

Физические характеристики неконденсационных аэрозольных облаков

Кандидаты физ.-мат. наук Б. Д. Белан, Г. О. Задде и
М. В. Панченко, В. К. Ковалевский, Т. М. Рассказчикова

В работе рассматривается атмосферное явление, суть которого заключается в том, что в ясной сухой атмосфере аэрозоль может скапливаться в ограниченных объемах, по форме напоминающих обычные конденсационные облака. Так как при низких значениях относительной влажности процессы конденсации маловероятны, то такие скопления аэрозоля получили название неконденсационных аэрозольных облаков. Выполненное исследование показало, что в таких аэрозольных облаках основной вклад в суммарную счетную концентрацию вносит среднедисперсная фракция, имеющая почвенное происхождение. Высказывается гипотеза о том, что такое явление может возникать вследствие прорыва приземного воздуха через слой инверсии. В заключение обобщены сведения, полученные к настоящему времени, о характеристиках аэрозольных неконденсационных облаков.

В работах [1, 2] сообщалось об отдельных наблюдениях пространственно ограниченных скоплений аэрозоля, которые регистрировались при низких значениях относительной влажности окружающего воздуха, когда конденсационные процессы маловероятны. Именно поэтому такие образования получили название неконденсационных аэрозольных облаков, хотя их происхождение и механизмы образования оставались во многом неизвестными. Результаты работ [1, 2] основывались на данных отдельных серий самолетного зондирования атмосферы, проводимого в 1981, 1983 и 1984 гг. Существенное расширение географии полетов и увеличение длительности наблюдений, осуществленное в течение 1985—1987 гг., позволило определить ряд новых фактов, касающихся их внутренней структуры, и получить более полное представление о данном явлении в целом.

Работа посвящена анализу новых сведений об аэрозольных неконденсационных облаках и обобщению накопленного к настоящему времени материала. Измерения выполнялись на самолете-лаборатории Института оптики атмосферы, аппаратурный комплекс которого по сравнению с [1, 2] был расширен включением в его состав аэрозольного нефелометра, оснащенного системой увлажнения (до RH~90%) и термонагрева (до 270°C) анализируемого аэрозоля и значительного увеличения оперативности работы модернизированного фотоэлектрического счетчика аэрозоля АЗ-5 за счет подключения 12-канального параллельного анализатора спектра частиц.

В табл. 1 суммированы сведения об аэрозольных неконденсационных облаках, зарегистрированных в течение полетов 1985—

1987 гг. Приводимые в таблице данные в целом соответствуют тем, которые содержатся в [1, 2]. Расширяются лишь регионы, над которыми эти облака наблюдались. По-видимому, это свидетельствует о том, что физическая природа рассматриваемого явления не связана с каким-либо определенным климатическим районом, или же о том, что подобные образования имеют сравнительно долгое время жизни в атмосфере и способны переноситься на значительные расстояния.

Расширение состава самолетного комплекса аппаратуры позволило получить более полные сведения о внутренней структуре аэрозольных неконденсационных облаков. В первоначальном варианте [1, 2] последовательное измерение функции распределения частиц по размерам осуществлялось в течение 10 мин, за которые самолет проходил практически все облако. Значительное осреднение спектра размеров во времени (следовательно, и по пространству) определило вывод, сделанный в первых публикациях, о том, что микроструктуры аэрозольных частиц в облаке и во внеоблачном пространстве подобны и различаются лишь по концентрации. Одновременное измерение всех регистрируемых диапазонов дисперсности позволило получить детальную пространственную картину распределения спектров размеров частиц, которая показала, что вывод об однотипности спектра внутри и вне облака неверен. И хотя увеличение суммарной концентрации частиц с $r > 0,2 \text{ мкм}$ в облаке сопровождается ростом содержания частиц во всех диапазонах размеров, динамика нарастания концентрации разных частиц от периферии облака к его центру оказывается различной. Характерной чертой всех исследованных аэрозольных неконденсационных облаков является опережающий рост относительного содержания среднедисперсной фракции частиц ($r = 0,5 \dots 1,0 \text{ мкм}$).

