

К.Я. Кондратьев

От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля.

2. Полевые наблюдательные эксперименты. Америка, Западная Европа и высокие широты

Центр экологической безопасности РАН/ Северо-западный международный центр чистого производства, г. С.-Петербург

Поступила в редакцию 7.06.2004 г.

Выполнен анализ результатов комплексных исследований свойств атмосферного аэрозоля, полученных в ходе осуществления полевых наблюдательных экспериментов в Америке, Западной Европе и в высоких широтах.

Введение

В первой части обзора обсуждены результаты исследований свойств аэрозоля, полученные в ходе осуществления полевых наблюдательных экспериментов в Африке и в Азии [4]. Целью второй части является анализ данных, относящихся к Америке и Западной Европе и к высоким широтам. Прежде чем обратиться к обсуждению этих данных, рассмотрим некоторые общие тенденции в развитии исследований атмосферного аэрозоля. Помимо осуществления комплексных полевых наблюдательных экспериментов, эти общие тенденции включают: 1) продолжающееся совершенствование методик наблюдений (как обычных, так и спутниковых) при большом внимании к дистанционному зондированию; 2) развитие глобальной сети аэрозольного мониторинга (в первую очередь с использованием многоканальных солнечных фотометров и лидарного зондирования); 3) обоснование более адекватных моделей атмосферного аэрозоля [1, 5, 30, 64, 74–76].

Дистанционное зондирование

В развитии наблюдательных средств важное место занимают методики лидарного зондирования атмосферы.

Согласно третьему отчету МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по проблеме изменений климата) в прогнозах глобального потепления (даже с использованием наиболее совершенных моделей климата) все еще сохраняется много неопределенностей [3]. До сих пор существует, в частности, большая неопределенность в оценках радиационного возмущающего воздействия (РВВ), определяемая неадекватностью данных спутнико-

вых наблюдений радиационного баланса Земли (РБЗ) и отсутствием достаточно надежного понимания роли облаков, аэрозоля и водяного пара (а также взаимодействие между ними) в формировании РВВ.

В этом контексте Национальное агентство Японии по космосу (NASDA) и японская Исследовательская лаборатория по средствам связи (CRL) в кооперации с Европейским агентством по космосу (ESA) начали осуществление фазы А проекта Earth CARE. Главными задачами этого проекта являются спутниковые наблюдения трехмерных полей характеристик аэрозоля и облаков, а также компонентов РБЗ, и дальнейшие исследования влияния аэрозоля и облаков на формирование радиационного баланса и РВВ.

Описанный Kimura и др. [40] спутник Earth CARE включает: 1) радиолокатор для зондирования облаков (RADAR-CPR); 2) лидар для зондирования атмосферы (LIDAR-ATLID); 3) многоспектральный видеорадиометр (MSI); 4) широкополосный радиометр (BBR); 5) Фурье-спектрометр (FTS). Доплеровский радиолокатор на частоте 94 ГГц имеет антенну диаметром 2,5 м и обладает чувствительностью, равной – 38 дБ. Вертикальное и горизонтальное разрешение – 100 м и 1 км. Спектральный диапазон длин волн Фурье-спектрометра равен 5700–25000 нм при разрешении $0,5 \text{ см}^{-1}$, а поле зрения $10 \times 10 \text{ км}$. Запуск спутника Earth CARE запланирован на 2008 г. при времени жизни спутника 2 года. Фаза А должна быть завершена в конце 2003 г.

Bravy и др. [15] проанализировали возможности использования многочастотного химического импульсного DF-лазера (10 равномерно распределенных каналов в интервале длин волн 3600–

4200 нм) с целью дистанционного зондирования химического состава и микроструктуры атмосферного аэрозоля и кратко обсудили опыт испытаний аппаратуры в лабораторных условиях.

Решение задачи дистанционного зондирования свойств аэрозоля по данным спутниковых спектральных измерений уходящей коротковолновой радиации (УКР) требует разделения вкладов в формирование УКР, обусловленных подстилающей поверхностью и различными оптически активными компонентами атмосферы. Естественно, что такого рода разделение легче всего осуществить при наличии темной подстилающей поверхности, т.е. водной поверхности. Именно поэтому были предприняты интенсивные усилия для решения задачи восстановления аэрозольной оптической толщины (АОТ) над океаном по данным наблюдений УКР в близкой ИК-области спектра. Использование сходных алгоритмов восстановления позволило определять АОТ над поверхностями как воды, так и суши по данным наблюдений в УФ-интервале длин волн.

При обработке данных спутниковых наблюдений в области более длинных волн важную роль сыграло использование данных спутника ATSR-2 для двух направлений визирования. В этой связи де Leeuw и др. [49] обсудили результаты испытаний «двойного» алгоритма по данным наблюдений над Индийским океаном (INDOEX) и Южной Африкой (SAFARI), которые были вполне положительными. Подобные алгоритмы разработаны также для обработки данных аппаратуры AATSR и SCIAMACHY (спутник ENVISAT) и OMI (спутник EOS-TERRA).

Gassó и Hegg [29] предложили методику восстановления массовой концентрации аэрозоля (AMC) и счетной концентрации облачных ядер конденсации (CCNC) по данным наблюдений при помощи спутникового видеорадиометра умеренного разрешения MODIS. Основу методики восстановления составляет использование соотношения прямой пропорциональности между AMC и оптической толщиной облаков при использовании восстанавливаемых по данным MODIS эффективного радиуса капель r_{eff} и параметра η , определяющего вклад интенсивности радиации, соответствующий аккумуляционной моде аэрозоля, в суммарную интенсивность радиации, а также относительной влажности RH окружающей среды при условии постоянства химического состава аэрозоля. Параметризация концентрации CCNC в зависимости от восстанавливаемого объема аэрозоля позволяет определить концентрацию CCNC.

Сравнение с данными прямых (*in situ*) измерений показало, что надежность восстановления в условиях сухой окружающей среды (при наличии пылевого аэрозоля) повышается, если учесть зависимость постоянной пропорциональности от r_{eff} и η , полученных для того же пикселя. При высокой влажности применение новой методики не дает убедительных результатов ввиду трудности надежного учета вертикального профиля относительной влаж-

ности. Практически такие же результаты обеспечило применение другой методики восстановления, разработанной для обработки данных самолетного имитатора MAS, хотя последняя методика оказалась несколько более надежной.

Von Hoyningen-Huene и др. [37] предложили методику восстановления аэрозольной оптической толщины атмосферы над поверхностью суши по данным спутниковых наблюдений интенсивности УКР в надире, которая предназначается для обработки данных аппаратуры SCIAMACHY и MERIS, установленной на спутнике ENVISAT. Основу методики составляет использование таблиц априорных данных (LUT), характеризующих зависимость АОТ от отражательной способности системы «подстилающая поверхность — атмосфера» в области длин волн меньше 0,67 мкм. Источником информации об отражательной способности служат результаты вычислений УКР с учетом спектрального альbedo подстилающей поверхности. Использована модель спектрального альbedo, опирающаяся на данные об альbedo оголенной поверхности почвы и растительного покрова, полученные с учетом спутниковой информации о нормированном вегетационном индексе (NDVI). Испытания адекватности методики осуществлены по данным аппаратуры SeaWiFS об УКР и наземного полевого наблюдательного эксперимента LACE по оптическим параметрам атмосферы. Применительно к данным для коротковолновых каналов SeaWiFS (интервал длин волн 412–510 нм) получено согласие результатов восстановления АОТ и соответствующих данных наземных наблюдений в пределах расхождений, не превосходящих 20%.

Fussen и др. [28] обосновали комплексную методику дистанционного зондирования атмосферы, основанную на использовании сочетания оператора обращения, применяемого при наличии значительного уровня шумов по данным наблюдений, и оптимального оценивания. Успех реализации подобной комплексной методики зависит от полноты имеющейся априорной информации о состоянии атмосферы. В работе [28] приведен пример обработки «затменных» данных дистанционного зондирования аэрозоля, иллюстрирующий робастность предлагаемой методики.

Holzer-Popp и др. [36a] описали новую методику восстановления аэрозольной оптической толщины, названную синергетическим восстановлением свойств аэрозоля (SYNAER). Эта методика опирается на использование данных одновременных наблюдений при помощи аппаратуры ATSR-2 (радиометр, осуществляющий сканирование вдоль траектории спутника) и спектрометра GOME для глобального мониторинга общего содержания озона. Оба эти прибора входили в состав комплекса научной аппаратуры, установленной на европейском спутнике для дистанционного зондирования ERS-2.

Рассматриваемые данные наблюдений позволяют восстановить АОТ для пограничного слоя атмосферы (BLAOT) и осуществить распознавание типа аэрозоля в атмосфере над сушей и над океа-

ном. Решение второй задачи реализовано путем оценки доли ВЛАОТ по отношению к шести репрезентативным компонентам массива данных ОРАС по оптическим параметрам аэрозоля и облаков (высокая пространственная разрешающая способность данных ATSR-2 обеспечивает надежное распознавание облаков).

Основу обсуждаемой методики восстановления ВЛАОТ составляет сравнение измеренных спектров уходящей радиации в видимой и близкой ИК-областях спектра (полученных по данным GOME после отфильтровывания влияния облачности) с рассчитанными при задании различных моделей аэрозоля. Согласование спектров при среднеквадратической минимизации расхождений определяет выбор адекватной модели аэрозоля. Описанную методику планируется применить также для обработки данных видеоспектрометра SCIAMACHY и усовершенствованной аппаратуры ATSR, которые будут установлены на спутнике Envisat, и аппаратуры GOME-2/AVHRR, созданной для спутника METOP.

Одной из перспективных методик дистанционного зондирования с целью восстановления оптических свойств атмосферного аэрозоля и облаков является использование спутниковых данных о спектральном распределении уходящей коротковолновой радиации при высоком спектральном разрешении в полосе А кислорода, центрированной вблизи длины волны 762 нм. Для апробации подобной методики в НИИ центра НАСА им. Лэнгли был разработан самолетный спектрометр LAABS для диапазона длин волн 12980–13160 см⁻¹ (~760–770 нм) при разрешающей способности около 0,60 см⁻¹. Pitts и др. [63] детально описали результаты лабораторных исследований характеристик LAABS, полевые испытания которого были осуществлены в июле 2001 г. при полетах в районе Чезапикского залива (США). Предварительные результаты, полученные во время трех полетов, оказались вполне положительными. Планируются последующие испытания, сопровождаемые контрольными наблюдениями *in situ* оптических параметров аэрозоля и облаков.

Yi и др. [85] описали алгоритм восстановления альbedo однократного рассеяния (АОР) и индикатрисы рассеяния атмосферного аэрозоля по данным наземных наблюдений углового распределения яркости неба. Первый этап решения задачи состоит в обосновании (с использованием теории возмущений поля излучения) системы линейных уравнений, которые позволяют приближенно выразить яркость неба в зависимости от АОР и от коэффициентов полинома Лежандра, аппроксимирующего индикатрису рассеяния. Эта линейная система является, однако, плохо обусловленной. Поэтому для получения устойчивого решения осуществляется процесс регуляризации. Наиболее важный и трудный шаг процесса регуляризации состоит в определении параметра регуляризации, особенно в том случае, когда восстановление связано с итерациями.

В работе Yi и др. [86] выполнена проверка адекватности упомянутой методики восстановления альbedo однократного рассеяния и индикатрисы рассеяния атмосферного аэрозоля по данным наблюдений углового распределения яркости безоблачного неба. С этой целью использованы данные условного («синтетического») эксперимента при задании различного уровня шумов. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивости алгоритма даже при высоком уровне шумов. Получены оценки чувствительности результатов восстановления к вариациям альbedo подстилающей поверхности и оптической толщины атмосферы. Подобная изменчивость может сказываться на результатах восстановления альbedo однократного рассеяния. Выполнен также анализ достоверности восстановления с использованием данных реальных наблюдений на сети станций аэрозольных наблюдений.

Zhao и др. [88] проанализировали значение отказа от предположения о сферичности частиц аэрозоля при восстановлении аэрозольной оптической толщины τ по данным спутниковой аппаратуры AVHRR с учетом несферичности частиц пылевого аэрозоля.

Подобный анализ выполнен путем сравнения с использованием данных наземных наблюдений τ на двух станциях сети AERONET в пустыне. Учет несферичности обеспечил снижение погрешностей восстановления τ (особенно случайных погрешностей) с использованием алгоритма восстановления, разработанного для обработки данных AVHRR.

Ellrod и др. [24] предложили новую методику восстановления содержания взвешенного в атмосфере вулканического пепла по данным метеорологических спутников об уходящей радиации на длинах волн 3900; 9700 и 12000 нм. Основу методики составляет рассмотрение суммы двух разностей яркостной температуры (BTD), нормированных с целью максимизации изменчивости яркостной температуры и ее контрастов как индикаторов содержания пепла. Следующие физические факторы благоприятствуют различию вкладов в формирование уходящей радиации, обусловленных пеплом и облачностью: 1) различия поглощения, обусловленного пеплом или сернистым газом на длинах волн 3900; 10700 и 12000 нм; 2) интенсивное отражение солнечной радиации пеплом на длине волны 3900 нм, обладающее дневным ходом. Наилучшие результаты восстановления были получены в дневные часы над всеми типами подстилающей поверхности, а ночью — в таких условиях, когда облако пепла располагается над океаном или другими водными бассейнами.

Alexandrov и др. [6] обсудили результаты статистического анализа пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщины в диапазоне пространственных масштабов от 0,2 до 1200 км по данным сети наблюдений при помощи многоканального фильтрового радиометра MFRSR в южной части Великих Равнин (США). На обширной территории в штатах Оклахома и Канзас функционировал 21 радиометр. Данные наземной

сети были сопоставлены с результатами восстановления АОТ по наблюдениям при помощи спутниковой аппаратуры MODIS. Помимо этого, результаты спутниковых наблюдений использованы для выявления крупномасштабной изменчивости АОТ. Полученные результаты позволяют обосновать наличие трех главных режимов пространственной изменчивости АОТ. В малых масштабах (0–30 км) доминирует влияние трехмерного турбулентного переноса. Влияние двухмерной турбулентности при масштабах более 30 км усиливает нестационарность АОТ, но она ослабляется в области масштабов более 100 км.

Сотрудники Политехнического университета Каталонии (Барселона) разработали портативный лидар на Nd:YAG с трехмерным сканированием для восстановления свойств аэрозоля в свободной атмосфере. Лидар одновременно функционирует на длинах волн 1064 и 532 нм при осуществлении сканирования в пределах зенитного угла 15–70° с шагом 5°. Эта аппаратура была использована Sicard и др. [69] для восстановления вертикальных профилей различных свойств аэрозоля (прежде всего отношения b/e коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции) по данным наблюдений в регионе Барселоны, где в течение всего года проявляется влияние различных источников загрязнений и сархарского пылевого аэрозоля.

Алгоритм восстановления основан на использовании вариационной методики, обеспечивающей восстановление вертикального профиля b/e и аэрозольной оптической толщины без каких-либо априорных предположений относительно типа аэрозоля. Вполне надежные результаты восстановления коэффициента b получены для слоя 0,3–2,5 км при среднем значении $0,030 \text{ sr}^{-1}$, тогда как для более значительных высот достоверных результатов получить не удалось. Использование лидарных профилей, относящихся к малым зенитным углам, позволило рассчитать значения коэффициента Ангрстрема для радиации, рассеянной назад, которые хорошо согласуются с величинами, восстановленными с применением вариационного метода. Трудности решения рассматриваемой задачи для высот более 1,6 км отображают, по-видимому, влияние неоднородностей атмосферы, связанных с сильной пространственной изменчивостью свойств аэрозоля.

Измерения аэрозоля in situ. Большие успехи дистанционного зондирования отнюдь не ослабляют значения прямых методов измерения его характеристик. Особенно это относится к химическому составу аэрозоля. В этой связи адекватное понимание природы и свойств атмосферного аэрозоля серьезно осложняет отсутствие необходимого комплекса аппаратуры. Достаточно хорошо разработана аппаратура для измерений массовой и счетной концентрации, а также микроструктуры аэрозоля, но значительно сложнее обстоит дело с измерением химического состава аэрозоля. Наиболее широкое применение нашла методика химического анализа фильтровых проб, применение которой осложняют различные трудности. За последние годы

все более широкое развитие получает аэрозольная масс-спектрометрия, обеспечивающая измерение химического состава аэрозоля в реальном масштабе времени. Основу этой методики составляют забор пробы аэрозоля, ее последующее испарение, ионизация молекул газа и масс-спектрометрический анализ ионов. С целью испарения и ионизации применяются мощные лазеры. Получение количественных результатов с применением новой методики серьезно затрудняет целый ряд факторов. Недостаточно учитываются, например, частицы размером меньше 0,2 мкм. Десорбция и ионизация связаны с существенной потерей информации в случае сложных органических соединений, что обусловлено интенсивной молекулярной фрагментацией.

Allan и др. [7] обсудили результаты использования новой масс-спектрометрической аппаратуры AMS, разработанной фирмой Aerodyne, в которой испарение аэрозоля осуществляется на нагретой поверхности и затем применяется квадрупольная масс-спектрометрия с электронной импактной ионизацией (EI). В этом случае оказывается возможным получение количественной информации о химическом составе и размерах частиц летучего и полунлетучего мелкодисперсного аэрозольного вещества при высоком разрешении по времени. Процесс обработки данных состоит в использовании результатов калибровки аппаратуры с целью перехода от спектра массы (MS) к массовой концентрации исследуемых компонентов ($\text{мкг}/\text{м}^3$).

Иллюстрируя достижения масс-спектрометрии, Allan и др. [8] обсудили результаты измерений химического состава атмосферного аэрозоля с использованием аэрозольного масс-спектрометра фирмы Aerodyne, полученные в двух британских городах — Эдинбурге (октябрь 2000 г.) и Манчестере (июль 2001 г. и январь 2002 г.). Рассматриваемые результаты содержат информацию о распределении по размерам частиц аэрозоля для нитрата, сульфата и органических соединений. Во всех трех случаях отчетливо зарегистрировано влияние местного транспорта при значениях массового модального аэродинамического диаметра частиц в пределах 0,1–0,2 мкм. Главный вклад в формирование этой моды аэрозоля вносят углеводородные соединения, которые обнаруживают лишь слабо выраженные признаки окисления. Наблюдалась также мода более крупных частиц, состоящих из неорганических соединений и окисленной органики. Эта мода определялась главным образом вкладами источников, расположенных вне городов, и характеризовалась внутренней перемешанностью частиц. Массовый, модальный аэродинамический диаметр частиц изменялся в пределах 0,2–0,5 мкм зимой и 0,5–0,8 мкм летом. Для данных наблюдений, проведенных летом, характерно возрастание массовой концентрации аэрозоля, не сопровождающееся увеличением числа частиц. В периоды малой скорости ветра наблюдались изменения химического состава и старение частиц со временем.

