

**К.Я. Кондратьев**

# **От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 1. Полевые наблюдательные эксперименты. Африка и Азия**

*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 Африке и в Азии.

## **Введение**

Возросший интерес к исследованиям атмосферного аэрозоля в контексте его воздействий на формирование климата; химических гетерогенных реакций в атмосфере, влияющих, в частности, на качество окружающей среды; проблем видимости и здоровья человека являются причиной необычных масштабов разработок, связанных с изучением атмосферного аэрозоля. Поэтому вслед за появившимися недавно детальными обзорами по этой проблематике [2–8] снова возникла необходимость анализа результатов, полученных в самое последнее время, которые касаются прежде всего трех аспектов обсуждаемой проблематики: 1) свойства аэрозоля по данным комплексных полевых наблюдательных экспериментов; 2) процессы образования аэрозоля и взаимодействие аэрозоля с облаками; 3) аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы (включая проблему дальнего переноса). Имея в виду тематический выпуск журнала «Оптика атмосферы и океана» (2004. Т. 17. № 5–6) и предшествующую публикацию [9], посвященные обсуждению результатов исследований аэрозолей Сибири, мы обратимся далее к рассмотрению других различных результатов.

## **1. Сахарский полевой эксперимент (SHADE)**

Первые комплексные наблюдательные эксперименты с целью аэрозольно-радиационных исследований пылевого аэрозоля пустынь были начаты в регионе г. Ашхабада (Туркмения) в рамках программы КЭНЭКС в октябре 1970 г. и получили затем дальнейшее широкое развитие [2, 26–28]. Один из новейших этапов аналогичных разработок связан с осуществлением полевого эксперимента

SHADE ввиду ключевой роли пустыни Сахара как наиболее мощного источника природного пылевого аэрозоля (ПА) [43, 48].

Haywood и др. [22] проанализировали физические и оптические свойства сахарского пылевого аэрозоля по данным наблюдений с самолета-лаборатории C-130 Британской метеослужбы, которые были получены в рамках полевого наблюдательного эксперимента SHADE. Четыре специализированных полета были выполнены с о-ва Сал (о-ва Cape Verde) 21, 24, 25 и 28 сентября 2000 г. Главными источниками информации служили данные наблюдений при помощи установленной на борту C-130 следующей аппаратуры: 1) фотометр PSAP для измерений поглощения коротковолновой радиации (КБР) на длине волны 567 нм; 2) нефелометр TSI-3563 (аэрозольное рассеяние на трех длинах волн: 450; 550 и 700 нм); 3) спектрометр размеров частиц аэрозоля и облаков в интервале радиусов 1–23,5 мкм; 4) широкополосные пиранометры Эшпли для диапазонов длин волн 300–3000 и 700–3000 нм; 5) 16-канальный фильтровой радиометр (SAFIRE) для спектральных измерений коротковолновой радиации; 6) направленный в надир спектрометр SWS для измерений в интервалах 300–950 и 950–1700 нм (спектральное разрешение соответственно равно 10 и 18 нм).

Обработка результатов наблюдений позволила, в частности, определить значения аэрозольной оптической толщины  $\tau_{aer\lambda}$  и обусловленного ПА прямого радиационного возмущающего воздействия (РВВ). Анализ результатов наблюдений выявил завышенность величин обусловленного ПА поглощения КБР при задании стандартных значений показателя преломления. Согласно рассматриваемым данным наблюдений, можно считать адекватным значение мнимой части комплексного показателя преломления на длине волны 550 нм, равное 0,0015i.

В работе [22] обсуждены различные методики расчета  $\tau_{\text{aer}\lambda}$  и оценены соответствующие погрешности. Значение  $\tau_{\text{aer}\lambda=550} = 1,48 \pm 0,05$  в условиях максимальной запыленности атмосферы. В этих условиях мгновенное значение РВВ  $\approx (-129 \pm 5) \text{ Вт/м}^2$ , что соответствует повышению альbedo системы «подстилающая поверхность — атмосфера» над океаном в  $(2,7 \pm 0,1)$  раза. Сравнение полученных значений РВВ с самолетными данными наблюдений в рамках программы CERES продемонстрировало согласие с точностью до коэффициента, равного 1,2. Обсужденные результаты отображают необходимость учета РВВ, обусловленного сахарским пылевым аэрозолем, в исследованиях глобального радиационного баланса.

По данным наблюдений при помощи аппаратуры, установленной на борту самолета-лаборатории С-130, которые были выполнены в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента SHADE, было изучено также влияние сахарского пылевого аэрозоля на перенос длинноволновой радиации (ДВР) в атмосфере [23]. Сравнение результатов измерений в условиях запыленной и чистой атмосферы (при безоблачном небе) обнаружило в спектрах восходящих и нисходящих потоков ДВР отчетливые сигнатуры воздействия ПА на перенос длинноволновой радиации. Сопоставление измеренных значений спектральных потоков ДВР с рассчитанными при задании необходимой входной информации по данным одновременных наблюдений позволило восстановить значения показателя преломления ПА в инфракрасной области спектра, поскольку основными факторами, влияющими на перенос излучения, являются показатель преломления, содержание ПА и высота расположения пылевого слоя. Воздействие микроструктуры аэрозоля оказывается менее существенным, если учесть наличие частиц радиусом более 1 мкм.

Влияние слоя ПА проявилось как относительное радиационно обусловленное потепление до  $0,5 \text{ К/сут}$  под слоем и выхолаживание до  $0,5 \text{ К/сут}$  над аэрозольным слоем. Эти радиационные изменения температуры примерно на порядок величины меньше соответствующих изменений, обусловленных поглощением коротковолновой радиации. В поле потоков ДВР наличие пылевого слоя отображается как спад уходящей ДВР ( $6,5 \text{ Вт/м}^2$ ) на уровне верхней границы атмосферы и возрастание ( $11,5 \text{ Вт/м}^2$ ) нисходящего потока ДВР на уровне подстилающей поверхности. Наличие пыли привело к снижению измеряемой с самолета яркостной температуры (по данным для окна прозрачности атмосферы) примерно до  $2\text{--}4 \text{ К}$ , что согласуется с аналогичными результатами спутниковых измерений.

Оценки глобально осредненных значений аэрозольного прямого радиационного возмущающего воздействия, обусловленного пылевым аэрозолем, привели к широкому разбросу значений в диапазоне от  $+0,09$  до  $-0,46 \text{ Вт/м}^2$  из-за неопределенности данных о химическом составе, микроструктуре и содержании ПА. Важным фактом является то, что диаметр частиц ПА может достигать нескольких

микрометров, а мнимая часть комплексного показателя преломления отлична от нуля, т.е. ПА является не только рассеивающим, но и поглощающим коротковолновую радиацию компонентом атмосферы. Не менее важные функции ПА заключаются в том, что он существенно влияет на свойства облаков и газовый состав атмосферы. Присутствуя в морском солевом аэрозоле, ПА является наиболее значительным компонентом и атмосферного аэрозоля. Оценки содержания ПА в глобальной атмосфере дали значения в пределах  $14\text{--}41 \text{ Тг}$  при очень сильно выраженной пространственно-временной изменчивости содержания ПА.

В период осуществления Сахарского пылевого эксперимента (SHADE) в сентябре 2000 г. с борта самолета-лаборатории С-130 Formenti и др. [14] были получены фильтровые пробы аэрозоля в атмосфере над Атлантическим океаном в регионе между о. Сал и Сенегалом с целью изучения химического состава аэрозоля. Результаты наблюдений отображают тот факт, что ПА был обнаружен в слоях  $0,5\text{--}1 \text{ км}$ , причем в пределах главного пылевого шлейфа наблюдались подслои с различной микроструктурой ПА, которые имели разное происхождение. Наличие отрицательной корреляции между концентрациями тропосферного озона и пыли указывает на то, что пылевые слои порождали удаление озона. В дни интенсивного запыления атмосферы концентрация ПА достигала  $54 \text{ мкг/м}^3$  (включая субмикронную и супермикронную фракции аэрозоля). Анализ мелкодисперсной фракции ПА выявил присутствие антропогенного компонента аэрозоля (главным образом в виде  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ) в тех случаях, когда имело место поступление воздушных масс из Западной Европы, претерпевших дальнейший перенос в Северную Африку.

Анализ химического состава ПА показал, что отношение содержания нитрата и неморского сульфата составляло около  $0,3$ . На этом основании можно сделать уже упоминавшийся вывод об отсутствии заметного количества компонентов, образовавшихся за счет сжигания биомассы (для последних типично более высокое содержание нитрата). В некоторых случаях были обнаружены следы шлейфов загрязнений за счет сжигания ископаемых топлив, поступивших, вероятно, из Северной Америки. Геохимические сигнатуры ПА согласуются с наблюдаемыми ранее. Не наблюдалось, в частности, обогащения Si, Fe и Ti по сравнению с аэрозолем почвенного происхождения, тогда как по отношению к таким элементам, как Ca и S, ситуация оказалась противоположной. Хотя Ca присутствует в африканских почвах преимущественно как кальцит, в атмосфере он обнаружен также в составе сульфата кальция.

Подводя итоги, Tanré и др. [45] кратко охарактеризовали программу, наблюдательные средства и результаты осуществления полевого наблюдательного эксперимента SHADE, главная цель которого состояла в изучении свойств сахарского пылевого аэрозоля, выносимого на акваторию Атлантического океана из региона Северной Африки в пе-

риоды возникновения в пустыне пылевых бурь. Основными наблюдательными средствами служили комплексы разнообразной аппаратуры, установленной на борту двух самолетов-лабораторий, совершавших полеты в регионе Cape Verde в период 19–29 сентября 2000 г.

Как уже упоминалось, в состав бортовой научной аппаратуры входили: стандартные датчики для измерений метеорологических параметров, аэрозольный спектрометр размеров частиц PCASP и оптический спектрометр FFSSP для измерений рассеянной вперед коротковолновой радиации (функционирование FFSSP оказалось, однако, ненадежным), датчик ледяных частиц SID, аппаратура для взятия фильтровых проб аэрозоля, фотометр PSAP для измерений обусловленного сажевыми частицами поглощения KBP на длине волны 567 нм и нефелометр TSI-3563, обеспечивавший измерения аэрозольного рассеяния на длинах волн 450; 550 и 700 нм. Пиранометры Эппли использовались для измерений восходящих и нисходящих потоков KBP в интервалах длин волн 300–3000 и 700–3000 нм. При помощи сканирующего фильтрового радиометра SAFIRE измерялась интенсивность KBP в 16 интервалах диапазона длин волн 550–2100 нм, а для получения данных о KBP при высоком спектральном разрешении (около  $0,5 \text{ см}^{-1}$ ) служил Фурье-спектрометр. Наконец, источником информации о спектральной яркости системы «подстилающая поверхность – атмосфера» был двухдиапазонный (300–950 и 950–1700 нм) спектрометр SWS для коротковолновой радиации.

