

**М.В. Панченко, С.А. Терпугова, А.Г. Тумаков,
Б.Д. Белан, Т.М. Рассказчикова**

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ САМОЛЕТНЫХ НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ

В статье обсуждаются методические вопросы, связанные с использованием самолетной нефелометрической установки для исследования оптических свойств субмикронного аэрозоля. Проведены оценки возможных искажений концентрации и функции распределения частиц по размерам, возникающих при заборе и транспортировке пробы к рассеивающему объему. Представлены результаты интеркалибровочных экспериментов, которые свидетельствуют об отсутствии неучтенных погрешностей калибровки и правильности выбора коэффициента перехода от угловых к интегральным характеристикам рассеяния. Оценивается качество и применимость накопленного материала для анализа факторов изменчивости оптических характеристик аэрозоля в региональном масштабе.

Введение

Атмосферный аэрозоль является неотъемлемой составной частью атмосферы и играет существенную роль в формировании ее оптического состояния. К настоящему времени накоплен большой объем сведений об оптических и микрофизических характеристиках аэрозоля, основных процессах его образования и трансформации практически во всем диапазоне высот, где присутствие частиц сказывается на оптических свойствах атмосферы (например, [1 – 5]).

В то же время сильная пространственно-временная изменчивость свойств аэрозоля и их связь со всеми атмосферными процессами обуславливает необходимость углубленного изучения всего многообразия состояний с целью совершенствования динамических моделей оптических характеристик, необходимых для решения задач прогноза погоды и климата, для оценки эффективности систем, работающих через атмосферу в оптическом диапазоне.

С точки зрения <аэрозольной погоды и климата> нижняя тропосфера, где сосредоточено более 80% оптически активных частиц, представляется наиболее сложным объектом для изучения. Именно этот диапазон высот в основном подвержен воздействию большого количества источников частиц, паров аэрозолеобразующих соединений и процессов, определяющих сток аэрозоля из атмосферы [1]. И именно нижняя тропосфера характеризуется наибольшей пространственно-временной изменчивостью практически всех параметров под влиянием сложного комплекса геофизических, синоптических и метеорологических факторов.

Эти причины послужили основанием для постановки широкомасштабных экспериментов, которые были начаты в Институте оптики атмосферы СО РАН в 1986 г. по программе <Вертикаль> [6].

Данная статья, которая открывает предполагаемую серию публикаций по анализу нефелометрических данных, полученных с 1986 по 1988 г. с борта самолета-лаборатории, посвящена рассмотрению методических аспектов измерений и формированию массива полученных данных.

Уделяя первоочередное внимание методическим вопросам, авторы руководствовались следующими соображениями. Дальнейшее развитие и совершенствование динамических моделей атмосферного аэрозоля на сегодняшнем этапе требует углубленного изучения факторов, определяющих изменчивость аэрозольных характеристик. В настоящее время измерениями различных параметров занимается большое число исследовательских групп. Объем публикаций, посвященных атмосферному аэрозолю, неуклонно растет.

Тем не менее пренебрежение методическими аспектами, неверная интерпретация роли частиц различных диапазонов размеров в оптических проявлениях, или, что наиболее часто встречается, недостаточная статистическая обеспеченность данных и необоснованное распространение результатов, полученных в отдельном географическом пункте, на региональный уровень, которые наблюдаются в публикациях, зачастую создают ложное представление о случайной изменчивости аэрозольных состояний, не поддающихся учету и прогнозу. Или

другая крайность – эти же причины в ряде публикаций приводят авторов к неверным выводам о существовании хорошо выраженных связей между аэрозольными характеристиками и тем или иным атмосферным фактором. Эти обстоятельства являются определенным препятствием в развитии оптических и микрофизических моделей атмосферного аэрозоля.

Субмикронные частицы тропосферного аэрозоля (а именно они и доступны для изучения с помощью применяемого нами нефелометра) обладают большим временем жизни. Следовательно, их состояние и изменчивость находятся под воздействием атмосферных процессов большого диапазона пространственно-временных масштабов (от локальных до, по крайней мере, региональных).