Конкретный пример пространственного разреза подобного облака, полученный по данным зондирования в Казахстане 10 апреля 1985 г., представлен на рис. 1, где увеличение суммарной концентрации аэрозоля к центральной части облака сопровождается увеличением числа частиц во всех диапазонах размеров ($d = 0,2 \dots 10 \text{ мкм}$), однако наиболее заметным образом растет концентрация частиц в диапазоне размеров $d = 1,0 \dots 1,5 \text{ мкм}$. При этом, как видно из рис. 2, концентрация среднедисперсных частиц становится соизмеримой с концентрацией самой мелкой из регистрируемых фракций, достигая 45% ее величины. Следует отметить, что в отдельных случаях наблюдения подобных образований были зарегистрированы ситуации, когда в центральной части облака концентрация частиц в диапазоне размеров $d = 1,0 \dots 1,5 \text{ мкм}$ была в 1,5—1,6 раза выше, чем в диапазоне $d = 0,4 \dots 0,5 \text{ мкм}$. Этот факт подтверждается и данными регистрации характеристик рассеянного излучения, измеренных проточным нефелометром. Увеличение коэффициента аэрозольного рассеяния при пересечении облака сопровождается сильными флуктуациями сигнала, которые в

Таблица 1
Характеристики аэрозольных облаков, наблюдавшихся в 1986—1987 гг.

Дата, район	Время, ч, мин	Горизонтальный размер, км	Высота, км	Температура, °С	Относительная влаж- ность, %	$\frac{N_{\text{обл}}}{N_{\text{ср}}}$	Воздушная масса	Примечание	
								Поле из 6 облаков	Термогигрометр не фиксировал влаж- ность 50%
10.04.85 Казахстан	0710—0748	35	2,7	—9,2...—9,7	22—24	4	куВ антициклон	—	—
20.09.85 Западная Сибирь	1516—1542	12	1,1	20,1...22,5	28—31	8	куВ антициклон	—	—
05.02.86 Средняя Азия	2257—2330	48 (24)	2,7	—5,5...—6,2	50	65	куВ малоградиентное поле	—	—
04.06.86 Казахстан	0126—0358	8—16	2,3	—1,0...—4,2	27—33	3—4	куВ антициклон	—	—
20.09.86 Забайкалье	1316—1338	8	2,7	0,2...1,0	46—49	5	куВ малоградиентное поле	—	—
18.12.86 Западная Сибирь	2254—2331	20	2,6	—25,6...—24,0	22—35	3	куВ антициклон	—	—
26.09.86 Дальний Восток	1358—1413	10	3,0	—0,4...0,8	24—27	3	куВ малоградиентное поле	—	—
14.05.87 Западная Сибирь	1717—1743	21	2,8	2,0...2,4	19—22	4	куВ тыльного фронта	—	—
Всего 8 случаев	1315—0358 (710—748)	8—48	1,1—3,0	—25,6...22,5	19—35(49)	3—65	куВ, кАВ	—	—

малом локальном объеме нефелометра определяются большими частицами.

Анализ микрофизических характеристик внутри аэрозольных неконденсационных облаков, перечисленных в табл. 1, показывает, что во всех случаях наблюдается вполне отчетливое увеличение относительного содержания среднедисперсной фракции частиц.

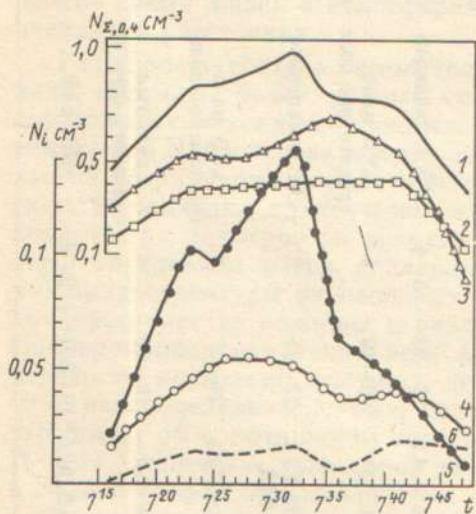


Рис. 1. Изменение счетной концентрации аэрозоля при пересечении облака 10 апреля 1985 г.