Совершенствование и более широкое применение различных средств наблюдений аэрозоля от-

крыли широкие перспективы получения более репрезентативной информации и, в частности, для обоснования новых моделей аэрозоля.

Модели аэрозоля. Gong и др. [31, 32] описали Канадский аэрозольный модуль (САМ), предназначенный для использования в численных моделях климата и качества воздуха. В модели учтены главные процессы, ответственные за формирование атмосферного аэрозоля: генерация, гигроскопический рост, коагуляция, нуклеация, конденсация, сухое осаждение, седиментация, вымывание в подоблачном слое атмосферы, активация, облачный модуль с учетом в явном виде микрофизических процессов для воспроизведения аэрозольно-облачных взаимодействий и химическая трансформация соединений серы в безоблачной атмосфере и в облаках. Gong и др. [31, 32] осуществили вычислительную оптимизацию определяемого САМ алгоритма для обеспечения эффективного решения сложной задачи описания процессов с учетом многокомпонентного аэрозоля и его микроструктуры, допускающего использование САМ в глобальных и региональных численных моделях. Относительно частиц аэрозоля предполагается, что они представляют собой внутренние смеси, за исключением пылевого аэрозоля и «черного углерода», которые рассматриваются как внешне перемешанные poblости от их источников.

С целью испытаний адекватности предложенного алгоритма в работе [32] рассмотрено его применение с учетом выбросов в атмосферу антропогенного и природного аэрозоля двух типов: морского солевого и сульфатов. Проанализированы возможности двух вычислительных методик реализации алгоритма: расщепления и обычных дифференциальных уравнений (ODE). Сравнение результатов показало, что методика расщепления обеспечивает получение более надежных данных (примерно на 15%), чем методика ODE, при вычислении массовой концентрации суммарных сульфатов, но несколько менее надежных данных (< 1%) для случая морского солевого аэрозоля. Важно то, что вычисления по методике расщепления проводятся в 100 раз быстрее, чем по методике ODE.

Gong и др. [31] изучили чувствительность рассчитанной микроструктуры к учету ее детальной «Диффузионное» поведение каждого отдельного процесса количественно охарактеризовано величиной разности модального радиуса и дисперсии для логнормальной кривой микроструктуры в случаях приближенного и более точного (с учетом 96 «шагов» распределений частиц по размерам) представлений микроструктуры. Численное моделирование показало, что распределения по размерам как счетной, так и массовой концентрации оказываются вполне адекватными при учете 12 «шагов» во многих ситуациях в атмосфере, когда сток для конденсируемого вещества на поверхности частиц аэрозоля настолько значителен, что нуклеация новых частиц оказывается пренебрежимо малой. Вполне достоверные результаты вычислений суммарной массовой концентрации получаются при использовании

только 8 «шагов». Однако для обеспечения реалистической микроструктуры нуклеационной моды следует принимать во внимание 18 «шагов» или больше.

Сетевые наблюдения. Наряду с данными спутниковых и самолетных наблюдений важный вклад в повышение уровня адекватности моделей аэрозоля вносят результаты регулярных наземных наблюдений, особенно на глобальной сети станций AERONET.

С появлением к середине 1990-х гг. высококачественной, способной функционировать в автоматическом режиме и коммерчески доступной аппаратуры для измерений прямой солнечной радиации с целью восстановления АОТ атмосферы произошло значительное расширение сети наблюдений с применением солнечных фотометров (СФ). Важное значение приобрели в связи с этим сравнения СФ, применяемых на существующей сети станций. На обсерватории, расположенной у оз. Братт (Канада), функционируют (в целях сравнения) СФ четырех типов, применяемых на трех сетях наблюдений: аэрозоли в Канаде; глобальное слежение за атмосферой (GAW); Программа мониторинга УФ-В солнечной радиации, осуществляемая при поддержке министерства сельского хозяйства США. Поскольку аппаратура, применяемая на этих и других сетях, достаточно похожа, полученные на основе выполненных летом 2001 г. сравнений СФ могут иметь достаточно общее значение. Полученные McArthur и др. [54] результаты сравнений показали, что погрешности восстановления мгновенных значений АОТ находятся в пределах $\pm 0,01$. В течение трехмесячных сравнений дисперсия значений АОТ на длине волны 500 нм составила 0,0069. Таким образом, солнечные фотометры вполне пригодны для глобального мониторинга аэрозольной оптической толщины.

Продолжая разработки, основанные на использовании данных AERONET, Smirnov и др. [70] исследовали свойства атмосферного аэрозоля над океаном, которые характеризуются сильной изменчивостью, определяемой прежде всего разнообразием типов аэрозоля, включающих, например, городской/промышленный аэрозоль, пылевой аэрозоль пустынь, продукты сжигания биомассы и морской аэрозоль. На основе использования данных наблюдений на роботизированной сети AERONET на трех островах (Бермудских в Атлантическом океане, Гавайских в Тихом океане и Каашидхоо в Индийском океане) в работе [71] обоснована модель морского компонента аэрозоля, которая может быть использована, в частности, при решении задачи атмосферной коррекции. Для восстановления морского компонента аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм использованы лишь такие условия наблюдений, когда АОТ была меньше 0,15, а параметр Ангстрема < 1.

Результаты определения микроструктуры морского компонента аэрозоля оказались очень близкими для рассматриваемых трех случаев и характеризуются наличием биомодальной моды с мелкодисперсной модой, которой соответствуют значения

эффективного радиуса частиц $r_{eff} \sim 0,11-0,14$ мкм, а в случае крупнодисперсной моды $r_{eff} \sim 1,8-2,1$ мкм (эти значения вполне соответствуют имеющимся в литературе). Не зависящий от длины волны комплексный показатель преломления оказался равным $1,37-0,001i$ (это соответствует альбедо однократного рассеяния около 0,98). Вклады мелкой и крупнодисперсной мод аэрозоля в АОТ равны соответственно $\tau_{fine} \sim 0,03-0,05$ и $\tau_{coarse} \sim 0,05-0,06$. Параметр Ангстрема варьирует в пределах 0,8–1,0 (интервал длин волн 340–670 нм) и $\sim 0,4-0,11$ (870–213 нм). Всем трем случаям соответствует почти одинаковая индикатриса рассеяния.

Установленная на спутнике TRMM для измерений осадков в тропиках аппаратура CERES предназначена для измерений компонентов радиационного баланса Земли в трех широких спектральных интервалах: 300–5000; 300–100000 и 8000–12000 нм. В комплекс научной аппаратуры TRMM входил также сканирующий радиометр VIRS для измерений уходящего излучения в видимой и инфракрасной областях спектра. Zhao и др. [89] предприняли сравнение данных TRMM/CERES-VIRS и результатов наземных наблюдений при помощи солнечного фотометра на сети станций AERONET с целью валидации восстановленных по спутниковым данным значений τ над океаном с учетом возможных погрешностей, обусловленных наличием подсеточной облачности (для этого использованы данные VIRS) и влиянием ветра у поверхности океана (волнения).

При сильном волнении обнаружена высокая положительная корреляция между скоростью ветра у поверхности океана и τ , которая обусловлена, по видимому, не непосредственным влиянием морского волнения, а усилением поступления в атмосферу морского аэрозоля [71]. После минимизации возможного влияния подсеточной облачности и отфильтровывания случаев с сильным ветром положительное систематическое расхождение между спутниковыми и наземными данными удалось уменьшить с 0,05 до 0,02 для канала VIRS на длине волны 630 нм и с 0,05 до 0,03 (1610 нм). Случайные погрешности также сократились с 0,09 до 0,06 (630 нм) и с 0,06 до 0,05 (1610 мкм). Сохранившиеся расхождения при малых значениях τ обусловлены главным образом погрешностями калибровки радиометрическими шумами и неадекватным заданием параметров аэрозоля в алгоритме восстановления. Целью последующих разработок станут оценки погрешностей восстановления τ для различных типов аэрозоля.

Если учесть, что микроструктура аэрозоля является, как правило, бимодальной, то распределение частиц аэрозоля по размерам (PSD) может быть использовано для различения тех компонентов оптической толщины атмосферы (соответственно, τ_f и τ_c), формирование которых определяется вкладом мелко- и крупнодисперсного аэрозоля. Источником информации для подобного различения может служить спектральная зависимость суммарной оптической толщины $\tau_a = \tau_f + \tau_c$. Как показали

O'Neill и др. [60], адекватность подобной методики обеспечивают: 1) ее физическая обоснованность; 2) согласие данных об изменчивости τ_c с фотографическими данными о тонких слоях облачности, тогда как достоверность τ_f иллюстрируют данные наблюдений, относящиеся к условиям ясного неба и дымки; 3) наличие высокой корреляции между оценками τ_c и τ_f и соответствующими значениями, полученными путем восстановления по данным о яркости неба и общем ослаблении солнечной радиации. Эти данные позволили также осуществить валидацию алгоритма отфильтровывания облачности.

Большое внимание привлекли за последние годы исследования биогенного компонента атмосферного аэрозоля [2]. Rannik и др. [65] обсудили результаты градиентных (корреляционных) наблюдений потока частиц атмосферного аэрозоля над 40-летним лесом из шотландской сосны (*Pinus sylvestris* L.), выполненными на станции для измерений взаимодействия между лесной экосистемой и атмосферой (программа SMEAR) в Хьютьяля (Hyytiälä) на юге Финляндии (61°51' с.ш., 24°17' в.д., 181 м над уровнем моря). Программа наблюдений включала измерения микроструктуры аэрозоля (диапазон диаметра 0,003–0,5 мкм) при помощи аппаратуры для определения дифференциальной подвижности частиц (OMPS), установленной на высоте 2 м, и конденсационного счетчика частиц (CPC), расположенного на уровне 23 м (средняя высота леса составляла 14 м). Данные счетчика CPC использованы для определения суммарной счетной концентрации частиц в диапазоне размеров 0,01–0,5 мкм.

Анализ данных наблюдений показал, что счетная концентрация частиц аэрозоля характеризуется более отчетливо выраженной нестационарностью, чем такие скалярные параметры, как температура, концентрация водяного пара и углекислого газа. Результаты наблюдений, полученные в периоды стационарного режима, отображают преобладание процесса осаждения частиц на лесной покров. В работе [65] получены оценки зависимости скорости осаждения от размеров частиц с использованием данных наблюдений микроструктуры аэрозоля и разработана полуэмпирическая модель процесса осаждения, которая вполне адекватна в таких условиях, когда в спектре размеров доминируют частицы диаметром меньше 0,1 мкм. Однако в условиях преобладания более крупных частиц эта модель не оказывается достоверной.

1. Северная Америка

На континенте Северной и Южной Америки был предпринят целый ряд крупномасштабных полевых наблюдательных экспериментов, важным компонентом которых были исследования атмосферного аэрозоля. Естественно, что на территории США главное внимание было уделено оценкам антропогенных воздействий и, в связи с этим, полевым экспериментам в регионах крупных городов.

«Суперэксперимент» в регионе г. Атланты

Летом 1999 г. в центральной части г. Атланта (штат Джорджия, США) при содействии Агентства США по окружающей среде (ЕРА) был оборудован «суперполигон» для исследований аэрозоля в условиях городской атмосферы в рамках проекта SOS изучения оксидантов на юге США. Первоначальной кратковременной целью были сравнения аппаратуры для измерений микроструктуры (массы), химического состава и физических свойств аэрозоля. Долгосрочная же задача состоит в исследованиях физических и химических процессов, происходящих в городской атмосфере при наличии интенсивных антропогенных воздействий.

Для получения информации об аэрозоле применялась аппаратура трех типов: 1) фильтры с обеспечением интегрирования взятия проб во времени или функционирующие в дискретном режиме, подобные используемым на сети станций ЕРА для мониторинга мелкодисперсного аэрозоля (PM-2,5); 2) аппаратура для непрерывной и полунепрерывной регистрации химического состава малых газовых компонентов (МГК) атмосферы и аэрозоля, которые все еще находятся в стадии разработки; 3) масс-спектрометры для измерений концентрации

МГК и химического состава отдельных частиц аэрозоля. Solomon и др. [72, 73] обсудили результаты сравнений 12 работающих в дискретном режиме различных фильтровых датчиков. Анализировались данные по суммарной массе аэрозоля, а также по содержанию сульфата, нитрата, аммония, органического и элементного углерода, некоторых трассерных элементов. Как правило, концентрация исследуемых компонентов в атмосфере существенно превосходила пределы обнаружения, за исключением нитрата и некоторых трассерных элементов (например, As и Pb). В большинстве случаев обнаружены расхождения между показаниями различной аппаратуры, исключая данные для сульфата и аммония. Такого рода расхождения обусловлены влиянием различных факторов, включающих специфику аппаратуры и методов анализа химического состава. Уровни расхождений характеризуются следующими данными: $\pm 20\%$ (масса аэрозоля); $\pm 10\%$ (сульфат); $\pm 30-35\%$ (нитрат); $\pm 10-15\%$ (аммоний); от ± 20 до $\pm 35-45\%$ (органический углерод); от ± 20 до $\pm 200\%$ (элементный углерод); $\pm 20-30\%$ (трассерные элементы).

Solomon и др. [73] сделали обзор разнообразной аппаратуры для исследований аэрозоля и малых газовых компонентов, применявшейся в рамках поддерживаемой Агентством по окружающей среде (США) программы изучения оксидантов в атмосфере на юге США (SOS). Предназначенный для испытаний и сравнений методик измерений характеристик аэрозоля «суперполигон» в г. Атланта находится в северо-западной части города на территории, используемой для полевого эксперимента ACE с целью наблюдений атмосферного аэ-

розоля. Исследованные методики включали различные фильтры и импакторы, а также аппаратуру для измерений химического состава аэрозоля (сульфаты, нитраты, аммоний, органический и элементный углерод, трассерные элементы) и МГК-предшественников аэрозоля (химический состав аэрозоля и МГК анализировался с применением четырех масс-спектрометров). Помимо этого, использовалась информация о метеорологических параметрах, летучих органических соединениях (VOC), окисленных VOC и NO_x , т.е. анализ условий формирования и аккумуляции аэрозоля в Атланта. Анализ обсуждаемых результатов обнаружил некоторые расхождения данных, полученных при помощи аппаратуры различных типов, но (при использовании адекватной методики обработки данных) позволил располагать богатой информацией о динамике аэрозоля в условиях г. Атланта.

В период с 6 августа по 1 сентября 1999 г. на «суперполигоне» в г. Атланта (США) выполнены исследования содержащегося в городской атмосфере аэрозоля с использованием лазерного десорбционно-ионизационного масс-спектрометра ATOFMS, позволяющего измерять химический состав отдельных частиц аэрозоля в диапазоне размеров 0,2–2,5 мкм. Выполненный Liu и др. [52] анализ полученных результатов (всего зарегистрировано 455444 масс-спектра) выявил наличие следующих семи типов аэрозоля: 1) калийсодержащий; 2) калийсодержащий с примесью вторичных компонентов (аммоний, нитрат, сульфат); 3) углеродный (как элементный, так и органический); 4) углеродный с примесью вторичных компонентов (аммоний, нитрат, сульфат); 5) пыль; 6) пыль с примесью вторичных компонентов (аммоний, нитрат, сульфат); 7) вторичные компоненты (аммоний, нитрат, сульфат). В работе [52] описаны основные характеристики ионных компонентов аэрозоля. В целом полученные результаты демонстрируют большую сложность и разнообразие химического состава городского аэрозоля.

Осуществленное Wenzel и др. [82] сравнение результатов измерений микроструктуры аэрозоля при помощи масс-спектрометра ATOFMS и лазерного счетчика частиц выявило наличие существенных расхождений, зависящих от химического состава частиц аэрозоля. Подобные расхождения были особенно значительными в такие периоды времени, когда наблюдалась повышенная массовая концентрация аммония и сульфата. Не зафиксированные при измерениях частицы аэрозоля относились к категории субмикронных частиц (0,35–0,54 мкм) и отчетливо характеризовались данными об обусловленном ими рассеянии. В работе [82] предложена методика масштабирования, которая позволяет учесть систематические погрешности определения химического состава частиц с использованием аппаратуры ATOFMS. Полученные таким образом результаты сопоставлены с данными измерений при помощи других видов аппаратуры.

В рамках осуществленного в августе 1999 г. полевого наблюдательного эксперимента по изучению оксидантов на «суперполигоне» в г. Атланта (США) Rhoads и др. [66] выполнили измерения химического состава аэрозоля в зависимости от размеров частиц с использованием уникальной десорбционно-ионизационной масс-спектрометрической методики. Подобная методика обеспечивает возможность анализа химического состава отдельных частиц в реальном масштабе времени при аэродинамическом диаметре частиц, варьирующем в пределах 0,01–1,5 мкм. В условиях высокого содержания аэрозоля в атмосфере Атланты производился анализ химического состава частиц размером 0,1–0,2 мкм примерно через каждую секунду. Всего в течение 1 мес (как днем, так и ночью) зарегистрировано около 16 тыс. масс-спектров.

Анализ полученных результатов привел к выводу, что доминирующим компонентом ультрамелких (менее 0,1 мкм) частиц являются соединения, содержащие углерод. Более значительной изменчивостью химического состава характеризуются крупные частицы, для которых типично сочетание органического углерода и неорганических компонентов (материал горных пород, металлы и др.). Рассмотрение всех полученных результатов выявило наличие 70 классов химического состава аэрозоля. Rhoads и др. [66] обсудили закономерности осредненных масс-спектров и их зависимость от метеорологических параметров для основных и некоторых второстепенных классов. Главные классы состава частиц определяются как характеризующиеся наличием максимумов в спектрах, которые соответствуют: органическому углероду (примерно 74% частиц); калию (8%); железу (3%); кальцию (2%); нитрату (2%); элементному углероду (1,5%) и натрию (1%). Многим из этих классов соответствует определенное направление ветра, отображающее местоположение источника аэрозоля.

