

М.В. Панченко, А.Г.Тумаков

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМО- И ГИГРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ

Рассмотрены результаты исследований аэрозоля в приземном слое атмосферы над Атлантическим океаном. Измерения проведены с использованием фотоэлектрического счетчика частиц и нефелометра, снабженного устройствами термо- и гигровоздействия на аэрозоль. Проанализировано влияние континента на формирование оптических и микрофизических свойств аэрозоля над океаном. Показано, что при изменении соотношения между содержанием частиц субмикронного и среднedisперсного диапазонов закономерно меняются термооптические параметры аэрозоля. Отмечена хорошая воспроизводимость этих параметров для аэрозоля морского происхождения.

В соответствии с долгосрочной программой исследований атмосферного аэрозоля в разных географических районах в апреле–июне 1988 г. во время 9-го рейса учебно-экспедиционного судна ЛГМИ <Профессор Сергей Дорوفеев> были проведены измерения в центральной и северной частях Атлантического океана. Схема маршрута приведена на рис. 1.

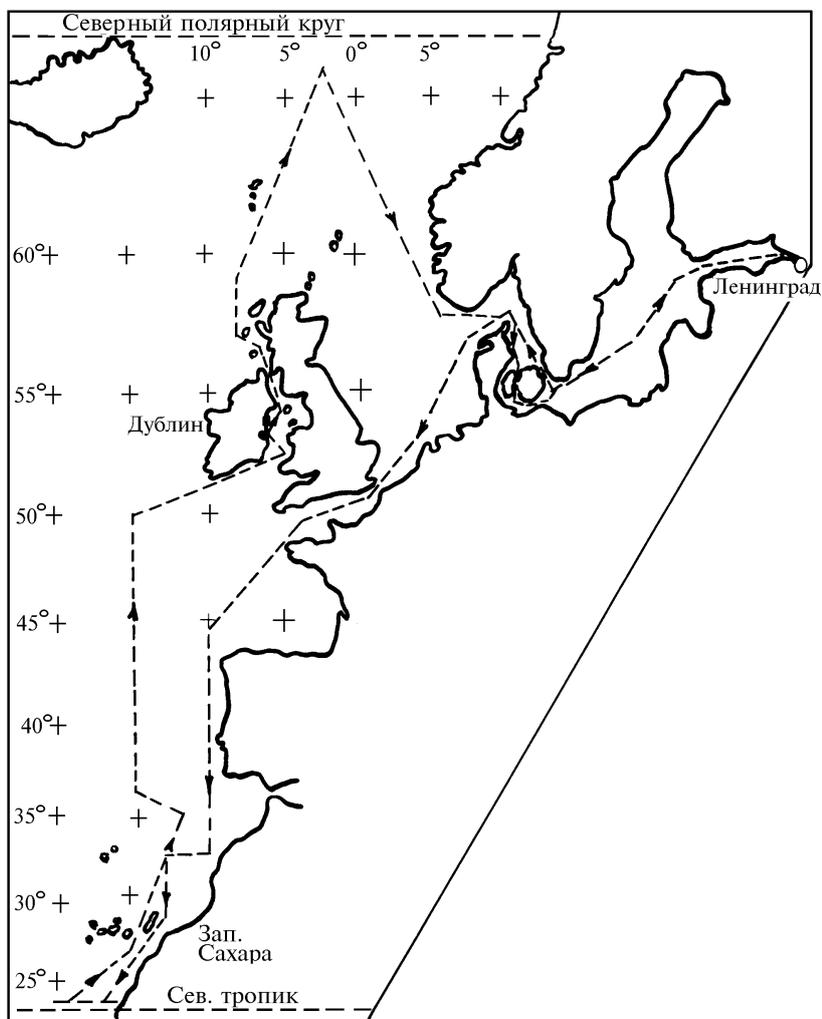


Рис. 1. Схема маршрута 9-го рейса судна «Профессор Сергей Дорوفеев»

Цель эксперимента заключалась в получении сведений о термо- и гигрооптических характеристиках аэрозоля [1] в приводном слое атмосферы и оценке влияния континента на формирование состава и свойств аэрозольных частиц.

Исходя из имеющихся представлений о влиянии суши на дисперсный состав воздуха над океаном [2–6], можно полагать, что ее воздействие должно проявляться в двух диапазонах размеров частиц – в субмикронной области, где сосредоточены частицы фотохимической природы, в том числе и антропогенные, и в диапазоне среднedisперсной фракции, где проявляются терригенные частицы. Приведенные соображения определили оптимальный, на наш взгляд, выбор локальных измерителей: нефелометра для субмикронных частиц и фотоэлектрического счетчика АЗ-5, наиболее хорошо работающего в среднedisперсном диапазоне размеров частиц.