Изучение атмосферных явлений регионального масштаба требует проведения либо многоточечных наблюдений, либо использования высококомобильных средств, способных в ограниченное время охватить обширные территории. Учитывая, что понимание процессов изменчивости субмикронной фракции аэрозольных частиц невозможно без сведений о трехмерной картине их распределения, в качестве основного носителя измерительной аппаратуры был выбран самолет-лаборатория.

Аппаратурно-методические вопросы

Для исследования оптических характеристик аэрозоля авторами была создана бортовая нефелометрическая установка на базе фотоэлектрического нефелометра ФАН, позволяющая измерять значения коэффициентов направленного светорассеяния для угла $\varphi = 45^\circ$ для нескольких длин волн в видимой области спектра [7]. Параллельно оптическим измерениям в течение всего полета регистрировались метеорологические параметры атмосферы: температура и относительная влажность воздуха.

Нефелометр располагался внутри салона самолета, что позволило снять все ограничения на работу в дневное время. Главным же преимуществом используемой схемы размещения по сравнению с бортовыми нефелометрами с открытым рассеивающим объемом [8, 9] является возможность прямого контролируемого воздействия на аэрозоль [7], что позволяет расширять информативность эксперимента и изучать влияние метеорологических факторов на его оптические свойства.

Однако такое расположение установки создает ряд трудностей, заключающихся в искажении характеристик исследуемого воздуха в процессе забора и транспортировки к рассеивающему объему.

В бортовой установке забор анализируемой пробы осуществлялся непрерывно прямым наддувом из набегающего воздушного потока. Принципиальным методическим моментом при этом является соблюдение условия изокинетичности, для чего необходимо выполнение определенных требований к геометрии заборного устройства [10]. Применяемый нами заборник был изготовлен из тонкостенной трубки с внутренним диаметром 10 мм и располагался перед винтами самолета на расстоянии около 0,3 м от фюзеляжа, т. е. в невозмущенной зоне. Радиус загиба заборной трубки был выбран таким образом, чтобы избежать инерционного осаждения частиц с размерами $d \sim 10$ мкм на ее стенках.

Возможные изменения концентрации частиц при движении по воздухозаборному тракту связаны, во-первых, с диффузионным и седиментационным осаждением их на стенках и, во-вторых, с инерционным осаждением на изгибах трубки, которых не удалось полностью избежать в конструкции воздухоподводящих путей. Оценки, сделанные в соответствии с [11, 12], показывают, что потери частиц субмикронного диапазона размеров в используемой конструкции не превышают 1%, но для частиц размером $d \sim 10$ мкм потери уже могут достигать десятков процентов.

Существенная причина, которая также уменьшает информативность эксперимента относительно частиц грубодисперсного диапазона, связана с небольшим рассеивающим объемом в установке.

При предлагаемом способе размещения измерительной установки неизбежна осушка исследуемого аэрозоля в воздухозаборном тракте вследствие разницы между температурой воздуха за бортом и в салоне самолета (которая была уменьшена с помощью теплоизоляции), а также непосредственно в рабочем объеме, где камера нефелометра дополнительно подогревается осветительной лампой. Следует подчеркнуть, что в нашем эксперименте влияние осушки

можно учесть при обработке результатов, поскольку в каждом цикле измерений для разных высот осуществлялась запись гигрограмм [7], т. е. зависимостей коэффициента рассеяния от относительной влажности воздуха f в диапазоне от 0 до ~90–95%. Параллельно с нефелометрическими измерениями регистрировались метеорологические параметры (температура и относительная влажность) воздуха за бортом самолета и непосредственно в рассеивающем объеме, на основании которых и проводилось восстановление реальных значений коэффициента рассеяния *in situ*.

При работе в широком диапазоне высот, где вклад аэрозольных частиц может быть сравнимым, а зачастую составлять только доли от молекулярного рассеяния, одним из важных моментов, обеспечивающих получение достоверной информации об изменчивости оптических характеристик, является вопрос о калибровке прибора в абсолютных единицах. Для калибровки нефелометра была разработана методика, основанная на регистрации коэффициентов рассеяния чистого воздуха на разных высотах [7]. Для проверки точности и надежности этой методики в лабораторных условиях была проведена калибровка прибора по молекулярному рассеянию химически чистых газов. В качестве рабочих веществ использовались He, N₂, CO₂, Ar, Kr и Xe, значения коэффициентов рассеяния которых известны [13]. Результаты калибровки показаны на рис. 1, а, где по оси абсцисс приведено отношение коэффициентов молекулярного рассеяния газа и N₂, а по оси ординат – нефелометрический сигнал. Таким образом, шкала прибора была проградуирована в абсолютных единицах коэффициента рассеяния и определен фон камеры нефелометра. Чувствительность установки к определению коэффициентов аэрозольного рассеяния составляет ~10 – 15 % от уровня молекулярного рассеяния на заданной высоте.