При помощи масс-спектрометра RSMS II, предназначенного для измерений химического состава частиц атмосферного аэрозоля, в период с 23 августа по 18 сентября 2000 г. в г. Хьюстоне (США) были осуществлены измерения в точке, расположенной к северу от основных источников промышленных выбросов в атмосферу. Полученные Phares и др. [62] в результате этих наблюдений 27 тыс. масс-спектров были классифицированы в зависимости от специфики максимумов спектров с использованием методики невральные сети. Были проанализированы корреляция между частотой встречаемости каждого из классов с направлением ветра, а также зависимость встречаемости от времени. Некоторые классы частиц присутствовали всегда, тогда как другие — время от времени или даже в течение очень коротких промежутков времени. Наиболее частыми компонентами состава частиц были калий и кремний. Менее значительный вклад принадлежал органике и тяжелым металлам.

Установление вредного воздействия на здоровье человека городского мелкодисперсного аэрозоля PM-2,5 стимулировало принятие Агентством США

по защите окружающей среды в 1997 г. национального стандарта качества воздуха (NAAQS), определявшего предельно допустимую концентрацию (ПДК) для PM-2,5 в атмосфере. Согласно NAAQS установлены кратковременная (65 мкг/м³ при осреднении за 24 ч) и долговременная ПДК (15 мкг/м³ для среднегодового уровня концентрации). Однако в мае 1999 г. законность подобных стандартов была подвергнута сомнению Верховным судом США.

В связи с возникновением подобного юридического казуса в г. Атланта (США) была организована сеть наблюдательных станций для мониторинга массовой концентрации и химического состава мелкодисперсного аэрозоля. Согласно полученным Butler и др. [18] результатам измерений среднегодовая концентрация аэрозоля изменялась (в зависимости от местоположения точки наблюдений) в пределах 19,3–21,2 мкг/м³ при максимальных уровнях концентрации, составивших 44,3–51,5 мкг/м³ (за сутки) и 73,3–87,9 мкг/м³ (за 1 ч). Наблюдался значительный годовой и суточный ход концентрации аэрозоля. Измерения химического состава, относящиеся примерно к 75% массы аэрозоля, показали, что доминирующими компонентами состава аэрозоля были углеродные соединения, сульфат, аммоний и нитрат.

В центре г. Атланта на ул. Джефферсона, где располагался «суперполигон» для мониторинга характеристик городской атмосферы, в период интенсивных наблюдений с 3 августа по 1 сентября 1999 г. Lim и др. [51] были выполнены полунепрерывные измерения содержания органики и элементного состава атмосферного аэрозоля с применением аппаратуры различных типов: термооптического анализатора углерода; монитора аэрозольного углерода; анализатора углерода, трансформируемого в газовую фазу, и эталомера АЕ-16. Сравнения результатов, полученных с использованием аппаратуры различных типов, выявили расхождения в данных по общему углероду (ТС), органическому углероду (ОС) и элементному углероду (ЕС), составившие, соответственно, 7, 13 и 26%. Корреляция попарных данных измерений ОС была умеренной ($r^2 = 54\text{--}73\%$), а для пар ЕС — высокой ($r^2 = 74\text{--}97\%$). Расхождения измеренных значений ОС оказались небольшими по сравнению с данными для ЕС. В целом согласованность обсуждаемых данных наблюдений можно считать вполне удовлетворительной, особенно с учетом качества аналогичных результатов, полученных ранее.

В августе 1999 г., в период интенсивных наблюдений на расположенном в г. Атланта «суперполигоне» для мониторинга химического состава атмосферы, были установлены пять новых видов аппаратуры для полунепрерывных измерений состава мелкодисперсного аэрозоля PM-2,5 (частиц диаметром меньше 2,5 мкм). С интервалом от 5 до 1 ч производились измерения химического состава проб аэрозоля с использованием ионного хроматографического анализа (IC) и обработка фильтровых проб (при обеспечении автоматического удаления воды).

Согласно данным продолжавшихся в течение 1 мес наблюдений, выполненных Weber и др. [81], осредненные за 15 мин интервалы значения концентрации нитрата были низкими (в пределах 0,1–3,5 мкг/м³) при среднем значении 0,5 мкг/м³. Осредненные за 10 мин значения концентрации сульфата изменялись от 0,3 до 40 мкг/м³ при среднем значении 14 мкг/м³. Сравнения полученных с использованием различных методик результатов (включая осредненные за сутки результаты анализа фильтровых проб) выявили наличие согласия в пределах расхождений 20–30% для нитрата (это соответствует массовой концентрации ~ 0,1–0,2 мкг/м³) и 10–15% для сульфата (1–2 мкг/м³). Для сульфата и нитрата не было выявлено расхождений между данными ИС и фильтровых проб при доверительном уровне 95%. Однако сравнения полунепрерывных ИС данных для нитрата обнаружили более слабую изменчивость, чем данные анализа фильтровых проб, осредненные за сутки.

По данным осуществленных в атмосфере г. Атланты (США) измерений концентрации и химического состава РМ-2,5 (частиц аэрозоля с аэродинамическим диаметром $d_p < 2,5$ мкм) Carrico и др. [19] проанализировали радиационные и, соответственно, физические и химические свойства городского аэрозоля. Полученные среднеарифметические значения и дисперсия обусловленных частицами РМ-2,5 коэффициента рассеяния σ_{sp} (на длине волны 530 нм) и коэффициента поглощения σ_{ap} (на той же длине волны) при относительной влажности, равной $(49 \pm 5)\%$, составили $[(121 \pm 48) \cdot 10^{-6}]$ и $[(16 \pm 12) \cdot 10^{-6}]$ м⁻¹ соответственно. Хотя среднее значение коэффициента экстинкции σ_{er} в Атланте значительно превосходит фоновый уровень, он сравним с величинами, наблюдавшимися в негородских регионах в центре юго-восточной части США, что отображает наличие здесь обширной региональной дымки. Альbedo однократного рассеяния в Атланте $\omega_0 = 0,87 \pm 0,08$ и лишь примерно на 10% меньше зарегистрированного в негородских регионах с загрязненной атмосферой, что обусловлено, по-видимому, влиянием мобильных источников загрязнений, состоящих в выбросах элементарного углерода.

Наблюдалась двойная структура дневного хода свойств аэрозоля, отчетливо проявляющаяся как воздействие мобильных источников (в утренние «пиковые» часы, когда возникает максимальная концентрация аэрозоля, особенно его сажевого компонента) и влияние перемешивания в атмосфере (ответственного за формирование послеполуденного минимума концентрации). Имеет место высокая корреляция ($r^2 = 0,80 \pm 0,96$) между σ_{sp} и РМ-2,5, а средняя величина массовой эффективности поглощения за счет элементарного углерода E_{sp} (отношения σ_{sp} к массовой концентрации РМ-2,5) варьирует в пределах 3,5–4,4 м²/г. Наблюдалась также (хотя и была выражена существенно более слабо) корреляция между σ_{sp} и РМ-2,5 ($r^2 = 0,19$).

Использование четырех методик оценки массовой эффективности поглощения за счет элементарного

углерода привело к значениям E_{ap} от 5,3 до 18,3 м²/г. Широкие диапазоны изменчивости упомянутых оптических параметров отображают наличие сильной изменчивости оптических свойств аэрозоля, а также существование значительных погрешностей измерений поглощения света аэрозолем, особенно поглощения, обусловленного ЕС. Наиболее согласие величины E_{ap} было получено при использовании наблюдаемого (с помощью многоступенчатого импактора) распределения массы и рассчитанного по формулам Ми значения σ_{ap} (в этом случае $E_{ap} = (9,5 \pm 1,5)$ м²/г), а также распределения массы и измеренного значения σ_{ap} ($E_{ap} = (9,3 \pm 3,2)$ м²/г). Расчеты коэффициентов рассеяния по формулам Ми с использованием в качестве входных величин измеренной массы микроструктуры ЕС привели к средним значениям коэффициента экстинкции, отображающим доминирующий вклад субмикронного аэрозоля в условиях города. Среднее значение РМ-2,5 составило (31 ± 12) мкг/м³, а аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм $\tau_a = 0,44 \pm 0,22$. Полученное с учетом такого значения τ_a и других параметров аэрозольное радиационное возмущающее воздействие на уровне верхней границы атмосферы оказалось равным $\Delta F = (-11 \pm 6)$ Вт/м², что на порядок величины превосходит уровень соответствующих среднеглобальных оценок.

Middlebrook и др. [55] выполнили сравнение четырех масс-спектрометров, участвовавших в измерениях концентрации малых газовых компонентов и химического состава отдельных частиц аэрозоля, осуществленных на «суперполигоне» в центральной части г. Атланта (США) с целью изучения антропогенных воздействий на химический состав МГК и аэрозоля. Хотя все четыре масс-спектрометра были однотипными, каждый из них обладал уникальными характеристиками ввиду значительных конструктивных различий. Некоторые различия конструкций существовали даже у двух лазерных десорбционно-ионизационных масс-спектрометров RSMS-II, но это не породило каких-либо существенных расхождений полученных с их помощью результатов, хотя по отношению к данным двух других масс-спектрометров такого рода расхождения возникали.

Jimenez и др. [38] описали методику забора и анализа проб атмосферного аэрозоля при помощи аэрозольного масс-спектрометра «Аэродайн» (AMS), предназначенного для измерений распределения по размерам частиц массы аэрозоля, общей массы и состава субмикронных частиц из летучих и полунлетучих химических соединений. Основными компонентами AMS являются: аэродинамические линзы, обеспечивающие фокусирование частиц в узкий пучок; нагреватель для испарения частиц в глубоком вакууме; квадрупольный масс-спектрометр для анализа состава испаряемых молекул. Индикатором размера частиц является время их пролета. Аппаратура AMS функционирует в двух режимах: 1) непрерывной регистрации масс-спектров без дифференциации по размерам; 2) определения микро-

структуры аэрозоля для фиксированных значений отношения m/z . Возможна также регистрация масс-спектров отдельных частиц, если они обладают достаточной массой.

В работе [38] обсуждены результаты испытаний AMS, осуществленных в августе 1999 г. на «суперполигоне» в центральной части г. Атланта (США) и в пригородном пункте вблизи Бостона (США) в сентябре 1999 г. В этих экспериментах главными компонентами состава аэрозоля были сульфат и органические соединения при наличии небольшой примеси нитрата, что согласуется с результатами предшествующих наблюдений. Различные компоненты химического состава аэрозоля часто характеризовались наличием у них неодинаковой микроструктуры и специфической эволюции со временем. Более половины массы сульфата приходилось на 2% общего числа частиц. Данные о трендах массовой концентрации сульфата и нитрата в Атланте хорошо согласуются с результатами, полученными ранее с использованием методики ионной хроматографии. Для аэрозольного нитрата типично наличие отчетливого суточного хода. Полученные результаты наблюдений обобщены в форме модели городского аэрозоля.

На основе использования данных наблюдений состава атмосферного аэрозоля, полученных во время полевого наблюдательного эксперимента с 3 августа по 1 сентября 1999 г. на «суперполигоне» в центральной части г. Атланты (США) Zhang и др. [87] проанализировали предположение о наличии термодинамического равновесия между содержащимися в мелкодисперсном аэрозоле (PM-2,5) нитратом (NO_3^-) и аммонием (NH_4^+) с газообразными азотной кислотой ($\text{HNO}_3(\text{g})$) и аммонием ($\text{NH}_3(\text{g})$). Оценка условий равновесия получена путем расчетов равновесной концентрации $\text{HNO}_3(\text{g})$ и $\text{NO}_3(\text{g})$ в предположении неорганического состава PM-2,5 (N^+ , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-}), а также при задании наблюдавшихся значений температуры и относительной влажности. Результаты вычислений равновесной концентрации сопоставлены с соответствующими значениями наблюдавшейся концентрации газофазных компонентов.

Данные наблюдений химического состава мелкодисперсного аэрозоля PM-2,5 опираются на использование осредненных за 5-минутные интервалы данных PALS, полученных сотрудниками технологического института Джорджии (США), а сведения о концентрации газообразных компонентов заимствованы из других источников. Для вычисления равновесной концентрации газовых компонентов использована методика ISORROPIA. Массив комбинированных данных по химическому составу PM-2,5, а также по концентрации $\text{HNO}_3(\text{g})$ и $\text{NH}_3(\text{g})$ включает 272 пятиминутных интервала.

Первоначальный анализ полученных результатов привел к выводу об отсутствии термодинамического равновесия при наличии вычисленных значений концентрации $\text{NH}_3(\text{g})$, которые меньше измеренных (обратное соотношение имеет место в слу-

чае $\text{HNO}_3(\text{g})$). Однако относительно небольшое уменьшение содержания SO_4^{2-} в PM-2,5 (с целью подгонки) обеспечило согласие вычисленных и измеренных значений концентрации $\text{NH}_3(\text{g})$ и $\text{HNO}_3(\text{g})$. Кроме того, исключение из всего массива 272 комплексов данных 31 серии, которые характеризовались аномально низкими значениями наблюдаемой концентрации SO_4^{2-} или $\text{NH}_3(\text{g})$, подтвердило адекватность упомянутой коррекции содержания SO_4^{2-} . Средние относительные значения поправок, требуемых для обеспечения термодинамического равновесия по отношению к HNO_3 и NH_3 , равны соответственно $-14,1$ и $-13,7\%$. Уровень этих поправок существенно превосходит возможное влияние погрешностей измерений.

Обсужденные в работе [87] результаты позволяют сделать вывод о существовании термодинамического равновесия для химического состава мелкодисперсного аэрозоля PM-2,5 в условиях наблюдений, сделанных в Атланте с учетом одной из следующих возможностей: 1) данные PALS о концентрации SO_4^{2-} в PM-2,5 были систематически завышены примерно на 15%; 2) эти данные систематически занижают концентрацию щелочных компонентов на 15%; 3) модель ISORROPIA систематически занижает рН для PM-2,5, который реально наблюдался в Атланте.

Главный вывод, который следует сделать на основе анализа данных полевого эксперимента в г. Атланта, состоит в том, что (как это и можно было предположить) свойства аэрозоля в условиях атмосферы в регионе большого промышленного города (к тому же расположенного в южных широтах) являются исключительно разнообразными и изменчивыми. Это серьезно осложняет учет воздействия аэрозоля как климатообразующего компонента. Подобный вывод иллюстрирует рассматриваемые далее результаты различных локальных и региональных исследований атмосферного аэрозоля в Северной Америке.

Региональные разработки

Особый интерес в контексте оценок влияния черного углеродного аэрозоля (BC) на формирование климата представляют измерения поглощения света атмосферным аэрозолем. Подобный аэрозоль возникает как продукт неполного сгорания содержащих углерод веществ. Если радиационное возмущающее воздействие за счет чисто рассеивающего сульфатного и нитратного аэрозоля порождает похолодание и, тем самым, обуславливает частичную (а иногда полную) компенсацию потепления, вызванного парниковыми газами, то наличие BC, поглощающего радиацию в видимой области спектра, благоприятствует усилению радиационного прогревания. Еще один эффект состоит в воздействии BC на микроструктуру и оптические свойства облаков, которое проявляется, в частности, в понижении альбедо облаков.

Arnott и др. [11] выполнили измерения поглощения света черным аэрозолем с применением двух

методик: 1) фотоакустической (эталометр); 2) основанной на использовании фильтровых проб аэрозоля (абсорбционный фотометр PSAP). Измерения осуществлены на юге штата Техас (США) в заповеднике «Биг Бенд» в рамках полевой наблюдательной программы по изучению регионального аэрозоля и условий видимости. Анализ результатов измерений выявил наличие вполне удовлетворительной корреляции между данными эталометра и PSAP. Коэффициент поглощения в видимой области спектра в течение 1 мес одновременных наблюдений не превосходил $2,1 \text{ N/м}$. Аналогичные измерения с использованием тех же двух методик были также осуществлены в 2000 г. в южной части Великих Равнин США. Было вновь обнаружено, в основном, удовлетворительное согласие данных, полученных с использованием двух методик, но коэффициент поглощения по данным PSAP оказался выше в 1,61 раза. Согласно результатам фотоакустических измерений имеет место уменьшение коэффициента поглощения с ростом относительной влажности RH при значениях $RH > 70\%$. Подобное уменьшение может быть связано с особенностями методики измерений. Осторожного отношения требует и применение PSAP в условиях быстрых изменений относительной влажности.

При помощи комплекса аппаратуры, установленного на борту самолета-лаборатории НАСА DC-8, Clement и др. [21] выполнили измерения концентрации в атмосфере различных МГК и ядер конденсации (ЯК), а также аэрозоля с целью изучения процессов образования аэрозоля. Анализ данных наблюдений выявил наличие сильной изменчивости концентрации ЯК, коррелирующей с концентрацией МГК, изменения которой были обусловлены смещением двух воздушных масс, обладающих различными свойствами. Образование ЯК происходило в воздушной массе, «вытекающей» из зоны шторма, а концентрация ЯК до перемешивания воздушных масс была сравнительно однородной на протяжении полета на расстоянии около 200 км. В работе [21] проанализировано обусловленное процессом нуклеации образование аэрозоля, сопровождавшееся ростом размеров и коагуляцией частиц, в предположении, что частицы аэрозоля состояли из воды и серной кислоты, локальное образование которых было обусловлено окислением SO_2 . Из полученных результатов следует, что за 5-минутной «вспышкой» процесса нуклеации следовало усиление процессов роста и коагуляции на протяжении примерно 5 ч. Наблюдаемые величины как массы, так и счетной концентрации аэрозоля соответствуют характерной для динамики шторма постоянной времени. Окончательная счетная концентрация аэрозоля исключительно слабо зависела от первоначальной концентрации SO_2 .

На более чем 60 станциях наблюдений в рамках Межотраслевой программы IMPROVE мониторинга окружающей среды в национальных парках США осуществляется регулярное взятие фильтровых проб атмосферного аэрозоля с целью последующего определения содержания во фракции

PM-2,5 TC, OC и EC. Выполненный Chow и Watson [20] анализ полученных результатов привел к выводу, что даже при наличии в пробах карбонатов они не оказывают существенного влияния на измеряемые концентрации TC, OC и EC. Подобная ситуация обусловлена тем, что: 1) при нагревании проб до температуры выше 800°C происходит разложение карбонатов; 2) определенное по концентрации кальция (Ca) максимально возможное содержание карбонатов почти всегда пренебрежимо мало по сравнению с концентрациями TC, OC и EC. В большинстве пунктов концентрация карбоната углерода была меньше 100 мг/м^3 и иногда оказывалась ниже порога обнаружения. Максимальная измеренная концентрация карбоната достигала 420 мг/м^3 .

