагать, что регистрируемый размер частиц будет близок к его истинным значениям.

Общее число зарегистрированных случаев	Общая продолжительность наблюдений, ч	Средняя продолжительность наблюдений на один случай обнаружения, ч	Диапазон превышения концентрации по отношению к средней $N/N_{ср}$ (мин. — макс.)	Диапазон относительной влажности воздуха в период обнаружения (мин. — макс.)	Диапазон температуры в период обнаружения (мин. — макс.), град
22	3480	158	3÷65	15÷45	-25,6÷22,5

тоэлектрического счетчика АЗ-5 был подключен к 12-канальному параллельному анализатору.

Дадим вначале общую характеристику описываемому явлению. Из приведенных в таблице данных следует, что речь идет о достаточно редких аэрозольно-оптических ситуациях, наблюдаемых в широком температурном диапазоне $-25,5 \div 22,5^\circ\text{C}$ при изменении относительной влажности от 15 до 45%. При более высоких значениях относительной влажности подобных аэрозольных образований обнаружено не было. Режим полетов самолета-лаборатории характеризовался разной продолжительностью работы над тем или иным географическим районом, поэтому корректно определить районы с повышенной повторяемостью появления аэрозольных неконденсационных облаков не удается. За период с 1981 по 1987 г. они зафиксированы над Уралом, Западной и Восточной Сибирью, Забайкальем, Дальним Востоком, Казахстаном и Средней Азией.

Перейдем непосредственно к анализу внутренней структуры аэрозольных неконденсационных облаков.

Проведенный анализ распределения частиц аэрозоля по размерам, измеренных с помощью модифицированного фотоэлектрического счетчика АЗ-5 [1], показывает, что в неконденсационных аэрозольных облаках не только заметно возрастает концентрация частиц с $r > 0,2 \text{ мкм}$, но и существенно изменяется вид функции распределения. На рис. 1 приведен наиболее яркий пример горизонтального разреза подобного облака, полученный 5.II 1986 г. на трассе полета Ургенч — Караганда. Кривая 1 характеризует временную зависимость коэффициента рассеяния σ для длины волны 0,5 мкм, кривая 2 соответствует измеренной суммарной концентрации N частиц с $r > 0,2 \text{ мкм}$.

Значительные флуктуации сигнала, измеряемые по оптическому каналу, обусловлены малым рассеивающим объемом нефелометра ($\sim 0,5 \text{ см}^3$), в то время как кривая суммарной концентрации частиц построена по точкам, полученным при осреднении отсчетов при прокачке 1 л исследуемого воздуха. При сравнении временной записи σ и N можно отметить, что повышение значений коэффициента рассеяния и существенное увеличение амплитуды флуктуаций оптического сигнала наблюдается раньше (на 5—6 мин или на 15—18 км), чем увеличение суммарной концентрации частиц N . Анализ функции распределения частиц по размерам в подобном облаке показывает, что это вызвано увеличением относительного вклада среднедисперской фракции аэрозольных частиц, который на периферии облака обуславливает заметное повышение оптического сигнала и его флуктуаций в малом рассеивающем объеме. Прохождение центральной части облака сопровождается резким возрастанием как общей концентрации частиц N (в настоящем случае в 65 раз), так и опережающим ростом содержания частиц с $r = 0,5 \div 2 \text{ мкм}$. Этот факт отражен на рис. 1, где приведена временная зависимость отношения концентрации частиц с $r = 0,5$ (кривая 4) и $r = 2 \text{ мкм}$ (кривая 3) к концентрации частиц с размером $r = 0,2 \text{ мкм}$. Концентрация частиц с $r = 0,35 \div 0,5 \text{ мкм}$ ведет себя нейтральным образом и практически повторяет ход суммарной концентрации N . Рис. 2 иллюстрирует трансформацию распределения частиц по размерам при пе-