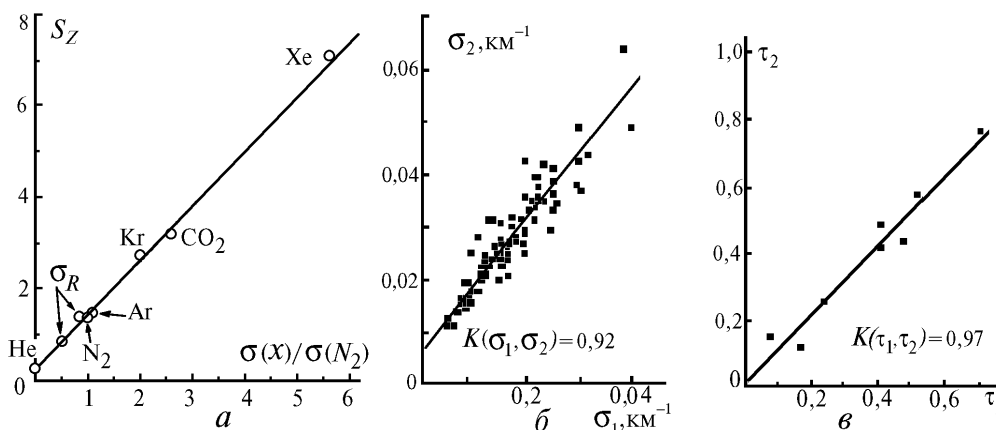


Рис. 1. График калибровки нефелометрической установки по молекулярному рассеянию чистых газов (σ_R – коэффициент рассеяния чистого воздуха при давлении 760 и 400 мм рт. ст.) – а; интеркалибровка аналога бортовой установки (σ_1) с нефелометром СНУ (ИФА РАН) (σ_2) по наземным измерениям коэффициента рассеяния (K – коэффициент корреляции) – б; сопоставление значений оптической толщи атмосферы, измеренной наземным методом (τ_2) и полученных интегрированием вертикального профиля коэффициента рассеяния в диапазоне высот от 0 до 5 км (τ_1) – в

Следующий вопрос, который необходимо обсудить, это переход от измеряемого нефелометром коэффициента направленного рассеяния $\mu(45^\circ)$ к объемному коэффициенту рассеяния σ , поскольку именно эта величина необходима для большинства научных и прикладных задач. Принимая во внимание тесную корреляционную связь между $\mu(45^\circ)$ и σ [14, 15], объемный коэффициент рассеяния можно оценить по формуле

$$\sigma = K \mu(45^\circ). \quad (1)$$

Следует отметить, что выбор конкретного значения константы перехода не должен вносить значительных искажений в динамику измеряемой величины, но для каждого конкретного случая может приводить к систематической ошибке определения σ . Анализ многочисленных экспериментальных и расчетных данных [14, 15, 16, 17] показывает, что среднее значение для

большинства атмосферных дымок и соответствующих им широких логнормальных распределений K равно 7,5. Для обработки результатов мы использовали K , равное 9. Опыт интеркалибровки с базовыми измерениями коэффициентов ослабления [15, 18] показал, что потеря определенного вклада частиц грубодисперсного диапазона размеров при измерениях нефелометрическим способом приводит к занижению величины коэффициента рассеяния на 10 – 20%. Следовательно, выбор константы перехода, превышающей рассчитанное среднее значение в 1,1 – 1,2 раза, вполне оправдан. Серия комплексных экспериментов, проведенных коллективами ИОА СО РАН и ИФА РАН в Одессе в 1987 г. и в Душанбе в 1989 г., позволила осуществить интеркалибровку различных приборов, в том числе и нашей бортовой нефелометрической установки. В этих экспериментах параллельно осуществлялись измерения на разных нефелометрических установках [19], самолетное зондирование вертикального профиля коэффициента рассеяния и наземные измерения вертикальной спектральной толщи атмосферы [19, 20]. Результаты сопоставления, представленные на рис. 1, б, в, указывают на хорошее согласие данных, что свидетельствует о правильности соответствующих калибровок и выборе коэффициента перехода от угловых к интегральным характеристикам рассеяния.