Научное оборудование французского самолета-лаборатории Mystere-20 (M-20) включало стандартные метеорологические датчики, пиранометры Эппли, двухволновый (532 и 1064 нм) лидар LEANDRE-1 и самолетный вариант спутниковой аппаратуры POLDER для поляризационных измерений на длинах волн 440 и 865 нм, а также для измерений яркости системы (440 и 865 нм). В период SHADE на о-ве Сал ( $14^{\circ}43' \text{ с.ш.}, 25^{\circ}56' \text{ з.д.}$ ) и в M'Bour ( $16^{\circ}43' \text{ с.ш.}, 22^{\circ}56' \text{ з.д.}$ ) функционировали солнечные фотометры сети AERONET. Наблюдения M-20 координировались с получением данных дистанционного зондирования при помощи установленного на спутнике Terra многоканального спектровидеорадиометра MODIS.

Как уже отмечалось, исследования химического состава аэрозоля показали, что в нем не было продуктов сжигания биомассы, но присутствовало небольшое количество антропогенного аэрозоля. Типичная микроструктура аэрозоля вблизи побережья Сенегала характеризовалась наличием двух максимумов около 0,40 мкм и в интервале 1,5–2,0 мкм. Несферичность частиц (при расчетах поля KBP) оказалось возможным учесть, предположив сфероидальную форму частиц. Значения аэрозольного поглощения оказались меньше полученных ранее: альbedo однократного рассеяния составило  $0,90 \pm 0,02$  в «голубой» области спектра;  $2,97 \pm 0,02$  на длине волны 670 нм и было практически равно нулю в близкой ИК-области спектра.

Максимальное значение прямого PVB, зарегистрированное 25 сентября, достигало  $-130 \text{ Вт/м}^2$ . Если учесть, что значение аэрозольной оптической толщины на длине волны 550 мкм равно примерно 1,5, то оказывается, что величина PVB, рассчитанная на единицу оптической толщины, составляет около  $-90 \text{ Вт/м}^2$ . Вблизи подстилающей поверхности PVB приблизительно в 1,6 раза больше, чем на уровне верхней границы атмосферы (это различие меньше, чем полученное ранее по данным наблюдений над Индийским океаном). Воздействие ПА на формирование PVB в ИК-диапазоне составляет примерно 10% по отношению к коротковолновому PVB и всегда положительно. Согласно результатам численного моделирования аэрозольное PVB в регионах  $0^{\circ}$ – $30^{\circ}$  с.ш.,  $60^{\circ}$  з.д. –  $40^{\circ}$  в.д. варьирует в пределах  $-8 \div -10 \text{ Вт/м}^2$  при ясном небе, составляя около  $-6,0 \text{ Вт/м}^2$  в условиях облачного неба при вкладах за счет длинноволновой радиации, соответственно равных 1,0–1,2 и 0,7–0,9  $\text{Вт/м}^2$ . Оценка вклада воздействия сахарского ПА в глобальных масштабах привела к значению  $-0,4 \text{ Вт/м}^2$ .

В связи с исследованиями ПА большое внимание уделялось совершенствованию методик измерений характеристик аэрозоля. В частности, Lèon и др. [30] обсудили возможности совершенствования методики восстановления свойств атмосферного аэрозоля по совместным данным активного и пассивного спутникового дистанционного зондирования, имея в виду ближайшие перспективы осуществления спутникового лидарного зондирования, а также функционирование такой совершенной аппаратуры, как видеоспектрорадиометр MODIS и поляризационный радиометр POLDER. На основе использования данных лидарного зондирования на длинах волн 532 и 1064 нм были рассмотрены возможности восстановления вертикального профиля отношения рассеяния назад и экстинкции, а вслед за тем – зависимости эффективного радиуса частиц аэрозоля (в предположении бимодальности его микроструктуры) от высоты.

Анализ чувствительности результатов восстановления к входным параметрам показал, что методика восстановления является достаточно робастной по отношению к уровням шумов и погрешностям калибровки. Надежность алгоритма восстановления испытана путем обработки данных наблюдений, полученных в сентябре 2000 г. над Атлантическим океаном в ходе осуществления эксперимента SHADE. Сравнение восстановленного вертикального профиля экстинкции с данными наблюдений продемонстрировало вполне удовлетворительное согласие. Результаты лидарных наблюдений 25 сентября отчетливо обнаружили наличие на высотах 2,2–4,5 км аэрозольного слоя при эффективном радиусе частиц  $(1,19 \pm 0,6) \text{ мкм}$ . Наблюдался также переходный подслой, расположенный над морским пограничным слоем атмосферы, в котором находились частицы аэрозоля с эффективным радиусом существенно меньше, чем в сахарском аэрозольном слое.

Начиная с середины 1980-х гг. при поддержке Европейского космического агентства была осуществлена серия программ самолетных и наземных наблюдений, цель которых заключалась главным образом в анализе перспектив дистанционного зондирования с применением спутниковой видеоспектроскопии. В частности, в рамках программы DAISEX были осуществлены наблюдения при помощи спектрометров на трех полигонах в юго-восточной Испании (Barrax) и в долине Верхнего Рейна (Colmar, Франция; Hartheim, Германия). Полученные результаты имели важное значение для обеспечения успешного функционирования видеоспектрометра MERIS на борту спутника Envisat.

Pedros и др. [40] обсудили результаты наблюдений, выполненных в Barrax с использованием двух спектрорадиометров Licor-1800 и одного спектрорадиометра Optonic OL-754 с целью восстановления спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ). Рассматриваемые результаты относятся к отдельным дням наблюдений в 1998, 1999 и 2000 гг. Анализ данных наблюдений в видимой области спектра привел к выводу, что во всех случаях формирование АОТ определялось преимущественно вкладом грубодисперсной фракции аэрозоля. Результаты вычислений «обратных» траекторий воздушных масс свидетельствуют о преобладании в нижних слоях тропосферы аэрозоля морского происхождения при наличии небольшой примеси континентального аэрозоля.

С целью получения информации о химических характеристиках конечных продуктов трансформации частиц сахарской пыли в атмосферный пылевой аэрозоль, претерпевающий дальний перенос, Guieu и др. [21] использовали пробы двух типов: 1) мелкодисперсной фракции частиц песка из Северной Африки; 2) аэрозольной фазы типичных осадков, выпадающих в Сахаре. Во втором случае для оценки первоначального состава частиц, попадающих в капли воды, осуществлялась коррекция с учетом растворения части аэрозоля в облачной воде.

Результаты анализа частиц на содержание Al, Fe, P и Pb привели к выводу, что (за исключением свинца) химический состав претерпевающего дальний перенос сахарского аэрозоля был более однородным, чем состав частиц песка. Согласно данным об «обратных» траекториях воздушных масс, более высокая однородность состава аэрозоля отчасти обусловлена тем фактом, что события образования ПА охватывают обширные территории сахарской пустыни и, таким образом, состав аэрозоля соответствует осредненному составу частиц почв, подвергающихся эрозии. Данные о Pb отчетливо отображают присутствие антропогенного компонента. Рассмотрение данных об отношении концентраций Pb/Al для частиц почвы привело к выводу, что состав выпадающих в Сахаре осадков, как правило, не свободен от воздействия перемешивания с воздушными массами, поступающими из Западной Европы.

Сахарский пылевой аэрозоль как конечный продукт трансформации попадающих в атмосферу час-

тиц песка характеризуется следующим типичным составом (%): Al ( $7,09 \pm 0,79$ ); Fe ( $4,45 \pm 0,49$ ); P ( $0,082 \pm 0,011$ ); Pb ( $24 \pm 9$ ) млн<sup>-1</sup>. В качестве наиболее типичных характеристик состава ПА следует рассматривать отношения концентраций различных малых газовых компонентов (МГК) к Al или Fe. Особая роль сахарской пыли состоит в том, что она может быть важным биогеном (P, Fe) для вод Средиземного моря, составляя, в частности, около 30–40% потока фосфора и примерно 90% потока железа из атмосферы в западном регионе Средиземного моря. Существенное влияние может оказывать ПА как фактор воздействия на биохимический круговорот железа, будучи главным источником растворенного железа в упомянутом регионе.

Источником разнообразной информации о свойствах сахарского ПА стали наблюдения в регионах, расположенных поблизости от Северной Африки. Так, например, анализ данных наблюдений в Лейпциге ( $51,3^\circ$  с.ш.;  $12,4^\circ$  в.д.) выявил наличие необычно высоких значений лидарного отношения экстинкции к обратному рассеянию при поступлении частиц сахарского аэрозоля. Первоначальные наблюдения этого пылевого выброса, зарегистрированного 13–15 октября 2001 г., позволили сделать вывод, что высокие значения лидарного отношения были обусловлены наличием несферических частиц атмосферного аэрозоля. С целью более надежной интерпретации этих данных наблюдений Müller и др. [37] детально рассмотрели информацию о геометрических и оптических характеристиках шлейфа пылевого аэрозоля. Это сделано на основе впервые осуществленного комплексного исследования шлейфа сахарского аэрозоля с использованием двухволнового рамановского лидара (Nd:YAG-лазер с повторяемостью импульсов через 30 с) и солнечного фотометра (длины волн  $\lambda = 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940$  и  $1020$  нм), установленных в Лейпциге.

Рассматриваемый пункт наблюдений входит в состав сети EARLINET лидарных аэрозольных зондирований. Автоматизированные наблюдения аэрозольной оптической толщины и яркости неба выполнены при помощи солнечного фотометра, функционирующего в рамках всемирной сети AERONET роботизированных наблюдений аэрозоля. Анализ обсуждаемых данных наблюдений привел к выводу, что пылевой шлейф достигал высоты 6 км, причем АОТ на  $\lambda = 532$  нм возрастала от 0,25 13 октября 2001 г. до максимального значения, равного 0,63, 14 октября 2001 г. Согласно данным лидарных наблюдений, основной вклад в формирование АОТ на  $\lambda = 532$  нм вносил пылевой слой, находившийся на высотах более 1000 м.

По данным солнечного фотометра в интервале  $\lambda = 380$ – $1020$  нм коэффициент Ангстрема составляет около 0,45 в начале поступления шлейфа пылевого аэрозоля и снижается до минимального значения, равного 0,14, во время максимума пылевого выброса. Восстановление вертикального профиля коэффициента Ангстрема по данным лидарного

зондирования на  $\lambda = 355$  и  $532$  нм выявило наличие сильной изменчивости при значениях коэффициента Ангрстрема до  $-0,2$  в центре пылевого шлейфа. Значения этого коэффициента, осредненные для нижнего 1-км слоя атмосферы, обнаружили изменения от 1,0 в начале периода запыления атмосферы до 0,39 днем 14 октября 2001 г., когда пылевой аэрозоль проник в пограничный слой атмосферы.

