

**К.Я. Кондратьев**

## **От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 6. Дальний перенос и процессы осаждения**

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

Поступила в редакцию 26.07.2004 г.

Сделан обзор дальнего переноса и процессов осаждения атмосферного аэрозоля.

### **Введение**

Сравнительно длительное (до 2–3 нед) время жизни частиц аэрозоля в атмосфере определяет возможность их дальнего переноса на большие расстояния. Наиболее хорошо известными и изученными ситуациями такого рода являются выбросы в атмосферу пылевого аэрозоля (ПА) во время пылевых бурь в Северной Африке и последующий трансатлантический перенос частиц, хотя иногда возникают и меридиональные потоки ПА, направленные в Западную Европу. Другая не менее известная ситуация – дальний перенос ПА на акваторию Северо-Западного региона Тихого океана во время пылевых бурь в Северо-Западном Китае и в Монголии (краткий обзор проблематики пылевых бурь можно найти в монографиях [1, 19]).

Осознание ключевой роли аэрозоля в формировании климата стимулировало дальнейшее развитие исследований дальнего переноса аэрозоля [1–50]. Одно из свидетельств этому – новая программа ITCT-Lagrangian-2k4 изучения межконтинентального переноса и химической трансформации аэрозоля.

Partish и Law [35] кратко охарактеризовали содержание программы ITCT, главной целью которой являются исследования дальнего (межконтинентального) переноса и химической трансформации аэрозоля и оксидантов, а также их предшественников. Для этого было бы целесообразно воспользоваться аппаратурой, установленной на «лагранжевой» платформе, перемещающейся вместе с исследуемой воздушной массой. Однако практически осуществимы лишь «псевдолагранжевые» наблюдения с использованием одной или более самолетов-лабораторий, совершающих многократное зондирование определенной воздушной массы. Именно это составляет основную задачу программы ITCT, первый этап осуществления которой летом 2004 г. составили самолетные наблюдения в регионе Северной Атлантики, сконцентрированные на изучении выбросов предшественников аэрозоля

и тропосферного озона в Северной Америке, включающем анализ их дальнего переноса и химической трансформации над акваторией Северной Атлантики, а также последующего воздействия на атмосферу Западной Европы.

К числу ключевых конкретных задач программы ITCT принадлежат: 1) определение потенциалов фотохимических оксидантов и образования аэрозоля в загрязненных воздушных массах, формирующихся в Северной Америке и поступающих через Атлантический океан в регион Западной Европы; 2) анализ динамики атмосферы, ответственной за дальний перенос загрязнений из планетарного пограничного слоя в Северной Америке; 3) количественная характеристика переноса северо-американских загрязнений к фоновой атмосфере, их последующей эволюции и воздействия на климат. Предполагается, что в осуществлении программы ITCT примут участие более 10 самолетов-лабораторий из различных стран.

С целью изучения закономерностей межконтинентального переноса загрязнений атмосферы Stohl и др. [43a] выполнили численное моделирование на срок 1 год (рассмотрены условия 2000 г.) для шести пассивных трассеров, выбросы которых происходили на различных континентах (для характеристики уровней выбросов приняты данные инвентаризации выбросов окиси углерода CO). Расчеты показали, что наиболее быстрым распространением по вертикали характеризуются выбросы с Азиатского континента, тогда как для европейских выбросов типична тенденция оставаться в пределах нижних слоев тропосферы. Европейские выбросы переносятся главным образом в Арктику, где они вносят основной вклад в формирование арктической дымки. Трассеры поступают с континента, где происходят выбросы, на другой континент в верхней тропосфере, как правило, спустя примерно 4 сут. После этого могут поступать и трассеры, переносимые в нижней тропосфере.

Если принять характерное время жизни трассеров равным 2 сут, то оказывается, что местные

трассеры являются доминирующим компонентом в толще атмосферы над всеми континентами, за исключением Австралии, где доля «иностранных» трассеров составляет около 20% по отношению ко всей массе трассеров. Если предположить, что время жизни трассеров равно 20 сут, то даже на континентах с высоким уровнем «домашних» выбросов доля трассеров с других континентов превосходит 50%. В связи с тем что особого внимания требуют три региона, куда происходит перенос трассеров и где «растворение» трассеров оказывается медленным, дальнейшие исследования следует сконцентрировать на трех направлениях разработок: 1) аккумуляция зимой над Индонезией и Индийским океаном трассеров, поступающих из Азии; 2) концентрация азиатских трассеров на Среднем Востоке летом, которая является максимальной; 3) распределение над Средиземным морем трассеров, поступающих летом из Северной Америки.

Предвычисление пространственного распределения пылевого (минерального) аэрозоля является трудной задачей ввиду эпизодической природы источников ПА и его дальнего переноса. На основе использования данных временного ряда наблюдений за 22 года в различных пунктах, но главным образом по данным спутникового дистанционного зондирования, Luo и др. [24] выполнили сравнения наблюдаемой пространственно-временной изменчивости распределения аэрозоля с результатами численного моделирования с комбинированным применением модели MATCH переноса аэрозоля в атмосфере с учетом химических реакций, определяющих трансформацию его свойств, а также модели DEAD, воспроизводящей процессы формирования и трансформации ПА.

Результаты сравнений выявили, в основном, хорошее согласие при наличии, однако, некоторых расхождений. С целью анализа причин расхождений было предпринято рассмотрение зависимости результатов численного моделирования от изменчивости различных входных метеорологических параметров, а также от выбора схемы параметризации процесса «мобилизации» частиц (попадания их в атмосферу в результате процесса сальтации). Обсуждаемый анализ чувствительности привел к выводу, что близости от Австралии расхождения вычисленного пространственного распределения аэрозольной оптической толщины (АОТ) с наблюдаемым обусловлены неадекватностью данных о поле ветра вблизи подстилающей поверхности и об источниках аэрозоля. В регионе Восточной Азии подобные расхождения определяются главным образом не вполне достоверным учетом метеорологических условий.

Согласно полученным оценкам, суммарные выбросы ПА в атмосферу в результате пылевых бурь составляют 1654 Тг/год. Наиболее мощными источниками выбросов ПА являются африканские пустыни, вклад которых в общее содержание ПА в атмосфере равен 73%. Восточная Азия вносит доминирующий вклад в формирование поля содержания над Тихим океаном в северном полушарии,

тогда как для южного полушария главным источником ПА служит Австралия. Характерное время жизни ПА в атмосфере составляет около 6 сут.

Важные результаты, характеризующие влияние аэрозоля на атмосферу в процессе дальнего переноса, получили Meloni и др. [306]. В мае–июне 1999 г. на о-ве Lampedusa (Средиземное море: 35,5° с.ш.; 12,6° в.д.) выполнена вторая фаза наблюдений в рамках полевого эксперимента PAUR II с целью изучения фотохимических процессов в атмосфере и ультрафиолетовой солнечной радиации (УФР). Наземный комплекс аппаратуры включал спектрофотометр Бруэра, аэрозольный лидар на длине волны 532 нм и многоканальный солнечный радиометр с теньевым экраном (MFRSR) для измерений потоков суммарной и рассеянной радиации, а также аэрозольной оптической толщины на длинах волн 415, 500, 615, 671, 868 и 937 нм. Одновременно производились самолетные (на высотах до 4,5 км) измерения актиничного потока коротковолновой радиации (АПР) в полосах фотодиссоциации NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>, что позволило оценить уровень образования O(‘D).

Meloni и др. [306] обсудили результаты наблюдений, полученные в течение трех дней: 18 мая, когда имело место вторжение шлейфа сахарского пылевого аэрозоля на высотах до 7 км и значения АОТ достигали 0,51 на длине волны 415 нм, а также 25 и 27 мая, когда содержание аэрозоля континентального и морского происхождения в атмосфере (на высотах до 3 км) было умеренным (АОТ на длине волны 415 нм составляла около 0,2). Сравнение данных измерений АПР с результатами расчетов позволило проанализировать зависимость АПР от вертикальных профилей концентрации аэрозоля и озона (во всех рассмотренных случаях имело место хорошее согласие данных наблюдений и результатов численного моделирования).

Расчеты, относящиеся к фиксированным значениям зенитного угла Солнца (ЗУС), обнаружили, что в условиях вторжения сахарского пылевого аэрозоля произошел спад АПР в нижней и средней тропосфере, достигавший 24% (по сравнению с условиями умеренного содержания аэрозоля в атмосфере). Подобный спад усиливался при увеличении ЗУС, достигая максимума при наиболее высоком содержании аэрозоля. Значения потока АПР на уровне подстилающей поверхности практически не зависели от специфики вертикального профиля концентрации аэрозоля (важно лишь общее содержание аэрозоля в атмосфере). Если использовать для вычислений потока АПР среднеклиматический (вместо наблюдаемого) профиль концентрации аэрозоля, то это порождает изменения АПР, не выходящие за пределы ±3% в условиях от малого до умеренного общего содержания аэрозоля.

Однако при вторжении сахарского пылевого аэрозоля рассчитанные значения АПР оказывались, как правило, завышенными до 19%. Анализ вычисленной (при задании различных данных о профиле аэрозоля) изменчивости АПР в спектральном диапазоне, ответственном за процесс фотодиссоциации

озона ( $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$ ), привел к выводу, что специфика вертикального профиля концентрации озона существенно влияет на поток АПР в спектральном диапазоне фотодиссоциации, особенно при малых значениях ЗУС и вблизи подстилающей поверхности. Происходящее под воздействием аэрозоля усиление рассеянной радиации приводит к тому, что значения АПР, вычисленные при задании среднеклиматического профиля аэрозоля, оказываются завышенными на 7,7% по сравнению с соответствующими реальным условиям при значении ЗУС около  $37^\circ$ . Подобное различие уменьшается с высотой и по мере роста ЗУС.

## 1. Африканский аэрозоль

Reid и др. [38] проанализировали результаты наблюдений свойств сахарского пылевого аэрозоля по данным самолетных и наземных исследований элементного состава суммарного ПА и его отдельных частиц. Для взятия проб аэрозоля использованы поликарбонатные фильтры, а химический анализ выполнен с применением электронно-микроскопической и рентгеновской (EDAX) аппаратуры. Химический состав отдельных частиц ПА осуществлен с учетом их размеров и морфологии. На главном наземном пункте наблюдений, расположенном на о-ве Cabras ( $18,21^\circ$  с.ш.;  $65,60^\circ$  з.д.), для получения проб применен каскадный импактор (DRUM), обеспечивающий измерения для 8 интервалов размеров в диапазоне диаметров 0,1–12 мкм (0,09; 0,24; 0,34; 0,56; 0,74; 1,1; 2,5 и 5 мкм) при разрешении по времени, равном 4 ч. Для анализа элементного состава проб ПА в целом (от Al до Zn) применена рентгеновская флуоресцентная методика (XRF).

Подобный анализ дал результаты, хорошо согласующиеся с данными DRUM и анализа самолетных проб ПА. Кластерный анализ данных для отдельных частиц выявил наличие 63 статистически существенных кластеров. Несколько кластеров уверенно идентифицированы как принадлежащие к различным материнским минералогическим компонентам состава почв. Поскольку, однако, кластеры представляют собой, как правило, агрегаты, большая их часть характеризуется сложным минералогическим составом. При наличии на самолетных фильтрах 65,5 тыс. отдельных частиц ПА для значительного числа частиц возможно было получение статистически существенных результатов. Оценки модального диаметра частиц дали значения порядка 5 мкм при среднем «аспектном» отношении, равном 1,9 (сильно проявлялась, таким образом, несферичность формы частиц).

Данные по морфологии частиц ПА отображают изменения источников поступления ПА в атмосферу и содержания неалюмосиликатных компонентов, но информация об отношении содержания алюминия и силикатов подобных изменений не обнаруживала, что побуждает предположить функционирование процесса гомогенизации аэрозоля в ходе его дальнего переноса. Данные DRUM выявили в течение всего периода непрерывных наблюдений

(3–24 июля 2000 г.) четыре эпизода значительного повышения уровня запыленности атмосферы (5, 10, 15–16 и 21 июля), которое коррелирует с результатами наблюдений аэрозольной оптической толщины. «Вспышки» приземной концентрации пыли, не отображаемые изменениями АОТ, были замечены также 13 и 24 июля. Минеральный состав ПА характеризовался доминированием иллита.