При использовании малого рассеивающего объема неизбежно встает вопрос о том, насколько измеряемые оптические параметры являются характерными для данных условий наблюдений и могут быть распространены на большие объемы атмосферного воздуха. Поскольку в каждом полете на разных высотах в течение определенного времени (5–10 мин) осуществлялась регистрация пространственной изменчивости нефелометрического сигнала, то при анализе и обработке всегда имелась возможность оценить стабильность атмосферно-оптической ситуации.

Полученные нами результаты позволили убедиться, что, несмотря на небольшой рассеивающий объем, практически во всех стабильных синоптических и метеорологических условиях наблюдаются лишь незначительные вариации коэффициентов рассеяния, что свидетельствует о существенной однородности оптических свойств субмикронного аэрозоля в пространстве. Для иллюстрации этого факта на рис. 2 приведены результаты зондирования вертикального профиля коэффициентов рассеяния, полученные при взлете и посадке самолета с интервалом в 1 ч (наблюдалась слабая изменчивость регистрируемых профилей метеопараметров).

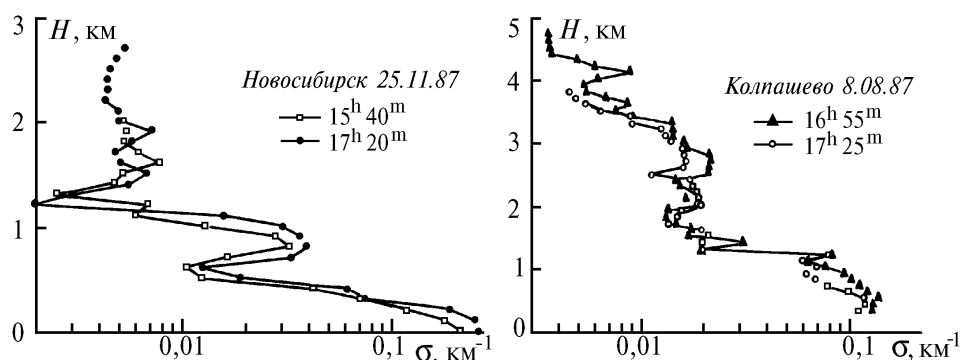


Рис. 2. Вертикальные профили коэффициента рассеяния, полученные в стабильных синоптических условиях с интервалом ~1 ч

Обсуждение массива данных, полученных над территорией Западной Сибири

Непрерывная регистрация вертикальных профилей проводилась в режиме взлета и посадки самолета (или ее имитации). Время записи профиля в диапазоне высот от 0 до 5 км составляло 30 – 40 мин. При обработке данных стандартная оцифровка осуществлялась через каждые 100 м высоты. При наличии заметных особенностей оцифровка проводилась более подробно, а максимальные и минимальные значения обрабатываемой величины привязывались к сетке высот с шагом 50 м. Определенное число профилей было синтезировано по данным измерений, проводимых в течение одного полета во время набора высоты или снижения между работой на отдельных горизонтальных площадках. Такие отрезки имеют высоту от 500 м до 2 км, а интервал между их записью составляет от 30 мин до 1 ч. Объединение отдельных участков вертикального профиля в один проводилось при условии, что за время работы на пло-

садке не происходило смены синоптической ситуации (расстояние, проходимое самолетом за это время, может достигать 200 км), а регистрируемые аэрозольные и метеорологические параметры не претерпели заметных изменений.

Таким образом, для Западно-Сибирского региона был сформирован массив из 602 вертикальных профилей, измеренных во все сезоны года в разнообразных метеорологических и синоптических ситуациях. География полетов в исследуемом регионе и объем данных, полученных в окрестности каждого пункта измерений, представлены на рис. 3.