Сравнение осредненных по толще атмосферы значений АОТ и коэффициента Ангрстрема, полученных по данным лидара и солнечного фотометра, выявили хорошее согласование. По данным лидарных наблюдений на  $\lambda = 532$  нм коэффициент депolarизации, обусловленной пылевым аэрозолем, возрастал до 25%. Анализ данных фотометра об индикатрисе рассеяния на  $\lambda = 440, 670, 870$  и  $1020$  нм (с этой целью использовались результаты измерений яркости неба) выявил наличие частиц несферической формы. Именно несферичность частиц аэрозоля была причиной необычно высоких значений лидарного отношения экстинкции к обратному рассеянию в пределах  $50-80$  ср на  $\lambda = 532$  нм.

С помощью методики электронной микроскопии Li и др. [32] исследовали пробы аэрозоля, взятые в Пунта дель Идальго на Канарских о-вах и в Сагре (Португалия) над Атлантическим океаном в период июня–июля 1997 г. в рамках программы ACE-2 полевого эксперимента по изучению свойств аэрозоля. Анализ химического состава отдельных частиц аэрозоля показал, что главные типы аэрозоля представляли собой свежие, а также частично или полностью вступившие в химические реакции с окружающей средой морские соли, состоявшие из NaCl, смешанных катионов (Na, Mg, K и Ca) сульфата,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaNO}_3$ ; частиц промышленного происхождения, содержавших  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , сажу, пепел, кремний, окислы железа и  $\text{CaSO}_4$ ; малых примесей в виде минеральной пыли.

Поскольку точки взятия проб находились в различных географических регионах, анализ полученных проб продемонстрировал наличие неодинаковых вкладов расположенных в Европе источников антропогенных выбросов. В Сагре, в зависимости от пробы, от 0 до 30% (0–50%) солевых частиц оставались не участвовавшими (частично участвовавшими) в химических реакциях, а 20–100% частиц оказались полностью трансформированными в сульфаты и нитраты в результате реакций с загрязняющими компонентами с Европейского континента. В противоположность этому пробы, взятые в Пунта дель Идальго, характеризовались слабой подверженностью частиц морского солевого аэрозоля антропогенным воздействиям. Даже в условиях загрязненной атмосферы подобное воздействие сказывалось (через посредство соответствующих химических реакций) не менее чем на 5% от общего числа частиц. Столь сильное различие свойств аэрозоля, взятых в Пунта дель Идальго и в Сагре, отображает различия процессов «растворения» загрязнений, скорости химических реакций и истощения количества химически активных за-

грязняющих компонентов по мере переноса воздушных масс над океаном.

Israelevich и др. [25] предложили методику распознавания источников поступления в атмосферу пыли с поверхности пустынь с использованием осредненных за длительные интервалы времени данных о локальных максимумах аэрозольного индекса по наблюдениям со спутника TOMS. Применение подобной методики обеспечивает получение столь же надежной информации, что и основанная на сведениях о числе дней с запыленной атмосферой, но является более простой и универсальной.

Полученные в работе [25] результаты позволили впервые обнаружить в период весны–лета наличие потоков пыли от источников, расположенных вблизи точек с координатами  $\sim 16^\circ$  с.ш. и  $16^\circ$  в.д., а также  $\sim 19^\circ$  с.ш. и  $6^\circ$  з.д., интенсивность которых превосходит мощность стоков пылевого аэрозоля за счет осаждения и переноса. По этой причине атмосфера над Северной Африкой оказывается почти постоянно запыленной при наличии значительного количества минерального пылевого аэрозоля в атмосфере весной и летом.

Источник пыли в бассейне оз. Чад ( $\sim 16^\circ$  с.ш.,  $16^\circ$  в.д.) оказался наиболее устойчивым и максимально активным в апреле. Более изменчивым источником пыли (наиболее интенсивным в июле) служит регион вокруг точки  $19^\circ$  с.ш.,  $6^\circ$  з.д. Благодаря функционированию так называемых циклонов Sharav осуществляется дальний перенос пыли на восток и на север – в сторону Средиземноморского бассейна. Прослеживание динамики шлейфов пыли показало, что они возникают сначала в западном секторе Средиземного моря, а затем перемещаются на восток со средней скоростью около  $7-8^\circ$  долготы в сутки. Весной подобное перемещение продолжается, по крайней мере, до восточного побережья Средиземного моря. Летом пылевой шлейф не проникает на восток далее  $15^\circ$  в.д.

Noornaert и др. [24] выполнили исследование микроструктуры и химического состава аэрозоля на о-ве Teneriffe с целью проанализировать зависимость свойств аэрозоля от специфики атмосферной циркуляции в морском пограничном слое атмосферы (МПСА) и в свободной тропосфере (СТ) в июне–июле 1997 г. Обработка данных наблюдений показала, что воздушные массы в СТ можно классифицировать (с точки зрения свойств аэрозоля) как чистые морские (атлантические), содержащие сахарский аэрозоль, и загрязненные (последнее относится к воздушным массам, поступавшим из Западной Европы). Примерно такими же особенностями обладают и воздушные массы в МПСА, где, однако, вклад сахарского ПА проявляется слабо.

Характерной особенностью химического состава аэрозоля в СТ и МПСА является его резкое различие для мелко- и крупнодисперсных фракций аэрозоля. В составе мелкодисперсного аэрозоля в СТ доминируют обедненные серой алюмосиликаты (62%) в случаях пылевого или сульфатного аэрозоля, а в условиях загрязненных воздушных

масс – углеродные частицы (20%) и обогащенные серой алюмосиликаты (46%). Грубодисперсный аэрозоль характеризуется сильным убыванием сульфатов (< 20%) и углеродных компонентов (10%) в пробах из загрязненных воздушных масс. Состав мелкодисперсного аэрозоля в МПСА полностью определяется частицами, обогащенными серой, и в меньшей степени – углеродными и морскими солевыми компонентами. Для грубодисперсной моды типично преобладание морского солевого аэрозоля (62%), тогда как частицы, обогащенные серой, составляют лишь 5,3%.

Vukmirović и др. [46] проанализировали эпизод поступления сахарского ПА в регион Белграда 14–17 апреля 1994 г., выполнив численное моделирование эволюции химического состава аэрозоля под воздействием сухого и влажного осаждения.

## 2. Полевой эксперимент по изучению свойств аэрозоля в Азии: ACE-Asia

Значительное внимание привлекли исследования ПА, поступающего в атмосферу в пустынях Китая и претерпевающего затем дальний (западно-восточный) перенос в сторону Восточно-Китайского моря и Тихого океана [51].

За время интенсивных наблюдений (март–май 2001 г.) в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia на сети станций China DSR для мониторинга пылевых бурь в Китае выполнены регулярные наблюдения атмосферного аэрозоля с целью определения его массовой концентрации и химического состава. В этот период имели место четыре пылевых бури. Осуществленный Zhang и др. [51] анализ данных наблюдений показал, что 45–82% массы пылевого аэрозоля приходилось на долю частиц почвенного происхождения при повышенном содержании в частицах Са и Fe (на 12 и 6% соответственно для ПА из Западного и Северного регионов Китая). Аэрозоль из Северного региона характеризовался также высокой концентрацией Si (30%), но низкой концентрацией Fe (4%). Во всех случаях относительное содержание Al в ПА составляло около 7%.

Расчеты «обратных» траекторий переноса ПА, возникшего в условиях пылевых бурь, выявили наличие пяти главных путей его перемещения весной 2001 г., причем все эти траектории проходили через Пекин. Одним из источников ПА были песчаные почвы Северо-Восточного Китая. Микроструктура аэрозоля в диапазоне диаметра 0,25–16 мкм характеризовалась логнормальным распределением при среднем диаметре 4,5 мкм и дисперсии 1,5. Подобные характеристики репрезентативны для примерно 69% общего содержания ПА. Доли частиц в диапазонах размеров < 2,5 и > 16 мкм составляли около 1,7 и 30% соответственно.

Gong и др. [17] выполнили численное моделирование процессов образования и переноса почвенного ПА с использованием региональной модели NARCM, основу которой составляет уравнение ба-

ланса массы ПА, определяемого соотношениями между источниками и стоками ПА. Расчеты сделаны для условий осуществленного в период марта–мая 2001 г. полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, одной из целей которого было изучение динамики ПА в Юго-Восточной Азии. Априорно заданная достаточно полная метеорологическая информация позволила всесторонне воспроизвести процессы образования, переноса (включая изменения свойств аэрозоля в процессе переноса, сухого и влажного осаждения ПА в регионе Китая с учетом 12 категорий почвенных источников аэрозоля. Для вычислений вертикального распределения микроструктуры ПА задана его микроструктура по данным наземных наблюдений в пустынях.

Сравнение результатов численного моделирования с данными наземных и спутниковых наблюдений для Восточной Азии и Северной Америки подтвердило адекватность выводов на основе численного моделирования. Согласно полученным оценкам в восточно-азиатских пустынях в период с 1 марта по 31 мая 2001 г. образовалось (и было выброшено в атмосферу) около 252,8 Мт почвенного аэрозоля (частицы диаметром меньше 40 мкм), причем примерно 60% всего ПА поступило в атмосферу в периоды четырех крупных пылевых бурь. Информация о содержании аэрозоля выше уровня 700 г/Па хорошо коррелирует с оценками аэрозольного индекса, полученными по данным спутниковой аппаратуры TOMS. Расчеты чувствительности результатов численного моделирования к микроструктуре частиц почвы, влагосодержанию атмосферы и к метеорологическим условиям позволили определить оптимальные значения параметров и условий, которые являются типичными (в рассматриваемом регионе) для процессов образования и переноса аэрозоля.

Mader и др. [33] выполнили исследования атмосферного аэрозоля в регионе Тихого океана с применением усовершенствованных методик забора проб атмосферного аэрозоля с борта самолета (самолет-лаборатория Twin Otter), которые включают термооптический анализатор углеродного аэрозоля, в период полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia (31 марта – 1 мая 2001 г.).

Полученные пробы аэрозоля анализировались с целью определения концентрации органического углерода (OC), элементного (EC) и карбонатного (CC) углерода. Во время некоторых полетов имели место повышенные уровни концентрации загрязнений и(или) минерального пылевого аэрозоля.