Reid и Maring [36] охарактеризовали главные задачи и наиболее существенные результаты, полученные в ходе осуществления полевого наблюдательного эксперимента PRIDE в регионе Пуэрто-Рико в период интенсивных наблюдений 28 июня – 24 июля 2001 г. с целью комплексных исследований дальнего переноса атмосферного пылевого аэрозоля. Основным наземным пунктом наблюдений располагался на о-ве Cabras ( $18,21^\circ$  с.ш.;  $65,60^\circ$  з.д.), расположенном на расстоянии нескольких сотен метров от главного о-ва Пуэрто-Рико. Здесь находилась передвижная аэрозольная лаборатория университета штата Майями и комплекс аппаратуры Годдардовского центра космических полетов. Одновременно функционировали два самолета-лаборатории (Piper Navajo и Cessna-172, частично использовались также данные C-130), НИС «Charman» и два пункта наблюдений сети AERONET. Важное значение имело также использование данных спутникового дистанционного зондирования аэрозоля при помощи аппаратуры MODIS, MISR, CERES, GOES и AVHRR.

Главные задачи PRIDE состояли в получении комплексной информации о микрофизических и оптических характеристиках, а также о химическом составе ПА, поступающего в атмосферу в Северной Африке и затем претерпевающего дальний перенос через Атлантический океан. Конкретные вопросы, на которые должен был дать ответ анализ данных PRIDE, сводились к следующему: 1) насколько адекватны существующие численные модели дальнего переноса ПА; 2) в какой степени надежна имеющаяся информация об источниках ПА; 3) насколько достоверны данные измерений свойств ПА; 4) что нового (с точки зрения понимания свойств ПА) дает анализ данных комплексных наблюдений; 5) каково соотношение между данными наблюдений *in situ* и результатами дистанционного зондирования; 6) какую роль играет учет несферичности формы частиц ПА; 7) какое значение имеют полученные результаты для решения различных прикладных задач.

Как показали Reid и др. [37], в период полевого наблюдательного эксперимента PRIDE, осуществленного в регионе Пуэрто-Рико, наблюдалось шесть событий поступления сахарского пылевого аэрозоля, претерпевшего дальний перенос через Атлантический океан: 28–29 июня, 4–6 июля, 9–10 июля, 15–16 июля, 21 июля и 23 июля 2000 г. В эти периоды значения АОТ в средней части видимой области спектра варьировали от соответствующих условиям чистой морской атмосферы (0,07) до сильно запыленной атмосферы ( $AOT > 0,5$ ). Среднее значение АОТ составило 0,24. В это время у побережья

Африки значения АОТ достигали, в среднем, примерно 0,45 при максимальном уровне до 0,8. Полученные в регионе Пуэрто-Рико величины АОТ оказались несколько ниже наблюдавшихся в течение трех предыдущих лет, что было обусловлено, возможно, влиянием более сильного, чем обычно, вымывания ПА из атмосферы осадками. Вертикальное распределение концентрации ПА характеризовалось наличием сильной изменчивости со временем.

Наряду с формированием хорошо известного сахарского аэрозольного слоя (SAL), имели место и условия существенно более слабо выраженного дальнего переноса ПА. Пылевой аэрозоль часто достигал высоты около 5 км, а присутствие пыли в морском пограничном слое атмосферы (МПСА) не коррелировало с каким-либо «типичным» профилем вертикального распределения концентрации ПА. Отсутствовала, в частности, корреляция с интенсивностью пассатных инверсий, наблюдавшихся в рассматриваемом регионе. Поскольку формирование пассатных инверсий определяется главным образом влиянием местных условий, это может объяснить отсутствие связи между SAL и инверсиями. Переход от режима переноса ПА в МПСА к режиму, характерному для нижней тропосферы, происходил постепенно, но при наличии спорадических флуктуаций. Типичным для отдельных случаев было, однако, существование отчетливых пылевых слоев над пассатной инверсией. Подобные пылевые слои могли быть заметными на расстояниях до сотен километров как в направлении преобладающего переноса, так и в перпендикулярном ему направлении.

Как правило, каких-либо значительных изменений размера частиц с высотой (вертикальных градиентов) не наблюдалось, за исключением самой верхней части запыленной тропосферы толщиной порядка 300 м. Этот вывод справедлив и для таких условий, когда имело место сильное расслоение аэрозоля. Исключение составили, однако, данные за 4–6 июля 2000 г., когда имел место сильный вертикальный градиент размеров частиц ПА в диапазоне высот от слоя пассатной инверсии до максимальной высоты распространения аэрозоля (около 5 км).

Выполненный Reid и др. [37] анализ факторов формирования вертикального профиля концентрации ПА привел к выводу, что влияние гравитационного осаждения частиц в процессе дальнего переноса, как правило, не было существенным. Это позволяет предположить, что дальний перенос через Атлантический океан не порождал значительных изменений вертикального профиля концентрации ПА, который сформировался над Африканским континентом. Однако следствием комбинированного воздействия процессов крупномасштабного осаждения и обусловленного влажной конвекцией вертикального перемешивания (в сочетании с дифференциальной адвекцией на различных уровнях) являются наблюдавшиеся иногда хаотические изменения вертикального профиля ПА.

Многочисленные исследования посвящены анализу чувствительности оптических свойств аэро-

золя к изменчивости микроструктуры, химического состава и формы частиц аэрозоля. Что касается последнего фактора, то он мало существен для таких частиц, как гидратированные солевые или возникающие при сжигании биомассы, но имеет очень важное значение для частиц пылевого аэрозоля, когда учет формы частиц сильно сказывается на их оптических свойствах и, соответственно, на оценках климатического воздействия аэрозоля. В этом контексте Reid и др. [38] выполнили сравнение данных о микроструктуре ПА, полученных с использованием различных методик измерений в ходе осуществленного в Пуэрто-Рико полевого наблюдательного эксперимента PRIDE с целью исследований микроструктуры поступающего из Африки сахарского ПА в период с 28 июня по 24 июля 2000 г.

Рассматриваемое сравнение выявило наличие очень существенных расхождений, особенно на основе использования оптических счетчиков частиц и аэродинамических методик. Анализ результатов, полученных с применением различных методик, показал, что в случае использования электронной микроскопии возникают значительные систематические погрешности при определении счетной концентрации более крупных частиц (4–10 мкм), что порождает сильную неопределенность параметров микроструктуры. Недостатком каскадных импакторов типа MOUDI и DRUM являются потери частиц на входном отверстии, достигающие 40%. В случае импактора DRUM иногда возникает также разрушение крупных частиц при их поступлении в импактор.

Надежные измерения размеров частиц обеспечивает аэродинамический датчик размеров APS-3300, дефектом которого оказывается, однако, неспособность различать частицы пылевого и морского солевого аэрозоля. Особенностью самолетного оптического счетчика частиц FSSP-10 является завышение размеров частиц ПА более чем в два раза (подобная особенность характерна и для других счетчиков частиц крупнодисперсного аэрозоля).

Параметры микроструктуры, восстановленные по данным AERONET о яркости неба и общем ослаблении прямой солнечной радиации при задании сфероидальной формы частиц, в целом, достаточно достоверны, но всегда требуют критического анализа с точки зрения возможного влияния невидимых перистых облаков и недостаточной достоверности регуляризации при решении обратной задачи. Ни одна из рассмотренных методик не обеспечивает получения адекватных значений (по сравнению с наблюдаемыми) массовых коэффициентов экстинкции и эффективности рассеяния пылевым аэрозолем при задании сферической геометрии частиц. Именно поэтому аэрозольное рассеяние оказывается заниженным примерно на 30%. Высказаны соображения о возможных путях совершенствования методики определения микроструктуры аэрозоля.

Livingston и др. [23] обсудили результаты самолетных наблюдений (21-го полета) АОТ атмосферы и общего содержания водяного пара (ОСВП) в атмосфере при помощи шестиканального (380,1; 450,9; 525,7; 864,5; 941,9 и 1021,3 нм) сол-

нечного фотометра (AATS-6), снабженного системой автоматизированного наведения на Солнце. Наблюдения выполнены в период с 28 июня – 24 июля 2000 г. во время наблюдательного эксперимента по PRIDE по изучению свойств пылевого аэрозоля, поступавшего в атмосферу в Северной Африке и претерпевавшего дальний перенос через Атлантический океан. Как правило, имело место хорошее согласие между результатами восстановления суммарной счетной концентрации аэрозоля по данным измерений вертикального профиля экстинкции на высотах до 5 км при помощи AATS-6 с синхронными самолетными данными наблюдений *in situ* суммарной счетной концентрации аэрозоля, а также с данными наземного лидарного зондирования.

Спектральное распределение АОТ для различных слоев атмосферы соответствует результатам вычислений с учетом ослабления прямой солнечной радиации за счет больших частиц ПА (или ПА с добавлением морского солевого аэрозоля) при значениях экспоненты Ангстрема, составляющих около 0,20. Расхождение результатов восстановления ОСВП (по данным для длины волны 941,9 нм) и данных прямых измерений не превосходило 4% (0,13 г/см<sup>2</sup>). Данные наземных наблюдений АОТ (AERONET) при помощи AATS-6 на о-ве Cabras и с низколетящего самолета согласуются в пределах расхождений, не превосходящих 0,004–0,030. Однако значения ОСВП, восстановленные по данным AERONET, оказались систематически превосходящими полученные по самолетной информации примерно на 21%. Сравнение значений АОТ, полученных по данным AATS-6 (низколетящий над океаном самолет), с результатами восстановления АОТ над океаном по спутниковым данным об уходящей коротковолновой радиации (аппаратура MODIS, TOMS и сканер, установленный на GOES-8) привело к противоречивым выводам, что определяет актуальность дальнейших сравнений.

На турецком побережье Средиземного моря (Erdemli: 36°33' с.ш., 34°15' в.д.) в рамках программы AERONET глобальной сети наблюдений при помощи солнечных фотометров с целью восстановления АОТ атмосферы Kubilay и др. [20] выполнили наблюдения в период с января 2000 г. по июнь 2001 г. Главной целью наблюдений были исследования оптических свойств пылевого (минерального) аэрозоля, выбрасываемого в атмосферу во время пылевых бурь в Сахаре (в центральном регионе пустыни весной и в восточной части летом) и на Аравийском п-ове (осенью) и претерпевающего затем дальний перенос в северо-восточный сектор Средиземноморья.

Перенос ПА летом и осенью происходил в тропосфере выше уровня 700 гПа. С другой стороны, в район наблюдений поступал на более низких уровнях (< 850 гПа) промышленный и городской аэрозоль с севера (Балканы, Украина) и из Турции. Помимо высокого уровня АОТ, достигавшего иногда 1,8, эпизоды пылевых загрязнений атмосферы характеризовались следующими особенностями: 1) резким спадом (почти до нулевого уров-

ня) коэффициента Ангстрема; 2) наличием сильного рассеяния при значениях альbedo однократного рассеяния более  $0,95 \pm 0,03$  и при показателе преломления  $1,51 \pm 0,07$  на длине волны 440 нм (в обоих случаях имело место небольшое возрастание этих параметров с увеличением длины волны); 3) значениями мнимой части комплексного показателя преломления  $0,0012 \pm 0,0007$  на длине волны 440 нм и  $0,0075$  на длине волны 870 нм; 4) почти нейтральной зависимостью упомянутых оптических параметров от длины волны.

Микроструктура ПА оказалась бимодальной при характерных средних значениях радиуса частиц грубо- и мелкодисперсного аэрозоля, равных 2,2 и 0,08 мкм соответственно. Объемная концентрация частиц составила около 1,0 и 0,1 мкм/мкм. Пылевой аэрозоль, поступивший из Сахары и с Аравийского п-ва, характеризовался различными значениями индекса поглощения, равными 0,0015 и 0,0005 соответственно, что, по-видимому, обусловлено различиями минерального состава частиц ПА.