Собранный на базе серийного фотометра ФАН и оснащенный устройствами увлажнения и нагрева исследуемого аэрозоля, нефелометр подробно описан в [1]. Увлажнение аэрозоля при условии контроля относительной влажности воздуха в рабочей камере нефелометра позволяет рассчитывать по эмпирической формуле Хенела [7] показатель конденсационной активности  $\gamma$  для коэффициента направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$ , а из регистрируемой температурной зависимости  $\mu(45^\circ)$  рассчитываются температурные параметры  $F$  и  $Q$ , определяемые как отношения коэффициентов  $\mu(45^\circ)$  при фиксированных температурах.

Установка размещалась в ходовой рубке судна, а забор аэрозоля осуществлялся в набегающем воздушном потоке с принудительной транспортировкой к рабочему объему по пластмассовой трубке длиной около 8 м и внутренним диаметром 20 мм. Расход воздуха через рабочий объем установки составлял 20–30 л в минуту. Вход заборного устройства располагался на высоте примерно 8 м от поверхности воды с наветренного борта, для чего заборник мог переноситься с борта на борт в зависимости от ориентации судна. Нефелометрические измерения проводились в основном в дневное время с интервалом около 4 ч. Интервал между микроструктурными измерениями на АЗ-5 составлял от 2 до 8 ч. Всего за период рейса было проведено около 200 сеансов измерений. Средние значения и их среднеквадратические отклонения (СКО) для нефелометрических данных, полученные за весь период рейса, приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Среднее значение СКО | Параметр  |               |          |      |      |          |           |
|----------------------|---|---------------|----------|------|------|----------|-----------|
|                      | $\mu(45^\circ)$ , $\text{км}^{-1} \text{ср}^{-1}$ | $P(90^\circ)$ | $\gamma$ | $F$  | $Q$  | $RH$ , % | $W$ , м/с |
|                      | 0,011   | 0,13          | 0,30     | 1,34 | 0,47 | 80,5     | 6,5       |
|                      | 0,011   | 0,11          | 0,11     | 0,17 | 0,20 | 8,3      | 3,2       |

Здесь  $\mu(45^\circ)$  – коэффициент направленного рассеяния под углом  $45^\circ$ ;  $P(90^\circ)$  – степень поляризации рассеянного излучения под углом  $90^\circ$ ;  $RH$  и  $W$  – соответственно величины относительной влажности воздуха и скорости ветра, а  $F$  и  $Q$  – термооптические параметры, определяемые следующими соотношениями:  $Q = \mu(250^\circ\text{C})/\mu(100^\circ\text{C})$ ;  $F = \mu(T+15^\circ\text{C})/\mu(100^\circ\text{C})$ , где  $T$  – температура окружающего воздуха.

Считается, что при температуре, на  $15^\circ$  выше окружающей среды, аэрозоль находится практически при нулевой относительной влажности воздуха, при  $100^\circ\text{C}$  из состава частиц выводится вся связанная вода, а при  $250^\circ\text{C}$  неразложившимися в основном остаются NaCl и сажа.

Можно отметить, что в целом данные получены в условиях высокой прозрачности атмосферы при значениях метеорологических параметров, характерных для нештормовой погоды в океане. Вместе с тем усреднение данных, существенно разделенных в пространстве и времени, во многом затушевывает понимание процессов, определяющих формирование оптического состояния атмосферы. Поэтому проанализируем некоторые участки всего ряда данных отдельно.

На рис. 2 представлены пространственно-временные разрезы значений коэффициентов направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$ , наблюдавшихся при удалении от континента либо при приближении к нему. Можно заметить, что удаление от промышленно развитых районов Европы приводит к уменьшению коэффициентов рассеяния более чем в 5 раз. Вероятно, определенную часть этого изменения можно было бы отнести на изменение метеорологической и синоптической обстановки (период более 10 суток), однако подобная картина устойчиво воспроизводится и в более кратковременных циклах измерений (рис. 2 б, в).