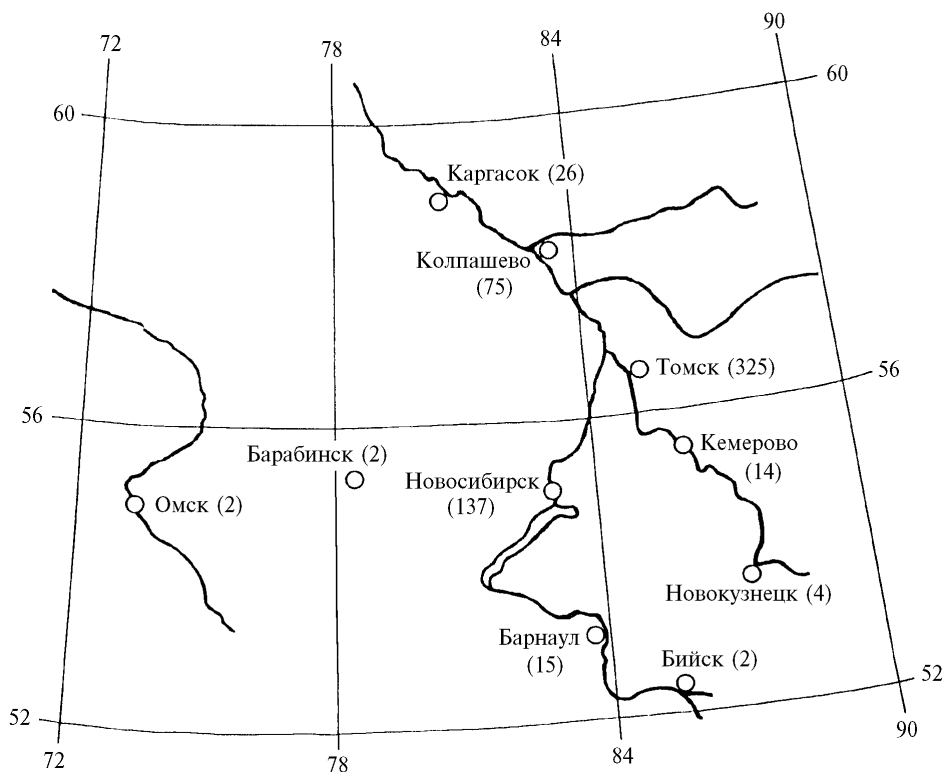


Рис. 3. География полетов самолета-лаборатории для Западно-Сибирского региона в 1986 – 1988 гг. и объем полученных данных (в скобках)

Стремясь к изучению аэрозольных процессов, характерных для региона в целом, при формировании массива данных наблюдений мы исключили результаты измерения непосредственно в «шапках» городов и в районах крупных промышленных центров. Понятно, что полностью избежать прямых антропогенных воздействий не удалось. Здесь имеется в виду воздействие конкретного населенного пункта, рассматриваемого как локальный источник аэрозоля, на измеряемую в данный момент характеристику, а не то обстоятельство, что он вносит определенный вклад в формирование среднерегионального аэрозольного фона. Особенно это обстоятельство должно сказаться на данных, регистрируемых в приземном слое атмосферы, т. к. большинство из них получено при взлете или посадке в аэропортах, где влияние близ расположенного населенного пункта может сказываться существенным образом.

Отметим, что основные черты стратификации вертикальных профилей коэффициента рассеяния в разных географических пунктах одного региона, находящихся в условиях единой устойчивой воздушной массы, как правило, оказываются близкими. Это иллюстрируется рис. 4, где приведены результаты зондирования, полученные в различных географических пунктах, находящихся в условиях одной и той же воздушной массы. Наблюдаемые преимущественно в приземном слое различия обусловлены, по-видимому, местными источниками, в том числе антропогенными.

При анализе геофизических процессов и явлений неизбежно возникает вопрос о репрезентативности данных, полученных на ограниченном отрезке времени. Более того, аппаратурная и методическая специфика различного рода измерений в реальной атмосфере может в за-

метной степени сместить наблюдательный ряд в какой-либо ограниченный диапазон погодных ситуаций. В частности, фотометрические измерения оптических характеристик атмосферы по естественным источникам и лидарное зондирование вертикальных профилей аэрозоля проводятся в малооблачных условиях (как правило, антициклональных), тем самым оставляя в стороне большое число иных атмосферно-оптических реализаций.