1 — суммарной ($1 > 0,4 \text{ мкм}$); 2 — с размером частиц $0,4-0,5 \text{ мкм}$; 3 — с размером частиц $0,5-0,6 \text{ мкм}$; 4 — с размером частиц $0,9-1,0 \text{ мкм}$; 5 — с размером частиц $1,0-1,5 \text{ мкм}$; 6 — с размером частиц $2-4 \text{ мкм}$.

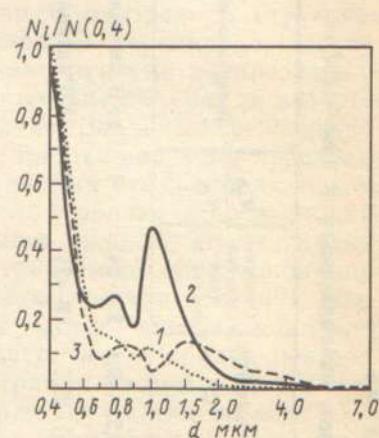


Рис. 2. Изменение распределения частиц аэрозоля по спектру в неконденсационном облаке.

1 — в 7 ч 16 мин; 2 — в 7 ч 32 мин;

3 — в 7 ч 48 мин.

Область максимального вклада среднедисперсных частиц в функцию распределения частиц по размерам может совпадать во времени (в пространстве) с моментом регистрации максимальной суммарной концентрации частиц в облаке, опережать или отставать во времени от ее наступления, но заметный рост содержания среднедисперсных частиц был зафиксирован во всех реализациях. По-видимому, этот факт свидетельствует о том, что аэрозольные частицы среднедисперсного диапазона играют ключевую роль в генезисе неконденсационных облаков.

Известно [4, 5], что среднедисперсная фракция частиц аэрозоля в атмосфере имеет преимущественно почвенное происхождение. В одном из циклов зондирования на трассе полета Ургенч—Караганда 5 февраля 1986 г. удалось взять пробы аэрозоля на фильтры раздельно внутри и в окрестностях мощного аэрозольного облака. Внутри облака пробы аэрозоля были взяты при наступлении максимума суммарной концентрации частиц с экспозицией фильтра

Таблица 2
Химический состав аэрозоля ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) вне и внутри неконденсационного облака 5–6 февраля 1986 г.

Время (местное)	Высота, км	Объем, м^3	Cl	Al	Ca	Si	Fe	Ni	Mg	Mn	Tl	Na	K	Cu	Σ	Воздушная масса
16 ³⁶	2,0	3,6	0,678	4,219	2,694	0,141	0,348	0,171	0,473	0,130	0,050	0,407	0,027	0,229	9,710	кСВ
17 ⁰⁷	2,2	5,2	0,994	2,976	3,672	0,056	0,181	0,096	0,193	0,060	0,016	0,335	0,033	0,211	8,823	кСВ
21 ²⁶	2,7	3,0	*	0,828	3,915	0,097	0,159	0,166	0,344	0,106	0,028	*	*	0,365	6,008	куВ
23 ²⁰	2,7	0,3	*	23,888	22,387	1,116	2,144	1,569	3,159	0,581	0,263	*	*	0,129	55,233	куВ
00 ⁴⁰	2,7	7,5	0,927	1,012	0,028	0,004	0,025	*	0,033	0,025	0,011	*	0,009	0,062	2,136	куВ

Примечание. * — содержание элемента ниже порога определения, кСВ — континентальный субтропический воздух, кУВ — континентальный умеренный воздух.