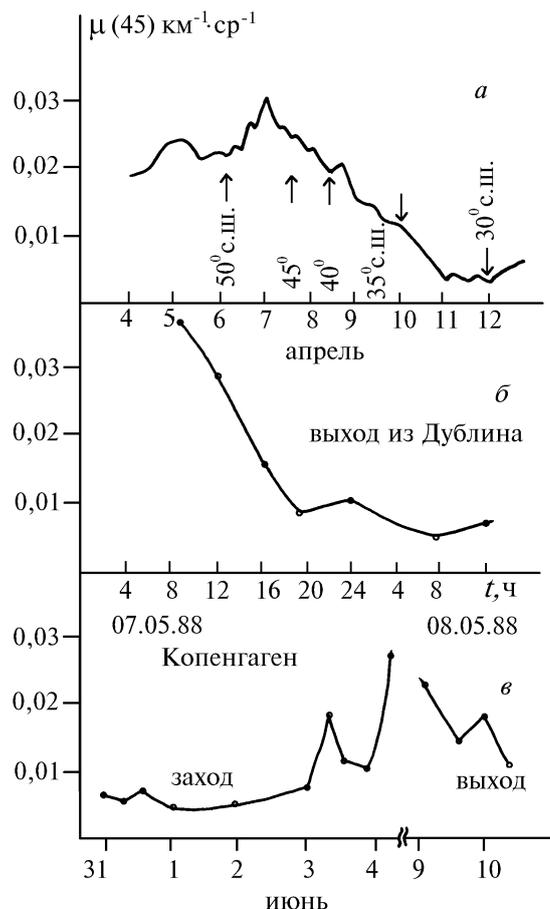


Рис. 2. Пространственно-временные разрезы величин коэффициентов направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$

Анализ микроструктурных данных показывает, что уменьшение коэффициента рассеяния при удалении от континента в основном обусловлено уменьшением абсолютного и относительного содержания частиц субмикронной фракции. Из рис. 3, где приведены усредненные нормированные функции распределения частиц по объемам для разных районов Атлантики, видно, что вклад континентального воздуха отчетливо проявляется в субмикронном диапазоне для спектров, полученных вблизи от берега, в то время как спектры размеров частиц аэрозоля в открытом океане являются типичными для большинства случаев.

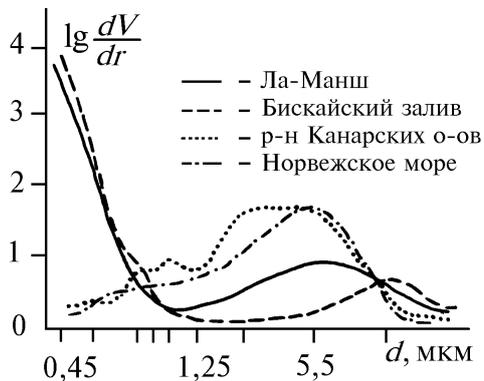


Рис. 3. Усредненные нормированные функции распределения частиц по объемам для разных районов Атлантики: сплошная линия – пролив Ла-Манш; штриховая – Бискайский залив; штрихпунктирная – Норвежское море; точки – район Канарских островов

Частицы среднедисперсной фракции, наблюдающиеся в условиях открытого океана, поступают в атмосферу в основном с морской поверхности в результате действия хорошо изученного пузырькового механизма образования частиц, а их содержание в первую очередь связано со степенью взволнованности морской поверхности и скоростью ветра [2–4]. Полученные нами экспериментальные данные не противоречат этим представлениям. Для иллюстрации влияния скорости ветра  $W$  на рост концентрации среднедисперсных частиц на рис. 4 приведены объемные распределения частиц, наблюдавшиеся в устойчивую погоду в течение одних суток.

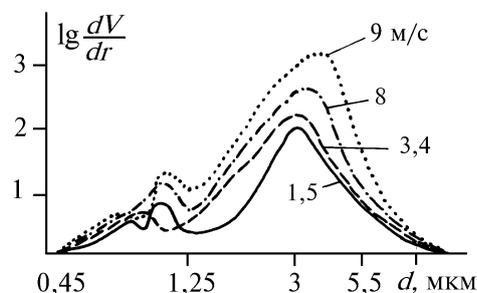


Рис. 4. Объемные распределения частиц при разных скоростях ветра

Среди анализируемых нами термо- и гирооптических характеристик возрастание относительного содержания морского аэрозоля (и, соответственно, существенная убыль числа частиц субмикронной фракции) наиболее отчетливо проявилось по параметру  $Q$ . Поскольку  $Q$  характеризует долю невыгорающего (неразлагающегося) остатка при температуре  $\sim 250^\circ\text{C}$ , то имеются все основания считать, что увеличение относительного содержания частиц солевого происхождения должно приводить к росту этого параметра [8]. Действительно, в нашем эксперименте такое увеличение было отмечено, и оно отражено на рис. 5, *a*, *б*, причем рис. 5, *a* соответствует разрезу  $\mu(45^\circ)$  на рис. 2, *a*, а рис. 5, *б* — разрезу на рис. 2, *в*. При уменьшении содержания субмикронных частиц доля невыгорающего остатка увеличивается от 10–20 до 40–80%. Отсюда следует полагать, что для наблюдений в океане параметр  $Q$  можно использовать для оценки доли континентальных (в данном случае субмикронных) и морских частиц.