На основе использования данных геостационарного спутника GOES-8 за 30 сут (повторность этих данных составляет 30 мин) Wang и др. [48] восстановили поля аэрозольной оптической толщины атмосферы в регионе осуществления полевого эксперимента PRIDE (14° с.ш. – 26° с.ш.; 73° з.д. – 63° з.д.), цель которого состояла в исследованиях сахарского пылевого аэрозоля и его дальнего переноса через Атлантический океан. Восстановление значений АОТ по данным спутниковых наблюдений уходящей коротковолновой радиации (УКР) в видимой области спектра осуществлено путем сравнения измеренных величин УКР с результатами вычислений, сделанных по методу дискретных ординат при задании микроструктуры аэрозоля и комплексного показателя преломления, равного  $1,53 - 0,0015i$  на длине волны 550 нм.

Сравнение восстановленных значений АОТ с данными наземных наблюдений при помощи солнечного фотометра выявило наличие хорошего согласия при значениях коэффициента корреляции (для двух пунктов наблюдений), равных 0,91 и 0,80. Среднемесячные восстановленные значения АОТ на длине волны 670 нм составили (для двух упомянутых пунктов)  $0,19 \pm 0,13$  и  $0,22 \pm 0,12$ , тогда как по данным наземных солнечных фотометров они равны  $0,23 \pm 0,13$  и  $0,22 \pm 0,10$  соответственно.

Оценки погрешностей, обусловленных неучетом несферичности формы частиц, привели к выводу, что действительными источниками погрешностей АОТ ( $\Delta\tau$ ) являются недостоверность комплексного показателя преломления ( $\Delta\tau = \pm 0,05$ ) и неадекватность задания альbedo подстилающей поверхности ( $\Delta\tau = \pm(0,2-0,4)$ ). Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточной надежности восстановленных по спутниковым данным значений АОТ над океаном (даже при низких значениях АОТ) для слежения за пространственно-временной изменчивостью полей АОТ и, следовательно, содержания ПА в атмосфере.

Ginoux [16] исследовал влияние несферичности частиц на гравитационное осаждение частиц минеральной пыли, параметризованное для случая вытянутых эллипсоидов и чисел Рейнольдса меньше 2. Полученная зависимость (обусловленное несферичностью уменьшение скорости осаждения) использована в модели GOCART влияния аэрозоля на химические процессы формирования глобального поля концентрации озона с целью воспроизведения микроструктуры аэрозоля в апреле 2001 г.

Применение двух схем параметризации показало, что для частиц диаметром больше 5 мкм рассчитанная микроструктура аэрозоля чувствительна к выбору схемы параметризации. Если отношение длины полуосей эллипсоида  $\lambda = 2$  (расчеты сделаны при задании  $1 < \lambda < 10$ ), то замена сферической формы частиц эллипсоидальной не порождает существенных изменений вычисленных значений концентрации и параметров микроструктуры частиц, за исключением области периферии источников пыли. Однако для частиц очень вытянутой формы ( $\lambda > 5$ ) подобные различия значительны. Поскольку, однако, согласно данным прямых (*in situ*) измерений, чаще всего  $\lambda = 1,5$ , влияние формы частиц на результаты численного моделирования в глобальных масштабах оказывается пренебрежимо малым.

В период 11–16 октября 2001 г. по данным сети 10 станций EARLINET лидарных аэрозольных зондирований в Европе наблюдалось значительное повышение запыленности атмосферы в юго-западном, западном и центральном регионах Западной Европы, обусловленное дальним переносом пылевого (минерального) аэрозоля, возникшего в результате пылевой бури в Сахаре. Впервые в таких масштабах было зарегистрировано поступление оптически плотного шлейфа ПА при обеспечении высокого разрешения данных о содержании ПА по высоте.

Как показали Ansmann и др. [6], главный слой ПА располагался над пограничным слоем атмосферы (выше 1 км) на высотах до 3–5 км, но частицы ПА достигали иногда и уровней 7–8 км. Типичные значения аэрозольной оптической толщины на длине волны 532 нм для слоя атмосферы выше 1 км варьировали в пределах 0,1–0,5, достигнув максимальных значений около 0,8 над Северной Германией. Сравнение лидарных данных по АОТ с результатами восстановления АОТ по данным спутниковой аппаратуры TOMS выявило качественное согласие. Анализ результатов вычислений «обратных» траекторий воздушных масс на срок 10 сут отчетливо продемонстрировал, что источником ПА была Сахара при поступлении аэрозоля в Европу через 1–2 сут после его выбросов. Полученные по данным лидарных зондирований значения отношения деполяризации, экспоненты Ангстрема и отношения экстинкции к обратному рассеянию составили соответственно 15–25%; от –0,5 до 0,5 и 40–80 ср. Результаты численного моделирования распределения ПА в атмосфере над Европой, в целом, хорошо согласуются с рассмотренными данными наблюдений.

Colarco и др. [12] предприняли численное моделирование выбросов, дальнего переноса сахарско-

го пылевого аэрозоля через Атлантический океан и осаждения ПА в период осуществления полевого эксперимента PRIDE (июнь–июль 2000 г.) с целью исследований ПА в регионе Пуэрто-Рико. Расчеты сделаны на основе использования трехмерной модели дальнего переноса аэрозоля при задании параметров, характеризующих метеорологические условия. Анализ результатов численного моделирования показал, что время достижения высокого уровня значений АОТ, наблюдаемого в Пуэрто-Рико, практически не зависит от времени выбросов ПА в регионе Сахары. Это означает, что в атмосфере Северной Африки всегда существует мощный резервуар взвешенных в атмосфере пылевых частиц, а интенсивность дальнего переноса ПА зависит главным образом от специфики атмосферной циркуляции.

Задание модели выбросов ПА (включая параметры микроструктуры), предложенной Ginoux [16], привело к оценке выбросов частиц ПА размером меньше 0,01 мкм в Африке и Аравии в июле 2000 г., составляющей 214 Тг. При этом 19% массы аэрозоля претерпевает перенос на запад от Африки (над Северной Атлантикой), а доля частиц, достигающих Пуэрто-Рико, равна 20%. Рассчитанные значения АОТ чувствительно зависят от задания первоначальной микроструктуры аэрозоля и от адекватности параметризации процесса влажного осаждения.

До недавнего времени казалось, что факторы, которые определяют происходящий в тропиках Северной Атлантики дальний перенос сахарского пылевого аэрозоля к Карибскому региону, изучены достаточно хорошо. Холодный и влажный воздух, поступающий с северо-востока к Северной Африке через Средиземное море, претерпевает над Африканским континентом сильное прогревание за счет турбулентного теплообмена с подстилающей поверхностью. За этим следует адвекция прогретого запыленного и хорошо перемешанного воздуха на запад на высотах до 6 км. В самом начале процесса адвекции происходит быстрый подъем нижней границы запыленного слоя, обусловленный воздействием северо-восточных пассатов с их относительно чистым и влажным воздухом. Сформировавшийся таким образом в нижней тропосфере слой теплого, сухого и запыленного воздуха был назван сахарским аэрозольным слоем. Его нижняя граница располагается на уровне около 850 гПа (1,5 км), а верхняя – вблизи 500 гПа (6 км). По мере продвижения SAL на запад происходят постепенный подъем его нижней границы до примерно 750 гПа (3 км) и снижение верхней границы до 550 гПа (5 км). Таким образом, в Карибском регионе SAL представляет собой слой толщиной около 2 км.

Выполненные Colarco и др. [13] исследования природы формирования SAL привели к выводу, что эта природа более сложна, чем предполагалось первоначально. Оказалось, в частности, что перенос ПА зимой происходит на меньших высотах, чем это следует из классической модели SAL. Сахарский аэрозоль у побережья Южной Америки был обнаружен даже в пограничном слое атмосферы. Дан-

ные спутниковых самолетных и наземных наблюдений, выполненных в период с 28 июня по 24 июля 2000 г. в регионе Пуэрто-Рико и включающих пять эпизодов аномально сильного запыления атмосферы, позволяют пролить дальнейший свет на природу SAL. Анализ этих данных показал, что «классический» SAL наблюдался лишь в течение последних 5 сут наблюдений. До этого вертикальное распределение аэрозоля было более сложным и изменчивым.

Сравнение результатов численного моделирования с наблюдениями показало, что расчеты достаточно адекватно воспроизводят формирование шлейфа ПА и перенос ПА, хотя, согласно расчетам, ПА переносится в западном секторе Северной Атлантики дальше на юг, чем это следует из анализа спутниковых изображений. Численная модель вполне достоверно воспроизводит наблюдавшиеся в период полевого эксперимента PRIDE пространственные распределения равномерно перемешанного и слоистого аэрозоля.

Расчеты привели к выводу, что происходившая в процессе дальнего переноса эволюция вертикального профиля концентрации ПА была обусловлена главным образом влиянием седиментации частиц и нисходящих атмосферных движений. Ключевую роль играет при этом процесс влажного осаждения. Если предположить, что содержание железа в составе ПА составляет 3,5%, то суммарное осаждение железа на поверхность океана в июле 2000 г. должно было достигать 0,71–0,88 Тг, что согласуется с данными наземных наблюдений массовой концентрации ПА. При задании годового осаждения, которое в 5 раз превышает наблюдавшееся в июле 2000 г., численное моделирование привело к оценке толщины слоя осадений на п-ве Флорида за 1 млн лет, равной 1 м.

Наблюдения сахарского аэрозоля, достигающего о-ва Барбадос в результате дальнего переноса через Атлантический океан, осуществляются уже в течение более 30 лет и представляют собой уникальную серию такого рода долговременных наблюдений. Выполненная ранее обработка данных наблюдений показала, что за период 1960–1980 гг. имели место изменения приземной концентрации атмосферного аэрозоля, достигавшие четырех раз.

Mahowald и др. [25] предприняли проверку обоснованности гипотезы, согласно которой главными источниками пылевого аэрозоля являются не распределенные источники (подобные культивируемым участкам поверхности или новым регионам пустыни), как это предполагалось ранее, а высокие топографические низины. Из полученных оценок следует, что учет вклада распределенных участков имеет важное значение, но не позволяет объяснить наблюдаемую динамику пылевого аэрозоля полностью. Дефицит данных наблюдений препятствует, однако, получению надежных количественных оценок.

По данным наземных наблюдений яркости безоблачного неба в вертикале Солнца на 14 длинах волн в видимой области спектра Cattrall и др. [9]

восстановили средние для всей толщины атмосферы значения альbedo однократного рассеяния (AOP) и индикатрисы рассеяния минерального сахарского аэрозоля. Наблюдения были выполнены в июле и августе 1998 г. в форте Джефферсон, на о-ве Драй-Тортугас (24°37,7' с.ш.; 82°52,5' з.д.), расположенном примерно в 100 км к западу от Ки-Вэст (штат Флорида, США), при помощи 512-канального спектрометра. Алгоритм восстановления состоял в итерационной подгонке рассчитанных значений яркости к наблюдаемым, что исключало необходимость учета формы частиц аэрозоля. Погрешность восстановления AOP составила 0,02. Восстановленные значения AOP отображают спектральные особенности, характерные для минералов, содержащих железо, и оказались значительно больше, чем принятые в моделях климата. Это свидетельствует о том, что реальный сахарский пылевой аэрозоль порождает более интенсивное похолодание климата, чем это обычно предполагается.

Сахарские пылевые бури — не единственный мощный источник поступления в атмосферу аэрозоля с Африканского континента, претерпевающего затем дальний перенос. Другой существенный источник — сжигание биомассы.

Пожары в саваннах Африки обуславливают около двух третей глобального сжигания биомассы в саваннах. Результатом подобных пожаров являются выбросы в атмосферу разнообразных малых газовых компонентов (включая CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, углеводородные соединения, галогенуглеродные соединения, окисленные органические соединения и аэрозоль). В Южной Африке пожары в саваннах возникают главным образом в период сухого сезона (апрель — октябрь), когда метеорологические условия характеризуются формированием устойчивых воздушных масс, юго-восточных пассатных ветров и субтропического пояса высокого давления. Наличие в атмосфере слоев устойчивости вблизи уровней 700 и 500 гПа ограничивает вертикальное перемещение дымового аэрозоля и малых газовых компонентов (МГК). Возникшие в атмосфере над Южной Африкой загрязнения претерпевают дальний перенос, порождая повышение содержания тропосферного озона над южным регионом Атлантического океана, а также поступают и в регион Индийского океана.