Таблица 3
Характеристики аэрозольных неконденсационных облаков

Район	Повторяемость			Налет часов	Встречаемость	Время, ч					Температура, °C	Влажность, %	Размер, км	$\frac{N_{обл}}{N_{ср}}$	Воздушная масса
	обла-ка	поля	все-го			06—12	12—18	18—24	00—06						
Западная Сибирь	8	2	10	1700	170	—	6	4	—	—25,6...22,5	16—35	6—21	3—40	кАВ	
Восточная Сибирь	—	1	1	140	140	—	—	1	—	—13,0...—12,7	36—39	10—12	5—8	куВ	
Забайкалье	1	—	1	60	60	—	1	—	—	0,2...1,0	46—49	8	5	куВ	
Дальний Восток	1	—	1	40	40	—	1	—	—	0,4...0,8	24—27	10	3	»	
Урал	2	—	2	240	120	—	—	2	—	—7,2...—6,7	27—33	20	6—10	»	
Средняя Азия	1	1	2	200	100	—	1	1	—	—6,2...0,0	24—25	8—24 (48)	5—65	»	
Казахстан	3	2	5	750	150	1	—	2	2	—9,7...7,5	20—36	8—35	3—9	»	
Итого:	16	6	22	3480	158	1	9	10	2	—25,6...22,5	16—39 (49)	6—35 (48)	3—65	кАВ куВ	

Примечание. кАВ — континентальный арктический воздух, кУВ — континентальный умеренный воздух.

в потоке воздуха, равной 2 минутам. Объем воздуха, прошедшего через фильтр, $0,3 \text{ м}^3$. Результаты химического анализа ряда элементов представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что увеличение содержания отдельных элементов в момент пересечения центральной части аэрозольного облака происходит более чем на порядок, в то время как переход из субтропической воздушной массы в умеренную вызывает изменение их концентрации не более чем в 3 раза.

При этом наблюдается значительное увеличение концентрации элементов, которые характерны для почвенного аэрозоля [4, 5], а именно Al, Ca, Si, Fe, Ni, Mg, Mn, Ti. Химический анализ был проведен также на содержание ионов SO_4 , NO_3 , NH_4 , но их суммарная масса в зоне аэрозольного облака оказалась ниже порога обнаружения используемых методов, так же как и для ионов Cl, Na и K.

Выполненные нами ранее исследования химического состава аэрозоля данного региона [3] показали, что такой состав наблюдается, когда в атмосфере преобладают частицы почвенного происхождения. Следовательно, по крайней мере в данном случае, основная масса аэрозольных частиц в облаке имела почвенное, а не фотохимическое происхождение. В противном случае имеющаяся точность определения ионов, характеризующих фотохимические процессы, позволила бы их уверенно обнаружить [3].

Следует отметить и еще один важный факт, который наблюдался в ряде случаев зондирования неконденсационных аэрозольных облаков. Включенный в состав аппаратурного комплекса нефелометр снабжен системой искусственного увлажнения аэрозоля с целью исследования изменчивости его оптических характеристик под воздействием относительной влажности воздуха, подобно тому, как это делается в наземных условиях [7]. Полученные в течение 1986—1987 гг. данные гидрооптического исследования показали, что в подавляющем большинстве ситуаций (более 97% реализаций) во всем диапазоне высот от 0 до 5 км во всех географических зонах страны в разные сезоны года увеличение относительной влажности воздуха приводит к росту коэффициента рассеяния для волн видимого участка спектра. Связь коэффициента рассеяния и относительной влажности воздуха (гигрограмма) хорошо аппроксимируется зависимостью типа формулы Кастена—Хенела [7], в которой в определенных пределах варьирует показатель степени, так называемый параметр конденсационной активности. В случае же записи гигрограмм в моменты наблюдения аэрозольных неконденсационных облаков подобной связи обнаружено не было. Это, на наш взгляд, еще раз свидетельствует о почвенном происхождении частиц аэрозоля, определяющих основную структуру подобных образований.

Накопленный к настоящему времени наблюдательный матери-

ал (22 реализации) позволяет сделать некоторые предварительные обобщения. Для этого обратимся к данным, приведенным в табл. 3.

Районы наблюдения облаков такого типа охватывают почти все регионы, в которых работала экспедиция Института оптики атмосферы, за исключением ЕТС, где время измерений составило всего около 350 ч. Встречаемость подобного рода аэрозольных образований, если не брать единичных случаев, в среднем составляет 1 на 158 летных часов, что близко к соответствующим оценкам для Западной Сибири и Казахстана, где время наблюдений и число обнаруженных облаков наибольшее.

Наиболее часто данные облака наблюдаются во второй половине суток. Исключение составляют лишь районы Казахстана, где их появление более вероятно утром и в ночное время (табл. 3).