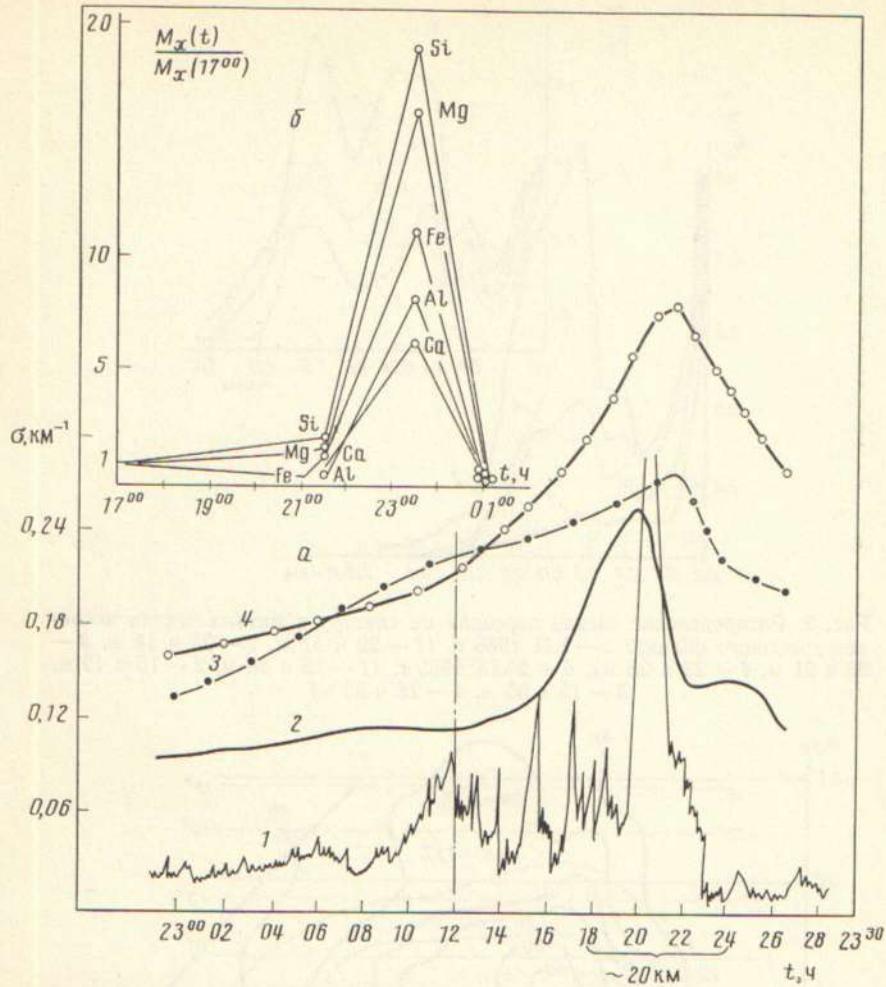


Рис. 1. Изменение счетной концентрации аэрозоля и коэффициента рассеяния (а), а также химического состава аэрозоля (б) ($M_x(17^{00})$: Al=3,0, Ca=3,7, Si=0,06, Fe=0,18, Mg=0,19 мкг/м³) при пересечении неконденсационного облака 5.II 1986 г. на трассе Ургенч — Караганда на высоте 2700 м

речесечении аэрозольного облака. Кривые на рис. 2 нормированы на значение N ($r=0,2$ мкм). Кривая 1 (22 ч 57 м) на рис. 2, а описывает функцию распределения во внеоблачном пространстве. Кривая 2, полученная в 23 ч 11 м, соответствует моменту роста оптического сигнала и возрастанию относительного содержания частиц с размером $r=0,5-1$ мкм. Функция распределения частиц по размерам, зарегистрированная в 23 ч 21 м (рис. 2, а, кривая 3), характерна для центральной части облака, где суммарная концентрация частиц и величина оптического сигнала достигают своих максимальных значений.

Как следует из приведенных данных, в центре облака вклад среднедисперсных частиц аэрозоля в суммарную его концентрацию превышает вклад субмикронных частиц с $0,2 \leq r \leq 0,25$ мкм. После пересечения центральной части облака (кривая 4, 23 ч 28 м) вместе с уменьшением суммарной концентрации начинает снижаться и относительный вклад среднедисперсной фракции в распределение частиц по размерам.

На рис. 1 и 2, а рассмотрена динамика наиболее мощного аэрозольного облака. Для сравнения на рис. 2, б приведены данные о микроструктуре аэрозольного облака, обнаруженного над Западной Сибирью,