В августе — сентябре 2000 г. в рамках программы Южно-Африканского регионального полевого эксперимента (SAFARI-2000) были выполнены самолетные (CONVAIR-580) наблюдения, одной из целей которых были исследования последствий сжигания биомассы в Южной Африке с точки зрения связанных с этим загрязнений атмосферы, особенно — образования слоев аэрозольной дымки. Описанная Sinha и др. [42] программа наблюдений включала определение вертикальных профилей (в нижней тропосфере) температуры и относительной влажности воздуха, концентрации сернистого газа (SO<sub>2</sub>), озона (O<sub>3</sub>), ядер конденсации (CN) и окиси углерода (CO), а также горизонтального распределения двадцати МГК и аэрозоля в пяти

регионах Южной Африки в период сжигания биомассы. Рассматриваемые регионы представляют собой полуаридные территории саванн северо-восточной части Южной Африки и северной Ботсваны, мозаику саванн и лесов прибрежного Мозамбика, влажные саванны Южной Замбии и пустыни Западной Намибии.

Максимальные средние значения концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ , частиц «черного» углерода и общего углерода зарегистрированы в Ботсване и Замбии (соответственно 388 и 392 млн<sup>-1</sup>; 369 и 463 млрд<sup>-1</sup>; 1753 и 1758 млрд<sup>-1</sup>; 79 и 88 млрд<sup>-1</sup>; 2,6 и 5,5 мкг/м<sup>3</sup>; 13,2 и 14,3 мкг/м<sup>3</sup>). Это объясняется влиянием интенсивного сжигания биомассы в Замбии и окружающих ее районах. В секторе Южной Африки максимумы средней концентрации  $\text{SO}_2$ , сульфатного аэрозоля и CN (составившие, соответственно, 5,1 млрд<sup>-1</sup>; 8,3 мкг/м<sup>3</sup> и 6400 см<sup>-3</sup>) определялись вкладами как сжигания биомассы, так и электростанций и горных разработок.

Над аридной Намибией наблюдались слои загрязнений в тропосфере при средних значениях отношений смеси  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  и  $\text{CO}$  (1,2; 76 и 310 млрд<sup>-1</sup> соответственно), которые были близкими к зарегистрированным в других, более загрязненных регионах, что определялось вкладом переноса загрязнений (за счет сжигания биомассы) из районов сжигания биомассы в южной части Анголы.

Средние значения концентрации МГК и аэрозоля над всем рассматриваемым регионом составили: (386 ± 8) млн<sup>-1</sup> ( $\text{CO}_2$ ); (261 ± 81) млрд<sup>-1</sup> ( $\text{CO}$ ); (2,5 ± 1,6) млрд<sup>-1</sup> ( $\text{SO}_2$ ); (64 ± 13) млрд<sup>-1</sup> ( $\text{O}_3$ ); (2,3 ± 1,9) мкг/м<sup>3</sup> (аэрозольный «черный» углерод); (6,2 ± 5,2) мкг/м<sup>3</sup> (аэрозольный органический углерод); (26,0 ± 4,7) мкг/м<sup>3</sup> (суммарная концентрация аэрозоля); (0,4 ± 0,1) мкг/м<sup>3</sup> (калиевые частицы). Эти значения сравнимы с соответствующими для городской загрязненной атмосферы.

Поскольку обсужденные результаты получены, как правило, в пунктах, удаленных от промышленных источников загрязнений, можно считать, что доминирующим фактором высокого уровня концентрации МГК и аэрозоля является сжигание биомассы. Иногда на высоте около 3 км возникали относительно тонкие (~0,5 км) слои очень чистого воздуха, разделяющего слои сильно загрязненной атмосферы. Вблизи побережья формировались слоистые облака на высоте порядка 1 км.

В рамках программы CARIBIC с использованием гражданских самолетов для регулярных исследований атмосферы Parasiporoulos и др. [34] выполнили измерения элементного состава атмосферного аэрозоля на высотах 9–11 км (в слое тропопаузы) в северном полушарии и обсудили результаты, полученные за два года в ходе межконтинентальных рейсов между Германией и Шри-Ланкой/Мальдивскими островами (Индийский океан). Пробы аэрозоля брались при помощи импакторов и анализировались на содержание 18 элементов с использованием рентгеновской методики PIXE. Одновременно производились также измере-

ния счетной концентрации частиц, концентрации озона и окиси углерода, а для анализа данных аэрозольных наблюдений производились вычисления «обратных» траекторий воздушных масс.

Анализ результатов измерений показал, что доминирующим компонентом химического состава аэрозоля была сера, концентрация которой в верхней тропосфере возрастала, в среднем, в два раза при перемещении из тропиков в высокие широты и также в два раза — в самой нижней части стратосферы по сравнению с тропосферой (в средних широтах). Рассмотрение траекторных данных привело к выводу, что значительные вклады в формирование состава аэрозоля вносили вещество горных пород, а также продукты сжигания ископаемых топлив и биомассы, тогда как абляция метеоров имела второстепенное значение. Траекторные данные отображают наличие переноса аэрозоля через тропопаузу из тропосферы в стратосферу вдоль изэнтропических поверхностей. Следствием значительной продолжительности жизни частиц аэрозоля и его газофазного образования в нижней стратосфере за счет окисления сернистого газа является формирование высотного источника аэрозоля, существование которого (с учетом опускания стратосферного воздуха) позволяет объяснить наличие вертикального градиента массовой концентрации аэрозольной серы в окрестности внетропической тропопаузы.

В целом, можно считать, что аэрозольная сера возникает за счет поступления как снизу (с земной поверхности), так и из стратосферы. Концентрации серы, калия и железа обладают различным годовым ходом, который наиболее сильно выражен для калия при очень низкой концентрации в июле — январе и при максимальной концентрации весной. В противоположность этому для более слабого годового хода концентрации серы типичны низкие значения в июле—сентябре в тропиках и субтропиках, тогда как в тропиках минимум концентрации наблюдается в июле—январе. Годовой ход концентрации железа выражен совсем слабо.

## 2. Азиатский аэрозоль

В настоящее время население Азии составляет около 3,4 млрд человек (примерно 60% всего населения на земном шаре), причем на долю Азии приходится около половины из 136 млн детей, родившихся в 2000 г. Следствием столь интенсивного роста населения является значительное усиление загрязнения окружающей среды, включая атмосферу, где осуществляется сравнительно быстрый дальний перенос загрязняющих атмосферу компонентов. Поскольку характерные для весны северного полушария метеорологические условия благоприятствуют дальнему переносу воздуха на восток, это определяет поступление в Азию загрязненного воздуха из Западной Европы и даже из Северной Америки. С другой стороны, происходящая над Азиатским континентом интенсивная конвекция и зависящий от времени года западно-восточный перенос способствуют переносу атмосферных масс



через Тихий океан. Наличие струйного течения, которое особенно интенсивно вблизи Японии (достигая скорости более 70 м/с), определяет время переноса воздушных масс между Азией и Северной Америкой, составляющее иногда всего несколько суток.

Martin и др. [27] обсудили результаты исследований дальнего переноса загрязнений над Тихим океаном в период поздней зимы в северном полушарии (25 февраля — 19 апреля 1999 г.), выполненных под эгидой NASA в рамках полевого наблюдательного эксперимента PEM West-B с целью мониторинга выноса загрязнений с континента Азии на акваторию Тихого океана (эти наблюдения были частью более общей программы GTE Глобального тропосферного эксперимента). Эксперимент PEM West-B осуществлен как дополнение к выполненной ранее в другое время года миссии PEM-West A (14 августа — 6 октября 1996 г.). Данные о содержании в атмосфере таких малых газовых компонентов — как неметановые углеводородные и углеводородные соединения, а также окись углерода были получены при помощи аппаратуры, установленной на принадлежащих NASA самолетах-лабораториях DC-8 и P-3B, совершавших полеты над Тихим океаном. Для расчета «обратных» траекторий воздушных масс вдоль маршрутов полетов использовалась метеорологическая информация, имевшаяся в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды.

Расчеты показали, что зарегистрированные над Тихим океаном МГК, которые пересекали океан в процессе дальнего переноса, поступали с территории Азии и даже из более западных регионов, оседая в области субтропического тихоокеанского антициклона с последующим переносом на юго-запад под воздействием пассатных ветров в нижней тропосфере. Время переноса частиц воздуха, достигавших западного сектора Тихого океана вблизи побережья Новой Гвинеи, составляло 20–25 сут. По-видимому, аналогичные («зеркально отраженные») процессы дальнего переноса проявляются и в южном полушарии, особенно при переносе продуктов сжигания биомассы в Южной Африке и Южной Америке.

Осуществленные за последние два десятилетия полевые наблюдательные эксперименты в удаленных регионах земного шара обнаружили наличие в атмосфере этих регионов присутствие значительного количества антропогенных загрязнений в условиях окружающей среды, которая рассматривалась ранее как свободная от загрязнений. Это относится, в частности, к Арктике и к Антарктике, а также к удаленным регионам Атлантического и Тихого океанов. Анализ данных самолетных наблюдений выявил крупномасштабные шлейфы загрязнений и аэрозольные слои в свободной атмосфере, образовавшиеся за счет промышленных загрязнений и сжигания биомассы с последующим дальним переносом загрязняющих атмосферу компонентов.

Шлейфы аэрозоля континентального происхождения часто характеризуются повышенной концентрацией ядер конденсации различного состава

(сульфаты, нитраты, пыль, углеродный и сажевый аэрозоль) при повышенном вкладе аккумуляционной моды (диаметр частиц 0,1–1,0 мкм) в микроструктуру аэрозоля. Широкие программы PEM-Tropics (PEMT) самолетных наблюдений состава атмосферы над тропиками Тихого океана были выполнены в 1996 г. (PEMT-A) и в 1999 г. (PEMT-B).

Выполненный Moore и др. [31] анализ данных наблюдений обнаружил существование мощных «рек» загрязненных потоков воздуха от континентов в удаленные регионы океана. В этих условиях характеристики аэрозоля существенно отличались от фоновых. В период PEMT-A шлейфы загрязнений наблюдались преимущественно в южном полушарии, тогда как во время PEMT-B имела место противоположная ситуация. Расчеты «обратных» траекторий отчетливо продемонстрировали наличие таких источников загрязнений, как городские и промышленные выбросы и сжигание биомассы, а также (в случае «рек» азиатского происхождения) пылевые бури. Характеристики микроструктуры аэрозоля сильно варьировали от шлейфа к шлейфу. Частицы аэрозоля промышленного происхождения представляли собой внутреннюю смесь сажеподобных компонентов со свойствами летучести.

Исследования зависимости летучести от размеров частиц привели к выводу о присутствии аммония в частицах аэрозоля. Определение альбедо однократного рассеяния  $\omega$  дало значения от 0,68 (продукты сжигания биомассы при отсутствии грубодисперсной фракции) до 0,94 (частицы загрязнений и пыли) в свободной тропосфере и 0,98 (частицы загрязнений и морских солей) в МПСА. Анализ вертикальных профилей аэрозоля выявил наиболее плотные шлейфы в сухом воздухе (при относительной влажности меньше 40%) при меньших значениях  $\omega$ , чем в МПСА.

Тихоокеанская исследовательская миссия PEM-Tropics A планировалась главным образом с целью исследований чистой (фоновой) атмосферы в удаленных районах тропиков Мирового океана, но очень скоро в морской тропосфере были обнаружены обширные слои загрязненной атмосферы, отбравшие существенное загрязнение «фоновой» атмосферы над океаном в южном полушарии, особенно в тропиках Атлантического океана. В частности, в субтропиках южного полушария наблюдался протяженный (> 15 000 км) шлейф меандров СО вокруг земного шара, постепенно распространяющийся вдоль круга широты ~20° ю.ш. Подобный шлейф особенно четко выражен в период сжигания биомассы весной в субтропиках как южного, так и северного полушарий.

На основе использования мезомасштабной модели MM5, которая позволяет воспроизвести (при высоком пространственном разрешении) почти что глобальную динамику атмосферы, Chatfield и др. [10] предприняли численное моделирование для двух ситуаций, включающих данные PEM-Tropics A и B за сентябрь–октябрь 1996 г. и март–апрель 1999 г. соответственно. В случае PEM-Tropics A близкие к источнику части шлейфа отчетливо обнаруживались

по данным спектрометра TOMS для картирования общего содержания озона о распределении поглощающего аэрозоля.