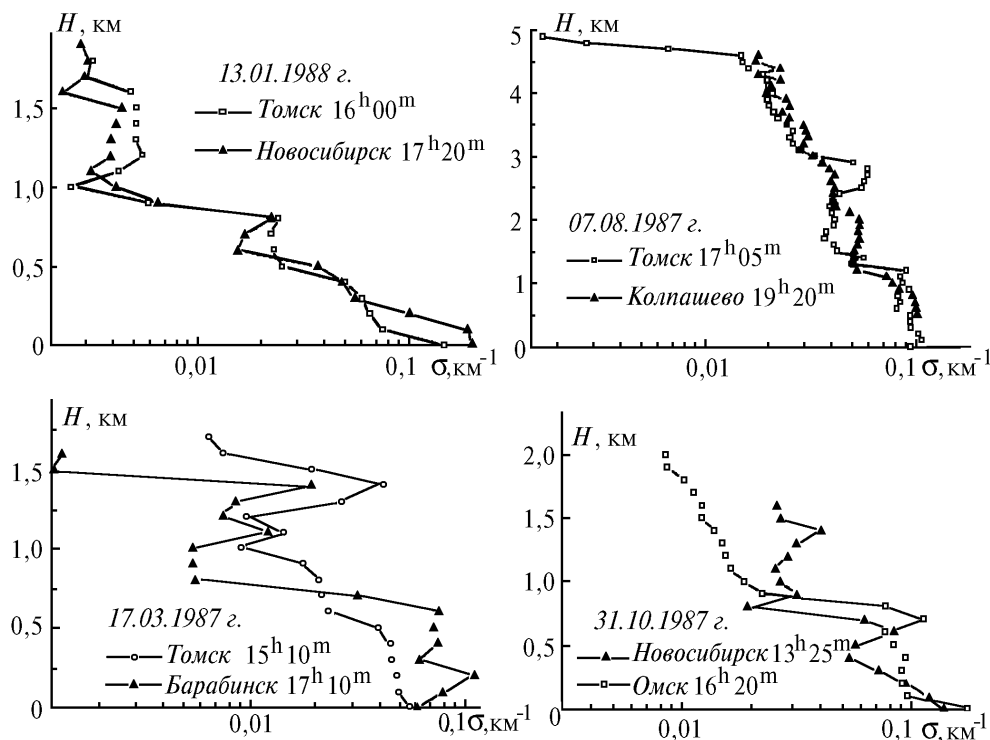


Рис. 4

Самолетный метод зондирования в значительной мере свободен от указанных ограничений. При планировании эксперимента была поставлена задача охватить измерениями все многообразие погодных ситуаций и обеспечить максимально возможную регулярность и длительность наблюдений. Исключение составляли лишь достаточно редкие случаи плотных туманов, мощных гроз и шквального ветра.

Тем не менее основной массив анализируемых в работе данных получен в ограниченный период времени в течение 2,5 лет с неодинаковой частотой наблюдений для разных синоптических и метеорологических ситуаций. Следовательно, прежде чем приступить к анализу наблюдаемых оптических характеристик аэрозоля, необходимо оценить геофизическую значимость и качество экспериментального материала. Поскольку этот вопрос является ключевым, а сведения о длинных рядах наблюдений вертикальных профилей аэрозольных характеристик для данного региона отсутствуют, попробуем оценить <типичность> исследуемого массива с точки зрения стандартных метеорологических и синоптических признаков.

Анализ проводился с использованием разработанной информационно-поисковой системы [21], позволяющей оперативно находить и компоновать подмассивы по заранее заданным критериям.