Для распознавания природы аэрозоля в различных слоях атмосферы по значениям экспоненты Ангстрема ( $\alpha$ ) использовались данные трехканального нефелометра. Значения экспоненты  $\alpha$  варьировали в пределах 0,2–2, что соответствовало слоям атмосферы, содержащим пыль или загрязняющие компоненты. Концентрация OC и EC на высотах меньше 3 км изменялась от 0,58 до 29 мкгС/м<sup>3</sup> и в интервале 0,20–1,8 мкгС/м<sup>3</sup> соответственно. В целом концентрация общего углерода (TC) в различных слоях атмосферы в период ACE-Asia оказалась бо-

лее высокой, чем наблюдавшаяся во время ACE-2, TARFOX (эксперимент по аэрозольному радиационному возмущающему воздействию в тропосфере) и INDOEX (исследования атмосферы над Индийским океаном).

В некоторых случаях наблюдались смешанные слои пыли и загрязнений. Наличие СС было обнаружено в пробах, которым соответствовали значения  $\alpha = 1,6$ , что свидетельствовало о наличии в пробах значительного количества пылевого аэрозоля, хотя  $\alpha > 0,2$ . Линейная регрессия аэрозольного коэффициента поглощения  $\sigma_{ap}$  в видимой области спектра в зависимости от ЕС характеризовалась значением коэффициента корреляции, составившим всего лишь 0,50 (таким образом, изменчивость  $\sigma_{ap}$  определялась не только ЕС, но и другими факторами). Массовый аэрозольный коэффициент поглощения  $E_{abs}$  ( $m^2/g$ ) изменялся (для различных проб) в 8 раз при среднем значении  $(11 \pm 50) m^2/g$ , что хорошо согласуется с данными, полученными ранее.

Ключевые задачи интерпретации данных наблюдений связаны с необходимостью ответов на следующие вопросы: 1) влияют ли наблюдаемые уровни концентрации ОС и ЕС в морском пограничном слое атмосферы на физико-химические свойства облачных ядер конденсации (CCN) в МПСА; 2) сказывается ли подобное влияние на формировании и времени жизни облаков в МПСА; 3) в какой мере химический состав ОС воздействует на уровень и физико-химические свойства CCN. В последнем случае важная нерешенная задача состоит в установлении относительных вкладов углеродного аэрозоля, возникающего за счет сжигания биомассы или ископаемых топлив.

Выбрасываемый в атмосферу весной в регионах пустынь Северо-Западной Азии пылевой аэрозоль, претерпевающий затем обусловленный ветром дальний перенос на акваторию Тихого океана в северном полушарии, давно привлекает внимание в контексте его воздействия на климат, а также с точки зрения решения задачи атмосферной коррекции. В интересах решения последней задачи Li и др. [31] проанализировали результаты одно-временных наблюдений уходящей коротковолновой радиации (УКР) по данным спутниковой широкоугольной аппаратуры SeaWiFS и яркости безоблачного неба по результатам наблюдений на НИС «Ronald H. Brown» в марте–апреле 2001 г., полученные в рамках программы ACE-Asia исследований атмосферного аэрозоля азиатского происхождения. Данные наблюдений яркости неба использованы для восстановления АОТ с применением оптимизационной методики. Измеренные величины УКР воспроизведены путем итерационных расчетов при задании различных характеристик аэрозоля.

Полученные Li и др. [31] результаты хорошо согласуются с данными по АОТ и прямым измерениям отражательной способности (альбедо) океана. Согласно данным наблюдений в трех точках океана, атмосферная коррекция обеспечила существенное

уменьшение погрешности восстановления альбедо океана до среднего значения около 6% на длинах волн 412 и 443 нм. Влияние ПА было сопоставлено с воздействием на формирование УКР мелкодисперсного поглощающего аэрозоля. На примере одного из наблюдений показано, что совместный учет ПА и поглощающего (сажевого) аэрозоля обеспечивает существенное уменьшение погрешности восстановления АОТ (с 44 до 13% на длине волны 865 нм). Этот пример иллюстрирует необходимость учета наличия поглощающего аэрозоля при решении задачи атмосферной коррекции с целью восстановления оптических свойств морских вод.

Наличие возрастающих выбросов антропогенных загрязнений в атмосферу в Азии, особенно в регионах быстрого промышленного развития, определило обострение необходимости изучения химически и радиационно активных МГК и аэрозоля. Выполненные ранее исследования обнаружили обусловленную выбросами высокую концентрацию загрязняющих атмосферу компонентов в обширном регионе Тихого океана в северном полушарии весной. Prospero и др. [41] обсудили результаты наблюдений концентрации аэрозоля на о-ве Мидуэй, расположенном в центральной части Тихого океана в северном полушарии ( $28^{\circ}13'$  с.ш.,  $177^{\circ}22'$  з.д.), за период 1981–2000 гг. С использованием относительно простой методики сепарации компонентов определены природная и антропогенная доли сульфатного и нитратного аэрозоля.

Из полученных результатов следует, что в течение рассматриваемого периода произошло увеличение (почти вдвое) концентрации антропогенного сульфатного и нитратного аэрозоля, которое коррелирует с ростом выбросов  $SO_2$  в Китае. Этот вывод основан на предположении, что весь избыток  $SO_4^{2-}$  весной по отношению к концентрации диметилсульфида (DMS), найденной по данным о метилсульфонате MSA, определяется вкладом антропогенных выбросов. Подобное предположение исходит из учета эпизодичности вулканических извержений как главного источника природных выбросов  $SO_2$ . На континентах существуют природные источники выбросов  $NO_x$  (например, молниевые разряды, выбросы почвой, сжигание биомассы), но их вклад (по сравнению с антропогенными источниками) можно считать малым, особенно весной (последнее относится к сжиганию биомассы). Незначителен, по-видимому, и вклад источников рассматриваемых МГК, находящихся за пределами Азии, влияние которых заметно главным образом зимой.

Данные наблюдений, относящиеся к концу 1990 г., свидетельствуют о наличии (начиная с середины 1990 г.) тренда стабилизации или даже спада концентрации  $SO_4^{2-}$  и  $NO_3^-$ . Важно, однако, что эти данные заслуживают меньшего доверия ввиду снижения (по разным организационным причинам) качества наблюдений (много проб аэрозоля пришлось забраковать). Тем не менее вывод о тренде стабилизации или спада концентрации  $SO_4^{2-}$  можно считать достоверным, поскольку

в этот период масштабы использования ископаемых топлив в Китае стабилизировались и начали сокращаться. В конце 1990 г. имел место и заметный спад выбросов химически активных соединений азота. Зарегистрированные наблюдениями стабилизация или уменьшение концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$  означают, что сделанные ранее прогнозы завышают концентрацию этих компонентов в тропосфере, тем более что из имеющихся данных следует вывод и о возможном спаде выбросов  $\text{NO}_x$  в Китае. С точки зрения уточнения информации об аэрозольном радиационном возмущающем воздействии важное значение имеет учет черного углеродного аэрозоля, содержание которого в выбросах, поступающих из Китая в регион Атлантического океана, существенно.

Широкое использование в сельских регионах Южной Азии древесного топлива для обогрева и приготовления пищи определяет большие масштабы сжигания биомассы и поступления продуктов сжигания в виде дыма и различных малых газовых компонентов в атмосферу. Для изучения такого рода аэрозольных продуктов Sheesley и др. [44] выполнили лабораторные опыты по сжиганию различных видов биотоплива, применяемых в Бангладеш. Химический состав продуктов сжигания характеризовался наличием органического и элементного углерода, сульфата, нитрата, аммония и ионов хлорида, причем содержание калия и натрия в различных соединениях, подвергшихся сжиганию, мало отличалось. Уникальные особенности типичны для химического состава органики, содержащейся в дымах от различных источников биотоплива. Фингерпринты органических соединений, входящих в состав дымового аэрозоля, существенно отличаются от соответствующих древесным топливам, используемым в Северной Америке. Репрезентативными молекулярными маркерами продуктов сжигания коровьего навоза являются фекальные стано-лы, включая 5 $\beta$ -стигмастанол, корпостанол и холестеранол. Кроме того, важную информацию о биомассе содержат сведения о метоксифенолах и растительных стеролах.

Падение уровня Аральского моря и связанные с этим процессы опустынивания принадлежат к числу наиболее серьезных бедствий, наблюдавшихся в XX в. За последние 40 лет обнажилось более 36 тыс. км<sup>2</sup> поверхности морского дна, что определило возникновение мощного источника поступления в атмосферу эоловой пыли. Предполагается, что связанное с этим усиление пылевых бурь и последующее осаждение пылевого аэрозоля представляют серьезную опасность для здоровья человека. В этом контексте Wiggs и др. [50] изучили связь между запыленностью атмосферы и респираторными заболеваниями среди детей в Каракалпакии. Наиболее сильная запыленность обнаружена в полосе бывшего дна моря, которая вносит наиболее существенный вклад в поступление пыли в атмосферу. Значительные источники пыли существуют и в отдельных районах Каракалпакии, сравни-

тельно удаленных от Аральского моря, особенно ранним летом. Предварительный анализ данных о респираторных заболеваниях среди детей показал, что дети, живущие в северной части Каракалпакии, где осадения эоловой пыли наиболее интенсивны, страдают респираторными заболеваниями значительно реже. Эта отрицательная корреляция требует дальнейшего подтверждения, иллюстрируя сложность связей между условиями окружающей среды и здоровьем человека.

Разумеется, пылевой аэрозоль является хотя и очень важным, но лишь одним из компонентов атмосферного аэрозоля в Азии. Существенный вклад вносят (время от времени) вулканические извержения.

Одним из наиболее вулканически активных регионов мира является Японский архипелаг. Здесь находятся 83 действующих вулкана, включая 12 вулканов, подобных таким, как Сакураджима, Асо-сан, Унзендаке и Миякеджима, которые отличаются особенно высокой активностью. Выполненный Fujita и др. [15] анализ данных наблюдений привел к выводу, что обусловленные вулканами выбросы сернистого газа составляют около 20% суммарных выбросов  $\text{SO}_2$  и в условиях Японии вносят вклад в осаждение общей серы, составляющий примерно 20%. В этом контексте происшедшее в июле 2000 г. извержение стратовулкана Миякеджима, расположенного в 200 км к югу от Токио (34,68° с.ш.; 139,53° в.д.), было беспрецедентным по масштабам и, в частности, повлияло на качество воздуха в регионе мегаполиса Токио, где проживает примерно 30 млн человек.

Продолжительная активность вулкана породила существенное повышение концентрации  $\text{SO}_2$  в атмосфере. Среднесуточные выбросы сернистого газа в период с августа 2000 г. до марта 2001 г. достигли примерно  $15 \cdot 10^9$  гS/сут, т.е. такого же уровня, как и возникавшие в результате сжигания ископаемых топлив в восточной Азии. Оценки суммарного (сухого и влажного) осаждения серы после извержения привели к значениям около 4,26 мгS/(м<sup>2</sup>·сут), которые более чем в три раза превосходили наблюдавшиеся до извержения [1,41 мгS/(м<sup>2</sup>·сут)]. Возрастание вклада влажного осаждения при усилении осадков отображало наличие значительного влияния вымывания соединений серы из атмосферы на удаление продуктов извержения из атмосферы.