Детальный анализ данных самолетных наблюдений позволил восстановить картину эволюции шлейфа в целом. Формирование шлейфа в южном полушарии определяется аккумуляцией загрязнений вблизи подстилающей поверхности в Африке и Южной Америке. При наличии грозových ситуаций происходит перемещение шлейфа вверх, но интенсивные выбросы загрязнений могут возникать и под воздействием движений синоптического масштаба. Вслед за тем шлейф распространяется на восток под влиянием субтропического струйного течения до того времени, когда под воздействием штормов в Тихом океане происходит его фрагментация. Аналогичная ситуация имеет место и в субтропиках северного полушария в период PEM-Tropics B.

Согласно имеющимся данным наблюдений, неоднократно возникали события дальнего переноса к западному побережью Северной Америки пылевого аэрозоля и малых газовых компонентов из пустынь Китая и Монголии, из промышленных регионов Восточной Азии, а также из Сибири, где происходили мощные лесные пожары. Holzer и др. [17] проанализировали закономерности дальнего переноса ПА и МГК путем оценки функции плотности вероятности (pdf) времени переноса воздушных масс ( $G$ ) с целью выделения («отфильтровывания») переноса на фоне таких других факторов, как вариации мощности источников выбросов и процессы химической трансформации ПА и МГК.

В отличие от обычно применяемой методики расчета «обратных» траекторий дальнего переноса для прогнозирования источников выбросов подход к решению этой задачи в терминах pdf позволяет полнее проанализировать совокупность возможных путей переноса с учетом как пространственно разрешенной адвекции, так и подсеточных процессов. Для получения статистической информации о среднесуточных значениях  $G$  применена модель MATSH процессов дальнего переноса с учетом химической трансформации при априорном задании входной метеорологической информации.

Рассчитанные значения  $G$  позволяют определить климатическую долю массы воздуха, поступающую из региона источника, в расчете на интервал времени переноса (или возраста воздушной массы). Над западным побережьем Северной Америки эта доля достигает максимума при значениях времени переноса порядка 8 сут в верхней тропосфере и на 6 сут позднее — вблизи подстилающей поверхности. Такие оценки получились при рассмотрении переноса ПА и загрязнений, а в случае дальнего переноса продуктов лесных пожаров в Сибири соответствующие значения составили 12–14 сут.

Анализ изменчивости  $G$  при фиксированном времени переноса позволил идентифицировать источники ПА и МГК и оценить вероятность событий подобного переноса. Так, например, одно из событий относится к региону «Тихоокеанского Северо-Запада» (PNW), определяемому координа-

тами ( $43,8^\circ$ – $53,3^\circ$  с.ш.)  $\times$  ( $115,3^\circ$ – $124,7^\circ$  з.д.). Степень коррелированности между осредненными для региона PNW значениями  $G$  и полем ветра позволяет выявить структуры крупномасштабных аномалий потока, которые соответствуют благоприятным условиям переноса к региону PNW.

Выполненный Matsuki и др. [28] анализ данных прямых самолетных измерений (*in situ*), лидарного зондирования и результатов вычислений «обратных» траекторий воздушных масс позволил проследить за процессом дальнего переноса и эволюции свойств пылевого аэрозоля, поступавшего в атмосферу в Восточно-Азиатском регионе главным образом в периоды пылевых бурь. Осуществленные над центральным регионом в Японии в 2000–2001 гг. самолетные измерения продемонстрировали наличие небольшого по масштабам, но устойчивого дальнего переноса ПА на высотах 2–6 км весной, включая и такие дни, когда отчетливые выбросы ПА с Азиатского континента отсутствовали. Подобный ПА, который можно рассматривать как фоновый, наблюдался и летом на высотах более 4 км в условиях доминирующего западно-восточного переноса. Рассмотрение продолжительной серии лидарных зондирований в Нагое выявило существенное изменение характеристик аэрозоля в свободной тропосфере от весны к лету. Наиболее вероятным источником наблюдавшегося фонового ПА была пустыня Такламакан.

Именно поэтому за последние годы большое внимание привлекла проблема дальнего переноса пылевого аэрозоля, выбрасываемого в атмосферу в пустынях в периоды пылевых бурь. Влияние подобного переноса проявляется не только в региональных, но и в глобальных масштабах, выражаясь в обусловленных ПА изменениях процессов образования и свойств облаков, «фертилизации» океана (за счет поступления соединений железа), ухудшении условий видимости, переносе патогенов и стимулировании болезней дыхательных путей. Прямое и косвенное воздействие ПА на формирование радиационного вынуждающего воздействия определяет значительное (и пока плохо изученное) влияние ПА на климат.

Наиболее мощными источниками ПА служат Сахара, пустыни Средней Азии и Восточной Азии. В последнем случае главный вклад в возникновение природного ПА вносят пустыни Такламакан (западный регион Китая) и Гоби (Северо-Восточный Китай и Монголия).

Необычно сильные пылевые бури возникли на Азиатском континенте в период 6–9 апреля 2001 г. 8 апреля фронт ПА достиг Корейского п-ва, а 9 апреля — Японии. Атмосфера над обширной акваторией Тихого океана оказалась под воздействием ПА. Часть гигантского пылевого шлейфа к 12–13 апреля достигла территории США, а позднее (19–20 апреля) была обнаружена в атмосфере над Атлантическим океаном. На основе использования разработанной специалистами из ВМС США интерактивной (для системы «атмосфера — океан») 46-слойной (при горизонтальном разрешении 27 км) модели COAMPS

(мезомасштабной модели атмосферной циркуляции) Liu и др. [22] предприняли численное моделирование динамики азиатских пылевых бурь за период 5–15 апреля 2001 г. Главными источниками ПА были в рассматриваемом случае пустыни Такламакан и Гоби. Апробация адекватности полученных результатов осуществлена с использованием результатов спутниковых наблюдений, демонстрирующих пространственную структуру дальнего переноса ПА, данных наземных наблюдений счетной концентрации частиц PM-10 (имеющих диаметр меньше 10 мкм) и лидарных зондирований в различных пунктах (Ланчжоу, Пекин, Хейфэй, Цукуба и Нагасаки).

Использованная модель позволила адекватно воспроизвести эволюцию пылевых бурь и дальний перенос ПА. Оказалось, в частности, что сформировавшиеся в Монголии циклон (6–7 апреля) и холодный фронт (8–9 апреля), сопровождавшийся вторичным циклоном, обусловили возникновение в атмосфере вынуждающего воздействия, следствием которого было формирование поля ПА в тропосфере. Оба циклона были ответственны за перенос пыли на высоты до 8–9 км, причем у верхней границы циклона перенос ПА был антициклоническим и направленным на северо-восток.

Главную роль в образовании ПА и его переносе к верхней границе пограничного слоя атмосферы играли турбулентное перемешивание и конвекция. В зоне определяемого циклоном преобладающего переноса доминирующим процессом, определяющим перенос ПА на большие высоты, была вертикальная адвекция, а западно-восточный перенос контролировал процесс дальнего переноса. Расчеты бюджета массы за весь рассматриваемый период показали, что около 75% всего поступления ПА (643 млн т частиц диаметром меньше 36 мкм) в атмосферу претерпевают возврат на поверхность как пустынь, так (20%) и не пустынных регионов за счет процессов влажного и сухого осаждения. Около 1,6% выпавшего аэрозоля приходится на долю акваторий Восточно-Китайского и Японского морей, а 3,6% аэрозоля пересекает восточную и северо-восточную границы модели.

Интенсивная фаза исследований атмосферного аэрозоля в рамках полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia была осуществлена в период с 31 марта по 4 мая 2001 г. и сконцентрирована в регионах Желтого и Японского морей. На основе использования разработанной в техническом университете штата Джорджия и Годдардовском центре космических полетов (США) глобальной модели GOCART, воспроизводящей процессы трансформации поля концентрации тропосферного озона и аэрозоля, а также метеорологических прогнозов (методика GEOS DAS, разработанная в Годдардовском центре) Chin и др. [11] составили прогноз «аэрозольной обстановки» на период ACE-Asia. Адекватность рассматриваемой модели проверена путем сравнения с данными наблюдений при помощи комплекса аппаратуры, установленной на самолете-лаборатории C-130.

Превосходный прогноз полей ветра, относительной влажности и температуры обеспечила методика GEOS DAS. Модель GOCART вполне адекватно воспроизвела трехмерное поле концентрации пылевого аэрозоля, включая выбросы на акваторию Тихого океана, но не обеспечила воспроизведения высокой концентрации ПА в пограничном слое атмосферы (ПСА), что можно объяснить неучетом развившихся за последние годы источников ПА в провинции Внутренняя Монголия (Китай). После того как эти источники были приняты во внимание, рассчитанное поле повышенной концентрации ПА в ПСА над Желтым морем оказалось вполне реалистическим. Обсуждаемая модель GOCART позволяет достоверно воспроизвести не только крупномасштабный межконтинентальный перенос ПА, но также и мелкомасштабную пространственно-временную изменчивость содержания аэрозоля, что особенно важно для планирования полевых экспериментов.

По данным анализа проб аэрозоля, полученных на о-ве Adak (Аляска), являющемся самым южным островом в цепи Алеутских островов, а также в Poker Flat (в 30 км к северо-востоку от г. Фербенкса на Аляске), Cahill [8] получил информацию о микроструктуре и химическом составе аэрозоля (химический анализ обеспечивал определение содержания 42 элементов от натрия до свинца с помощью методики синхротропной рентгеновской флуоресценции). Анализ элементного состава аэрозоля в сочетании с результатами вычислений «обратных» траекторий показал, что аэрозоль был продуктом дальнего переноса с Азиатского континента. В случае данных наблюдений на о-ве Adak некоторый вклад вносило также поступление аэрозоля из регионов Северной Европы и России. Максимальные значения концентрации крупных частиц почвенного аэрозоля (аэродинамический диаметр в пределах 1,15–2,5 мкм) в Poker Flat составляли лишь 15% по отношению к наблюдавшимся на о-ве Adak.

Если предположить, что в обоих случаях пробы аэрозоля относились к одинаковым воздушным массам, то это означает, что на пути дальнего переноса аэрозоля через Тихий океан происходило его существенное осаждение на поверхность океана. Однако в действительности различие наблюдаемых значений концентрации аэрозоля могло быть также обусловлено неодинаковостью траекторий переноса и условий вертикального перемешивания в районах двух рассматриваемых станций наблюдений. Для оценки относительной роли этих факторов необходимы дальнейшие исследования.

Uno и др. [47] описали модель CFORS дальнего переноса малых газовых компонентов атмосферы и аэрозоля с учетом их химической трансформации в процессе переноса, предназначенную для планирования полевых наблюдательных экспериментов и последующей интерпретации данных наблюдений. Эта модель обеспечивает воспроизведение трехмерных полей концентрации МГК и аэрозоля при высоком (около 90 с) разрешении по времени. Модель применена для интерпретации данных наземных наблюдений, полученных в рамках программы

VMAP исследований изменчивости свойств морского аэрозоля.

С целью анализа закономерностей переноса и трансформации МГК и аэрозоля с учетом как антропогенных загрязняющих компонентов (сульфат, «черный» углерод, СО), так и природных компонентов (включая радон и пылевой аэрозоль), рассмотрена эволюция со временем полей концентрации МГК и аэрозоля. Анализ выявил важную роль изменений погоды в синоптических масштабах как фактора переноса загрязнений в континентальных масштабах весной в Восточной Азии. В работе [47] детально обсуждена сложная пространственно-временная структура полей загрязняющих компонентов в периоды выбросов с Азиатского континента на акваторию Тихого океана. Результаты численного моделирования вполне удовлетворительно согласуются с данными самолетных наблюдений.