Blanchard и др. [13] рассмотрели результаты обработки фильтровых проб аэрозоля, полученных в двух точках региона Большого Торонто (Канада) в течение нескольких периодов наблюдений в 1998–1999 гг. с целью изучения органической фракции атмосферного аэрозоля. Главной задачей был анализ различий состава органической фракции аэрозоля (ОФА) по данным наблюдений в городском и сельском пунктах наблюдений в различное время года. С применением методик термической десорбции, перевода пробы аэрозоля в раствор, дериватизации, хроматографии и масс-спектрометрии были получены данные о содержании в атмосферном аэрозоле органического и элементного углерода, алканойчных кислот, *n*-алканов и полициклических ароматических углеводородных соединений (ПАН).

Полученные в работе [13] результаты оказались сходными с данными предшествующих аналогичных наблюдений. Концентрация частиц PM-2,5 была в обеих точках наибольшей в феврале за счет погодных условий, благоприятствовавших образованию аэрозольных частиц. Соотношение между содержанием органического и элементного углерода было примерно таким же, как и в соответствующих выбросах, за исключением данных, относящихся к сельскому пункту, где более значительную роль играли, по-видимому, более высокий потенциал образования биогенных частиц, а также возникновение вторичного аэрозоля.

Сравнение содержания отдельных компонентов химического состава аэрозоля и общего органического углерода продемонстрировало, что кислоты, алканы и ПАН составляют лишь очень небольшую часть массы аэрозоля, это означает необходимость дальнейшего совершенствования методик анализа химического состава аэрозоля. Результаты предварительной обработки данных наблюдений позволяют сделать вывод о том, что в условиях городского пункта содержание алканойчных кислот коррелировало с уровнем выбросов дизельными двигателями. Данные по *n*-алканам отображают наличие преобладающих вкладов антропогенных источников в городском пункте и биогенных источников в сельском пункте наблюдений. В последнем случае

отчетливо проявляется вклад растительного покрова в биогенные выбросы.

В августе 2000 г. на крыше здания в Покер Флэт (Аляска: 65,12° с.ш.; 147,43° в.д.) были установлены два широкополосных 13- и 6-канальных радиометра для последующих регулярных измерений прямой солнечной, рассеянной и суммарной радиации. Главная цель наблюдений состояла в анализе воздействий изменчивости общего содержания озона в атмосфере, количества облаков, альбедо подстилающей поверхности и аэрозоля на поступление УФ солнечной радиации. В марте–апреле 2001 г. была осуществлена специальная серия измерений характеристик аэрозоля с использованием аппаратуры, обеспечивающей определение химического состава аэрозоля в зависимости от размеров частиц. Wetzel и др. [83] обсудили результаты наблюдений, полученных при поступлении в район наблюдений воздушных масс четырех типов: трех весенних воздушных масс из пустыни Гоби, загрязненной воздушной массы из Арктики и влажного морского воздуха, а также воздушной массы, поступившей поздним летом.

Анализ результатов наблюдений показал, что дальний перенос загрязнений в регион Центральной Аляски вызвал лишь небольшое или умеренное возрастание аэрозольной оптической толщины атмосферы в УФ-области спектра и, соответственно, ограниченное снижение прозрачности атмосферы на УФ-длинах волн. Наиболее сильное возрастание экстинкции обусловил морской аэрозоль, находящийся в атмосфере с высоким уровнем влажности. Результаты вычислений коэффициента Ангстрема, альбедо однократного рассеяния (по данным о спектральной АОТ), обусловленного аэрозолем поглощения, и данные наблюдений радиационных потоков продемонстрировали отчетливую специфичность всех этих характеристик у аэрозоля различных типов. Это означает, что даже при низкой концентрации аэрозоля специфические особенности различных воздушных масс определяют возникновение существенной изменчивости спектрального и углового распределений интенсивности УФ-радиации, которую необходимо учитывать при изучении фотохимических процессов в атмосфере и при оценках доз биологически активной УФ солнечной радиации.

Природные и антропогенные выбросы малых газовых компонентов — предшественников аэрозоля и их последующий перенос в верхнюю тропосферу (УТ) представляют собой главный источник аэрозоля в УТ. В рамках проекта INCA исследований межполушарных различий свойств перистых облаков, обусловленных антропогенными выбросами МГК, Minikin и др. [56] осуществили две серии самолетных измерений характеристик атмосферного аэрозоля и перистых облаков в верхней тропосфере средних широт северного (СП) и южного (ЮП) полушарий. Была рассмотрена часть полученных в связи с этим результатов, включающая измерения вертикальных профилей счетной концентрации летучих частиц Айткена, а также частиц аккумуляци-

онной моды аэрозоля с целью анализа межполушарных различий полученных результатов. Анализ данных наблюдений показал, что счетная концентрация частиц в СП более изменчива, чем в ЮП, и окзывается, как правило, в 2–3 раза более высокой.

Feingold и Morley [25] продемонстрировали возможности полученных с использованием лидара одноканальных данных об обратном рассеянии для оценки усвоения водяного пара частицами аэрозоля в хорошо перемешанном и «накрытом» слое облачности пограничном слое атмосферы (ПСА). Решение подобной задачи имеет важное значение для анализа влияния аэрозоля на формирование радиационного баланса Земли. Данные направленного в зенит лидара использованы для восстановления вертикального профиля обратного рассеяния в ПСА под слоисто-кучевыми облаками. Была проанализирована зависимость обратного рассеяния от измеренной с самолета относительной влажности в диапазоне ее значений от ~85 до 98,5%. Для расчета ожидаемого усиления обратного рассеяния за счет усвоения водяного пара использованы результаты прямых (*in situ*) измерений микроструктуры и состава аэрозоля.

Сравнение наблюдаемого и вычисленного усиления обратного рассеяния в зависимости от RH выявило хорошее согласие. По-видимому, аэрозольное обратное рассеяние на участках восходящих атмосферных движений оказывается слабее, чем на участках нисходящих движений (при одинаковых значениях RH). Подобная ситуация согласуется с представлениями об инерции больших гидратированных частиц по отношению к их росту (или испарению) при коротких масштабах времени. Некоторую роль играют, возможно, и систематические расхождения восстановленной по лидарным данным высоты нижней границы облаков в районах восходящих и нисходящих движений. Расчеты усиления суммарного рассеяния, обусловленного усвоением водяного пара, и аналогичного усиления обратного рассеяния выявили согласие зависимостей от RH в пределах ~20% при $RH < \sim 95\%$, но значительное различие в случае $RH > 95\%$.

В предположении безоблачной атмосферы Weaver и др. [80] обосновали методику атмосферной коррекции результатов восстановления вертикальных профилей температуры и влажности с учетом наличия в атмосфере поглощающего в ИК-диапазоне минерального (пылевого) аэрозоля (ПА) по данным разработанной для спутников TIROS аппаратуры оперативного вертикального зондирования (TOVS), входящей в состав комплекса ИК-зондировщика высокого разрешения (HIRS). Концентрация и свойства ПА заданы по данным для модели GOCART глобального переноса аэрозоля с учетом сопутствующих переносу химических реакций. Мерой влияния ПА на формирование уходящего теплового излучения служила разность (O–F) между наблюдаемой яркостной температурой (ЯТ) и значениями ЯТ, вычисленными при задании вертикальных профилей температуры и влажности через каждые 6 ч.

Из результатов такого рода расчетов следует, что при увеличении концентрации ПА разность $O-F$ становится более отрицательной. Это означает, таким образом, что наличие аэрозоля ведет к снижению наблюдаемой ЯТ, т.е. аэрозоль заметно влияет на ЯТ. В случае каналов HIRS, которые чувствительны к температуре подстилающей поверхности, а также к температуре и влажности в свободной атмосфере, понижение ЯТ, обусловленное аэрозолем, достигает 0,5 К и более. Было поэтому предпринято уточнение схемы параметризации переноса излучения, используемой в алгоритме восстановления для учета влияния ПА в предположении, что аэрозоль состоит из иллита. Результатом уточнения явилось повышение температуры поверхности (0,4 К) и температуры нижней тропосферы в регионах умеренного запыления атмосферы в Тропическом Поясе Атлантического океана.

2. Южная Америка

Осуществление комплексных полевых наблюдательных экспериментов в Южной Америке было связано главным образом с проблематикой экодинамики региона Амазонии, включавшей, в частности, разработки, касающиеся атмосферного аэрозоля [42, 43, 45].

Тропики, площадь которых составляет около половины земной поверхности, играют ключевую роль как фактор химических реакций и физических процессов в атмосфере. Обширные регионы высокопродуктивных тропических экосистем на суше представляют собой важные источники аэрозоля и малых газовых компонентов, воздействующих на формирование радиационного режима и окислительной способности атмосферы. Обширные территории, занятые крупнейшими в мире влажными тропическими лесами, находятся в бассейне р. Амазонки, подвергающемуся усиливающемуся антропогенному воздействию. Следствием происшедшего в конце 1970-х — начале 1980-х гг. сжигания биомассы в тропиках стали выбросы в атмосферу ряда ключевых МГК, оказавших существенное воздействие на химические процессы в глобальной атмосфере. Так, например, именно сжигание биомассы ответственно за 10–30% глобального бюджета окиси углерода, а также стало значительным источником таких МГК, как NO_x , CH_4 , COS и CO_2 .

В этом контексте, в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента по изучению крупномасштабного взаимодействия атмосферы и биосферы в Амазонии (LBA) в марте 1998 г. Крејсі и др. [47] выполнили самолетные измерения (всего осуществлено 10 полетов) характеристик атмосферного аэрозоля над северо-восточным регионом влажных тропических лесов Амазонии на высотах от 0,2 до 12,6 км. Анализ результатов наблюдений показал, что счетная концентрация аэрозоля в свободной тропосфере (нормированная по отношению к стандартным значениям температуры и влажности) оказалась выше в 2–15 раз, чем наблюдаемая в пограничном слое атмосферы, где характерное значение концентрации составляет 500 см^{-3} . Обна-

ружение подобного контраста между ПСА и свободной тропосферой согласуется с результатами, полученными ранее. Расчеты «обратных» траекторий воздушных масс показали, что даже спустя более 1 нед дальнего переноса воздушных масс в средней части тропосферы свыше одной трети суммарной счетной концентрации аэрозоля составляли вновь образовавшиеся ультрамелкие частицы.

Для вертикального профиля микроструктуры аэрозоля в диапазоне размеров 0,001–3 мкм, определенного по данным измерений в шести подслоях тропосферы, была типична С-образная форма при максимумах концентрации аккумуляционной моды аэрозоля в ПСА и в свободной тропосфере выше 10 км. Минимальная счетная концентрация аэрозоля зарегистрирована в слое 4–8 км. Увеличение концентрации частиц аккумуляционной моды аэрозоля на высотах более 10 км можно объяснить влиянием выноса частиц из проникающей конвективной облачности. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее важную роль в эволюции аэрозоля и его химического состава в атмосфере над влажными тропическими лесами играет конвекция. Перспективы дальнейших разработок должны предусматривать исследования: 1) свойств облачности и ее влияния на вертикальный перенос аэрозоля; 2) вымывания и переработки аэрозоля, осуществляемых облаками; 3) образования новых частиц в потоках воздуха, вытекающих из облаков.

В рамках программы европейского вклада в осуществление полевого наблюдательного эксперимента LBA-EUSTACH с целью исследований взаимодействия атмосферы и биосферы в период сезона сжигания биомассы в 1999 г. и перехода от сухого к влажному сезону (сентябрь–октябрь) Graham и др. [33a] получили пробы аэрозоля в репрезентативном районе пастбищ и в первичном влажном тропическом лесу в Рондонии (Бразилия). С использованием методик ядерной магнитной резонансной спектроскопии (NMR) и газовой хроматографии-масс-спектрометрии (GC-MS) был выполнен анализ с целью распознавания и определения содержания в аэрозоле воднорастворимых органических компонентов (WSOC).

Данные NMR свидетельствуют о том, что WSOC представляют собой главным образом алифатические или окисленные алифатические соединения (алкоголи, карбоксильные кислоты и др.) при небольшом содержании ароматических колец с карбоксильными и фенольными группами. Наиболее существенным компонентом, выявленным по данным GC-MS, оказался левоглюкозан (1,6-ангидро- β -D-глюкоза) — хорошо известный продукт сгорания глюкозы, концентрация которого варьировала в пределах 0,04–6,90 мкг/м³ и составляла 1–6% по отношению к общему углероду и 2–8% по отношению к WSOC. Другие ангидросахара, возникавшие при разрушении гемицеллюлозы, были обнаружены в меньших количествах, в дополнение к кислотам, гидроксикислотам, оксокислотам и полиалкоголям (в совокупности их содержание состав-

ляет 2–5% от ТС и 3–6% от WSOC). Наличие корреляции всех этих компонентов с органическим углеродом, черным углеродом и калием отображает их происхождение как продуктов сжигания биомассы.

В качестве компонентов природного фоновых аэрозоля идентифицированы такие соединения, как различные сахарные алкоголи (манитол, арабитол, эритритол) и сахара (глюкоза, фруктоза, маноза, галактоза, сукроза, трехалоза). По-видимому, эти компоненты возникают за счет содержащихся в атмосфере микробов и других биогенных веществ. Основная часть WSOC (86–91%) не отображается данными GC-MS, представляя собой преимущественно высокомолекулярные соединения.

Mayol-Brasero и др. [53] выполнили химический анализ полученных в октябре 1999 г. проб аэрозоля, взятых в Рондонии (Бразильская Амазония), на содержание углеродных соединений. Период наблюдений включает максимум сезона сжигания биомассы, а также переход от сухого к влажному сезону. Информация об углеродном компоненте аэрозоля получена с использованием методики термического сжигания для определения концентраций ТС, ВС и ОС. Значительная часть фракции ВС (обычно около 50%) представляет собой вещество, растворимое в воде.

В работе [53] выполнен детальный анализ воднорастворимого компонента органического углерода в составе ТС по данным измерений содержания WSOC с использованием высокочувствительной аппаратуры жидкостной хроматографии (HPLC) для разделения воднорастворимых компонентов, концентрация которых определяется с использованием методик газовой хроматографии/масс-спектрометрии. Согласно полученным результатам доля WSOC в ОС изменяется в пределах 45–75%. Столь высокое содержание WSOC отображает происхождение этого компонента аэрозоля как продукта тления при сгорании. Наличие данных GC/MS позволило распознать присутствие многих различных соединений, включая гидроксильные, карбоксилатные и карбонильные группы. Доля WSOC, определенная по данным GC/MS, составила около 10%. Три класса соединений были выделены по УФ-данным HPLC: нейтральные соединения, монокарбоксильные и дикарбоксильные кислоты (MDA), поликарбоксильные кислоты (РА). Суммарное содержание соединений этих трех групп составило около 70% WSOC, причем наиболее высокое содержание (около 50%) соответствовало MDA и РА.

Высокая корреляция (коэффициент корреляции $r^2 = 0,84 \pm 0,89$) между BC_{water} (ВС после удаления воды) и левоглюкозаном (оба эти соединения служат индикаторами сжигания биомассы) и, с другой стороны, — воднорастворимыми компонентами (т.е. WSOC, N, MDA и РА), а также их высокая концентрация во время сжигания биомассы были убедительным свидетельством того, что главный источник WSOC — сжигание биомассы. Особый интерес вызывает то обстоятельство, что в период процесса горения образовывались значи-

тельные количества РА и в этой связи, вероятно, — гумусоподобных веществ (ввиду их поликислотной природы). Подобные вещества, благодаря их высокой растворимости в воде и влиянию на понижение поверхностного натяжения, могут играть важную роль как факторы образования при сжигании биомассы частиц аэрозоля, которые могут функционировать как облачные ядра конденсации (ОЯК) и, следовательно, существенно влиять на свойства облаков и климат. В дальнейших исследованиях серьезное внимание будет уделено изучению фракции WSOC и ее воздействия на образование ОЯК.

Расположенные в бассейне р. Амазонки влажные тропические леса представляют собой крупнейший массив подобных лесов на земном шаре и, вероятно, являются наиболее значительным континентальным источником выбросов растительностью биогенных МГК и аэрозоля. Этот же регион подвержен и наиболее интенсивному обезлесиванию за счет лесных пожаров. По данным МГЭИК, сжигание биомассы оказывается в глобальных масштабах вторым по значению источником антропогенного аэрозоля, причем около 80% сжигания биомассы приходится на тропики (и примерно одна треть этого количества — на долю Южной Америки).

Условия интенсивной конвекции, связанной с динамикой внутритропической зоны конвергенции, благоприятствуют тому, что продукты природных и пирогенных выбросов в форме МГК и аэрозоля подвергаются интенсивному переносу в более высокие слои атмосферы и дальнему переносу в более высокие широты. В этой связи в рамках крупномасштабного полевого эксперимента по изучению взаимодействия атмосферы и биосферы в регионе Амазонии, а также европейских разработок с целью изучения МГК и химических процессов в атмосфере (LBA-EUSTACH) Guyon и др. [34] предприняли сбор проб различных фракций атмосферного аэрозоля в районе влажных тропических лесов Бразильской Амазонки в периоды апреля–мая и сентября–октября 1999 г. Эти два периода включают части влажного и сухого сезонов соответственно. Относящиеся к дневному и ночному времени пробы аэрозоля взяты на трех уровнях (над, внутри и под пологом леса) с использованием установленной в лесу метеорологической башни высотой 54 м. Применение методик рентгеновского эмиссионного и термооптического анализов позволило изучить состав аэрозоля на содержание 19 компонентов. Были осуществлены также гравиметрический анализ и определение содержания эквивалентного «черного углерода» (BC_e).

Измеренные средние значения массовой концентрации частиц диаметром больше 2 мкм оказались равными 2,2 и 3,5 мкг/м³ в условиях влажного и сухого сезонов соответственно. Для компонентов аэрозоля, образование которых было связано с сжиганием биомассы и выбросами почвенной пыли, было характерно достижение максимумов концентрации над пологом леса днем, тогда как аэрозоль, генерируемый лесом, был сосредоточен пре-

имущественно под пологом леса ночью. Подобная изменчивость может быть объяснена главным образом влиянием конвективного перемешивания днем и образования «мелкого» пограничного слоя ночью, а также более благоприятными условиями формирования биогенных выбросов аэрозоля ночью. Полученные значения массовых коэффициентов рассеяния (σ_s) и поглощения (σ_a) указывают на доминирующий вклад мелкодисперсного аэрозоля в формирование σ_s , тогда как величина σ_a в примерно одинаковой степени определялась влиянием мелко- и грубодисперсного аэрозоля в периоды обоих сезонов. Анализ данных наблюдений привел также к выводу, что не элементный углерод, входящий в состав частиц аэрозоля, а другие компоненты были ответственны за значительную часть обусловленного аэрозолем поглощения радиации.