В соответствии с климатическим определением сезонов года, характерных для исследуемого региона [22], было проведено разбиение всего массива данных наблюдений по сезонам. Внутри каждого из сезонов проводилась классификация по типам воздушной массы, барическим образованиям, погодным условиям. В отдельный подмассив в каждом из сезонов были выделены ситуации, характеризующиеся прохождением атмосферных фронтов, доля которых составила 25% от общего числа реализаций. Временной ход разбиения на сезоны и частоты повторяемости синоптических признаков для каждого из сезонов в анализируемом массиве представлены на круговой диаграмме на рис. 5. Здесь же в скобках для зимнего и летнего пе-

риодов приведены для сравнения средние многолетние данные [22] о частотах повторяемости различных барических образований. Число погодных ситуаций в Западной Сибири, определяемых континентальным умеренным типом воздушной массы, по средним многолетним данным [22] составляет 59 – 62% для каждого из сезонов, чему неплохо соответствуют приводимые на рис. 5 данные нашего массива. В хорошем согласии со средними многолетними наблюдениями находятся и анализируемые частоты повторяемости различных типов барических образований. Небольшые различия в сравниваемых частотах, по-видимому, обусловлены тем обстоятельством, что в отличие от [22] мы в каждом из сезонов выделили фронтальные процессы в отдельные подмассивы.

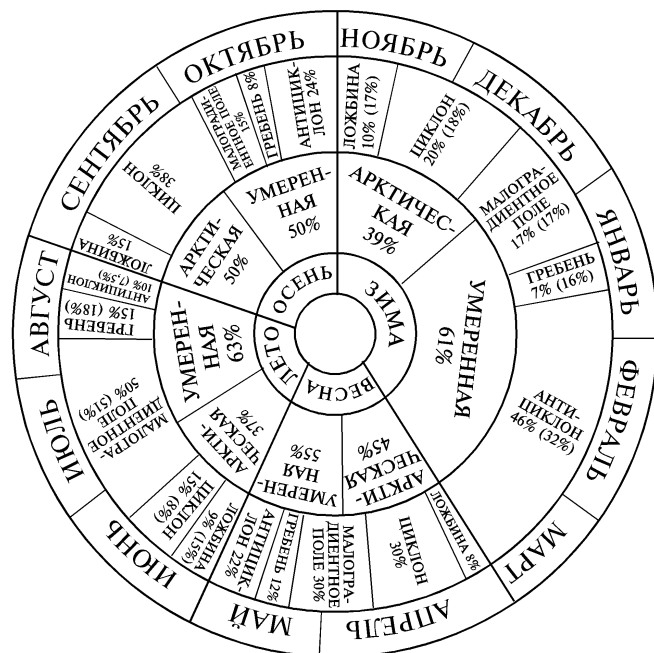


Рис. 5. Сопоставление сезонной повторяемости воздушных масс и барических образований в анализируемом массиве со средними многолетними данными

Аналогично было проведено сравнение вертикальных профилей измеренных метеопараметров со средними многолетними данными аэрологического зондирования [23]. На рис. 6, а представлены средние для нашего массива вертикальные профили температуры для всех сезонов, а на рис. 6, б аналогичные зависимости для удельной влажности воздуха. Крестиками приведены данные аэрологического зондирования, осредненные по станциям, находящимся в анализируемом районе работ самолета-лаборатории (Александровское, Барабинск, Новосибирск, Омск).

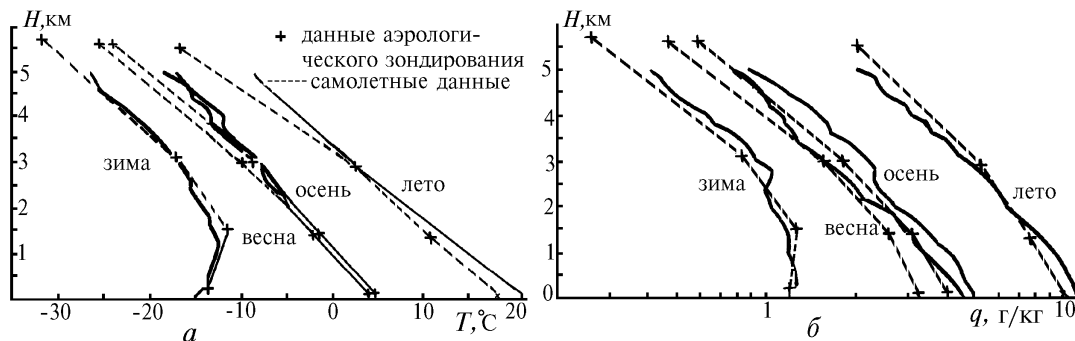


Рис. 6. Сопоставление полученных в эксперименте среднесезонных профилей метеопараметров атмосферы с данными аэрологического зондирования: а – температура; б – удельная влажность воздуха, —+— данные аэрологического зондирования, — — самолетные данные