В период теплого времени года, для которого характерно преобладание субтропических антициклонов над Тихим океаном, возникновение эпизодов высокой концентрации  $\text{SO}_2$  происходило иногда с некоторой задержкой по времени, обусловленной переносом на север вулканического шлейфа. В холодное время года преобладал северо-западный ветер с Азиатского континента и в этих условиях происходил перенос большей части вулканических выбросов над Тихим океаном. Хотя прямой связи между сухим осаждением и вулканическими выбросами  $\text{SO}_2$  обнаружено не было, наблюдалась положительная корреляция между влажным осаждением



nss (несолевого сульфата)-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и выбросами SO<sub>2</sub>. Следует думать, что взаимодействие между дождящими облаками и шлейфом продуктов вулканического извержения происходило непосредственно перед извержением вулкана Миякеджима, а роль процесса влажного осаждения в удалении вулканической серы из атмосферы была существенной за пределами рассматриваемого региона.

Гао и др. [16] проанализировали химический состав 41 пробы аэрозоля, взятой с самолета над океаном в регионах, расположенных к северу, югу и к востоку от Японии. Анализ проб был сделан прежде всего на содержание водно-растворимых компонентов, особенно органических соединений. Обнаружено наличие 21 четко идентифицируемого соединения, включая неорганические анионы, карбогидраты, органические кислоты и различные металлы. Тремя главными источниками аэрозоля, выявленными по особенностям его химического состава, были: антропогенные выбросы, сжигание биомассы и пылевые выбросы.

Как уже отмечалось ранее, пылевой аэрозоль, возникающий в атмосфере во время пылевых бурь в Сахельском регионе Северной Африки и претерпевающий процесс дальнего переноса, нередко достигает Западной Европы и даже Южной Англии. Обнаруживались, например, следы подобного аэрозоля, осажденного на поверхность снежного покрова, в Альпах. Одной из репрезентативных сигнатур местоположения источника аэрозоля могут служить данные об изотопном составе ниодима, содержащегося в пробах аэрозоля, в сочетании с результатами вычислений «обратных» траекторий дальнего переноса аэрозоля. Так, например, анализ проб «красной пыли», полученных во Франции, отчетливо выявил, что регионом источника аэрозоля была Северная Африка.

Выполненное Grousset и др. [19] рассмотрение «обратной» траектории неожиданно обнаружило в одном из случаев (6 марта 1990 г.), что аэрозоль поступил из региона Китая. Изотопный анализ ниодима обнаружил в этом случае близкое сходство с аналогичным составом китайских лессов. Более того, результаты численного моделирования глобальной циркуляции атмосферы показали, что пылевой шлейф, предшествовавший наблюдавшемуся, покинул Китай до 25 февраля 1990 г., пересек Северную Америку на границе между февралем и мартом и достиг Французских Альп 6 марта 1990 г. Таким образом, рассмотренный случай впервые выявил возможность трансконтинентального переноса пылевого аэрозоля через Тихий океан и Северную Атлантику в полосе широт западно-восточного переноса.

В рамках программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, целью которого было изучение атмосферного аэрозоля в условиях восточной Азии, Wang и др. [47] выполнили измерения микроструктуры и химического состава аэрозоля с использованием следящей установленной на самолете Twin Otter аппаратуры: дифференциаль-

ный анализатор подвижности (DMA), аэродинамический счетчик частиц (APS), импакторы (MOUDI) и датчики для взятия проб аэрозоля. Детально проанализированы данные четырех полетов, которые были использованы для сравнения рассчитанных (при задании наблюдаемых параметров аэрозоля) и измеренных (с использованием 14-канального солнечного фотометра AATS-14) величин общего ослабления солнечной радиации (экстинкции) в условиях безоблачной атмосферы.

Пространственное распределение аэрозоля характеризовалось наличием загрязнений в пограничном слое атмосферы (ПСА) и практическим отсутствием минеральной пыли в свободной тропосфере. Для данных четырех упомянутых полетов наилучшее согласие имеет место при отношении вычисленных к наблюдаемым значениям экстинкции, равном  $0,97 \pm 0,24$  ( $0,96 \pm 0,21$ ) и  $1,07 \pm 0,08$  ( $1,08 \pm 0,08$ ) на длинах волн 525 (1059) нм соответственно для ПСА и для находящихся в ПСА загрязненных слоев. В пылевых слоях, располагавшихся в свободной тропосфере, рассчитанная аэрозольная экстинкция была, как правило, меньше полученной по данным AATS-14 при значениях рассматриваемого отношения, равных  $0,65 \pm 0,06$  (525 нм) и  $0,66 \pm 0,05$  (1059 нм). Возможно, подобное расхождение обусловлено неучетом формы частиц минерального аэрозоля при численном моделировании, а также влиянием горизонтальной неоднородности слоев пыли.

### 3. Регион Индийского океана: INDOEX

Главной целью полевого наблюдательного эксперимента INDOEX, период интенсивных наблюдений которого был осуществлен 11–25 февраля 1999 г., было получение комплексной информации о химических, микрофизических и оптических свойствах атмосферного аэрозоля как природного, так и антропогенного происхождения с применением наземных, самолетных и судовых средств наблюдений [12, 13, 38, 49]. Сравнение данных измерений с использованием различных видов аппаратуры, относящихся к различным условиям наблюдений, выявило наличие значительной изменчивости осредненных значений таких «экстенсивных» характеристик, как масса, а также обусловленные аэрозолем рассеяние и поглощение радиации. С другой стороны, для таких «интенсивных» свойств, как массовая эффективность рассеяния (MSE), альbedo однократного рассеяния, доля радиации, рассеянной назад, коэффициент Ангстрема и отношения концентрации различных компонентов аэрозоля, типична значительно более слабая изменчивость. Как правило, отношения концентрации более изменчивы, чем параметры микроструктуры и оптические свойства аэрозоля.

Изменчивость характеристик аэрозоля, выявленную при сравнении данных аппаратуры, установленной на различных носителях, можно интерпретировать как реально существующую, а также

обусловленную специфическими особенностями методик измерений и нетождественностью условий наблюдений. При высоком уровне концентрации аэрозольной дымки (соответственно — при больших значениях коэффициента рассеяния) значения MSE оказались близкими (при относительной влажности, равной 33%) к  $(3,8 \pm 0,3) \text{ м}^2/\text{г}$ , что определяет возможность ограничения изменчивости оптических свойств аэрозоля такого рода уровнем. Наиболее существенная изменчивость MSE наблюдалась в условиях чистой атмосферы или в регионах низкой концентрации аэрозоля. Полученные Clarke и др. [12] результаты побуждают сделать вывод, что для осуществления «замыкания» оптических, химических и микрофизических характеристик аэрозоля с погрешностью не более 20% необходимо существенное совершенствование методик калибровки и измерений.

Важной целью полевого наблюдательного эксперимента INDOEX были исследования дальнего переноса и эволюции природного и антропогенного аэрозоля, выбрасываемого в атмосферу в регионе Индийского субконтинента, а также взаимодействий аэрозоля с облаками, радиацией и климатом. Одним из средств наблюдений, предназначенных для решения перечисленных задач, была система шаров-зондов, дрейфующих по горизонтали на различных высотах. В период интенсивной фазы наблюдений по программе INDOEX (15 января — 27 февраля) из Гоа (западное побережье Индии) были запущены 17 шаров-зондов, которые дрейфовали на различных высотах в нижней тропосфере.

Слежение со спутника за дрейфом шаров-зондов показало, что дрейф происходил под воздействием осцилляции Маддена—Джулиана, но проявлялось также влияние прибрежных антициклонических циркуляций у западного побережья Индии, связанных с топографией и мезомасштабными системами циркуляции. Последние играют важную роль в процессе дальнего переноса через побережье антропогенных и минеральных загрязняющих компонентов.

Сравнение наблюденных и предвычисленных траекторий и свойств воздушных масс показало, что с точки зрения величин скорости ветра, температуры и влажности воздуха согласие, в целом, было вполне удовлетворительным. Однако в пределах морского пограничного слоя выявлены существенные расхождения результатов вычислений с данными наблюдений, включая заниженность температуры, которая могла быть обусловлена пространственной сглаженностью рассчитанных значений.

Важную часть разработок в период интенсивных наблюдений в рамках полевой наблюдательной программы INDOEX, выполненных в 1999 г., составляли судовые наблюдения свойств атмосферного аэрозоля. Эти наблюдения были выполнены на борту НИС «Ronald H. Brown» в регионах Индийского океана к северу и к югу от внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) в Аравийском море, а также Бенгальского залива. Выполненный Quinn и др. [42] анализ результатов вычислений «обрат-

ных» траекторий воздушных масс (ВМ) привел к обнаружению восьми регионов-источников воздушных масс, поступавших в исследуемый регион, включая: Атлантический и Индийский океаны в южном полушарии; Индийский океан в северном полушарии; восточную часть субконтинента Индии (здесь траектории ВМ проходили поблизости от Калькутты, через южную часть Индии); Индийский субконтинент, где траектории ВМ пересекали центральную часть Индии; Аравийское море; Аравийско-Индийский субконтинент с характерным для него сочетанием траекторий над Аравией в нижней тропосфере и траекторий над Индией — на более высоких уровнях; Аравийское море/побережье Индии, где преобладали траектории воздушных масс вдоль побережья Индии.

К числу исследованных свойств аэрозоля в морском пограничном слое атмосферы относились: химический состав, микроструктура, коэффициенты рассеяния и поглощения. Кроме того, были получены также данные о вертикальном профиле коэффициента обратного рассеяния и АОТ. Quinn и др. [42] проанализировали наблюдающуюся зависимость счетной и массовой концентрации различных преобладающих компонентов состава аэрозоля, коэффициентов рассеяния, поглощения и общего ослабления (экстинкции), альbedo однократного рассеяния (АОР), коэффициента Ангстрема и АОТ (на длине волны 500 нм) в зависимости от специфики (происхождения) воздушных масс. Все наблюдения (за исключением АОТ) сделаны при относительной влажности, равной  $(55 \pm 3)\%$ . В случаях ВМ, поступивших из южного полушария, экстинкция за счет частиц размером меньше 1 мкм и меньше 10 мкм была обусловлена главным образом вкладом морского солевого аэрозоля. Отношение коэффициентов экстинкции для частиц упомянутых размеров было в этих случаях минимальным по сравнению со всеми остальными случаями, составляя, в среднем, соответственно, 28 и 40%, что определялось доминирующим вкладом субмикронного морского солевого аэрозоля в формирование массы аэрозоля. Минимальными были и значения АОТ, составляя в среднем  $0,06 \pm 0,03$ .