Небольшое число зарегистрированных случаев наблюдения аэрозольных облаков не позволяет эффективно выявить сезоны их преимущественного появления, хотя в теплое полугодие частота их регистрации оказалась выше (14 случаев против 8), чем в холодное полугодие. При этом надо отметить, что время наблюдений в холодное полугодие в 1,4 раза выше, чем в теплое (табл. 4).

Таблица 4
Годовой ход повторяемости аэрозольных неконденсационных облаков

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
—	1	—	1	6	4	—	—	3	—	—	7

Возвращаясь к табл. 3, рассмотрим другие характеристики аэрозольных неконденсационных облаков. Температурный диапазон, в котором обнаруживаются подобные аэрозольные образования, достаточно широк: от $-25,6$ до $+22,5^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха, как правило, менее 40%. Исключение составляет лишь один случай, когда облако наблюдалось при относительной влажности 46–49%, но оно идентифицировалось по увеличению среднедисперсной фракции и по отсутствию реакции аэрозоля на увлажнение.

Все случаи появления аэрозольных неконденсационных облаков зафиксированы в континентальном (арктическом и умеренном) воздухе. Максимальное увеличение концентрации аэрозоля в облаке по отношению к концентрации вне его достигает 65 раз, хотя в большинстве случаев оно составляет 3–8 раз. Горизонтальные размеры облаков изменяются в широких пределах — от 6 до 35 км (в одном случае 48 км). К настоящему времени у нас имеется лишь два случая зондирования, когда удалось оценить вертикальную мощность аэрозольных неконденсационных облаков. Один приведен и описан в работах [1, 2], второй представ-

лен на рис. 3. Если в первом случае [1, 2] вертикальная мощность такого облака находилась в диапазоне 300—600 м, то на рис. 3 видно, что во втором случае она оказалась больше 3 км. В первом случае период измерений в облаке и вокруг него составил 52 мин, во втором (рис. 3) он достиг уже 5 ч 20 мин. Повидимому, это свидетельствует о достаточно большой временной устойчивости таких аэрозольных образований.

Обратимся еще к одному факту, который хорошо виден на рис. 3.

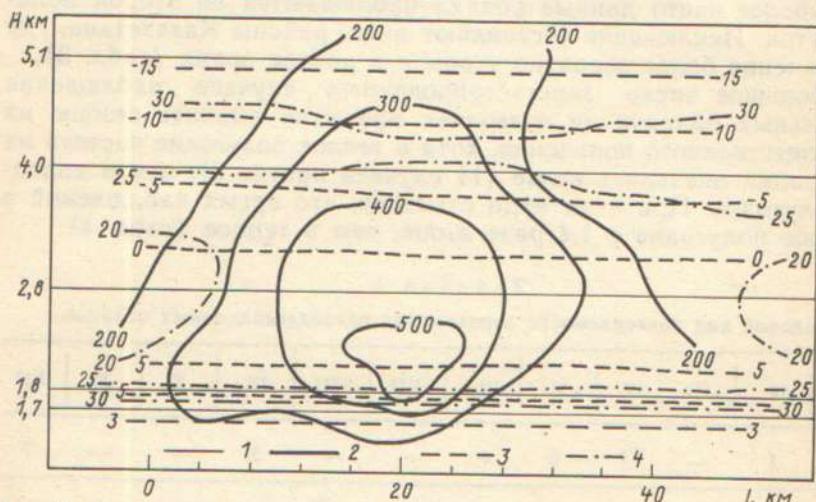


Рис. 3. Вертикальный разрез неконденсационного аэрозольного облака 14 мая 1987 г., полученный с 14 до 19 ч местного времени.
1 — эшелоны полетов, 2 — счетная концентрация аэрозоля ($d > 0,4 \text{ мкм}$), 3 — изотермы, 4 — изолинии относительной влажности.