На сети наземных станций, расположенной на четырех японских островах (Rishiri, Sado, Nachijo, Chichi-jima) в западном секторе Тихого океана вдоль параллели 140° в.д. (в диапазоне широт 25°–45° с.ш.) Matsumoto и др. [29] выполнили регулярные наблюдения различных характеристик атмосферного аэрозоля, включая содержание элементного углерода (ЕС). В работе [29] обсуждены результаты наблюдений содержания ЕС за период с марта по май 2001 г., скоординированные с наблюдениями в рамках полевого эксперимента ACE-Asia. Средние значения массовой концентрации ЕС варьировали в пределах 0,18–0,60 мкг/м<sup>3</sup>, причем изменения концентрации на северных островах (35°–45° с.ш.) Rishiri и Sado оказались синхронными, как и данные для южных островов (25°–35° с.ш.) Nachijo и Chichi-jima, но между результатами наблюдений на двух парах островов подобная связь отсутствовала, что отображает различие траекторий дальнего переноса аэрозоля к упомянутым двум парам островов. Как правило, поступающие с Азиатского континента воздушные массы оказываются загрязненными над рассматриваемыми южными, но не северными регионами.

Uno и др. [46] выполнили численное моделирование дальнего переноса и трансформации свойств аэрозоля с использованием региональной модели CFORS с целью воспроизведения данных наблюдений концентрации «черного» углерода по программам VMAP и APX на пяти удаленных островах Японского архипелага в период осуществления полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia весной 2001 г. Предполагается, что ВС-аэрозоль является полностью мелкодисперсным, что позволяет избежать необходимости учета гравитационного оседания, влажного осаждения и химического старения частиц углеродного аэрозоля. Уровень сухого осаждения задан как составляющий  $10^{-4}$  ( $10^{-3}$ ) м/с на поверхности океана (суши).

В работе [46] обсуждены результаты двух численных экспериментов: 1) контрольного, в котором учтены все выбросы ВС; 2) сравнительного, в котором не приняты во внимание выбросы за счет сжигания биомассы, для оценки (путем сравнения

с данными первого эксперимента) вклада сжигания биомассы в формирование поля концентрации углеродного аэрозоля в рассматриваемом западном секторе Тихого океана (центр этого региона расположен в точке 25° с.ш., 115° в.д.; вычисления сделаны на сетке с шагом, равным 80 км для толщи атмосферы 0–23 км при учете 23 неравномерно распределенных уровней).

Сравнение с данными наблюдений продемонстрировало, что модель CFORS вполне удовлетворительно воспроизводит многие наблюдаемые особенности пространственно-временной изменчивости концентрации ВС при различном режиме атмосферной циркуляции. Главные особенности синоптической ситуации наблюдений (Rishiri и Sado) относятся в основном к высотам меньше 2 км, а вклад продуктов сжигания биомассы в формирование ВС оказался меньше 20%. Для более южных станций (включая Chichi-jima) этот вклад достигает 23% вблизи подстилающей поверхности и 52% в свободной атмосфере. Таким образом, как основные источники, так и пути переноса углеродного аэрозоля к северным и южным станциям оказываются различными.

Takekuma и др. [45] применили комбинированную модель SPRINTARS дальнего переноса аэрозоля и переноса излучения для воспроизведения крупномасштабного трансатлантического переноса продуктов пылевых бурь в Азии в Северную Америку применительно к условиям в период весенних сезонов 2001 и 2002 гг. Расчеты показали, что около 10–20% азиатского ПА, поступающего в регион Японии, достигает Северной Америки. Состав аэрозоля характеризуется присутствием не только ПА, но также антропогенного углеродного и сульфатного аэрозоля, АОТ которого имеет примерно ту же величину, что и АОТ пылевого аэрозоля.

В период осуществления полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia в западном секторе Тихого океана с самолета-лаборатории C-130 получены пробы субмикронного аэрозоля на тефлоновые фильтры. Выполнен анализ этих проб на содержание аэрозольного органического углерода (ОС) с использованием ИК-Фурье-спектрометра (FTIR) для регистрации спектров пропускания. Спектральный анализ выявил присутствие таких компонентов, как силикаты, карбонаты, алкен, ароматические соединения, алкополи, карбонил, амин и органосульфатные группы. Для анализа элементного состава аэрозоля использована методика рентгеновской флуоресценции. Измерения массовой концентрации ОС дали значения в пределах 0,4–14,2 мкг/м<sup>3</sup>, а органических соединений — от 0,6 до 19,6 мкг/м<sup>3</sup>, что, в среднем, эквивалентно 36% всей массы субмикронного аэрозоля.

Выполненное Maria и др. [26] рассмотрение соотношений между значениями концентрации окиси углерода и ОС (наклона прямой, соответствующей зависимости СО/ОС) позволило установить наличие 10 категорий воздушных масс, характеризующихся специфическими данными инвентаризации выбросов с Азиатского континента. Данные о наклоне СО/ОС использованы для распознавания

источников выбросов и их влияния на состав органических компонентов аэрозоля. Так, 52% проб аэрозоля, полученных в период ACE-Asia, характеризуются (по данным о CO/OC) наличием примеси продуктов сжигания биомассы, причем существует несомненная региональная специфичность химического состава возникающих на Азиатском континенте крупномасштабных выбросов аэрозоля на акваторию Тихого океана. Подобную специфичность характеризуют, например, повышенная концентрация пылевого аэрозоля в воздушных массах, поступающих из пустыни Такламакан, рост содержания нитратов и сульфата аммония при поступлении воздуха из региона Шанхая, а сульфатов — с о-ва Хоккайдо.

В период полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia (март — май 2001 г.) была выполнена обширная программа наземных наблюдений химического состава, микроструктуры и переноса аэрозоля на о-ве Rishiri, расположенном вблизи северной оконечности о. Хоккайдо (45,07° с.ш.; 141,12° в.д.). Согласно данным наблюдений, средние значения массовой концентрации в частицах аэрозоля  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$  составили соответственно 2,48; 0,64; 0,72 и 0,17 мкг/м<sup>3</sup>. Средние значения концентрации элементного и органического углерода в частицах мелкодисперсной фракции аэрозоля (диаметр  $d < 2,5$  мкм) оказались равными 0,25 и 0,80 мкг/м<sup>3</sup> соответственно.

Под влиянием выбросов загрязненных воздушных масс с Азиатского континента на акваторию Тихого океана происходило значительное возрастание концентрации аэрозоля, тогда как в фоновых условиях она приближалась к уровням, характерным для удаленных регионов океана. Полученные Matsumoto и др. [30] результаты свидетельствуют о сосуществовании  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  и  $\text{NH}_4^+$  в мелкодисперсном аэрозоле, а  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{nss-Ca}^{2+}$  — в крупнодисперсной фракции аэрозоля.

Возникающие на континенте ионы  $\text{NO}_3^-$  претерпевают дальний перенос в составе крупнодисперсной фракции аэрозоля. Дальний перенос антропогенных загрязняющих компонентов и пылевого аэрозоля может осуществляться как совмещенно, так и раздельно. Часто антропогенные частицы мелкодисперсной фракции, содержащие значительное количество  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ , появляются первыми, а за ними следуют абсорбированные  $\text{NO}_3^-$  большие частицы пылевого (минерального) аэрозоля. В периоды поступления воздушных масс с континента нередко возникают кратковременные вторжения воздушных масс, содержащих значительное количество аэрозольных углеродных соединений, источником которых является, вероятно, сжигание биомассы. Режимы дальнего переноса сульфатов, нитратов и углеродных соединений характеризуются специфическими особенностями, хотя все они определяются влиянием процессов внутреннего сгорания (функционированием двигателей).

Osada и др. [33] выполнили наблюдения микроструктуры аэрозоля и содержания озона в период с января 1999 по ноябрь 2002 г. на ст. Murododaira (36,6° с.ш.; 137,6° в.д., 2450 м над уровнем моря), расположенной на западном склоне г. Tateyama в центральном регионе Японии. Рассмотрены данные наблюдений в ночное время (24 ч — 05 ч по местному времени), которые свидетельствуют о слабой изменчивости концентрации тропосферного озона (дисперсия составляла 4 млрд<sup>-1</sup>) при средней концентрации  $\text{O}_3$  зимой (октябрь—февраль), равной 40 млрд<sup>-1</sup>, сильной изменчивости (дисперсия 8 млрд<sup>-1</sup>) при более высокой концентрации (51 млрд<sup>-1</sup>) весной (март—май) и сильной изменчивости (14 млрд<sup>-1</sup>) и более низком значении концентрации (32 млрд<sup>-1</sup>) летом (июнь—сентябрь). Наиболее значительная среднемесячная объемная концентрация частиц аккумуляционной моды ( $0,3 < d < 1,0$  мкм) наблюдалась в июне (2,7 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>), тогда как зимой (октябрь—февраль) средняя концентрация составляла лишь 0,7 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

Статистический анализ результатов вычислений «обратных» траекторий воздушных масс показал, что преобладавшие летом условия застойной атмосферы в прибрежных регионах Желтого моря и у берегов Японии благоприятствовали повышению счетной концентрации частиц аккумуляционной моды аэрозоля. Значительным фактором подобного повышения были также выбросы  $\text{SO}_2$  вулканом Miyakejima, начиная с августа 2000 г. Наивысшая среднемесячная объемная концентрация (11,2 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) грубодисперсного аэрозоля ( $d > 1,0$  мкм) была зарегистрирована в апреле. Изменчивость ежедневной концентрации грубодисперсного аэрозоля ночью также была наиболее значительна весной (дисперсия составляла 13,6 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) и низкой (около 2 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) в течение остальной части года.

Причиной высокого уровня объемной концентрации и его сильной изменчивости весной было частое поступление частиц желтой пыли (пылевого аэрозоля) с Азиатского континента. В периоды таких эпизодов поступления пылевого аэрозоля, получивших название «коза», часто наблюдалось быстрое повышение объемной концентрации грубодисперсного аэрозоля в 30 раз в течение 3 ч. Периодом особо интенсивной активности явления «коза» был 2001 г., когда события «коза» возникали начиная с января и продолжались до начала июля.

Schmid и др. [41] выполнили названное «замкнутым» анализом сравнение определенного по данным наблюдений общего ослабления коротковолновой радиации на длине волны 550 нм за счет аэрозоля, характеризующегося значениями коэффициента экстинкции  $\sigma_{\text{ep}}$ , с результатами наблюдений на борту самолета-лаборатории «Twin Otter» при помощи 14-канального солнечного фотометра AATS-14 и данных измерений характеристик аэрозоля *in situ*, а также судовых лидарных зондирований. В период с 31 марта по 1 мая 2001 г. в рамках программы ACE-Asia осуществлено 19 полетов над Японией на

высотах до 3,8 км из района Хиросимы (34,15° с.ш.; 132,23° в.д.).

Сравнение наблюдаемых и рассчитанных (с использованием четырех различных методик) вертикальных профилей  $\sigma_{\text{ep}}$  обнаружило вполне удовлетворительное согласие при наличии расхождений абсолютных значений  $a_{\text{вр}}$ , которые зависели от высоты. Значения  $\sigma_{\text{ep}}$ , вычисленные по измеренным микроструктуре и химическому составу аэрозоля, хорошо согласуются с данными AATS-16 в морском пограничном слое атмосферы, но оказались значительно заниженными в слоях пылевого аэрозоля в том случае, когда задавалась сферическая форма частиц аэрозоля. Сравнение 14 вертикальных профилей  $\sigma_{\text{ep}}$ , определенных по данным измерений *in situ* характеристик рассеяния и поглощения радиации аэрозолем, с измеренными при помощи солнечного фотометра выявило, что первые занижены примерно на 13% по отношению ко вторым.

Совместный анализ результатов лидарных и фотометрических наблюдений обнаружил наличие слоев пылевого аэрозоля на высотах до 10 км, оптическая толщина которых (на высотах 3,5–10 км) варьировала в пределах 0,1–0,2 (на длине волны 500 нм), а отношение коэффициентов экстинкции и обратного рассеяния (на длине волны 523 нм) изменялось в интервале 59–71 ср. Согласно данным самолетных наблюдений, атмосфера в период наблюдений была относительно сухой при общем содержании водяного пара меньше 1,5 «см» и абсолютной влажности  $\rho_w < 12 \text{ г/м}^3$ . Сравнение непосредственно измеренных значений  $\rho_w$  с восстановленными по данным AATS-16 обнаружило наличие высокой корреляции ( $r^2 = 0,96$ ), но систематической заниженности восстановленных значений  $\rho_w$  примерно на 7%.