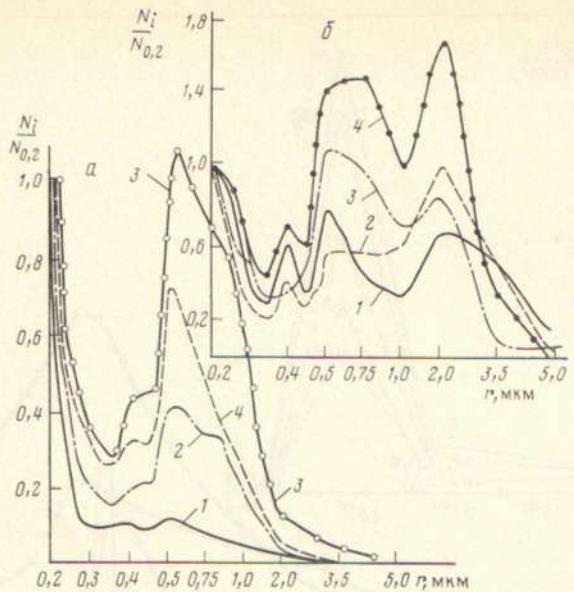


Рис. 2. Распределение частиц аэрозоля по спектру в разных частях неконденсационного облака: а — 5.II 1986 г. (1 — 22 ч 57 м, 2 — 23 ч 11 м, 3 — 23 ч 21 м, 4 — 23 ч 28 м), б — 20.IX 1985 г. (1 — 15 ч 15 м, 2 — 15 ч 19 м, 3 — 15 ч 35 м, 4 — 15 ч 32 м)

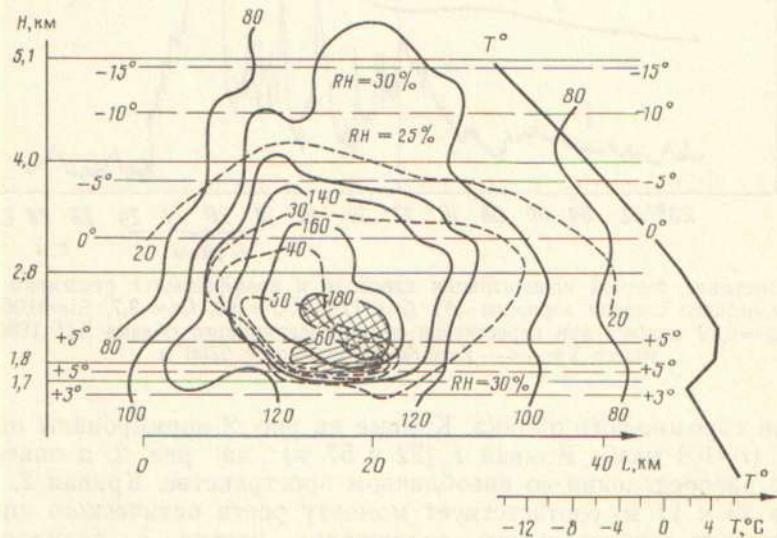


Рис. 3. Вертикальный разрез неконденсационного аэрозольного облака, построенный по данным самолетного зондирования 14.V 1987 г. за период с 14 до 19 ч местного времени

которые качественно совпадают с результатами, представленными на рис. 2, а. Анализ всего массива данных показывает, что в различных реализациях вклад среднедисперсной фракции в общую концентрацию может изменяться и не всегда совпадать по времени или в пространстве с максимумом суммарной концентрации аэрозоля в облаке. Однако заметный рост относительного содержания среднедисперсных частиц типичен для всех случаев измерения микроструктуры этих аэрозольных образований. Это позволяет сделать вывод, что неконденсационные облака формируются главным образом за счет частиц, размер которых лежит в диапазоне $r=0,5 \div 1$ мкм.

Чтобы выяснить природу и происхождение этих частиц, были предприняты попытки отбора аэрозольного вещества на фильтры с целью последующего исследования их элементного состава. При этом возникают определенные методические трудности. Главной является сравнительно небольшая горизонтальная протяженность аэрозольного облака, которая определяет малое время экспозиции фильтра в потоке исследуемого воздуха. Следующая трудность состоит в том, что режим работы самолета-лаборатории по трассе полета не всегда позволяет осуществить многократное прохождение через центральную часть облака, которая визуально не обнаружима и в большинстве зарегистрированных случаев отличается по концентрации частиц от окружающего пространства в среднем лишь в 10 раз. Эти обстоятельства приводят к тому, что через фильтр прокачивается большое количество воздуха из околовоблачного пространства. Поэтому в большинстве случаев наблюдения неконденсационных облаков не удается разделить элементный состав этих аэрозольных образований и элементный состав аэрозоля в окружающем облако пространстве.