Graf [33] исследовал комплексное взаимодействие между аэрозолем, генерируемым пожарами в амазонских лесах, и облаками. Этот аспект аэрозольных исследований будет обсужден в третьей части обзора.

Целый ряд локальных полевых экспериментов, осуществленных в Южной Америке, также сыграл заметную роль в исследованиях атмосферного аэрозоля.

Важный вклад в осуществление полевого наблюдательного эксперимента PRIDE в период 26 июня – 24 июля 2000 г. в регионе Пуэрто Рико с целью исследований сахарского ПА и его дальнего переноса внесли результаты дистанционного зондирования ПА при помощи установленного на спутнике Terra видеоспектро радиометра умеренного разрешения MODIS. Существенную часть программы PRIDE составили выполненные Levy и др. [50] сравнения данных MODIS с результатами наблюдений при помощи солнечного фотометра, а также прямых (*in situ*) наземных и самолетных измерений характеристик ПА. Обработка данных MODIS позволила располагать результатами восстановления аэрозольной оптической толщины над поверхностью океана и микроструктуры аэрозоля. Сравнение данных MODIS и СФ по АОТ на длине волны 660 нм обнаружило хорошее согласие. Однако данные MODIS оказались систематически завышенными на длинах волн 470 и 550 нм, но заниженными – в близкой ИК-области спектра (870 нм). Подобные погрешности дистанционного зондирования были обусловлены заниженностью восстановленных размеров частиц ПА по сравнению с данными как прямых измерений, так и с помощью СФ, что может отчасти быть связано с заданием в алгоритме восстановления микроструктуры ПА сферической формы частиц.

По данным измерений в двух точках в г. Мехико и в пяти городских пунктах Германии Baumgardner и др. [12] проанализировали соотношение между концентрацией в атмосфере ВС и окиси углерода СО. Во всех случаях коэффициент корреляции был больше 0,90. Осредненный наклон прямых линейной регрессии составил 2,2 мкг/мг (Германия) и 1,1 мкг/мг (Мехико).

Наиболее важными факторами, определяющими рассматриваемое соотношение, было отношение уровней использования дизельного к бензиновому топливу и эффективности сжигания этих топлив в двигателях. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования данных измерений концентрации СО для оценок содержания ВС в тех случаях, когда такого рода информация отсутствует.

3. Западная Европа

Один из наиболее содержательных западноевропейских полевых наблюдательных экспериментов был осуществлен в Германии в 1998 г.

LACE-98. В период с 13 июля по 12 августа 1998 г. в районе Линденбергской метеорологической обсерватории (Германия: 52,2° с.ш.; 14,1° в.д.) был осуществлен комплексный полевой наблюдательный эксперимент LACE-98 с целью изучения свойств аэрозоля по данным наземных и самолетных (три самолета) наблюдений. Комплекс научной аппаратуры включал, в частности, один самолетный и четыре наземных лидара. Наблюдения выполнены в условиях чистой и загрязненной атмосферы, которым соответствовал широкий диапазон значений аэрозольной оптической толщины. Ansmann и др. [10] сделали общий обзор использованного комплекса аппаратуры, проиллюстрированный некоторыми результатами наблюдений. Особое внимание привлекли данные за 9–10 августа 1998 г., когда в свободной тропосфере был обнаружен слой аэрозоля, возникший под воздействием лесных пожаров на западе Канады.

По данным наблюдений и расчетов получены значения аэрозольно обусловленного радиационного возмущающего воздействия на уровне тропопаузы, варьировавшие от -4 Вт/м^2 (в условиях чистой атмосферы) до -16 Вт/м^2 (для загрязненной атмосферы). Обработка самолетных лидарных данных показала, что альbedo однократного рассеяния было всегда меньше 0,9 (загрязненная атмосфера) и составляло 0,8–0,9 при наличии в свободной тропосфере аэрозольного слоя, образовавшегося за счет лесных пожаров в Канаде. Согласно данным наземных наблюдений АОР составляло в среднем 0,8.

Одна из важных задач LACE-98 состояла в осуществлении «замкнутого» аэрозольно-радиационного эксперимента. Получение необходимого комплекса данных о свойствах аэрозоля (микроструктуре и оптических параметрах) и радиационных потоках (как интегральных, так и спектральных) позволило выполнить корректное сравнение результатов наблюдений и численного моделирования. Petzold и др. [61] детально охарактеризовали специфические особенности наблюдаемых вертикальных профилей микроструктуры, коэффициента экстинкции и доли рассеянной назад радиации, которые следует учитывать при численном моделировании климата. Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 710 нм варьировала в период наблюдений от 0,18 до 0,06, а аэрозольно-обусловленное радиационное возмущающее воздействие для

системы «подстилающая поверхность — атмосфера» изменялось от (-33 ± 12) до (-12 ± 5) Вт/м².

Burdke и др. [16] выполнили в период LACE-98 наземные наблюдения микрофизических и оптических характеристик аэрозоля с использованием различной аппаратуры (аэрозольный фотометр, нефелометр, аппаратура PSAP для определения поглощения радиации, обусловленного сажевым аэрозолем; интегрирующая пластина, лидар). Данные горизонтально направленного лидара использовались для определения коэффициентов экстинкции и их зависимости от влажности. С этой же целью обрабатывались и данные фотометра. В работе [16] приведены некоторые результаты наблюдений. Значения альbedo однократного рассеяния изменялись в пределах 0,80–0,93.

Для определения в реальном масштабе времени химического состава частиц аэрозоля различных размеров в период полевого наблюдательного эксперимента LACE-98 Trimborn и др. [77] применили мобильный лазерный масс-спектрометр LAMPAS-2. Использование LAMPAS-2 позволило получить информацию о химическом составе пяти фракций (по размерам) аэрозоля при разрешении по времени, равном 1 ч (всего было зарегистрировано несколько десятков тысяч масс-спектров). Результатом статистической обработки данных наблюдений явилось обоснование 10 основных классов частиц, различающихся их химическим составом, в числе которых 4 класса, определяемые наличием минерального, морского солевого и углеродного аэрозоля, являются наиболее существенными.

Schröder и др. [67] проанализировали результаты статистической обработки данных самолетных (самолет-лаборатория Falcon) наблюдений суммарной счетной концентрации и микроструктуры аэрозоля, выполненных в июле–августе 1998 г. в регионе Берлина (13,5–14,5° з.д.; 51,5–52,7° с.ш.) в рамках эксперимента LACE-98. Анализ данных о вертикальных профилях счетной концентрации частиц и связанных с этим изменчивостей нуклеационной и крупнодисперсной мод частиц привел к выводу, что верхняя тропосфера служит мощным источником образования новых частиц из газов-предшественников. Наблюденная экстремальная эволюция аэрозоля рассматривается как обусловленная последовательностью процессов нуклеации, формирования аккумуляционной моды и воздействий аэрозоля на облака. Подобная интерпретация предполагает наличие близкой связи между источниками аэрозоля (нуклеация частиц из газообразных предшественников) и стоками аэрозоля (обусловленное облаками вымывание частиц аэрозоля). Детально рассмотрены процессы, которые ответственны за трансформацию жизненного цикла аэрозоля, и проанализированы данные о счетной концентрации и площади поверхности частиц для аэрозоля различных типов. Площадь поверхности сухих частиц аэрозоля варьирует в пределах 1–20 мкм²/см³ в свободной тропосфере и от 2 до 13 мкм²/см³ — в слое тропопаузы. Предложены схемы параметризации микроструктуры аэрозоля и пло-

щади поверхности частиц, которые могут быть использованы в моделях атмосферы. Обеспечение адекватной параметризации возможно, однако лишь на основе накопления значительно большего (более репрезентативного) объема данных наблюдений.

В период LACE-98 Ebert и др. [23] выполнили импакторные измерения микроструктуры атмосферного аэрозоля в диапазоне размеров 0,1–25 мкм, а с использованием методики рентгеновского флуоресцентного анализа получена информация об элементном составе аэрозоля — от калия до свинца ($11 \leq Z \leq 83$). Применение методик сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения и рентгеновского микроанализа позволило исследовать около 15,5 тыс. отдельных частиц аэрозоля, а примерно 3,8 тыс. частиц были изучены с помощью комбинированной методики трансмиссионной электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа.

Рассмотрение данных по морфологии и химическому составу частиц позволило осуществить их классификацию на следующие 10 групп: сульфаты аммония, сульфаты кальция, морские соли, окислы металлов/гидроокислы, карбонаты, силикаты, сажа, биологические частицы, смешанные углеродно-сульфатные частицы и остаточные частицы, обогащенные углеродом. На основе использования данных о микроструктуре и относительном содержании частиц различных групп в работе [23] найдены средние и дифференцированные по размерам значения комплексного показателя преломления (КПП). В зависимости от дней взятия проб действительная часть КПП варьировала в пределах 1,52–1,57 — изменчивость мнимой части КПП от 0,031 до 0,057 определялась вариациями содержания сажевого и углеродно-сульфатного компонентов. Полученные средние значения КПП находятся в хорошем согласии с результатами фотометрических измерений сухих фильтровых проб.

В ходе LACE-98 Wandinger и др. [79] выполнили синхронные наземные и самолетные (лидарные) измерения характеристик атмосферного аэрозоля. На двух самолетах-лабораториях была установлена также аппаратура для прямых (*in situ*) измерений оптических и микрофизических параметров аэрозоля. Лидарные данные служили источником информации о коэффициентах обратного рассеяния на восьми длинах волн в интервале 320–1064 нм, а также о коэффициенте экстинкции на 2–3 длинах волн в интервале 292–532 нм. Наличие подобной информации позволило восстановить микроструктуру аэрозоля. Использование двух алгоритмов восстановления открыло возможность получить данные об эффективном радиусе, объеме, площади поверхности, счетной концентрации и КПП частиц. Расчеты по формулам Ми дали значения альbedo однократного рассеяния. Результаты восстановления сопоставлены с данными прямых измерений микроструктуры аэрозоля и коэффициентов поглощения частиц.

В работе [79] приведены два примера обработки данных наблюдений. Ночью 9–10 августа 1998 г.

измерения были сделаны в аэрозольном слое, образовавшемся в тропосфере за счет лесных пожаров. Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 550 нм составляла около 0,1. Сравнения выявили наличие превосходного согласия между данными прямых измерений и дистанционного зондирования. Эффективный радиус частиц в центральной части шлейфа загрязнений составлял около 0,25 мкм, а значения КПП достигали $(1,56 \pm 1,66) + (0,05 \pm 0,07)i$. На длине волны 532 нм зарегистрированы весьма низкие значения АОР (0,78–0,83). Во втором из рассмотренных случаев (11 августа 1998 г.) наблюдались типичные для Центральной Европы условия промышленного загрязнения тропосферы. АОР (на длине волны 550 нм) составляла 0,35, а эффективный радиус частиц варьировал в пределах 0,1–0,2 мкм. В отличие от первого случая мнимая часть КПП оказалась меньше $0,03i$. Соответственно АОР изменялось от 0,87 до 0,95.

Wex и др. [84] осуществили сравнение рассчитанных значений коэффициентов рассеяния, обратного рассеяния и поглощения радиации для частиц атмосферного аэрозоля с результатами наземных и самолетных наблюдений, сделанных в рамках полевого эксперимента LACE-98 с целью изучения свойств аэрозоля в регионе Линденберга (Германия). Для коэффициентов рассеяния и обратного рассеяния расхождение между рассчитанными и измеренными значениями не превосходили $\pm 20\%$. При этом достоверность рассчитанных значений в сильной степени зависела от адекватности задания микроструктуры аэрозоля. Измеренные значения коэффициента поглощения оказались значительно меньше вычисленных, причем неопределенность последних была обусловлена главным образом зависящей от размеров частиц долей концентрации элементарного углерода. Использование метода Монте Карло при варьировании входных параметрах для вычислений изменчивости рассматриваемых коэффициентов привело к выводу, что измеренная изменчивость коэффициентов не выходит за пределы неопределенности вычислений (около $\pm 20\%$ для коэффициентов рассеяния и обратного рассеяния и $\pm 30\%$ коэффициентов поглощения). Таким образом, для снижения уровней неопределенности вычисленных коэффициентов необходимо уменьшить погрешности измерений микроструктуры аэрозоля. Требуют усовершенствования также методики измерений коэффициента поглощения аэрозоля и доли массовой концентрации элементарного углерода.

Взаимодействие частиц тропосферного аэрозоля с водяным паром оказывает влияние на время жизни частиц в тропосфере и механизмы их удаления из тропосферы. Гигроскопические свойства частиц аэрозоля зависят от химического состава воднорастворимой фракции частиц. Эти свойства контролируют содержание воды в частицах и, в конечном счете, размер отдельных частиц. В рамках программы Линденбергского полевого эксперимента LACE-98 Busch и др. [17] выполнили измерения гигроскопических свойств частиц атмосферного аэрозоля в диапазонах частиц Айткена, боль-

ших и гигантских частиц в условиях сельской местности, в 80 км к юго-востоку от Берлина. Гигроскопические свойства частиц Айткена определены для четырех классов размеров частиц (0,05, 0,1, 0,15 и 0,250 мкм) при помощи дифференциального анализатора подвижности в диапазоне относительной влажности от 60 до 90%. При относительной влажности 90% частицы аэрозоля можно было классифицировать на две группы («более» и «менее» гигроскопических фракций), но при уровне RH , равном 60%, подобная классификация невозможна.

Измеренные средние значения фактора роста «более» гигроскопических частиц составили 1,43; 1,49; 1,56 и 1,63 для частиц упомянутых классов размеров соответственно. В случае «менее» гигроскопических частиц зависимость фактора роста, составляющего около 1,1, от размеров частиц практически отсутствует. В предположении, что частицы аэрозоля состоят из сульфата аммония при наличии нерастворимого ядра, получены оценки доли объема водно-растворимого аэрозоля. Согласно оценкам для «более» гигроскопических частиц доли их объема равны 0,47; 0,52; 0,59 и 0,68, тогда как в случае «менее» гигроскопических частиц не зависящее от их размеров значение доли объема составляет около 0,1. При $RH = 60\%$ измеренные средние значения фактора роста варьировали в пределах 1,15–1,22, а доля объема водно-растворимой фракции изменялась от 0,41 до 0,59.

Согласно данным измерений для квазимонодисперсных проб частиц в диапазоне диаметров 0,4–3,8 мкм (с дифференциацией по семи уровням размеров) наблюдаются до трех классов доли объема водно-растворимых фракций. В некоторых случаях выявлено также наличие почти нерастворимых частиц, которые соответствуют менее гигроскопической фракции с долей водно-растворимых частиц около 0,5–0,7. Обычно имеет место и третий класс частиц с долей объема водно-растворимой фракции около 0,85. В диапазоне частиц диаметром меньше 0,7 мкм сильно доминируют почти полностью водно-растворимые частицы третьего класса, тогда как в случае частиц диаметром больше 0,7 мкм распределение доли объема частиц всех классов размеров достаточно однородно. В период полевого эксперимента LACE-98 не наблюдалось существенных вариаций доли объема больших и гигантских частиц.

В ноябре 1997 г. в районе г. Мельпитца, а в июле–августе 1998 г. вблизи Линденберга (Германия) были осуществлены комплексные полевые наблюдательные эксперименты MINT и LACE-98 с целью исследований атмосферного аэрозоля и его влияния на перенос коротковолновой радиации. При помощи различной наземной и самолетной аппаратуры измерялись микроструктура и (в зависимости от размера частиц) химический состав аэрозоля, а также оптические параметры и радиационные потоки (как интегральные, так и спектральные в коротковолновом диапазоне).

С целью оценки качества полученной информации Neusüss и др. [59] выполнили сравнение различных методик измерения распределения массы

частиц по их размерам. Гравиметрическая масса мелкодисперсного аэрозоля интерпретируется как обусловленная главным образом вкладом углеродного вещества и ионов, а также воды, усвоение которой связано с наличием гигроскопических компонентов аэрозоля. Для характеристики крупнодисперсной фракции аэрозоля, вклад которой в суммарную массу является менее значительным, важно учитывать наличие в ней нерастворимого вещества. Массовая концентрация, рассчитанная по данным о микроструктуре аэрозоля, хорошо согласуется с гравиметрической массовой концентрацией. Однако рассчитанные значения превосходят измеренные, особенно в случаях мод Айткена и аккумуляционной. Вычисленная по данным о микроструктуре массовая концентрация особенно чувствительна к погрешностям определения счетной концентрации частиц различных размеров. Суммарная погрешность вычисленных значений составляет около 10%.

Для различных типов воздушных масс в работе [59] приведены значения параметров логнормальных распределений, относящихся к распределениям по размерам счетной концентрации, массы и объема частиц. Как правило, модальные параметры для различных воздушных масс не отличаются существенно. Наиболее высокие значения массовой концентрации связаны с увеличением размеров частиц (мод Айткена и аккумуляционной), но не с ростом числа частиц данной моды. Как правило, доля массы углерода возрастает с уменьшением размеров частиц. Наиболее значительными особенностями годового хода являются возрастание содержания углерода в частицах от лета к зиме, а также увеличение содержания нитрата, порождающее спад содержания сульфата. В случае содержания нитрата наблюдается сильная зависимость от направления прихода воздушной массы. Обычно происходит нейтрализация сульфата и нитрата, обусловленная аммонием.

Помимо такого крупномасштабного эксперимента, как LACE-98, в Европе были выполнены многочисленные другие полевые исследования атмосферного аэрозоля.

Во время происшедших с 16 июня по 25 июля 1997 г. четырех эпизодов мощных выбросов (шлейфов на высотах более 500 м) аэрозольных загрязнений атмосферы из Западной Европы на акваторию Атлантического океана Müller и др. [57] выполнили лидарные зондирования с целью восстановления вертикальных профилей физических характеристик аэрозоля и альbedo однократного рассеяния на длине волны 532 нм. Результаты наблюдений при помощи шестиволнового лидара, установленного поблизости от Сагре, Португалия (37° с.ш., 9° з.д.), в рамках Программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-2, были использованы для восстановления вертикальных профилей коэффициента обратного рассеяния на длинах волн 355, 400, 532, 710, 800 и 1064 нм, а также коэффициента экстинкции на длинах волн 355 и 532 нм.