Концентрация несолевого сульфатного аэрозоля в ВМ из региона Индийского океана в северном полушарии примерно в 6 раз превосходила значения, соответствующие ВМ из южного полушария (при сравнимых значениях концентрации субмикронного морского солевого аэрозоля). Если в случае субмикронных частиц сульфатного аэрозоля их вклад в экстинкцию достигал 40%, то морской солевой аэрозоль доминировал при наличии частиц размером более 10 мкм. Средние значения АОТ были равны  $0,10 \pm 0,03$ , а АОР составляло около 0,89. Наличие обнаружимой концентрации «черного углерода» (BC), равной  $(0,14 \pm 0,05) \text{ мкг}/\text{м}^3$ , отображало существование дальнего переноса в регион ВЗК аэрозоля с Индийского континента. Два региона, находившиеся под воздействием переноса на высоте 500 м из Аравии, характеризовались более высокими значениями концентрации несолево-

го сульфатного субмикронного аэрозоля, частиц из органического вещества (РОМ) и из неорганического окисленного вещества (ИОМ), чем в морских регионах. Концентрации супермикронных ИОМ и солевых частиц были сравнимыми. Вклад субмикронных частиц несолевого сульфатного аэрозоля был доминирующим в формировании экстинкции и оставался значительным в случае частиц больше 10 мкм, когда доминирующее воздействие оказывал морской солевой аэрозоль.

Средний вклад ВС в формирование экстинкции за счет субмикронных частиц был равен соответственно 8 и 12% для ВМ из морских и континентальных регионов, тогда как значения АОР составляли  $0,93 \pm 0,02$  и  $0,38 \pm 0,07$ , а АОТ  $0,19 \pm 0,12$  и  $0,38 \pm 0,07$  (более высокие значения соответствуют воздушному потоку на высоте 2 500 м из Индии). Регионы, находившиеся под воздействием поступления ВМ в нижней тропосфере с Индийского субконтинента, характеризовались максимальными значениями концентрации субмикронного несолевого сульфатного аэрозоля, РОМ, ВС и ИОМ. Концентрация супермикронного морского солевого аэрозоля была ниже или сравнимой с концентрацией супермикронного нитрата. Основной вклад в экстинкцию, обусловленную суб- и супермикронными частицами, вносил несолевой сульфатный аэрозоль, хотя возникший за счет сжигания биомассы вклад ВС,  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  был почти эквивалентным. Значение АОР ( $0,85 \pm 0,11$ ) оказалось самым низким. Средние значения АОТ были максимальными (0,3–0,4) в регионах дальнего переноса с Индийского субконтинента.

Поскольку углеродный компонент составляет одну из главных фракций состава атмосферного аэрозоля, большой интерес представляет получение информации о содержании в аэрозоле элементного углерода, ответственного за поглощательные свойства аэрозоля, и органического углерода, который вносит существенный вклад в обусловленное аэрозолем рассеяние радиации. Это особенно относится к почти отсутствующим данным о соотношении ОС/ЕС для различных фракций размеров частиц. Если главным источником ЕС служит сжигание биомассы, то источники ОС более разнообразны, включая прямые выбросы в атмосферу при неполном сгорании ископаемых топлив или биомассы, газофазные реакции с участием летучих органических соединений и др. Neusüß и др. [39] обсудили результаты судовых (НИС «Ronald H. Brown») наблюдений концентрации ЕС и ОС в субмикронной и супермикронной фракциях аэрозоля в атмосфере над Индийским океаном, выполненных в рамках программы INDOEX в феврале–марте 1999 г.

Анализ данных измерений суммарной концентрации (ТС) показал, что она была низкой в случае воздушных масс, формировавшихся в южном полушарии, в таких условиях было обнаружено лишь небольшое количество органического углерода в составе супермикронной фракции морских солевых частиц. В атмосфере над Индийским океаном в северном полушарии, где проявлялось воздейст-

вие континентальных воздушных масс, концентрация ОС в суб- и супермикронных компонентах аэрозоля оказалась более высокой на порядок величины и выше. Элементный углерод был обнаружен главным образом в составе субмикронных частиц, причем его содержание увеличивалось более чем на два порядка величины в северной части Индийского океана по сравнению с его южной частью. Массовая доля углеродного аэрозоля варьировала в пределах 6–15 и 2–12% для суб- и супермикронных фракций, соответственно возрастая по мере повышения уровня загрязнения воздушных масс.

Измеренные большие значения коэффициента поглощения аэрозоля можно отчасти объяснить высокой степенью перемешанности с рассеивающим радиацию компонентом состава аэрозоля. Эффективность поглощения оказалась более высокой при низком уровне содержания фракции ЕС аэрозоля. В качестве поглощающих компонентов выявлены различные обладающие короткими цепями дикарбоксильные и гидроксильные дикарбоксильные кислоты. Первые сконцентрированы главным образом в супермикронных частицах, а вторые — в субмикронной фракции аэрозоля. В малых количествах обнаружены также алканы и полициклические ароматические углеводородные соединения. Это побуждает предположить, что существенная часть органического вещества аэрозоля имеет вторичное происхождение. Подобное предположение подтверждает наличие высокой корреляции между суммарной концентрацией карбоксильных кислот, концентрацией ОС, нитрата и, в более слабой степени, — сульфата. Однако наблюдаемые значения отношения концентрации ОС/ЕС отображают и присутствие первичного ОС. Крайне важными являются наблюдения источников ОС и ЕС в Юго-Восточной Азии.

В период осуществления полевой наблюдательной программы INDOEX происходил дальний перенос аэрозольных и малых газовых компонентов с субконтинента Индии в регион Индийского океана, по направлению к внутритропической зоне конвергенции. Анализ рассчитанных «обратных» траекторий воздушных масс позволил проследить трансформацию химического состава аэрозоля и малых газовых компонентов в зависимости от их географического происхождения. В связи с этим Guazzotti и др. [20] выполнили сравнение данных наблюдений временной изменчивости содержания ацетонитрила (долговременного индикатора сжигания биомассы и биотоплив), счетной концентрации субмикронного углеродсодержащего аэрозоля, массовой концентрации калия (индикатора источников сгорания ископаемых топлив) и субмикронного несолевого калиевого аэрозоля. Эти сравнения выявили наличие высоких уровней корреляции ( $0,84 < r^2 < 0,92$ ) между перечисленными компонентами. На этом основании можно заключить с высокой вероятностью о сходстве источников рассматриваемых компонентов.

Данные об аэрозоле и МГК указывают на влияние выбросов за счет сжигания ископаемых

топлив, а также биомассы и биотоплив, претерпевающих дальний перенос в атмосфере. В воздушных массах, претерпевших адвекцию с субконтинента Индии на акваторию Индийского океана, зарегистрированы высокие уровни концентрации субмикронного неосолевого калия, а также содержащих углерод и калий частиц и ацетонитрила. Подобная ситуация отображает наличие сильного воздействия на состав воздушных масс сжигания биомассы и биотоплив, происходившего в период INDOEX (вклад подобного воздействия в формирование субмикронного углеродного аэрозоля составляет  $(74 \pm 9)\%$ ). В отличие от этого, воздушные массы, поступавшие с Аравийского полуострова, характеризовались низким содержанием упомянутых компонентов. В этих случаях преобладало влияние процессов сгорания ископаемого топлива, вклад которого в формирование субмикронного углеродного аэрозоля был равен  $(63 \pm 9)\%$ . Полученные результаты отображают актуальность комплексных исследований закономерности изменчивости химического состава аэрозоля и МГК в различных регионах.

В период INDOEX-1999 в регионе Индийского океана были выполнены аэрозольные зондирования атмосферы при помощи микроимпульсных лидаров (MPL), установленных на НИС «Ronald H. Brown» и на Мальдивских островах. Для измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы, а также в целях калибровки MPL использовались многоканальные (длины волн 380, 440, 500, 675 и 870 нм) солнечные фотометры. Welton и др. [49] обсудили результаты наблюдений вертикальных профилей оптических свойств аэрозоля по данным лидарных зондирований на длине волны 523 нм. Согласно осуществленным за время рейса НИС наблюдениям аэрозоль располагался, как правило, на высотах меньше 4 км. В это время высота морского пограничного слоя атмосферы составляла меньше 1 км.

Результаты аэрозольных зондирований были проанализированы в сочетании с данными о вычисленных траекториях воздушных масс и аэрологических зондирований. В течение всего рейса относительная влажность изменялась от 30% вблизи поверхности океана до 50% на уровне верхней границы аэрозольного слоя. При отсутствии поступления аэрозоля с субконтинента Индии значения АОТ для морского аэрозоля составляли  $0,05 \pm 0,03$ , отношение экстинкции к обратному рассеянию  $S = (33 \pm 6)$  ср, а максимальное значение коэффициента экстинкции (вблизи верхней границы МПСА) — примерно  $0,05 \text{ км}^{-1}$ . Эти значения согласуются с результатами, полученными ранее. В случае загрязненных воздушных масс над Индийским океаном, подвергшихся воздействию континентального аэрозоля, значения АОТ превосходили 0,2;  $S > 40$  ср, а максимальный коэффициент экстинкции достигал  $0,20 \text{ км}^{-1}$ . Все эти характеристики типичны для континентального аэрозоля.

Welton и др. [49] сравнили полученные по данным MPL значения коэффициента экстинкции поблизости от судна (на высоте 75 м) и результаты

наблюдений экстинкции на уровне судна по данным наблюдений рассеяния при помощи нефелометра и поглощения — с использованием фотометра, позволяющего определить поглощение радиации сажевым компонентом аэрозоля. Подобные сравнения показали, что использование алгоритма обработки данных MPL (при задании постоянного значения  $S$  в нижней тропосфере) обеспечивает получение достоверных величин экстинкции вблизи поверхности океана, согласующихся с данными наблюдений на уровне судна, только в таких условиях, когда аэрозоль, находящийся в пределах МПСА, хорошо перемешан с аэрозолем, расположенным в более высоких слоях атмосферы (над МПСА). Анализ вертикальных профилей экстинкции, полученных по данным MPL, привел к выводу, что вертикальный профиль экстинкции, найденный ранее (1996 г.) как характерный для района Мальдивских островов, нельзя считать репрезентативным для всего региона Индийского океана. Предложена поэтому новая модель вертикального профиля экстинкции для морской атмосферы над Индийским океаном, а также модель, характеризующая условия загрязненной атмосферы при поступлении континентального аэрозоля.