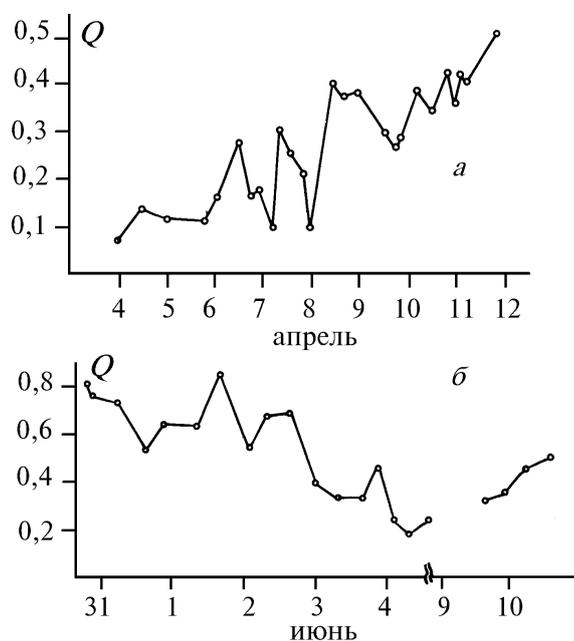


Рис. 5. Зависимость значений параметра  $Q$  от изменения относительного содержания солевых частиц при удалении от континента

Наши представления о летучести субмикронных частиц хорошо согласуются с данными авторов [8], которые исследовали температурную трансформацию функции распределения частиц по размерам в морских условиях. В то же время было обнаружено, что при измерениях вблизи Африканского континента определенный вклад в увеличение параметра  $Q$  дают среднедисперсные частицы пылевого происхождения, выносимые в атмосферу над океаном с пустыни Сахара.

Для иллюстрации того, что наиболее высоколетучие вещества характерны для субмикронных частиц (вероятнее всего, не морского происхождения), подробнее рассмотрим эпизод, наблюдавшийся в районе Канарских островов. В условиях почти полного штиля и очень высокой прозрачности атмосферы ( $\sigma \sim 0,08 \text{ км}^{-1}$ ) при затоке воздуха с Канарских островов в районе измерений наблюдалось повышение концентрации мелкодисперсных частиц (ситуация по ряду признаков была схожа с моментами формирования фотохимических дымок, которые мы до этого наблюдали в континентальных условиях). Временной разрез этого эпизода приведен на рис. 6. Для удобства сопоставления данные о  $\mu(45^\circ)$ , о концентрации частиц, гигро- и термооптических характеристиках приведены в относительных единицах. Из рис. 6 видно, что с увеличением содержания мелкодисперсных частиц (рост  $\mu(45^\circ)$ ) происходят возрастание параметра  $F$  и соответствующее падение величины  $Q$ .

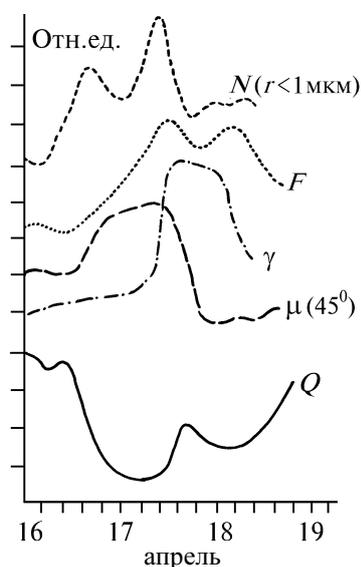


Рис. 6. Иллюстрация процесса образования и трансформации фотохимической дымки над океаном в районе Канарских островов.  $Q_{\min} \sim 0,14$ ;  $F_{\min} \sim 1,20$ ;  $\gamma_{\min} \sim 0,25$ ;  $Q_{\max} \sim 0,36$ ;  $F_{\max} \sim 1,84$ ;  $\gamma_{\max} \sim 0,60$