Как отмечалось и в [1, 2], концентрация аэрозоля внутри облака неравномерна, она существенно выше вблизи его основания. Причем в данном случае, если сравним расположение изолиний аэрозоля и изотерм, то увидим, что облако находится над слоем тонкой инверсии, которая имеет перепад температуры 3°C на 150 м по вертикали. Этот факт, а также тот, что химический состав частиц в облаке характерен для аэрозоля почвенного происхождения, позволяет остановиться на следующей гипотезе образования неконденсационных облаков. Облака такого типа возникают в результате мощного прорыва подинверсионного аэрозоля в надинверсионный, где могут существовать достаточно долго в отсутствие вымывающих и выметающих факторов (облака, дождь, снег). Время жизни облака в условиях ясной атмосферы, в которой они и были обнаружены, будет определяться в основном процессами седиментации и диффузии.

Правомерность такой гипотезы подтверждают данные работы [6], авторы которой многочисленными экспериментами выявили возможность переноса примесей через основание инверсии. Они показали, что выше основания инверсии происходит увеличение концентрации трассеров, введенных в аэрозоль под ней; профиль концентрации морской соли с высотой не меняется существенно выше основания инверсии; флюоресцирующие вещества проникают сквозь инверсию. Вертикальный перенос через инверсию авторы [6] оценили в 15 см/с и считают его результатом действия устойчивых внутренних гравитационных волн, возникающих в слое инверсии из-за сильного вертикального сдвига ветра. К сожалению, в наших экспериментах характеристики ветра не измерялись. Поэтому оценить вероятность генерации гравитационных волн невозможно. Косвенным же подтверждением связи инверсии и аэрозольных неконденсационных облаков можно считать данные табл. 5, в которой представлена повторяемость высоты их наблюдения для холодного и теплого периодов. Из данных табл. 5 следует, что в холодное время они появляются не выше 3 км, причем чаще в слое 1—2 км. В теплое время года частота появления таких облаков в слое 1—2 км ниже, чем в слое 2—3 км или в слое выше 3 км. Как известно, подобный годовой ход имеет и приземная инверсия, под которой в основном и накапливается атмосферный аэрозоль, образующийся у поверхности земли.

В заключение отметим, что при данной гипотезе неясным пока остается лишь механизм прорыва подинверсионного аэрозоля в свободную атмосферу. Наиболее вероятным нам представляется быстрый локальный прорыв по типу конвективного или вихревого в каком-то отдельном месте. В таком случае в результате прорыва могут получаться аэрозольные облака, подобные описанным в настоящей работе. Дальнейшее их существование должно определяться процессами седиментации для грубодисперсного аэрозоля и диффузионными для мелкодисперсного.

Литература

- Белан Б. Д., Задде Г. О. О мезомасштабных аэрозольных облаках. — Доклады АН СССР, 1986, т. 290, № 6.
- Белан Б. Д., Задде Г. О., Рассказчикова Т. М. Атмосферный аэрозоль в облачных условиях. — Метеорология и гидрология, 1987, № 4.
- Белан Б. Д., Задде Г. О., Пхалагов Ю. А., Толмачев Г. Н. Масовая концентрация и химический состав аэрозоля над Западной Сибирью и Казахстаном. — Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, ч. I. Томск, 1986.

4. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. — Л., Изд-во ЛГУ, 1982.
5. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Поздняков Д. В. Атмосферный аэрозоль. — Л., Гидрометеоиздат, 1983.
6. Goodman J. K., Miller A. Mass transport across a temperature inversion.—J. Geophys. Res., 1977, vol. 82, No. 24.
7. Hänel G. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air. — Adv. Geophys., 1976, No. 19,

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР

Поступила
20 VIII 1987

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF NONCONDENSABLE AEROSOL CLOUDS

B. D. Belan, G. O. Zadde, M. V. Panchenko,
V. K. Kovalevsky, T. M. Rasskazchikova

In the clear dry atmosphere an aerosol can accumulate as limited formations resembling ordinary condensable clouds. Such aerosol clusters were named the noncondensable aerosol clouds because the condensation processes are hardly probable under a low relative humidity. The investigation revealed that in the aerosol clouds the middle-size fraction of soil origin primarily contribute to the total number concentration. It is hypothesized that the phenomenon can occur due to a break of surface air through the inversion layer. Available data on the characteristics of noncondensable aerosol clouds are summarized.