В марте—феврале 1999 г., в рамках полевого эксперимента INDOEX, Mayol-Bracero и др. [35, 36] выполнили самолетные измерения (самолет-лаборатория C-130) содержания в мелкодисперсном аэрозоле (диаметр частиц  $D_p < 1,3 \text{ мкм}$ ) углеродных компонентов, а также растворимых в воде ионных компонентов на различных высотах с целью анализа зависимости химического состава аэрозоля от высоты. В регионе Индийского океана, расположенном к северу от экватора, обнаружено регулярное наличие загрязненных слоев атмосферы на высотах до 3,2 км. Суммарная массовая концентрация мелкодисперсного аэрозоля (сумма масс углеродного и ионного компонентов) в этих слоях составляла  $(15,3 \pm 7,9) \text{ мкг/м}^3$ . Главными компонентами были аэрозольные органические вещества (POM, 35%),  $\text{SO}_4^{2-}$  (34%), черный углерод (EC, 14%) и  $\text{NH}_4^+$  (11%).

Основным различием между химическим составом МПСА (диапазон высот 0—1,2 км) и расположенным над ним остаточным континентальным ПСА (1,2—3,2 км) было более высокое содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  по сравнению с POM в пределах МПСА, что оказалось, вероятно, обусловлено более быстрой трансформацией  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_4^{2-}$  в МПСА. Полученные результаты показали, что углерод вносит главный (иногда доминирующий) вклад в формирование массы аэрозоля, причем этот вклад возрастает с высотой. Малая изменчивость оптических свойств аэрозоля была обнаружена в двух слоях. Регрессионный анализ зависимости коэффициента поглощения на длине волны 565 нм от массы BC (при концентрации  $\text{BC} > 4,0 \text{ мкгС/м}^3$ ) привел к значению удельного поперечника поглощения, равному  $(8,1 \pm 0,7) \text{ м}^2/\text{г}$  в течение всего периода наблюдений. Необычно

значительная доля содержания ВС, а также наличие высокой корреляции между ВС и коэффициентом поглощения отображали тот факт, что ВС был ответствен за сильное поглощение света, наблюдавшееся в слоях загрязнений во время INDOEX. Высокая корреляция между ВС и содержанием общего углерода (ТС) ( $r^2 = 0,86$ ) свидетельствовала о преимущественно первичном происхождении ТС. Высокая корреляция была зарегистрирована также между коэффициентом рассеяния на длине волны 550 нм и массой мелкодисперсной фракции аэрозоля. Удельный поперечник рассеяния составил  $(4,9 \pm 0,4) \text{ м}^2/\text{г}$ . В течение всего периода наблюдений отношения концентраций ВС/ТС, ВС/ОС,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{BC}$  и  $\text{K}^+/\text{BC}$  были почти неизменными. Из данных об этих отношениях следует, что от 60 до 80% аэрозоля, находившегося в загрязненных слоях атмосферы в период INDOEX, возникли за счет сжигания ископаемых топлив, а 20–40% были обусловлены сгоранием биотоплив.

В период INDOEX Chazette [11] выполнил лидарное зондирование атмосферы в Гоа (западное побережье Индии:  $15,45^\circ$  с.ш.;  $73,08^\circ$  в.д.), продолжавшееся с 1 по 15 марта 1999 г. Были восстановлены вертикальные профили отношения  $\Phi_p$  обратного рассеяния к экстинкции с целью изучения закономерностей вертикального распределения и эволюции со временем содержания аэрозоля в атмосфере в период зимнего муссона (микроимпульсный лидар функционировал на длине волны 523 нм). С учетом данных солнечного фотометра по аэрозольной оптической толщине среднее значение  $\Phi_p = (0,03 \pm 0,010) \text{ ср}^{-1}$ . Репрезентативным трассером коэффициента аэрозольного рассеяния  $\alpha_s$  (по данным наблюдений в дневное время) оказалась концентрация черного углерода ВС, тогда как влияние относительной влажности  $RH$  имело второстепенное значение.

В работе [11] получено статистическое соотношение между  $\alpha_s$  и ВС, которое было использовано для восстановления свойств аэрозоля в ночное время, когда значения  $\Phi_p$  практически такие же, что и днем. Восстановленные по лидарным данным значения АОТ ночью были более высокими, чем днем. Среднее за период наблюдений значение АОТ равно  $0,76 \pm 0,15$  ночью и  $0,55 \pm 0,09$  днем. Значительный вклад в формирование АОТ вносил слой толщиной 0,7 км над поверхностью океана (ASL). Второй аэрозольный слой был обнаружен над ASL (на высотах 0,7–3,5 км) и характеризовался наличием значительного суточного хода его протяженности по высоте и оптической толщины, который был обусловлен, по-видимому, изменчивостью бриза. Оптическая толщина верхнего аэрозольного слоя варьировала от  $0,49 \pm 0,14$  ночью до  $0,25 \pm 0,07$  днем.

В течение 6 сут в период INDOEX Masonis и др. [34] выполнили самолетные (самолет-лаборатория С-130, базировавшийся на Мальдивских островах:  $4,18^\circ$  с.ш.;  $73,53^\circ$  в.д.) прямые (*in situ*) измерения и лидарное рамановское зондирование

вертикальных профилей аэрозольного коэффициента экстинкции ( $\sigma_{\text{ep}}$ ) и коэффициента обратного рассеяния ( $\beta_p$ ). Прямые измерения  $\sigma_{\text{ep}}$  и  $\beta_p$  осуществлены с использованием двух интегрирующих нефелометров и фотометра для измерений обусловленного сажевыми частицами поглощения. С применением наземного солнечного фотометра измерялась также аэрозольная оптическая толщина атмосферы.

Значения  $\sigma_{\text{ep}}$  и  $\beta_p$ , полученные по данным лидарного зондирования, оказались примерно на 30% больше, чем наблюдаемые *in situ* (при 95%-м доверительном интервале). Возможными причинами подобных расхождений являются: 1) систематические погрешности данных *in situ*, обусловленные потерями аэрозоля на входе устройства для забора проб; 2) недооценка влияния влажности воздуха на экстинкцию при обработке данных прямых измерений; 3) завышение значений  $\sigma_{\text{ep}}$  и  $\beta_p$ , полученных по данным лидарного зондирования, которое обусловлено влиянием ненаблюдаемой облачности; 4) погрешности обработки результатов наблюдений (особенно лидарных данных). Известную роль могла играть и неполная пространственно-временная совместимость *in situ* и лидарных данных.

В период осуществления программы наблюдений INDOEX в регионе Индийского океана (январь–март 1999 г.) на борту НИС «Ronald H. Brown» и «Sagar Kanya Granat» и др. [18] получили пробы дождевой воды и выполнили их химический анализ на содержание главных ионов и некоторых следовых металлов. На основе использования результатов вычислений «обратных» траекторий воздушных масс на срок 10 сут было осуществлено распознавание возможных находящихся в Азии источников воздушных масс и сделан сравнительный анализ данных о химическом составе дождевой воды и одновременно полученных проб аэрозоля.

Хотя наблюдаемая концентрация  $\text{nssSO}_4^{2-}$ , ионов  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{nssK}^+$  и  $\text{nssCa}^{2+}$  в дождевой воде рассматриваемого региона оказалась в 2–3 раза более низкой, чем на субконтиненте Индии, она, несомненно, определялась существенным воздействием континентальных источников загрязнений и пылевого аэрозоля из Азии. По мере перемещения воздушных масс на юг и удаления в сторону океана от континента происходило уменьшение концентрации ионов  $\text{nssCa}^{2+}$ , тогда как концентрация  $\text{nssSO}_4^{2-}$  повышалась. Это согласуется с фактом более высокой кислотности дождевой воды над океаном (при значениях рН в интервале 4,8–5,4), чем над субконтинентом Индии. При этом главным катионом был  $\text{NH}_4^+$  (но не  $\text{Ca}^{2+}$ , как это имеет место на суше). Наблюдалась высокая корреляция концентрации Al и Fe с  $\text{nssCa}^{2+}$ , отображавшая континентальное происхождение (как продукта горных пород) этих элементов.

Соотношение между концентрациями  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Br}^-$  в дождевой воде было близким к соответствующему соотношению в морской воде, что

свидетельствует об отсутствии избытка или дефицита упомянутых ионов галогенов. Отношения концентраций ионов металлов в дождевой воде и в атмосфере были систематически более высокими в случае грубодисперсной моды аэрозоля солевого происхождения ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$ ) по сравнению с мелкодисперсной модой ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{nssK}^+$  и  $\text{nssSO}_4^{2-}$ ). Это свидетельствует о наличии внутриоблачного процесса вымывания мелкодисперсного аэрозоля, тогда как существенный вклад в удаление солевых частиц крупнодисперсного аэрозоля вносили падающие под облаками капли дождя. Такие компоненты, как  $\text{nssCa}^{2+}$  и  $\text{NO}_3^-$ , относятся к промежуточной категории, и процесс их вымывания под облаками не оказывается столь существенным, как для крупнодисперсного морского солевого аэрозоля.

Азиатско-африканский зимний муссон характеризуется наличием устойчивого северо-западного переноса воздушных масс из зоны Индийского субконтинента к регионам Аравийского моря и экваториальной полосы Индийского океана. Подобная ситуация оказывает значительное воздействие на развитие химических процессов в глобальных масштабах, обусловленное переносом большого количества антропогенного атмосферного аэрозоля. С целью анализа закономерностей упомянутого переноса воздушных масс Krishak и др. [29] сделали расчеты их траекторий за каждые сутки, начиная с 1 февраля 1999 г., когда осуществлялся полевой наблюдательный эксперимент INDOEX. Численное моделирование, относящееся к одному из эпизодов переноса при наличии интенсивного циклона, позволило проследить за эволюцией процесса формирования пылевого шлейфа. В работе [29] проанализирована роль погодообразующих систем в переносе в Европу загрязненных воздушных масс из региона INDOEX. Такого рода перенос может оказывать существенное влияние на режим осадков и климат в регионах Южной Европы и Средиземноморья.

Во второй части обзора мы рассмотрим результаты наиболее существенных комплексных полевых наблюдательных экспериментов, предпринятых в Америке и в Западной Европе.

1. Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Измерения. Интерпретация. СПб.: СПбНЦ РАН, 2002. 388 с.
2. Кондратьев К.Я. Биогенный аэрозоль в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 3. С. 171–179.
3. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб.: Наука, 1992. 359 с.
4. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Физические свойства и химический состав // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 2. С. 123–146.
5. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 301–320.