Согласно полученным результатам эффективный радиус частиц аэрозоля составлял $(0,15 \pm 0,06)$ мкм, объемная концентрация частиц варьировала в пределах $6\text{--}27$ мкм³/см³, а площадь поверхности частиц изменялась от 80 до 1200 мкм²/см³. Среднее значение мнимой части независимого от длины волны комплексного показателя преломления достигало лишь $(0,009 \pm 0,010)i$, т.е. поглощение радиации частицами аэрозоля оказалось, как правило, ничтожно малым. Среднее значение вещественной части показателя преломления составило $1,56 \pm 0,07$, а АОП на длине волны 532 нм было равно $0,95 \pm 0,06$. Полученные результаты указывают на то, что доминирующим в составе аэрозоля был аммоний — сульфатный компонент — и только небольшую примесь составлял поглощающий радиацию сажеобразный компонент. Корреляционный анализ выявил наличие высокой корреляции между эффективным радиусом частиц и коэффициентом Ангстрема. Обнаружена также корреляция между АОП, отношением коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции, а также мнимой частью комплексного показателя преломления. Сходство полученных результатов с данными полевого наблюдательного эксперимента TARFOX свидетельствует о том, что являющиеся источниками аэрозоля процессы внутреннего сгорания в Европе незначительно отличаются от происходящих в Северной Америке. Значительными оказались, однако, различия с данными INDOEX и SCAR-B, что обусловлено в первом из этих случаев образованием углеродных соединений за счет сжигания угля, функционирования дизельных двигателей и (или) сжигания биомассы, а во втором из упомянутых случаев — сжиганием биомассы.

В рамках поддерживаемой Всемирной метеорологической организацией Аэрозольной программы мониторинга глобальной атмосферы на исследовательской станции, расположенной на горе Юнгфрауях (2580 м над уровнем моря), Henning и др. [36] выполняли непрерывные наблюдения химического состава атмосферы, начиная с июля 1999 г., в течение 1,5 лет. Забор фильтровых проб производился с учетом двух классов частиц: всех частиц и частиц с аэродинамическим диаметром меньше 1 мкм. Хроматографический анализ состава проб сделан на содержание главных ионов, массовая концентрация которых составляла около 30% суммарной массовой концентрации аэрозоля. В работе [36] получено среднегодовое значение суммарной ионной массовой концентрации, равное $1,04$ мкг/м³. Главными компонентами мелкодисперсной фракции аэрозоля были сульфат, аммоний и нитрат, тогда как доминирующими компонентами растворимой в воде крупнодисперсной моды были кальций и нитрит. Анализ отдельных частиц грубодисперсной моды показал, что они представляют собой внутреннюю смесь кальция и нитрата. Суммарная массовая концентрация ионов характеризуется наличием сильного годового хода при значениях концентрации, равных 1,25; 1,62; 0,70 и 0,25 мкг/м³

весной, летом, осенью и зимой соответственно. Что касается отдельных компонентов аэрозоля, то концентрация сульфата, нитрата и аммония изменялась сильнее, чем кальция (последнее обусловлено, вероятно, наличием локальных источников кальция, а также поступлением сахарского аэрозоля, которое не зависит от времени года).

Несмотря на интенсивные усилия в области исследований качества воздуха, остается много нерешенных вопросов, что обусловлено прежде всего недостаточной комплексностью разработок. Именно поэтому Vautard и др. [78] предприняли осуществление комплексного полевого наблюдательного эксперимента EQUIF, главной задачей которого было всестороннее изучение загрязнений атмосферы в большом городском регионе Парижа с последующим использованием результатов наблюдений для проверки адекватности моделей качества воздуха, воспроизводящих загрязнение атмосферы за счет фотооксидантов.

Главные разделы EQUIF включали исследования: 1) чувствительности процессов образования приземного озона к различным факторам (дальний перенос, уровни городских выбросов, соотношение антропогенных и биогенных выбросов); 2) адекватности данных по инвентаризации выбросов (NO_x , CO, VOC и др.); 3) влияния аэрозоля и облаков на скорость фотолиза); 4) роли фотохимических процессов в эпизодах повышения концентрации NO_2 зимой; 5) путей совершенствования методик измерений и численного моделирования; 6) специфики пространственно-временной изменчивости аэрозоля в регионе Парижа.

В период 1998–2000 гг. в различных районах Парижа были выполнены наблюдения, основной частью которых были 12 периодов интенсивных наблюдений (IOP), преимущественно в летнее время года. Условия наблюдений характеризовались большим разнообразием метеорологических ситуаций, особенно таких, когда происходило сильное загрязнение атмосферы Парижа и его окрестностей. Система наблюдений включала круговые полеты вокруг города в сочетании с наземными наблюдениями с использованием методик прямых (*in situ*) измерений и дистанционного зондирования. Наличие комплексных данных наблюдений позволило проследить трехмерную эволюцию событий загрязнений (в целом атмосферу Парижа нельзя считать сильно загрязненной).

В работе [78] выполнено сравнение данных наблюдений для различных IOP с точки зрения выявления специфики различных событий загрязнения атмосферы, включая, в частности, оценки роли дальнего переноса. Сопоставлены также данные наблюдений и результаты численного моделирования (с использованием методик сопряженных уравнений и Монте-Карло). Важная цель подобного сопоставления состояла в оценках роли корректного учета граничных условий, задания выбросов загрязняющих атмосферу компонентов (включая биогенные) и правильного воспроизведения процессов фотолиза.

Анализ данных наблюдений, полученных в периоды IOP, показал, в частности, что события загрязнений возникают в условиях застойной атмосферы очень быстро. При этом максимумы концентрации оксидантов наблюдались при большой или при малой высоте пограничного слоя атмосферы и даже в таких условиях, когда не было заметных температурных инверсий. Наиболее значительные максимумы загрязнений формировались как следствие локальных загрязнений при благоприятствующих усилению загрязнений метеорологических условиях, но в ряде случаев существенный вклад вносил и дальний перенос загрязнений.

Химический анализ проб городского аэрозоля, взятых в г. Генте (Бельгия), выполненный Kubátova и др. [48] с использованием методик газовой хроматографии и масс-спектрометрии, выявил присутствие примерно 100 различных органических соединений. Наличие проб, полученных в разное время года, позволило проследить за изменениями состава аэрозоля в течение года. Состав органических соединений отображал прежде всего (как зимой, так и летом) свойства продуктов автомобильных выбросов. В число преобладающих органических соединений входили (в течение всего года) *n*-алканы и жирные кислоты, причем относительное содержание различных органических компонентов характеризовалось наличием отчетливого годового хода. Для изменчивости содержания *n*-алканов в аэрозоле летом было типично проявление воздействия биогенных выбросов, обусловленных растительностью.

Характерная особенность годового хода содержания жирных кислот состояла в том, что концентрация ненасыщенных жирных кислот летом была более низкой чем зимой, что могло быть связано с происходящими летом процессами более интенсивного окисления ненасыщенных жирных кислот. Содержание дикарбоксильных кислот и связанных с ними продуктов, которые возникают, по-видимому, за счет окисления углеводородных соединений и жирных кислот, было максимальным летом. В некоторых случаях подобные соединения могли быть обнаружены только летом, достигая максимальной концентрации в жаркие летние дни при максимальной температуре воздуха выше 25 °C и повышенной концентрации приземного озона. Такого рода соединения включали недавно обнаруженные производные глутаричной кислоты, 3-изопропил и 3-ацетил пентанедиоичную кислоту, которая образуется, вероятно, при окислении в атмосфере химически активного монотерпена или предшественников сесквитерпена, которые еще не были идентифицированы. Некоторые из обнаруженных соединений являются индикаторами сгорания древесины, включая дитерпиноичные кислоты, продукты гидролиза лигнина и левогликозан. Результаты измерений содержания дитерпиноичных кислот и продуктов пиролиза лигнина свидетельствуют о том, что вклад сжигания древесины был более значителен зимой, чем летом. Полученные данные отображают тот факт, что в формирование

органического аэрозоля вносит вклад сжигание как твердой (лиственные породы), так и мягкой древесины, но зимой преобладает вклад твердой древесины. Повышение концентрации зимой характерно также для полиароматических углеводородных соединений.

De Tomasi и др. [22] обсудили результаты восстановления вертикальных профилей концентрации водяного пара и аэрозоля, осуществленного с использованием регулярных данных наблюдений при помощи комбинированного рэлеевско-рамановского лидара, основанного на применении эксимерного лазера XeF (длина волны 351 нм). Этот лидар, установленный на юге Италии (40°20' с.ш.; 18°06' в.д.), функционировал в рамках программы наблюдений на европейской сети станций аэрозольного лидарного зондирования. В течение нескольких месяцев производились синхронные наблюдения вертикальных профилей аэрозольного обратного рассеяния $R(z)$, аэрозольного коэффициента экстинкции $\sigma_{\lambda_0}^{aer}(z)$ и отношения смеси водяного пара $w(z)$ с целью изучения корреляции между $R(z)$ и $\sigma_{\lambda_0}^{aer}(z)$, с одной стороны, и $w(z)$, имея в виду выявление закономерностей изменчивости оптических свойств аэрозоля. Обнаружена сильная корреляция между пространственной и временной эволюцией $R(z)$ и $w(z)$ летом и осенью. Имеет место возрастание $R(z)$ с увеличением w . Значения общего содержания аэрозоля и водяного пара меньше осенью, чем летом. Анализ рассчитанных за 4 сут «обратных» траекторий воздушных масс показал, что зависимость $\sigma_{\lambda_0}^{aer}(z)$ и $R(z)$ от w изменяется под воздействием вариаций адвекции в пункте наблюдений. Наблюдалось усиление вклада аэрозоля в формирование $R(z)$ и $\sigma_{\lambda_0}^{aer}(z)$ при поступлении воздушных масс из северных и восточных регионов Европы. В этих условиях средние значения лидарного отношения S возрастали до 50–63 ср. При поступлении воздушных масс из Северной Африки средние значения S варьировали от 48 до 74 ср.

В период с января по сентябрь 2000 г. в сельском пункте Венгрии Kiss и др. [41] осуществили забор проб мелкодисперсного аэрозоля (диаметр частиц $d_p < 1,5$ мкм), анализ которых показал, что содержание общего углерода в аэрозоле варьировало от 5 до 13 мкг/м³ и от 3 до 6 мкг/м³ в течение первых 3 мес и остальной части периода наблюдений соответственно. В среднем растворимый в воде органический углерод составлял 66% по отношению к концентрации общего углерода независимо от времени года. Изменчивая часть воднорастворимых компонентом (38–72% от WSOC, в зависимости от пробы) была отделена от неорганических ионов и изолирована в виде чисто органических соединений с использованием методики отфильтровывания твердой фазы. Эта фракция аэрозоля характеризовалась значением отношения содержания органического вещества к органическому углероду, равным 1,9, которое оставалось практически постоянным в течение года. Было получено следующее

молярное соотношение, характеризующее элементный состав: C : H : N : O \approx 24 : 23 : 1 : 14 для органической фракции, свидетельствующее о доминировании окисленных функциональных групп и о низком отношении концентрации водорода к углероду, на что указывает наличие ненасыщенных или поливзаимосвязанных структур.

Подобные выводы подтверждают результаты анализа с применением данных УФ, флуоресцентной и Фурье-спектрометрии. Теоретические оценки соотношения масс-органического вещества и органического углерода привели к значению, равному 2,3 для неизолированной водно-растворимой фракции и 2,1 – для WSOC. С целью получения данных об общем органическом углероде, которые необходимы для замыкания баланса углерода, вслед за водным экстрагированием осуществлялось экстрагирование с использованием ацетона и раствора 0,01 М NaOH. Благодаря этому было получено значение отношения масс общего органического вещества и общего углерода, составляющее 1,9–2,0.

По данным анализа проб аэрозоля, взятых на обсерватории Puu de Dome (высота над уровнем моря 1465 м) в 2000–2001 гг., Sellegri и др. [68] исследовали зависимость химического состава аэрозоля от размеров частиц. Для проб, полученных с применением двух видов каскадных импакторов, выполнен химический анализ проб на содержание ионов неорганических соединений (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-}) и органических соединений (HCOO^- , CH_3COO^- и $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$), а также органического и элементного углерода, нерастворимой пыли и суммарной массы аэрозоля. При наличии облаков пробы содержали также аэрозоль, содержащийся в воздухе внутри облаков. Анализу подвергались и остающиеся после испарения облачных капель твердые соединения.

Полученные результаты относятся к воздушным массам трех категорий (в зависимости от содержания и состава аэрозоля): фоновых (BG), антропогенных (ANT) и специфических (EV), включающих перенос пыли из Сахары, а также поступление в пункт наблюдений аэрозоля из загрязненного пограничного слоя атмосферы. С учетом наличия или отсутствия крупных частиц морского солевого аэрозоля различались воздушные массы, подвергшиеся (или не подвергшиеся) воздействию океана. Для всех трех категорий воздушных масс в случаях частиц субмикронного аэрозоля удалось замкнуть баланс массы (с погрешностью, равной 18,5%), что отображает адекватность полученной информации о свойствах аэрозоля в свободной тропосфере Западной Европы. Суммарная масса аэрозоля при относительной влажности, равной 50%, составила примерно $(2,7 \pm 0,6)$ (BG); $(5,3 \pm 1,0)$ (ANT) и $15\text{--}22$ мкг/м³ (EV). Анализ распределения массы аэрозоля по размерам выявил наличие двух субмикронных мод: Acc1 (средний геометрический диаметр равен $(0,2 \pm 0,1)$ мкм) и Acc2 ($(0,5 \pm 0,2)$ мкм), а также одной супермикронной моды ((2 ± 1) мкм).

Свойства аэрозоля характеризуются наличием высокой степени внешнего перемешивания по отношению к углеродсодержащим соединениям (ЕС и ОС) и ионам, входящим в состав Асс1 и Асс2. Концентрация легких карбоксилатов и минеральной пыли ни в одном из случаев не превосходила 4% по отношению к общему содержанию рассмотренных компонентов, за исключением событий переноса сахарской пыли, вклад которой (при наличии подобного переноса) достигает 26% по отношению к суммарной массе аэрозоля. Относительное содержание водно-растворимых неорганических углеродсодержащих соединений варьировало (в зависимости от типа воздушной массы) в пределах 25–70% по отношению к общей массе соответственно. Доля фракции ОС выше в случае воздушных масс с низким содержанием аэрозоля: 53, 32 и 22 для BG, ANT и EV соответственно. Наоборот, доля ЕС повышается с 4% в BG до 10% в ANT и 14% в EV. Содержание неорганической фракции выше в EV (55%) и ANT (60%), чем в BG (40%) за счет повышения концентрации нитрата и в меньшей степени – сульфата и аммония.

Наблюдаемый в атмосфере органический углерод возникает за счет нескольких источников, в число которых входят: выбросы органического углерода за счет сжигания ископаемых топлив и биомассы, а также газообразные продукты процессов фотохимического окисления, имеющие как антропогенное, так и биогенное происхождение. Поскольку важным индикатором процессов образования органического углерода является химический состав атмосферного аэрозоля, Alves и др. [9] выполнен анализ проб аэрозоля, взятых в условиях городской окружающей среды в Португалии (города Лиссабон и Авейро) и в финском лесу. С использованием методики пламенной хроматографии экстракты раствора аэрозольного вещества разделялись на фракции, характеризующие содержание таких соединений, как алифатические и ароматические соединения, карбонилы, алкоholes и кислотные фракции, которые анализировались с применением газовой хроматографической и масс-спектрометрической методик. Для оценки содержания углеродных компонентов, водно-растворимой фракции и раствора в целом в пробах применялся анализатор органического (черного) углерода.

Анализ полученных в работе [9] результатов продемонстрировал, что экстрагирование с помощью дихлорметана обеспечивает перевод в состояние раствора менее 50% массы органического вещества аэрозоля, но использование в качестве растворителя также воды позволяет (суммарно) трансформировать в раствор около 70–90% органического вещества составляющего органические соединения, среди которых преобладают органические кислоты и алкоholes, особенно в случае частиц диаметром меньше 0,49 мкм. Анализ содержания органических компонентов аэрозоля, имеющих антропогенное и биогенное происхождение, продемонстрировал, что в последнем случае основными источниками

являются растительный воск и петрогенные источники, но некоторый вклад вносят и продукты окисления летучих органических соединений, а растворимая в воде фракция включает оксокарбоксильную и дикарбоксильную кислоты, а также целлюлозу.

Что касается антропогенных компонентов проб, то неполярные фракции составляют до 24% экстрагированного органического углерода в Лиссабоне (при большой доле вклада продуктов бензина), тогда как в условиях леса – 8%. В пробах из Авейро и из Финляндии 76–92% экстрагированного углерода составляют окисленные органические соединения. Следствием благоприятных условий для фотохимических процессов в период наблюдений является высокий уровень концентрации вторичных органических соединений, который характерен для данных, полученных в г. Авейро. Для участка леса в Финляндии типичны сильная изменчивость водно-растворимых компонентов и высокий уровень концентрации подобных компонентов.

При помощи комплекса аппаратуры, установленной на принадлежащем метеослужбе Великобритании самолете-лаборатории C-130, в августе 1998 г. Formenti и др. [26] выполнили измерения концентрации сернистого газа, а также физических и химических свойств аэрозоля в свободной атмосфере над Эгейским морем. Значения отношения смеси SO_2 в атмосфере вблизи Салоник достигали 18 млрд^{-1} , а аэрозольного сульфата – до 500 трил^{-1} . Наиболее высокий уровень концентрации имел место в слое 1–2 км, тогда как вблизи подстилающей поверхности концентрация SO_2 уменьшалась до $1\text{--}4 \text{ млрд}^{-1}$. Данные наблюдений выявили наличие переноса загрязнений над Эгейским морем на юг, до о-ва Крит, где зарегистрированы значения отношения смеси до 5 млрд^{-1} . Совместный анализ результатов измерений концентрации SO_2 , сульфата и микроструктуры аэрозоля показал, что воздушные массы содержат продукты выбросов в атмосферу компонентов различного возраста, варьирующего от нескольких часов до нескольких суток.