Представленные на рис. 1, б данные о временной изменчивости химического состава аэрозоля, полученные при зондировании наиболее мощного облака, микроструктурные характеристики которого обсуждались выше, указывают на существенный рост содержания Si, Mg, Fe, Al, Ca в его центральной части. Это, по-видимому, свидетельствует о почвенном происхождении частиц аэрозоля [3, 4], определяющих основные микрофизические характеристики неконденсационного облака. Важно заметить, что в пробах не обнаружено ионов и элементов, характерных для аэрозоля фотохимического происхождения.

Накопленные данные позволяют обсудить вероятные механизмы образования аэрозольных облаков. Не располагая достаточным знанием микроструктуры и химического состава аэрозольных частиц, авторы [1, 2] отвергли гипотезу об их конвективном происхождении, так как все зарегистрированные неконденсационные облака были обнаружены выше инверсионного слоя, в котором, как правило, конвективные движения не наблюдаются. Исследование пространственного распределения частиц аэрозоля разных размеров позволило уточнить особенности формирования внутренней структуры неконденсационных облаков.

На рис. 3 приведен пространственный разрез аэрозольного облака, полученный 14.V 1987 г. в Западной Сибири. Сплошная линия — изолинии равной концентрации для частиц, радиус которых лежит в интервале $r=0,2 \div 0,25$ мкм (цифры у изолинии означают количество частиц этого диапазона в 1 дм³), штриховые изолинии — аналогичные данные для частиц с размерами $r=0,5 \div 0,75$ мкм. Здесь же крупными штрихами обозначены изотермы и даны сведения об относительной влажности воздуха (RH). В правой части рисунка представлен профиль температуры T , который убедительно показывает наличие хорошо выраженной инверсии между высотами $H=1,7$ км и $H=1,8$ км и изотермии в диапазоне высот $1,8 \div 2$ км. В целом характер пространственного распределения суммарной концентрации частиц в данном облаке и метеорологическое состояние атмосферы в момент наблюдений соответствует зарегистрированным ранее случаям [1, 2]. Анализ же пространственной картины распределения для частиц разных размеров (рис. 3) показывает, что область максимальной концентрации частиц среднедисперсного диапазона расположена на меньших высотах, а спад их концентрации к периферии облака происходит гораздо быстрее по сравнению с более мелкими частицами, имеющими размер порядка $0,2 \div 0,25$ мкм.

Совокупность приведенных выше фактов заставляет вернуться к гипотезе о конвективном происхождении неконденсационных облаков. Вероятной причиной образований подобных аэрозольных облаков яв-

ляются мощные вертикальные потоки, способные осуществить локальный прорыв инверсионного слоя. Вынесенный таким механизмом аэрозоль почвенного происхождения будет существовать в атмосфере в виде отдельного аэрозольного облака, которое в течение определенного времени под действием процессов диффузии и седиментации изменяет первоначальное распределение частиц по размерам в пространстве.

В процессе зондирования атмосферы такого рода аэрозольные образования должны встречаться на разных стадиях своего существования, и, следовательно, в разных реализациях соотношение частиц мелкодисперсной и среднедисперсной фракций может быть разным, что и было отмечено выше.

В заключение авторы выражают глубокую признательность всем участникам работ по программе самолета-лаборатории, проводившим измерения, а также пилотам и руководящему составу Новосибирского авиапредприятия, предоставившим возможность их проведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белан Б. Д., Задде Г. О. О мезомасштабных аэрозольных облаках//Докл. АН СССР. 1986. Т. 290. № 6. С. 1328—1331.
2. Белан Б. Д., Задде Г. О., Рассказчикова Т. М. Атмосферный аэрозоль в облачных условиях//Метеорология и гидрология. 1987. № 4. С. 38—46.
3. Кондратьев К. Я., Москаленко И. И., Поздняков Д. В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 224 с.
4. Ильев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 368 с.

Академия наук СССР
Сибирское отделение
Ин-т оптики атмосферы

Поступила в редакцию
30.VII 1987

THE INNER STRUCTURE OF AEROSOL CLOUDS

ZUEV V. E., BELAN B. D., ZADDE G. O., PANCHENKO M. V.,
RASSKAZCHIKOVA T. M., TERPUGOVA S. A., TOLMACHEV G. N.,
TUMAKOV A. G., FADEEV V. Ya.

Based on the airborne sounding of the atmosphere, an inner structure of aerosol noncondensing clouds recently found is examined. The largest contribution to their formation is shown to be made by a medium-dispersion aerosol fraction of ground origin. The hypothesis of the origin of such clouds is formulated using the data thus obtained.