Хорошее согласие проанализированных синоптических и метеорологических характеристик атмосферы за период наших наблюдений со среднеклиматическими величинами для данного региона позволяет надеяться, что полученный нами массив оптических параметров субмикронного аэрозоля и обсуждаемые в последующих работах факторы изменчивости также отражают наиболее характерные черты, присущие исследуемому региону в целом.

1. Розенберг Г. В., Горчаков Г. И., Георгиевский Ю. С., Любовцева Ю. С. // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216 – 256.
2. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
3. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Поздняков Д. В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
4. Ивлев Л. С., Андреев С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
5. Кабанов М. В., Панченко М. В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. III. Атмосферный аэрозоль. Томск: ТФ СО АН СССР, 1984. 189 с.
6. Результаты комплексных экспериментов <Вертикаль-86> и <Вертикаль-87> / Сб. статей. Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. 104 с.
7. Панченко М. В., Тумаков А. Г., Терпугова С. А. // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1987. С. 40 – 46.
8. Гришин А. И., Матвиенко Г. Г. // Там же, С. 47 – 53.
9. Максимюк В. С., Ганташев М. В., Татьянин С. В. / IV Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере (Тезисы докл.). Томск: ТФ СО АН СССР, 1981. С. 52 – 55.
10. Назаров Л. Е. // Труды ИЭМ, 1985. Вып. 9(124). С. 7 – 81.
11. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: Наука, 1955. 351 с.
12. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 429 с.
13. Фабелинский И. Л. Молекулярное рассеяние света. М.: Наука, 1965. 511 с.
14. Горчаков Г. И., Исаков А. А., Свириденков М. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. N 12. С. 1261 – 1268.
15. Кабанов М. В., Панченко М. В., Пхалагов Ю. А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
16. Козлов В. С., Фадеев В. Я. Таблицы оптических характеристик светорассеяния мелкодисперсного аэрозоля с логнормальным распределением по размерам. Томск, 1981. 64 с. (Препринт / Ин-т оптики атмосферы СО АН СССР, N 31).
17. Яновичкий Э. Г., Думанский З. О. Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц. Киев: Наукова думка, 1972. 124 с.
18. Гришин А. И., Панченко М. В., Пхалагов Ю. А. // Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 163 – 169.
19. Результаты комплексного эксперимента <ОДАЭКС-87> (Сб. статей). Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. 151 с.
20. Исаков А. А., Лукшин В. В., Панченко М. В. и др. // V Всесоюз. совещание по атмосферной оптике (Тезисы докл.). Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1991. С. 30.
21. Герасимова Л. А., Панченко М. В., Терпугова С. А., Теущев В. Д. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 7. С. 770 – 773.
22. Климат Томска / Под ред. С. Д. Кошинского, Л. И. Трифионовой, Ц. А. Швер. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 176 с.
23. Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над территорией СССР / Под ред. И. Г. Гутермана. М.: Гидрометеоздат, 1980.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
27 апреля 1994 г.

M. V. Panchenko, S. A. Terpugova, A. G. Tumakov, B. D. Belan,
T. M. Rasskazchikova. **Some Aspects of a Technique for Airborne Nephelometric Studies of the Tropospheric Aerosol on a Regional Scale.**

In this paper we discuss in detail some aspects of a technique for airborne studies of submicron aerosol using a nephelometric device. In particular, we analyze possible deviations of measured number density and size-spectrum from actual ones that can occur at aerosol sampling and transportation to scattering volume. We also present in this paper results of intercalibration measurements, which confirm the validity of estimations of the calibration uncertainties. These results also show that the value of the coefficient in the relation between the angular and integral characteristics of light scattering has been chosen correctly.

The experimental material compiled is assessed from the standpoint of its quality and applicability to analysis of the variability of aerosol optical characteristics on a regional scale.