Наблюдавшиеся в атмосфере над северной Грецией загрязнения за счет сжигания ископаемых топлив были обусловлены переносом из Восточной Европы (Болгарии, Румынии и Турции). Кроме того, данные измерений отображают существование значительного вклада лесных пожаров. Это особенно относится к слоям дымки, сформировавшимся десятью днями раньше под воздействием лесных пожаров в северо-западном регионе Канады и претерпевшим перенос через Атлантический океан. На высотах более 1 км наблюдались слои окиси углерода CO толщиной около 1–2 км, которые часто характеризовались двухслойностью вертикальной структуры при наличии второго слоя на высотах более 3,5 км. Оценки показали, что вклады сжигания биомассы в формирование слоев СО над Грецией примерно в четыре раза превосходили вклады за счет сжигания ископаемых топлив. Для нижних слоев атмосферы типично наличие высокой счетной концентраций частиц N_p аккумуляционной моды (0,1–1 мкм) при отношении N_p/CO порядка 2–

$6 \text{ см}^{-3}/\text{млрд}^{-1}$, тогда как в верхней части тропосферы N_p уменьшается за счет конвекции и вымывания. Счетная концентрация частиц моды Айткена ($0,005\text{--}0,1 \text{ мкм}$) оказалась пониженной как в нижних, так и в верхних слоях. Это означает, что подобные частицы, первоначально присутствовавшие в нижних слоях, к моменту их обнаружения выросли до размеров частиц аккумуляционной моды.

Над точкой в северо-восточной Греции ($40^{\circ}24' \text{ с.ш.}; 23^{\circ}57' \text{ в.д.}$), где производились непрерывные наземные спектральные измерения нисходящих потоков коротковолновой радиации (суммарной, рассеянной и прямой солнечной), Formenti и др. [27] осуществили синхронные самолетные наблюдения (в процессе спуска самолета-лаборатории C-130) вертикальных профилей физических, химических и оптических характеристик атмосферного аэрозоля, первоначально образовавшегося при сжигании биомассы (в процессе лесных пожаров в северо-западном регионе Канады с последующим дальним переносом через Атлантический океан).

Согласно данным наземных измерений значения аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм оказались повышенными ($0,39$) за счет слоя дымки, сформировавшегося на высотах $1\text{--}3,5 \text{ км}$. Обусловленный сухими частицами аэрозоля коэффициент рассеяния в этом слое составлял около 80 М/м ($1 \text{ М} = 10^{-6} \text{ м}^{-1}$), а коэффициент поглощения 15 М/м , что соответствовало альбедо однократного рассеяния на длине волны 500 нм , равному примерно $0,89$ (для сухих частиц). Оценки доли «черного углерода» дали значения в пределах $6\text{--}9\%$ по отношению к массе частиц аккумуляционной моды (диаметром меньше 1 мкм). Обусловленный увеличением относительной влажности рост коэффициента рассеяния достигал примерно 40% при возрастании относительной влажности от 30 до 60% . При задании микроструктуры и оптических свойств (в зависимости от высоты) сухого аэрозоля сделаны расчеты спектральных нисходящих потоков коротковолновой радиации на уровне подстилающей поверхности. Сравнение рассчитанных величин с наблюдаемыми выявило согласие в пределах расхождений не более 10% в случаях прямой солнечной и рассеянной радиации на длинах волн $415, 501$ и 615 нм . Вычисления радиационного возмущающего воздействия на уровнях подстилающей поверхности и верхней границы атмосферы (ТОА) показали, что влияние поглощения радиации аэрозолем значительно сильнее проявляется у поверхности, чем на уровне ТОА. Значения РВВ над морем, рассчитанные для интервала длин волн $280 \text{ нм} - 4 \text{ мкм}$, достигают -64 Вт/м^2 у поверхности и -22 Вт/м^2 на уровне ТОА. Таким образом, отношение величины РВВ у поверхности и на уровне ТОА достигает примерно 3 , что согласуется с результатами, полученными по данным полевого эксперимента INDOEX.

Johansen и Hoffmann [39] обсудили результаты анализа проб атмосферного аэрозоля на содержание лабильного Fe(II) и других трассерных метал-

лов. Пробы взяты над Аравийским морем с германского НИС «Sonne» в марте 1997 г. в рамках программы JGOFs по изучению взаимодействия между океаном и атмосферой. Ранее аналогичные судовые наблюдения были выполнены в течение двух других сезонов. Анализ проб на содержание черного железа производился сразу после их взятия, а концентрации других трассерных металлов, анионов и катионов определялись после возвращения из рейса в лабораторных условиях.

Главный компонент минерального состава аэрозоля определялся средним составом горных пород, а его массовая концентрация составляла $(5,94 \pm 3,08) \text{ мг/м}^3$. Дополнительный компонент типа глин, обогащенных воднорастворимыми Mg^{2+} и Ca^{2+} , зарегистрирован в мелкодисперсном аэрозоле в воздушных массах аравийского происхождения. Общая концентрация соединений железа изменялась в пределах $3,9\text{--}17,2 \text{ нг/м}^3$ при среднем значении $(9,8 \pm 3,4) \text{ нг/м}^3$, причем доля Fe(II) , сконцентрированного в мелкодисперсном аэрозоле, составляла $(87,2 \pm 3,37)\%$ (это эквивалентно, в среднем, $(1,3 \pm 0,5)\%$ по отношению к общему железу). Антропогенный вклад в состав аэрозоля, отражаемый содержанием Pb , Zn , а также некоторых анионов и катионов, оказался больше (особенно в течение первых 10 сут рейса), чем зарегистрированный ранее по данным наблюдений в периоды между муссонами и во время юго-западного муссона в 1995 г.

4. Высокие широты

Исследования аэрозоля в высоких широтах давно привлекают большое внимание, и соответствующие результаты широко обсуждались в научной литературе, включая недавнюю монографию [14, 44]. Поэтому уместо ограничиться лишь отдельными комментариями.

На основе использования данных самолетных импакторных и фильтровых наблюдений свойств атмосферного аэрозоля в арктической тропосфере, полученных в ходе осуществления полевого наблюдательного эксперимента ASTAR в регионе о-ва Шпицберген (Свалбард) в марте–апреле 2000 г., Нага и др. [35] проанализировали состояние перемешанности частиц аэрозоля. Обработка результатов наблюдений показала, что главными компонентами как фонового аэрозоля, так и арктической дымки являются сульфат и сажа, тогда как вклад морского солевого аэрозоля преобладал лишь в нижней тропосфере (на высотах меньше 3 км). Минеральные/пылевые, а также неизвестные компоненты были обнаружены в период рассматриваемых наблюдений лишь как второстепенные.

Самолетные измерения свойств аэрозоля были выполнены в различных условиях, включая случаи арктической дымки (23 марта) и обогащенной аэрозолем атмосферы (20 марта и 12 апреля). Максимальное относительное содержание сажевого компонента ($\sim 94,7\%$) зарегистрировано в свободной тропосфере 23 марта, когда имела место наиболее интенсивная за период наблюдений арктическая

дымка. В течение нескольких суток антропогенный аэрозоль поступал в регион о-ва Свалбард из промышленных регионов России. Анализ проб аэрозоля привел к выводу, что в условиях арктической дымки и обогащенной аэрозолем тропосферы доминировали частицы, характеризуемые внешней перемешанностью сульфатного и сажевого компонентов, тогда как в случаях фонового аэрозоля преобладала, как правило, внутренняя перемешанность. С другой стороны, для большинства частиц в свободной тропосфере, содержащих сульфат, была типична внешняя перемешанность с сажевым и другими компонентами аэрозоля как при наличии арктической дымки, так и в фоновых условиях. Морской солевой аэрозоль доминировал, однако в нижних слоях тропосферы (иногда в нем происходило уменьшение концентрации Cl^-), хотя некоторое количество морских солевых частиц зарегистрировано также в средней и верхней тропосфере (на высотах 3–7 км).

Химический состав атмосферного аэрозоля во многих регионах земного шара (включая городские условия, морскую и полярную атмосферу) характеризуется наличием гомологических рядов низкомолекулярных дикарбоксильных кислот (LMW). Последние образуются при сжигании ископаемых топлив и биомассы, а также в процессах фотохимического окисления как антропогенных, так и биогенных органических предшественников. В настоящее время LMW рассматриваются как существенные компоненты водно-растворимого органического аэрозоля. Их важная функция состоит в том, что частицы подобного аэрозоля могут функционировать как облачные ядра конденсации и, таким образом, оказывать прямое и косвенное воздействие на формирование радиационного возмущающего воздействия. Недавние данные наблюдений показали, что в период полярного восхода Солнца происходит сильное (в 5–20 раз) возрастание концентрации LMW в атмосфере, которое можно интерпретировать как следствие фотохимического образования дикарбоксильных кислот путем окисления их антропогенных предшественников, поступающих в Арктику из средних и высоких широт. Если главными предшественниками являются летучие органические соединения, то естественно предположить возможность важной роли газофазных процессов

в образовании LMW в субмикронных частицах аэрозоля. Другая возможность состоит в функционировании гетерогенных реакций как механизма образования LMW на частицах супермикронных размеров. До сих пор отсутствуют, однако, данные наблюдений микроструктуры кислотного аэрозоля в арктической атмосфере.

С целью получения такого рода данных Nagakawa и др. [58] получили пробы фракций мелко- (диаметр частиц $d_p < 1$ мкм) и крупнодисперсного ($d_p > 1$ мкм) аэрозоля в период полярного восхода Солнца на станции Алерт (82°30' с.ш.; 62°21' з.д.) с 29 марта по 14 апреля 1997 г., что составляло часть программы полевого наблюдательного экспе-

римента PSE-1997. Применение методик газовой хроматографии с использованием ионизационного детектора (GC-FID) и масс-спектрометрии обеспечило анализ проб на содержание низкомолекулярных (C_2 – C_{11}) дикарбоксильных кислот.

Результаты анализа показали, что более 80% LMW сконцентрировано в мелкодисперсной фракции аэрозоля, что отображает наличие в Арктике газофазного процесса образования подобного аэрозоля. В обеих фракциях аэрозоля преобладает вклад оксаличной кислоты как компонента LMW, за которым следуют сукциничная и малонициная кислоты. 5–7 апреля был зарегистрирован максимум концентрации дикарбоксильных кислот с более короткими цепями (C_2 – C_5), тогда как в случае LMW с более длинными цепями ($> C_6$) подобного максимума не наблюдалось.

В период наблюдений зафиксирован значительный спад концентрации приземного озона при наличии отрицательной корреляции между концентрациями озона и (C_2 – C_5) дикарбоксильных кислот в мелко- и грубодисперсной фракциях аэрозоля. В обеих этих модах аэрозоля замечена также повышенная концентрация фильтруемого брома. Наличие упомянутого максимума концентрации LMW в обеих фракциях аэрозоля во время спада концентрации озона указывает на существование гетерогенных реакций на поверхности больших и, возможно, малых частиц. Образование дикарбоксильных кислот могло быть также связано с окислением таких соединений — предшественников как глиоксальная, глиоксилициная и другие ω -оксикарбоксильные кислоты, которые содержат соединения гидратированной формальдегидной группы, принимающие активное участие в химических процессах трансформации приземного озона и галоенов в морском пограничном слое атмосферы Арктики.

В периоды 5–20 января 2000 г. и 1–26 января 2001 г. Коронен и др. [46] осуществили измерения концентрации и микроструктуры атмосферного аэрозоля на антарктической станции Абоа (73°03' ю.ш.; 13°25' з.д.), расположенной на расстоянии около 130 км от береговой линии на высоте 480 м над уровнем моря. В течение упомянутых периодов лета южного полушария получены данные о суммарной счетной концентрации частиц аэрозоля, имеющих диаметр в интервале 0,003–0,8 мкм, которые отображают наличие вариаций в пределах 200–2000 $см^{-3}$. Значения концентрации оказались более высокими в морских/прибрежных, чем в континентальных воздушных массах. Предполагается, что высокий уровень концентрации (более 300–400 $см^{-3}$) обусловлен вкладом мелких ($< 0,02$ мкм) частиц нуклеационной моды аэрозоля.

Микроструктуру аэрозоля оказалось возможным аппроксимировать как суперпозицию 2–4 логнормальных мод. Анализ всех спектров размеров выявил наличие аккумуляционной моды с максимальным диаметром в пределах 0,07–0,15 мкм и моды Айткена (0,03–0,050 мкм). Средний диаметр частиц аккумуляционной моды оказался для континентальных воздушных масс значительно

меньше, чем для морских, тогда как мода Айткена характеризовалась почти одинаковыми значениями диаметра частиц для воздушных масс обоих типов. Нуклеационная мода присутствовала в более чем половине наблюдаемых спектров размеров, а иногда имели место даже две нуклеационные моды. Только в морских/прибрежных воздушных массах зарегистрировано образование новых частиц с последующим их ростом до примерно 0,04 мкм. Рост размеров частиц в таких случаях происходил со скоростью 1–3 нм/ч и размеры частиц превосходили соответствующие моде Айткена в несколько раз. Это означает, что климатически существенные частицы мод Айткена и аккумуляционной могут возникать не только в средней и верхней тропосфере, где существуют условия для их продолжительного роста, но и в пограничном слое атмосферы.

Обсуждаемые в работе [46] результаты наблюдений продемонстрировали, что вновь образовавшиеся частицы вносят значительный вклад в формирование общего бюджета частиц аэрозоля в антарктическом пограничном слое атмосферы и могут иметь важное значение как климатически существенные моды Айткена и аккумуляционная атмосферного аэрозоля. Остается, однако, не вполне ясным, происходит ли в действительности образование новых частиц. В воздушных массах, формирующихся вблизи центра континента, нуклеационная мода не наблюдалась. Очень редко была она замечена и в удаленном морском пограничном слое атмосферы над открытым океаном. С другой стороны, присутствие нуклеационной моды, как правило, регистрировалось по данным судовых наблюдений при приближении к побережью Антарктики. Следовательно, образование новых частиц как-то связано с околобереговыми процессами. Эта обусловленность может определяться особенностями метеорологического режима прибрежной зоны или выбросами малых газовых компонентов в регионе паковых льдов. Выяснение этих вопросов требует дальнейших исследований.

Заключение

Обсужденные результаты исследований свойств аэрозоля в различных регионах Америки и Западной Европы, полученные в рамках осуществления программ полевых наблюдательных экспериментов, еще раз продемонстрировали исключительное разнообразие физических свойств и химического состава аэрозоля, требующих дальнейшей систематизации данных наблюдений с целью обоснования более адекватных, чем существующие, моделей аэрозоля. Только на основе использования подобных моделей есть вероятность получения более достоверных оценок возможных воздействий аэрозоля на климат, качество воздуха и здоровье человека.

1. Захаренко В.С., Мосейчук А.Н. Химические реакции в тропосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 447–453.
2. Кондратьев К.Я. Биогенный аэрозоль в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 3. С. 171–179.

3. Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной климатологии // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2004. Т. 136. Вып. 2. С. 1–25.
4. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 1. Полевые наблюдательные эксперименты. Африка и Азия // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 690–714.
5. Сафатов А.С., Андреева И.С., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Белан Б.Д., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Иванова Н.А., Куценогий К.Л., Макаров В.И., Марченко В.В., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Панченко М.В., Петрищенко В.А., Пьянков О.В., Резникова И.К., Сергеев А.Н. Доля биогенной компоненты в атмосферном аэрозоле на юге Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 532–536.
6. Alexandrov M.D., Lacis A.A., Carlson B.E., Cairns B. Atmospheric aerosol and trace gases parameters derived from local MFRSR network: multi-instrument data fusion in comparison with satellite retrievals // Proc. SPIE. 2002. V. 4882. P. 498–509.
7. Allan J.D., Jimenez J.L., Williams P.I., Alfarra M.R., Bower K.N., Jayne J.T., Coe H., Worsnop D.R. Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer. 1. Techniques of data interpretation and error analysis // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 3. P. AAC 1/1–AAC 1/10.
8. Allan D.R., Alfarra M.R., Bower K.N., Williams P.I., Gallagher M.W., Jimenez J.L., McDonald A.G., Nemitz E., Canagaratna M.R., Jayne J.T., Coe H., Worsnop D.R. Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer. 2. Measurements of fine particulate chemical composition in two U. K. cities // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 3. P. AAC 2/1–AAC 2/15.
9. Alves C., Carvalho A., Pio C. Mass balance of organic carbon fractions in atmospheric aerosols // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. ICC 7/1–ICC 7/9.
10. Ansmann A., Wandinger U., Wiedensohler A., Leiterer U. Lindenberg Aerosol Characterization Experiment 1998 (LACE 98): Overview // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 1/1–LAC 1/12.
11. Arnott W.P., Moosmüller H., Sheridan P.J., Ogren J.A., Raspet R., Slaton W.V., Hand J.L., Kreidenweis S.M., Collett J.L., Jr. Photoacoustic and filter-based ambient aerosol light absorption measurements: Instrument comparisons and the role of relative humidity // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 15/1–15/11.
12. Baumgardner D., Raga G., Peralta O., Rosas I., Castro T., Kuhlbusch T., John A., Petzold A. Diagnosing black carbon trends in large urban areas using carbon monoxide measurements // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. ICC 4/1–ICC 4/9.
13. Blanchard P., Brook J.R., Brazal P. Chemical characterization of the organic fraction of atmospheric aerosol at two sites in Ontario, Canada // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 21. P. ICC 10/1–ICC 10/8.
14. Bobylev L.P., Kondratyev K.Ya., Johannessen O.M. (Eds.) Arctic Environment Variability in the Context of Global Change. Springer/PRAXIS. Chichester, U. K. 2003. 471 p.
15. Bravy B., Vasiliev G., Agroskin V., Papin V. Recognition of composition and of microphysical characteristics of aerosol clouds in multi-frequency sounding with DF laser based lidar system // Proc. SPIE. 2002. N 4882. P. 394–399.
16. Burdke U., Hänel G., Horvath H., Kaller W., Seidl S., Wex H., Wiedensohler A., Wiegner M.,