6. Кондратьев К.Я. Радиационное возмущающее воздействие, обусловленное аэрозолем // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 5–18.
7. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 1. С. 1–24.
8. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Дистанционное зондирование глобальной пространственно-временной изменчивости аэрозоля и его воздействие на климат // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 1. С. 25–35.
9. Панченко М.В. (ред.) Тематический выпуск «Аэрозоли Сибири» // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 405–559.
10. Cantrell C., Carder K.L., Gordon H.R. Columnar aerosol single-scattering albedo and phase function retrieved from sky radiance over the ocean: Measurements of Saharan dust // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 9. P. AAC 10/1–AAC 10/11.
11. Chazette P. The monsoon aerosol extinction properties at Goa during INDOEX as measured with lidar // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 6. P. ACH 6/1–ACH 6/12.
12. Clarke A.D., Howell S., Quinn P.K., Bates T.S., Ogren J.A., Andrews E., Jefferson A., Massling A., Mayol-Bracero O., Maring H., Savoie D., Cass G. INDOEX aerosol: A comparison and summary of chemical, microphysical, and optical properties observed from land, ship, and aircraft // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 19. P. INX2 32/1–INX2 32/32.
13. Ethé C., Basdevant C., Sadourny R., Appu K.S., Harenduprakash L., Sarode P.R., Viswanathan G. Air mass motion, temperature, and humidity over the Arabian Sea and western Indian Ocean during the INDOEX intensive phase, as obtained from a set of superpressure drifting balloons // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 19. P. INX2 22/1–INX2 22/19.
14. Formenti P., Elbert W., Maenhaut W., Haywood J., Andreae O.M. Chemical composition of mineral dust aerosol during the Saharan Dust Experiment (SHADE) airborne campaign in the Cape Verde region, September 2000 // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 18. P. SAH 3/1–SAH 3/15.
15. Fujita S.-i., Sakurai T., Matsuda K. Wet and dry deposition of sulfur associated with the eruption of Miyakejima volcano, Japan // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 15. P. ACH 3/1–ACH 3/9.
16. Gao S., Hegg D.A., Jonsson H. Aerosol chemistry, and light-scattering and hygroscopicity budgets during outflow from East Asia // J. Atmos. Chem. 2003. V. 46. N 1. P. 55–88.
17. Gong S.L., Zhang X.Y., Zhao T.L., McKendry I.G., Jaffe D.A., Lu N.M. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. Model simulation and validation // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 9. P. ACH 4/1–ACH 4/19.
18. Granat L., Norman M., Leck C., Kulshrestha U.C., Rodhe H. Wet scavenging of sulfur compounds and other constituents during the Indian Ocean Experiment (INDOEX) // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 19. P. INX2 24/1–INX2 24/10.
19. Grousset F.E., Ginoux P., Bory A., Biscaye P.E. Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. N 3. P. 10/1–10/4.
20. Guazzotti S.A., Suess D.T., Coffee K.R., Quinn P.K., Bates T.S., Wisthalet A., Hansel A., Ball W.R.,

- Dickerson R.R., Neusüß C., Crutzen P.J., Prather K.A.* Characterization of carbonaceous aerosols outflow from India and Arabia: Biomass/biofuel burning and fossil fuel combustion // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 15. P. ACL 13/1–ACL 13/14.
21. *Guieu C., Loje-Pilot M. D., Ridame C., Thomas C.* Chemical characterization of the Saharan dust end-member. Some biogeochemical implications for the western Mediterranean Sea // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 15. P. ACH 5/1–ACH 5/11.
22. *Haywood J., Francis P., Osborne S., Glew M., Loel N., Highwood E., Tarré D., Myhre G., Formenti P., Hirst E.* Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 18. P. SAH 4/1–SAH 4/16.
23. *Highwood E.J., Haywood J.M., Silverstone M.D., Newman S.M., Taylor J.P.* Radiative properties and direct effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during Saharan Dust Experiment (SHADE). 2. Terrestrial spectrum // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 18. P. SAH 5/1–SAH 5/13.
24. *Hoornaert S., Godoi R.H.M., van Grieken R.* Single particle characterization of the aerosol in the marine boundary layer and free troposphere over Tenerife, NE Atlantic, during ACE-2 // *J. Atmos. Chem.* 2003. V. 46. P. 271–293.
25. *Israelevich P. L., Levin Z., Joseph J. H., Ganor E.* Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 21. P. AAC 13/1–AAC 13/13.
26. *Kondratyev K.Ya.* Radiation Processes in the Atmosphere. Second IMO Lecture. WMO Publ. N 309. Geneva, 1972. 214 p.
27. *Kondratyev K.Ya.* The Complete Atmospheric Energetics Experiment. GARP Publ. Ser. WMO. Geneva, 1973. N 12. 43 p.
28. *Kondratyev K.Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds. Springer/PRAXIS. Chichester, U.K. 1999. 264 p.
29. *Krichak S.O., Tsidulko M., Alpert P.* A study of an INDOEX period with aerosol transport to the eastern Mediterranean area // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 21. P. AAC 18/1–AAC 18/8.
30. *Léon J.-F., Tarré D., Pelyn J., Kaufman Y.J., Haywood J.M., Chatenet B.* Profiling of a Saharan dust outbreak based on a synergy between active and passive remote sensing // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 18. P. SAH 2/1–SAH 2/18.
31. *Li L.P., Fukushima H., Fronin R., Mitchell B.G., He M.-X., Uno U., Takamuro T., Ohta S.* Influence of submicron absorptive aerosol on Sea-viewing Wide Field of View Sensor (SeaWiFS) – derived marine reflectance during Aerosol Characterization Experiment (ACE)-Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 15. P. AAC 13/1–AAC 13/11.
32. *Li J., Anderson J.R., Buseck P.R.* TEM study of aerosol particles from clean and polluted marine boundary layers over the North Atlantic // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 6. P. ACH 8/1–ACH 8/14.
33. *Mader B.T., Flagan R.C., Seinfeld J.H.* Airborne measurements of atmospheric carbonaceous aerosols during ACE-Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 23. P. AAC 13/1–AAC 13/21.
34. *Masonis S.J., Franke K., Ansmann A., Müller D., Althausen D., Ogren J.A., Jefferson A., Sheridan P.J.* An intercomparison of aerosol light extinction and 180° backscatter as derived using in situ instruments and Raman lidar during the INDOEX field campaign // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 19. P. INX2 13/1–INX2 13/21.
35. *Mayol-Bracero O.L., Gabriel R., Andreae M.O., Kirchstetter T.W., Novakov T., Ogren J., Sheridan P., Streets D.G.* Carbonaceous aerosols over the Indian Ocean during the Indian ocean Experiment (INDOEX): Chemical characterization, optical properties, and probable sources // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 19. P. INX2 29/1–INX2 29/21.
36. *Mayol-Bracero O.L., Guyon P., Graham B., Roberts G., Andreae M.O., Decesari S., Facchini M.C., 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 15. P. LBA 59/1–LBA 59/15.
37. *Müller D., Mattis I., Wandinger U., Aumann A., Althausen D., Dubovik O., Eckhardt S., Stohl A.* Saharan dust over a central European EARLINET-AERONET site: Combined observations with Raman lidar and Sun photometer // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 12. P. AAC 1/1–AAC 1/17.
38. *Nakajima T.* and APEX Science Team. Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003. JST / CREST / APEX 2003 Interim Report. Univ. of Tokyo, 2003. 240 p.
39. *Neusüß C., Gnauk T., Plewka A., Hermann H., Quinn P.K.* Carbonaceous aerosol over the Indian Ocean: OC/EC fractions and selected specifications from size-segregated onboard samples // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 19. P. INX2 30/1–INX2 30/13.
40. *Pedros R., Martinez-Lozano J.A., Utrillas M.P., Gymez-Amo J.L., Tenc F.* Column integrated aerosol optical properties from ground-based spectroradiometer measurements in Barrax (Spain) during the Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment (DAISEX) campaign // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 18. P. AAC 5/1–AAC 5/17.
41. *Prospero J.M., Savoie D.L., Arimoto R.* Long-term record of nss-sulfate and nitrate in aerosols on Midway Island, 1981–2000: Evidence of increased (now decreasing?) anthropogenic emissions from Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 10/1–10/11.
42. *Quinn P.K., Coffman D.J., Bates T.S., Miller T.L., Johnson J.E., Welton E.J., Neusüß C., Miller M., Sheridan P.J.* Aerosol optical properties during INDOEX 1999: Means, variability, and controlling factors // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 107. N 19. P. INX2 19/1–INX2 19/25.
43. *Reid J.S., Jonsson H.H., Maring H.B., Smirnov A., Savoie D.L., Cliff S.S., Reid E.A., Livingston J.M., Meier M.M., Dubovik O., Tsay S.-C.* Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD 9/1–PRD 9/20.
44. *Sheesley R.J., Shaner J.J., Chowdhury Z., Cass G.R.* Characterization of organic aerosols emitted from the combustion of biomass indigenous to South Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 9. P. AAC 8/1–AAC 8/15.
45. *Tarré D., Haywood J., Pelon J., Léon J.E., Chatenet B., Formenti P., Francis P., Goloub P., Highwood E.J., Myhre G.* Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact: Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 18. P. SAH 1/1–SAH 1/12.
46. *Vukmirović Z., Unkašević M., Lazić L., Tošić I., Rajšić S., Tasić M.* Analysis of the Saharan dust

- regional transport // Meteorol. and Atmos. Phys. 2004. V. 85. N 4. P. 265–273.
47. Wang J., Flagan R.C., Seinfeld J.H., Jonsson H.H., Collins D.R., Russel P.B., Schmid B., Redemann J., Livingston J.M., Gao S., Hegg D.A., Welton E.J., Bates D. Clear-column radiative closure during ACE-Asia: Comparison of multi-wavelength extinction derived from particle size and composition with results from Sun photometry // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 23. P. AAC 7/1–AAC 7/22.
48. Wang J., Christopher S.A., Reid J.A., Maring H., Savoie D., Holben B.N., Livingston J.M., Russel P.B., Yang S.-K. GOES-8 retrieval of dust aerosol optical thickness over the Atlantic Ocean during PRIDE // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 19. P. PRD 11/1–PRD 11/15.
49. Welton E.J., Voss K.J., Quinn P.K., Flatau P.J., Markowicz K., Campbell J.P., Spinhirne J.D., Gordon H.R., Johnson J.E. Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using multi-pulse lidar // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 19. P. INX2 18/1–INX2 18/20.
50. Wiggs G.F.S., O'Hara S.L., Wegert J., van der Meers J., Small I., Hubbard R. The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: Possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin // Geogr. J. 2003. V. 169. N 2. P. 142–158.
51. Zhang X.Y., Gong S.L., Shen Z.X., Mei F.M., Xi X.X., Liu L.C., Zhou Z.J., Wang D., Wang Y.Q., Cheng Y. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during ACE-Asia: 1. Network observations // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 9. P. ACH 3/1–ACH 3/13.

***K.Ya. Kondratyev. From nano- to global scales: properties, processes of formation, and aftereffects of the atmospheric aerosol impacts. 1. Field observational experiments. Africa and Asia.***

Results of complex investigations of the atmospheric aerosol properties, obtained during observational experiments in Africa and Asia, are under analysis.