На основе совместного использования данных установленной на спутнике NOAA-14 аппаратуры AVHRR и объективного анализа, осуществленного NCEP-NCAR (США), Rajeev и др. [35a] изучили закономерности пространственного распределения и специфики дальнего переноса аэрозоля над регионами Аравийского моря, Бенгальского залива и Индийского океана в периоды сухого сезона (ноябрь–апрель) и юго-западного муссона во время влажного сезона (июнь–сентябрь). Исходной информацией послужили данные об аэрозольной оптической толщине, восстановленной по спутниковым наблюдениям для канала № 1 (длина волны  $(630 \pm 50)$  нм) аппаратуры AVHRR для акватории в пределах 25° ю.ш. – 25° с.ш.; 40° в.д. – 100° в.д.

Полученные результаты иллюстрируют отчетливые различия полей АОТ в периоды сухого и влажного сезонов, обусловленные спецификой воздушных масс и различием типов аэрозоля в эти периоды. Как это ни удивительно, в течение всего года поля АОТ (и, таким образом, содержания аэрозоля) подвержены существенному влиянию индийского субконтинента, несмотря на наличие значительной миграции ВЗК в течение года и удален-

ности от субконтинента экваторий, расположенных в южном полушарии.

Отчетливо проявляются как дальний перенос аэрозоля к океану в течение сухого сезона в северном полушарии, так (и в еще более сильной степени) перенос пылевого аэрозоля из Аравийской пустыни в регион Аравийского моря во время влажного сезона. В регионе Бенгальского залива и в тропиках Индийского океана существенно сказывается поступление аэрозоля с Индийского субконтинента и из юго-восточной части Азии. Дальний перенос аэрозоля с континента ограничен, однако, главным образом регионами Аравийского моря, Бенгальского залива и Индийского океана в северном полушарии. В течение всего года наблюдается большой градиент АОТ над Аравийским морем и Бенгальским заливом, особенно в меридиональном направлении в интервале широт 5° ю.ш. – 10° с.ш. Гигантский шлейф аэрозоля (при АОТ более 1,0) в тропиках Индийского океана в сентябре–ноябре 1997 г. был связан с лесными пожарами в Индонезии, возникшими в период Эль-Ниньо.

Высокий уровень неопределенности оценок прямого и косвенного воздействия аэрозоля на климат стимулировал большой интерес к анализу процессов, определяющих влияние аэрозоля и облаков на формирование климата. Обсуждаемые неопределенности связаны главным образом с процессами сложного взаимодействия между аэрозолем и облаками, зависящими от микроструктуры, химического состава и типа облаков. Задача еще более осложняется ввиду изменений свойств частиц аэрозоля, обусловленных их взаимодействием с облачными каплями, происходящим внутри облаков.

При этом взаимодействия между аэрозолем и облаками проявляются двояко: посредством функционирования частиц аэрозоля как облачных ядер конденсации и при обратном воздействии облаков на аэрозоль, приводящем к изменениям счетной концентрации, микроструктуры и химического состава аэрозоля. Изменения свойств частиц аэрозоля возникают в процессе коагуляции облачных капель во время роста облаков за счет добавления вещества в результате происходящего в жидкой фазе (каплях) окисления таких малых газовых компонентов, как  $\text{SO}_2$ , а также путем изменения концентрации аэрозоля в атмосфере посредством вымывания частиц из атмосферы и фотетических процессов.

Для понимания механизмов воздействия аэрозоля на климат необходимо располагать информацией о его концентрации, свойствах и времени жизни в различных атмосферных условиях. В этом контексте Levin и др. [21] выполнили наблюдения обусловленного облачными каплями нуклеационного вымывания частиц аэрозоля при прохождении мелкого холодного фронта на горной станции, расположенной в северной части Израиля на вершине г. Мерон (35,41° в.д.; 32,99° с.ш., 1200 м над уровнем моря) в период 8–10 декабря 2000 г. Анализ траекторий воздушных масс (дальнего переноса) показал, что до прохождения холодного фронта

преобладал воздух, возникавший на севере и приносивший из Восточной Европы антропогенный аэрозоль. После прохождения фронта доминировал воздух, поступающий с востока и сопровождавшийся дальним переносом минерального пылевого аэрозоля.

Анализ химического состава аэрозоля выявил преобладание таких компонентов аэрозоля, как сульфат, нитрат и аммоний. Около 65% содержащих сульфат частиц принимали участие в процессе нуклеации облачных капель, причем нуклеационное «вымывание» аэрозоля коррелировало с размерами частиц аэрозоля. Если частицы размером меньше 0,14 мкм не подвергались влиянию этого процесса, то для более крупных частиц их счетная концентрация уменьшалась пропорционально концентрации облачных капель. В условиях сплошной облачности происходило нуклеационное вымывание 80% частиц в диапазоне размеров 0,3–1 мкм. После диссипации облачности счетная концентрация частиц диаметром меньше 1 мкм возвращалась к первоначальному уровню.

На основе использования данных самолетных наблюдений, полученных в ходе регионального эксперимента по изучению арктических облаков (FIRE/ACE), осуществленного в рамках Международного проекта по спутниковой климатологии облачного покрова (ISCCP), Wylve и Hudson [49] изучили изменчивость вертикального профиля концентрации облачных ядер конденсации в регионе Арктического океана. В качестве дополнительной информации учтены результаты вычислений «обратных траекторий» воздушных масс и спутниковые изображения облачного покрова. Анализ всех рассматриваемых данных показал, что находящаяся в арктическом пограничном слое атмосферы протяженная слоистая облачность обуславливает понижение концентрации ОЯК в ПСА за счет их вымывания.

Пониженный уровень концентрации наблюдался во всех случаях, когда воздух проходил через облака, за исключением случая перистых облаков, влияние которых на ОЯК варьирует в широких пределах. Процесс вымывания ОЯК облаками приводит к уменьшению их концентрации при любом уровне пересыщения. Наблюдавшееся ранее сильное возрастание концентрации ОЯК в атмосфере над Атлантическим и Тихим океанами при поступлении воздушных масс с континентов не проявлялось над Арктическим океаном. Максимальные значения концентрации ОЯК были зарегистрированы в тех случаях, когда воздух находился над Арктическим океаном не менее 6 сут при отсутствии взаимодействия воздуха с облаками. Вертикальные профили концентрации ОЯК в Арктике существенно отличаются от наблюдавшихся в других морских регионах. Максимальные значения концентрации обнаружены на уровне потолка самолетных зондирований (6,5 км, вблизи уровня тропопаузы), т.е. (в противоречии с обычной ситуацией) концентрация ОЯК возрастала с высотой.

### 3. Процессы осаждения аэрозоля

Завершающим этапом круговорота аэрозоля является его осаждение на подстилающую поверхность. На основе использования модели NARCM дальнего переноса пылевого аэрозоля с учетом трансформации его свойств в процессе переноса, обусловленной влажным и сухим осаждением, Zhao и др. [50] воспроизвели эволюцию шлейфа ПА, возникающего в пустынях Азиатского континента, на акваторию Тихого океана в северном полушарии и достигающего западного побережья Америки. Из результатов численного моделирования следует, что доминирующую роль в удалении ПА из атмосферы вблизи источников выбросов играл процесс сухого осаждения, тогда как при переносе через Тихий океан более важное значение приобретало влажное осаждение, вклад которого был примерно в 10 раз больше, чем сухого осаждения. Осаждение азиатского пылевого аэрозоля на акваторию Тихого океана не только коррелировало с интенсивностью осадков, но также зависело от пространственной структуры дальнего переноса ПА.

Ежемесячные выбросы ПА с Азиатского континента и их дальний перенос были сконцентрированы вблизи 38° с.ш. (март), 42° с.ш. (апрель) и 41° с.ш. (май). В этой связи в работе [50] детально описаны особенности пространственной структуры переноса ПА весной через Тихий океан. Положение главной оси переноса варьировало в пределах широт 30°–40° с.ш. в марте, а в апреле зональный перенос ПА был сосредоточен вдоль 40° с.ш. Для мая было характерно раздвоение преобладающих траекторий дальнего переноса на две: зональную (где перенос направлен на восток) и меридиональную – от района источника ПА к северо-восточному региону Азии. Расчеты наблюдавшегося весной 2001 г. бюджета ПА привели к выводу, что главные источники азиатского пылевого аэрозоля располагались в регионах пустынь Китая и Монголии при уровне выбросов около 21,5 т/км<sup>2</sup> (их экспорт составлял лишь 8,42 т/км<sup>2</sup>), причем лёссовое плато оказалось главным регионом стока (на континенте) для азиатского ПА, а основным регионом стока служила акватория Тихого океана.

Gallagher и др. [15] выполнили прямые (флуктуационные) измерения потоков мелких (диаметр 0,1–0,2 мкм) частиц аэрозоля над вересковой и травянистой растительностью с целью анализа влияния шероховатости поверхности на скорость сухого осаждения аэрозоля. В случае травяного покрова наблюдения выполнены до и после его скашивания. Анализ полученных данных выявил их согласие с аналогичными результатами предшествующих разработок, особенно при учете идентичности условий устойчивости атмосферы. В работе [15] предложена приближенная методика параметризации скорости осаждения  $V_{ds}$  в зависимости от параметра шероховатости  $z_0$ :

$$V_{ds}/u^* = k_1 + k_2 (-300z/L)^{2/3},$$

где  $k_1 = 0,001222 \lg(z_0) + 0,003906$ ;  $k_2 = 0,009$ . Здесь  $z$  – высота;  $L$  – параметр устойчивости Обухова;  $u^*$  – динамическая скорость. Gallagher и др. [15] подчеркнули необходимость дальнейших наблюдений для различных типов подстилающей поверхности (особенно обладающих шероховатостью в диапазоне 0,1–1,0 м), а также необходимость обобщения методики параметризации на диапазон размеров частиц 0,5–1,0 мкм.

Наряду с аэрозолем почвенного происхождения выбрасываемый в атмосферу Мировым океаном морской солевой аэрозоль вносит главный вклад в формирование глобальной массы атмосферного аэрозоля (оценки сухой массы выбросов морского аэрозоля привели к значениям в пределах  $10^3$ – $10^4$  Тг/год). Norrel и др. [18] выполнили численное моделирование, результаты которого свидетельствуют о том, что при наличии такого горизонтально однородного источника частиц, как в случае морского солевого аэрозоля (МСА) скорость сухого осаждения аэрозоля кардинально отличается от характеризующей осаждение частиц, поступающих посредством адвекции или в результате процесса вертикального перемешивания.

В работе [18] предложена методика, позволяющая рассчитать скорость осаждения в двух этих случаях. Применение равновесной методики оценки функции источника МСА по данным о концентрации аэрозоля на определенной высоте, а также скорости осаждения продемонстрировало бесперспективность такого рода методики для частиц размером меньше 5–10 мкм. Подобный результат обусловлен двумя причинами: 1) время установления равновесия между источником и потерями за счет сухого осаждения много больше, чем характерное время жизни частиц малых размеров, определяемое вымыванием частиц осадками; 2) очень трудно (если возможно вообще) учесть влияние вертикальных скоростей синоптических масштабов, а также перемешивания между морским пограничным слоем (МПС) и свободной тропосферой.

Была разработана поэтому модифицированная методика оценки функции источника морского солевого аэрозоля. Эта методика основана на введении понятия «скорость вовлечения» с целью учета влияния таких процессов, как: 1) осаждение или подъем, обусловленные крупномасштабной дивергенцией или конвергенцией в пределах МПС; 2) вертикальные движения за счет снижения или расширения МПС; 3) обмен со свободной тропосферой через верхнюю границу МПС.

### Заключение

Дальний перенос аэрозоля (особенно трансокеанский) определяет разнообразные воздействия аэрозоля на окружающую среду и климат в региональных и глобальных масштабах. Важное место занимает в этом контексте обусловленное дальним переносом антропогенного аэрозоля и малых газовых компонентов загрязнение высокоширотной атмосферы, которое не рассматривалось здесь, чтобы избежать повторов [2, 7]. Таким же соображением

определяется и лапидарность освещения проблем дальнего переноса продуктов сжигания биомассы и антропогенных выбросов на акваторию Индийского океана, обсужденных в предшествующих частях этого обзора [3, 4].