О том, что этот процесс связан именно с мелкодисперсными частицами аэрозоля, свидетельствует ход концентрации частиц с  $r < 1 \text{ мкм}$  (содержание частиц с  $r > 1 \text{ мкм}$  в этот период было очень мало и практически не менялось). Обращает на себя внимание и тот факт, что по мере развития этого аэрозольного образования при максимальных значениях  $F$  наблюдаются и максимальные значения параметра конденсационной активности  $\gamma$  ( $\gamma_{\max} \sim 0,6$ ), что во время океанских измерений нами отмечалось редко. После формирования максимальных значений  $F$  и  $\gamma$  (см. рис. 6) они сохраняются в течение нескольких часов, несмотря на снижение общего содержания субмикронных частиц, выявляемого по падению  $\mu(45^\circ)$ . Это, по-видимому, связано с пространственным растеканием образовавшейся дымки.

На первый взгляд несколько неожиданными являются регулярно регистрируемые над океаном невысокие значения  $\gamma$ . Однако это может быть объяснено следующими соображениями: предложенная Хенелом эмпирическая формула [7] связывает увеличение размера частиц с ростом относительной влажности воздуха  $RH$ , т.е.

$$r = r_0(1 - RH)^{-\varepsilon},$$

где  $r$  — радиус частицы;  $\varepsilon$  — параметр конденсационной активности для  $r$ . В диапазоне субмикронных частиц с  $r \sim \lambda$  коэффициент рассеяния  $\sigma$  пропорционален  $r^3$  [5], а для частиц  $r \gg \lambda$   $\sigma \sim r^2$ .

Следовательно, для субмикронных частиц  $\gamma$  показатель пропорционален  $3\varepsilon$ , а для крупных  $\sim 2\varepsilon$ . Таким образом, в случае, когда основной вклад в формирование коэффициента рассеяния вносят морские частицы среднedisперсной фракции, можно ожидать, что величина параметра конденсационной активности  $\gamma$  для коэффициента рассеяния будет связана с аналогичным параметром для радиуса частиц в виде  $\gamma \sim 2,5\varepsilon$ . Для частиц морской соли Хенелом указано значение  $\varepsilon \sim 0,19$  [7]. Но в его экспериментах исследовался рост частиц кристаллов морской соли, а в реальной атмосфере над океаном присутствуют частицы, рожденные из капель морской воды, которые при характерной относительной влажности морского воздуха не могут достичь состояния кристаллизации. Иными словами, эти частицы находятся в верхней части петли гистерезиса зависимости  $r$  от  $RH$  [9]. В этом случае величина  $\varepsilon$  будет меньше 0,19. Кроме того, мы имеем дело не с объемным коэффициентом рассеяния  $\sigma$ , а с коэффициентом направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$ , в котором с ростом относительной влажности воздуха снижается значение нормированной индикатрисы рассеяния  $f(45^\circ)$ . Следовательно, регистрируемые нами значения параметра конденсационной активности  $\gamma \sim 0,3$  вполне объяснимы.

Редкие проникновения континентального воздуха в районы измерений в открытом океане, как правило, приводили к определенному росту параметра  $\gamma$ . Вместе с тем небольшое число наблюдений таких эпизодов, в основном сопровождавшихся усилением ветра и, соответственно, одновременным повышением содержания морских частиц, во многом маскирующее проявление субмикронных частиц, пока не дает возможности достоверно обосновать это предположение и требует дальнейшей экспериментальной проверки с привлечением аппаратуры для измерения дисперсности частиц в субмикронном диапазоне.

К настоящему моменту достаточно хорошо известно влияние, которое оказывает континент на содержание грубо- и среднedisперсных частиц в атмосфере над океаном во время пылевых выносов из пустынных районов [3]. В экстремальных условиях вынос пыли существенно изменяет оптическое состояние атмосферы, и его вклад в районах, подверженных выносу, является преобладающим. В обычных условиях в этих географических районах выделить вклад пылевых частиц в формирование микроструктуры приводного аэрозоля представляется довольно сложной задачей.

Наши измерения в районе  $24\text{--}25^\circ\text{с.ш.}$  и  $16\text{--}18^\circ\text{з.д.}$  зафиксировали повышенное значение параметра  $Q \sim 0,8$ , которое в условиях практически штилевой погоды не удавалось объяснить присутствием большого количества частиц морской соли. Для проверки гипотезы об определенном вкладе пылевых частиц, выпадающих из верхнего яруса при наблюдавшемся направлении воздушного потока с Африки, нами был осуществлен пространственный разрез по  $24^\circ\text{с.ш.}$  к побережью Западной Сахары. Следует отметить, что значительных изменений в нефелометрических данных обнаружить не удалось, но наблюдалось более чем четырехкратное увеличение числа частиц с  $r > 1,5$  мкм, что иллюстрируется графиком на рис. 7 (здесь в милях указано расстояние от побережья).