- Freudenthaler V. Aerosol optical properties during the Lindenberg Aerosol Characterization Experiment (LACE 98) // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 5/1–LAC 5/15.
17. Busch B., Kandler K., Schütz L., Neusüss C. Hygroscopic properties and water-soluble volume fraction of atmospheric particles in the diameter range from 50 nm to 3.8 μm during LACE 98 // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 108. N 21. P. LAC 2/1–LAC 2/11.
 18. Butler A.J., Andrew M.S., Russel A.G. Daily sampling of PM_{2.5} in Atlanta: Results of the first year of the Assessment of Spatial Aerosol Composition in Atlanta study // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 3/1–SOS 3/11.
 19. Carrico C.M., Bergin M.H., Xu J., Baumann K., Maving H. Urban aerosol radiative properties: Measurements during the 1999 Atlanta Supersite Experiment // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 1–/1–SOS 10/17.
 20. Chow J.C., Watson J.G. PM_{2.5} carbonate concentrations at regionally representative Interagency Monitoring of Protected Visual Environment sites // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. ICC 6/1–ICC 6/9.
 21. Clement C.F., Ford I.J., Twohy C.H., Weinheimer A., Campos T. Particle production in the outflow of a midlatitude storm // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. AAC 5/1–AAC 5/9.
 22. De Tomasi F., Perrone M.R. Lidar measurements of tropospheric water vapor and aerosol profiles over southeastern Italy // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. AAC 14/1–14/12.
 23. Ebert M., Weinbinch S., Rausch A., Gorzawski G., Hoffmann P., Wex H., Helas G. Complex refractive index of aerosols during LACE 98 as derived from the analysis of individual particles // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 3/1–LAC 3/15.
 24. Ellrod G.P., Connell B.H., Hillger D.W. Improved detection of airborne volcanic ash using multi-spectral infrared satellite data // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 12. P. AAC 6/1–AAC 6/13.
 25. Feingold G., Morley B. Aerosol hygroscopic properties as measured by lidar and comparison with in situ measurements // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 11. P. AAC 1/1–AAC 1/11.
 26. Formenti P., Reiner T., Sprung D., Andreae M.O., Wendisch M., Wex H., Kindred D., Dewey K., Kent J., Tzortziou M., Vasaras A., Zerefos C. STAARTE-MED 1998 summer airborne measurements over the Aegean Sea. 1. Aerosol particles and trace gases // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. AAC 1/1–AAC 1/15.
 27. Formenti P., Boucher O., Reiner T., Sprung D., Andreae M.O., Wendisch M., Wex H., Kindred D., Tzortziou M., Vasaras A., Zerefos C. STAARTE-MED 1998 summer airborne measurements over the Aegean Sea. 2. Aerosol scattering and absorption, and radiative calculations // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. AAC 2/1–AAC 2/14.
 28. Fussen D., Vanhellefont F., Bingen C. Synthesis inverse mapping method applied to the retrieval of aerosol size distributions from extinction measurements // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 15. P. AAC 1/1–AAC 1/10.
 29. Gassó S., Hegg D.A. On the retrieval of columnar aerosol mass and CCN concentration by MODIS // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 6/1–6/25.
 30. Ginoux P., Torres O. Empirical TOMS index for dust aerosol: Applications to model validation and source characterization // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 17. P. AAC 1/1–AAC 1/20.
 31. Gong S.L., Barrie L.A., Blanchet J.-P., von Salzen K., Lohmann U., Lesing G., Spacek L., Zhang L.M., Girard E., Lin H., Leatich R., Leighton H., Chýšlek P., Huang P. Canadian Aerosol Module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models. 1. Module development // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 3/1–3/16.
 32. Gong S.L., Barrie L.A. Simulating the impact of sea salt on global nss sulphate aerosol // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 16. P. AAC 4/1–AAC 4/18.
 33. Graf H.-F. The complex interaction of aerosols and clouds // Science. 2004. V. 5662. P. 1309, 1311.
 - 33a. Graham B., Mayol-Bracero O., Guyon P., Roberts G.C., Decesary S., Facchini M.C., Artaxo P., Maenhaut W., Köll P., Andreae M.O. Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia. 1. Characterization by NMR and GC-MS // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 15. P. LBA 14/1–LBA 14/16.
 34. Guyon P., Graham B., Roberts G.C., Mayol-Bracero O.L., Maenhaut W., Artaxo P., Andreae M.O. In-canopy gradients, composition, sources, and optical properties of aerosol over the Amazon forest // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 18. P. AAC 9/1–AAC 9/16.
 35. Hara K., Yamagata S., Yamanouchi T., Sato K., Herber A., Iwasaka Y., Nagatani M., Nakata H. Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. AAC 2/1–AAC 2/12.
 36. Henning S., Weingartner E., Schwikowski M., Göggele H.W., Gehrig R., Hinz K.-P., Trimborn A., Spengler B., Baltenspreger U. Seasonal variation of water-soluble ions of the aerosol at the high-alpine site Jungfraujoch (3580 m asl) // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 8/1–8/10.
 - 36a. Holzer-Popp T., Schroedter M., Gesell G. Retrieving aerosol optical depth and type in the boundary layer over land and ocean from simultaneous GOME spectrometer and ATSR-2 radiometer measurements. 1. Method description // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. AAC 16/1–AAC 16/17.
 37. von Hoyningen-Huene W., Freitag M., Burrows J.B. Retrieval of aerosol optical thickness over land surfaces from top-of-atmosphere radiance // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 9. P. AAC 2/1–AAC 2/20.
 38. Jimenez J.L., Jayne J.T., Shi Q., Kolb C.E., Worsnop D.R., Yourshaw I., Seinfeld J.H., Flagan R.C., Zhang X., Smith K.A., Morris J.W., Davidovits P. Ambient aerosol sampling using the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 13/1–SOS 13/13.
 39. Johansen A.M., Hoffmann M.R. Chemical characterization of ambient aerosol collected during the northeast monsoon season over the Arabian Sea: Lafite-Fe (II) and other trace metals // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 14. P. ACH 5/1–ACH 5/11.
 40. Kimura T., Kondo K., Kumagai H., Kuroiwa H., Ishida C., Oki R., Kyze A., Suzuki M., Okamoto H., Imasu R., Nakajima T. Earth CARE-Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer: Its objectives and Japanese sensor designs // Proc. SPIE. 2002. V. 4882. P. 510–519.
 41. Kiss G., Varga B., Galamos I., Ganszky I. Characterization of water-soluble organic matter isolated from atmospheric fine aerosol // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. ICC 1/1–ICC 1/8.
 42. Kondratyev K.Ya., Grigoryev A.I. Environmental Disasters: Natural and Anthropogenic. Springer/PRAXIS, Chichester, U. K. 2002. 484 p.

43. Kondratyev K.Ya. Global climate change and the Kyoto Protocol // *Időjárás*. V. 106. N 2. P. 1–37.
44. Kondratyev K.Ya. High-latitude environmental dynamics in the context of global change // *Időjárás*. 2003a. V. 107. N 1. P. 1–29.
45. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/PRAXIS, Chichester, U. K. 2003. 385 p.
46. Koponen I. K., Virkkula A., Hillamo R., Kerminen V.-M., Kulkala M. Number size distributions and concentrations of the continental summer aerosols in Queen Maud Land, Antarctica // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 18. P. AAC 8/1–AAC 8/10.
47. Krejci R., Ström J., de Reus M., Hoor P., Williams J., Fischeer H., Hansson H.-C. Evolution of aerosol properties over the rain forest in Surinam, South America, observed from aircraft during the LBA-CLAIRE-98 experiment // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 18. P. AAC 1/1–AAC 1/17.
48. Kubátova A., Vermeylen R., Claes M., Cafmeyer J., Maenhaut W. Organic compounds in urban aerosols from Gent, Belgium: Characterization, sources, and seasonal differences // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107. N 21. P. ICC 5/1–ICC 5/12.
49. de Leeuw G., Gonzalez C.R., Kusmierczyk-Michulec J., Decae R., Veeffkind P. Retrieval of aerosol optical depth from satellite measurements using single and dual view algorithms // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4882. P. 275–283.
50. Levy R.C., Remer L.A., Tanré D., Kaufman Y.J., Ichoku C., Holben B.N., Livingston J.M., Russel P.B., Mering H. Evaluation of the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) retrievals of dust aerosol over the ocean during PRIDE // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 19. P. PRD 10/1–PRD 10/13.
51. Lim H.-J., Turpin B.J., Edgerton E., Hering S.V., Allen G., Mering H., Solomon P. Semicontinuous aerosol carbon measurements: Comparison of Atlanta Supersite measurements // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 7/1–SOS 7/12.
52. Liu D.-Y., Wenzel R. J., Prather K. A. Aerosol time-of-flight mass spectrometry during the Atlanta Supersite Experiment. 1. Measurements // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 14/1–SOS 14/16.
53. Mayol-Bracero O.L., Guyon P., Graham B., Roberts G., Andreae M.O., Decesary S., Facchini M.P., Fuzzi S., Artaxo P. Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia. 2. Apportionment of the chemical composition and importance of the polyacidic fraction // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 20. P. LBA 59/1–LBA 59/15.
54. Mc Arthur L.J.B., Halliwell D.H., Niebergall O.J., O'Neill N.T., Slusser J.R., Wehrli C. Field comparison of network Sun photometers // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 19. P. 1/1–1/18.
55. Middlebrook A.M., Murphy D.M., Lee S.-H., Thomson D.S., Prather K.A., Wenzel R.J., Liu D.-Y., Phares D.J., Rhoads K.P., Wexler A.S., Johnston M.V., Jimenez J.L., Jayne J.T., Worsnop D.R., Yourshaw I., Seinfeld J.H. A comparison of particle mass spectrometers during the 1999 Atlanta Supersite Project // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 12/1–SOS 12/13.
56. Minikin A., Petzold A., Ström J., Krejci R., Seifert M., van Velthoven P., Schlager H., Schumann U. Aircraft observations of the upper tropospheric fine particle aerosols in the Northern and Southern Hemispheres at midlatitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. N 10. P. 10/1–10/4.
57. Müller D., Ansmann A., Wagner F., Franke K., Althausen D. European pollution outbreaks during ACE-2: Microphysical particle properties and single-scattering albedo inferred from multi-wavelength lidar observations // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107. N 15. P. AAC 3/1–AAC 3/11.
58. Narukawa M., Kawamura K., Anlauf K.G., Barrie L.A. Fine and coarse modes of dicarboxylic acids in the Arctic aerosols collected during the Polar Sunrise Experiment 1997 // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 18. P. ACH 3/1–ACH 3/9.
59. Neusüss C., Wex H., Birnili W., Wiedensohler A., Koziar C., Busch B., Brüggemann E., Gnauk T., Ebert M., Covert D.S. Characterization and parameterization of atmospheric particle number, - mass-, and chemical-size distributions in central Europe during LACE 98 and MINT // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 9/1–LAC 9/13.
60. O'Neill N.T., Eck T.F., Smirnov A., Holben B.N., Thulasiraman S. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 17. P. AAC 8/1–AAC 8/15.
61. Petzold A., Fiebig M., Flentje H., Keil A., Leiterer U., Schröder F., Stifter A., Wendisch M., Wendling P. Vertical variability of aerosol properties observed at a continental site during the Lindenberg Aerosol Characterization Experiment (LACE 98) // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 10/1–LAC 10/18.
62. Phares D.J., Rhoads K.P., Johnston M.V., Wexler A.S. Size-resolved ultrafine particle composition analysis. 2. Houston // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 8/1–SOS 8/14.
63. Pitts M., Hansen G., Lucker P. An airborne A-band spectrometer for remote sensing of aerosol and cloud properties // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4882. P. 353–362.
64. Raj P.E., Devara P.C.S., Pandithural G., Manes Kumar R.S., Dani K.K. Some atmospheric aerosol characteristics as determined from laser angular scattering measurements at a continental urban station // *Atmosfera*. 2004. V. 17. N 1. P. 39–52.
65. Rannik Ü., Aalto P., Keronen P., Vesala T., Kulkala M. Interpretation of aerosol particle fluxes over a pine forest: Dry deposition and random errors // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 17. P. AAC 3/1–AAC 3/11.
66. Rhoads K.P., Phares D.J., Wexler A.S., Johnston M.V. Size-resolved ultrafine particle composition analysis. 1. Atlanta // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 6/1–SOS 6/13.
67. Schröder F., Kärcher B., Fiebig M., Petzold A. Aerosol states in the free troposphere at northern midlatitudes // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 8/1–LAC 8/8.
68. Sellegri K., Laj P., Peron F., Dupuy R., Legrand M., Peunkert S., Putraud J.-P., Cachier H., Ghermandi G. Mass balance of free tropospheric aerosol at the Puy de Dôme (France) in winter // *J. Geophys. Res. D*. 2003. V. 108. N 11. P. AAC 2/1–AAC 2/17.
69. Sicard M., Rocadenbosch F., Llypez A.M., Comeryn A., Rodriguez A., Mucoz C., Garcia-Vicaino D. Characterization of aerosol backscatter-to-extinction ratio from multi-wavelength and multi-angular lidar profiles // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4882. P. 442–450.
70. Smirnov A., Holben B.N., Dubovik O., Frouin R., Eck T.F., Slutsker I. Maritime component in aerosol optical models derived from Aerosol Robotic Network

- data // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 14/1–14/11.
71. Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I. Effect of wind speed on columnar aerosol optical properties at Midway Island // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 24. P. AAC 15/1–AAC 15/8.
 72. Solomon P.A., Cowling E.B., Weber R. Preface to special section: Southern Oxidants Study 1999 Atlanta Supersite Project (SOS3) // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 0/1.
 73. Solomon P.A., Chameides W., Weber R., Middlebrook A., Kiang C.S., Russel A.G., Butler A., Turpin B., Mikel D., Scheffe R., Cowling E., Edgerton E., St. John J., Jansen J., Mc Murry P., Hering S., Bahadori T. Overview of the 1999 Atlanta Supersite Project // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 1/1–SOS 1/24.
 74. Solomon P., Baumann K., Edgerton E., Tanner E., Eatough D., Modey W., Maring H., Savoie D., Natarajan S., Meyer M.B., Morris G. Comparison of integrated samplers for mass and composition during the 1999 Atlanta Supersite project // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 11/1–SOS 11/26.
 75. Sun D., Chen F., Bloemendal J., Su R. Seasonal variability of modern dust over the Loess Plateau of China // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 21. P. AAC 3/1–AAC 3/16.
 76. Thomas A., Borrmann S., Kiemle C., Cairo F., Volk M., Buermann J., Lepuchov B., Santacesaria V., Matthey R., Rudakov V., Mac Kenzie A. R., Stefanutti L. In situ measurements of background aerosol and subvisible cirrus in the tropical tropopause region // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 24. P. AAC 8/1–AAC 8/14.
 77. Trimborn A., Hinz K.-P., Spengler B. Online analysis of atmospheric particles with a transportable laser mass spectrometer during LACE 98 // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 13/1–LAC 13/10.
 78. Vautard R., Martin D., Beekmann M., Drobinski P., Friedrich R., Jaubertie A., Kley D., Lattuati M., Moral P., Neininger B., Theloke J. Paris emission inventory diagnostics from ESQUIF airborne measurements and a chemistry transport model // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 17. P. ESQ 7/1–ESQ 7/21.
 79. Wandinger U., Müller D., Böckmann C., Althausen D., Matthias V., Rösenberg J., Weiß V., Fiebig M., Wendisch M., Stohl A., Ansmann A. Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multi-wavelength lidar and aircraft measurements // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 7/1–LAC 7/20.
 80. Weaver C. J., Joiner J., Ginoux P. Mineral aerosol contamination of TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) temperature and moisture retrievals // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 8. P. AAC 5/1–AAC 5/15.
 81. Weber R., Orsini D., Duan Y., Baumann K., Kiang C.S., Chameides W., Lee Y. N., Brechtel F., Klotz P., Jongejan P., ten Brink H., Slanina J., Boring C.B., Genfa Z., Dasgupta P., Hering S., Stolzenburg M., Dutcher D.D., Edgerton E., Hartsell B., Solomon P., Tanner R. Intercomparison of near real time monitors of PM_{2.5} nitrate and sulfate at the U. S. Environmental Protection Agency Atlanta Supersite // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 9/1–SOS 9/13.
 82. Wenzel R.J., Liu D.-Y., Edgerton E.S., Prather K.A. Aerosol time-of-flight mass spectrometry during the Atlanta Supersite Experiment. 2. Scaling procedure // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 15/1–SOS 15/8.
 83. Wetzel M.A., Shaw G.E., Slusser J.R., Borys R.D., Cahill C.F. Physical, chemical, and ultraviolet radiative characteristics of aerosol in central Alaska // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 14. P. AAC 9/1–AAC 9/16.
 84. Wex H., Neusüss C., Wendisch M., Stratmann F., Koziar C., Keil A., Wiedensohler A. Particle scattering, backscattering, and absorption coefficients: An in situ closure and sensitivity study // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. P. LAC 4/1–LAC 4/18.
 85. Yi Q., Box M.A., Jupp D.L.B. Inversion of multi-angle sky radiance measurements for the retrieval of atmospheric optical properties. 1. Algorithm // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 22. P. AAC 10/1–AAC 10/10.
 86. Yi Q., Jupp D.L.B., Box M.A. Inversion of multi-angle sky radiance measurements for the retrieval of atmospheric optical properties. 2. Application // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 22. P. AAC 11/1–AAC 11/9.
 87. Zhang J., Chameides W.L., Weber R., Cass G., Orsini D., Edgerton E., Jongejan P., Slanina J. An evaluation of the thermodynamic equilibrium assumption for fine particulate composition: Nitrate and ammonium during the 1999 Atlanta Supersite Experiment // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 7. P. SOS 2/1–SOS 2/11.
 88. Zhao T.X.-P., Laszlo I., Dubovik O., Holben B.N., Sapper J., Tanré D., Pietras C. A study of the effect of non-spherical dust particles on the AVHRR aerosol optical thickness retrievals // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. N 3. P. 50/1–50/4.
 89. Zhao T.X.-P., Laszlo I., Holben B.N., Pietras C., Voss R.J. Validation of two-channel VIRS retrievals of aerosol optical thickness over ocean and quantitative evaluation of the impact from potential subpixel cloud contamination and surface wind effect // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 3. P. AAC 7/1–AAC 7/12.

K. Ya. Kondratyev. From nano- to global scales: properties, processes of formation, and aftereffects of the atmospheric aerosol impacts. 2. Field observational experiments. America, West Europe, and high latitudes.

Results of complex investigation of the atmospheric aerosol properties, obtained during field observational experiments in America, West Europe, and in high latitudes, are under analysis.