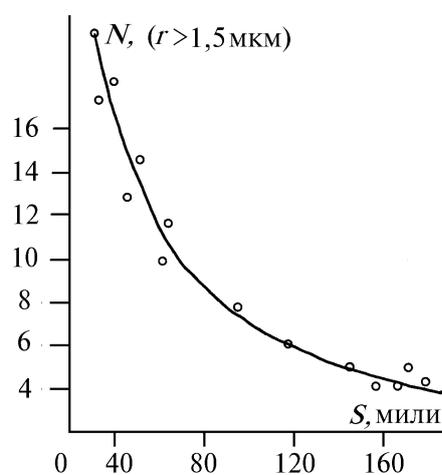


Рис. 7. Изменение содержания частиц пылевого происхождения в приводном слое в зависимости от расстояния до побережья Западной Сахары

Акцентируя внимание на роли влияния континента в формировании аэрозоля над океаном, нужно отметить, что основной массив экспериментальных данных получен для условий, когда можно быть вполне уверенным в морском происхождении большинства аэрозольных частиц. В таких ситуациях термо- и гидрооптические характеристики достаточно хорошо воспроизводятся, а их значения близки к величинам, приводимым в табл. 1.

Для того чтобы подчеркнуть схожесть результатов по измерениям термо- и гидрооптических параметров в морских дымках, в табл. 2 помещены данные, полученные в наиболее удаленных друг от друга контрастных географических зонах Атлантики (здесь же для сравнения даны средние значения параметров, полученные в континентальных условиях).

Таблица 2

| Район измерений        | Параметр |      |      |
|------------------------|----------|------|------|
|                        | $\gamma$ | $F$  | $Q$  |
| Северный тропик        | 0,30     | 1,41 | 0,47 |
| Северный полярный круг | 0,32     | 1,31 | 0,49 |
| Западная Сибирь        | 0,37     | 1,66 | 0,31 |

В заключение можно отметить, что влияние континентальных субмикронных частиц наблюдается на значительных удалениях от побережья и проявляется как в абсолютных значениях коэффициентов рассеяния, так и в термо- и гидрооптических характеристиках. Континентальные частицы среднедисперсного диапазона размеров в тропической части Атлантики могут иметь терригенную природу и связаны с выносом пыли из пустыни Сахара. В условиях открытого океана при отсутствии континентального воздействия микроструктурные, термо- и гидрооптические параметры хорошо воспроизводятся и имеют достоверные отличия от наблюдаемых на континенте.

1. Панченко М.В., Тумаков А.Г., Терпугова С.А. // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 40 – 46.
2. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 541 с.
3. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. М.: Наука, 1981. 104 с.
4. Woodcock A. H. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. N 27. P. 5316 – 5321.
5. Кабанов М.В., Панченко М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 3. Атмосферный аэрозоль // Томск: ТФ СО АН СССР, 1984. 189 с.
6. Patterson E.M., Kiang C.S., Delany A.C. et al. // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. N C 12. P. 7361 – 7376.
7. Hanel G. // Adv. in Geophys. 1976. V. 19. P. 73 – 188.
8. Clarke A.D., Ahlquist N.C., Covert D.S. // J. Geophys. Res. V. 92. N D4. P. 4179 – 4190.
9. Батчер С., Чарлсон Р. Введение в химию атмосферы. М.: Мир, 1977. 270 с.

Институт оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
18 апреля 1994 г.

**M. V. Panchenko, A. G. Tumakov. Investigation of Thermo- and Hygrooptical Characteristics of Atmospheric Aerosol above the Atlantic Ocean.**

The results of investigation of aerosol in the atmospheric layer adjacent to water above the Atlantic Ocean are presented. The measurements had been performed using a photometer of particles and a nephelometer equipped with thermo- and hygroactuators of aerosol. The influence of the continent upon formation of optical and microphysical properties of aerosol above the Ocean is analysed. A variation in proportion of submicron- and medium-sized particles is shown to be followed with a low by a change of thermo-optical parameters of aerosol. A good reproducibility of these parameters for aerosol of marine origine is remarked.