Подводя итоги, следует, как и ранее, подчеркнуть неадекватность имеющейся информации о дальнем переносе аэрозоля, что диктует необходимость дальнейшего развития как систем наблюдений (при особом внимании к лидарному и спутниковому дистанционному зондированию), так и имитационного численного моделирования глобальной динамики атмосферного аэрозоля.

1. Григорьев Ал.А., Кондратьев К.Я. Экодинамика и геополитика. Т. 2. Экологические катастрофы. СПб.: ИЦ РАН, 2001. 684 с.
- 1а. Иванов А.П., Чайковский А.П. Лазерный луч исследует атмосферу. Минск: ИФ НАН Беларуси, 2002. 12 с.
2. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Филипп Г.В. Проблемы загрязнения высокоширотной окружающей среды. СПб.: ИЦ РАН, 2002. 280 с.
3. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля. 1. Полевые наблюдательные эксперименты. Африка и Азия // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 699–714.
4. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля. 2. Полевые наблюдательные эксперименты. Америка, Западная Европа и высокие широты // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 715–741.
5. Augustine J.A., Cernvall C.R., Hodger G.B., Long C.N., Medina C.I., De Luisi J.J. An automated method of MFRSR calibration for aerosol optical depth analysis with application to an Asian dust outbreak over the United States // J. Appl. Meteorol. 2004. V. 42. N 2. P. 266–278.
6. Ansmann A., Bösenberg J., Chaiikovsky A., Cameryn A., Eckhardt S., Eixmann R., Freudenthaler V., Ginoux P., Komguem L., Linné H., López Marquez M., Matthias V., Mattis L., Mitev V., Müller D., Music S., Nickovic S., Pelov J., Souvage L., Sobolewsky P., Srivastava M.K., Stohl A., Torres O., Vaughan G., Wandinger U., Wiegner M. Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: The 11–16 October 2001 outbreak observed with EARLINET // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 24. P. AAC12/1–AAC12/15.
7. Bobylev L.P., Kondratyev K.Ya., Johanessen O.M. Arctic Environment Variability in the Context of Global Change // Springer/PRAXIS. Chichester, U.K. 2003. 471 p.
- 7а. Brenninkmeijer C.A.M., and the CARIBIC team. Representative medium term observations of trace gases and aerosols in the upper troposphere and lower troposphere (CARIBIC, a flying laboratory) // AFO Newslett. 2003. N 4. P. 11–14.
8. Cahill C.F. Asian aerosol transport to Alaska during ACE-Asia // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 23. P. ACE32/1–ACE32/8.
9. Cattrall 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. AAC10/1–AAC10/11.



10. *Chatfield R.B., Guo Z., Sachse G.W., Blake D.R., Blake N.J.* The subtropical global plume in the Pacific Exploratory Mission-Tropics A (PEM-Tropics A), PEM-Tropics B, and the Global Atmospheric Sampling Program (GASP): How tropical emissions affect the remote Pacific // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 16. P. ACH1/1–ACH1/20.
11. *Chin M., Ginoux P., Lucchesi R., Huebert B., Weber R., Anderson T., Masonis S., Blomqvist B., Bandy A., Thornton D.* A global aerosol model forecast for the ACE-Asia field experiment // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE22/1–ACE22/17.
12. *Colarco P.R., Toon O.B., Holben B.N.* Saharan dust transport to the Caribbean during PRIDE: 1. Influence of dust sources and removal mechanisms on the timing and magnitude of downwind aerosol optical depth event from simulations of in situ and remote sensing observations // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD5/1–PRD5/20.
13. *Colarco P.R., Toon O.B., Reid J.S., Livingston J.M., Russel P.B., Redemann J., Schmid B., Maring H.B., Savoie D., Welton E.J., Campbell J.R., Holben B.N., Levy R.* Saharan dust transport to the Caribbean during PRIDE: 2. Transport, vertical profiles, and deposition in simulations of in situ and remote sensing observations // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD6/1–PRD6/16.
- 13a. *Eckhardt S., Stohl A., Forster C., James P.* Climatology of ascending airstreams and their relation to the long-range transport of trace substances in the atmosphere (CARLOTTA) // *AFO Newslett.* 2003. N 4. P. 3–6.
14. *Fast J.D., Zaveri R.A., Bian X., Chapman E.G., Easter R.C.* Effect of regional-scale transport on oxidants in the vicinity of Philadelphia during the 1999 NE-OPS field campaign // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 16. P. AAC13/1–AAC13/11.
15. *Gallagher M.W., Nemitz E., Dorsey J.R., Fowler D., Sutton M.A., Flynn M., Dwyer J.* Measurements and parameterizations of small aerosol deposition velocities to grassland, arable crops, and forest: Influence of surface roughness length on deposition // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 12. P. AAC8/1–AAC8/10.
16. *Ginoux P.* Effects of nonsphericity on mineral dust modeling // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 2. P. AAC3/1–AAC3/10.
17. *Holzer M., McKendry I.G., Jaffe D.A.* Springtime trans-Pacific atmospheric transport from east Asia: A transit time probability density function approach // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 22. P. ACL11/1–ACL11/17.
18. *Hoppel W.A., Frick G.M., Fitzgerald J.W.* Surface source function for sea-salt aerosol and aerosol dry deposition to the ocean surface // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 19. P. AAC7/1–AAC7/17.
19. *Kondratyev K.Ya., Grigoryev A.A., Varotsos C.A.* Environmental Disasters: Anthropogenic and Natural // Springer/PRAXIS. Chichester, U.K. 2002. 484 p.
20. *Kubilay N., Cokacar T., Oguz T.* Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 21. P. AAC4/1–AAC4/10.
21. *Levin Z., Teller A., Ganor E., Graham B., Andreae M.O., Maenhaut W., Falkovich A.H., Rudich Y.* Role of aerosol size and composition in nucleation scavenging within clouds in a shallow cold front // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 22. P. AAC5/1–AAC5/14.
22. *Liu M., Westphal D. L., Wang S., Shimizu A., Sugimoto N., Zhou J., Chen Y.* A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001 // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE21/1–ACE21/21.
23. *Livingston J.M., Russel P.B., Reid J.S., Rodemann J., Schmid B., Allen D.A., Torres O., Levy R.C., Remer L.A., Holben B.N., Smirnov A., Dubovik O., Welton E.J., Campbell J.R., Wang J., Christopher S.A.* Airborne Sun photometer measurements of aerosol optical depth and columnar water vapor during the Puerto Rico Dust Experiment and comparison with land, aircraft, and satellite measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD4/1–PRD4/23.
24. *Luo C., Mahowald N.M., del Corral J.* Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 15. P. AAC5/11–AAC5/21.
25. *Mahowald N.M., Zender C.S., Luo C., Savoie D., Torres O., del Corral J.* Understanding the 30-year Barbados desert dust record // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 107. N 21. P. AAC7/11–AAC7/16.
26. *Maria S.F., Russel L.M., Turpin B.J., Poreja R.J., Campos T.L., Weber R.J., Huebert B.J.* Source signatures of carbon monoxide and organic functional groups in Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-Asia) submicron aerosol types // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE5/1–ACE5/14.
27. *Martin B.D., Fuelberg H.E., Blake N.J., Crawford J.H., Logan J.A., Blake D.R., Sachse G.W.* Long-range transport of Asian outflow to the equatorial Pacific // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 2. P. PEM5/1–PEM5/18.
28. *Matsuki A., Iwasaka Y., Osada K., Matsunaga K., Kido M., Inomata Y., Trochkin D., Nishita C., Nezuoka T., Sakai T., Zhang D., Kwon S.-A.* Seasonal dependence of the long-range transport and vertical distribution of free tropospheric aerosols over East Asia: On the basis of aircraft and lidar measurements and isentropic trajectory analysis // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE31/1–ACE31/12.
29. *Matsumoto K., Uematsu M., Hayano T., Yoshioka K., Tanimoto H., Iida T.* Simultaneous measurements of particulate elemental carbon on the ground observation network over the western North Pacific during the ACE-Asia campaign // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE3/1–ACE3/6.
30. *Matsumoto K., Uyama Y., Hayano T., Tanimoto H., Uno I., Uematsu M.* Chemical properties and outflow patterns of anthropogenic and dust particles on Rishiri Island during the Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-Asia) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE34/1–ACE34/15.
- 30a. *Meshkidze N., Chameides W.L., Nenes A., Chen G.* Iron mobilization in mineral dust: Can anthropogenic SO<sub>2</sub> emissions affect ocean productivity? // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. N 21. P. ASC2/1–ASC2/5.
- 30b. *Meloni D., diSarra A., Fiocco G., Junkermann W.* Tropospheric aerosols in the Mediterranean: 3. Measurements and modelling of actinic radiation profiles // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 10. P. AAC6/1–AAC6/12.
31. *Moore K.G., II, Clarke A.D., Kapustra V.N., Howell S.G.* Long-range transport of continental plumes over the Pacific Basin: Aerosol physiochemistry and optical properties during PEM-Tropics A and B // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 2. P. PEM8/1–PEM8/27.
32. *Nishizawa T., Asano S., Uchiyama A., Yamazaki A.* Seasonal variation of aerosol direct radiative forcing

- and optical properties estimated from ground-based solar radiation measurements // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. N 1. P. 57–72.
33. *Osada K., Kido M., Iida H., Matsunaga K., Iwasaka Y., Nagatani M., Nakada H.* Seasonal variation of free tropospheric aerosol particles at Mt. Tateyama, central Japan // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE35/1–ACE35/9.
  34. *Papasiropoulos G., Martinsson B.G., Zahn A., Breninkmeijer C.A. M., Hermann M., Heintzenberg J., Fischer H., van Velthoven P.F.J.* Aerosol elemental concentrations in the tropopause region from intercontinental flights with the Civil Aircraft for Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container (CARIBIC) platform // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 23. P. AAC3/1–AAC3/14.
  35. *Parrish D., Law K.* Intercontinental Transport and Chemical Transformation (ITCT-Lagrangian – 2k4) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 15. P. 8–13.
  - 35a. *Rajeev K., Nair S.K., Parameswaran K., Raju C.S.* Satellite observations of the regional aerosol distribution and transport over the Arabian Sea, Bay of Bengal and Indian Ocean // *Indian. J. Mar. Sci.* 2004. V. 33. N 1. P. 11–29.
  36. *Reid J.S., Maring H.B.* Foreword to special section on the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD1/1–PRD1/2.
  37. *Reid J.S., Kinney J.E., Westphal D.L., Holben B.N., Welton E.J., Tsay S.-C., Eleuterio O.P., Campbell J.R., Christopher S.A., Colarco P.R., Jonsson H.H., Livingston J.M., Maring H.B., Meier M.L., Pilewskie P., Prospero J.M., Reid E.A., Remer L.A., Russel P.B., Savoie D.L., Smirnov A., Tarré D.* Analysis of measurements of Saharan dust by airborne and ground-based remote sensing methods during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD2/1–PRD2/27.
  38. *Reid E.A., Reid J.S., Meier M.M., Dunlap M.R., Cliff S.S., Broumas A., Perry K., Maring H.* Characterization of African dust transported to Puerto Rico by individual particle and size segregated bulk analysis // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 19. P. PRD7/1–PRD7/22.
  39. *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.H., 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. 9/1–9/22.
  40. *Rissman T.A., Nenes A., Seinfeld J.H.* Chemical amplification (or dampening) of the Twomey effect: Conditions derived from droplet activation theory // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. N 8. P. 919–930.
  41. *Schmid B., Hegg D.A., Wang J., Bates D., Redemann J., Russel P.B., Livingston J.M., Jonsson H.H., Welton E.J., Seinfeld J.H., Flagan R.C., Covert D.C., Dubovik O., Jefferson A.* Column closure studies of lower tropospheric aerosol and water vapor during ACE-Asia using airborne Sun photometer and airborne in situ and ship-based lidar measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE24/1–ACE24/22.
  42. *Sinha P., Hobbs P.V., Yokelson R.J., Blake D.R., Gao S., Kirchstetter T.W.* Distributions of trace gases and aerosols during the dry biomass burning season in southern Africa // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 17. P. ACH4/1–ACH4/23.
  43. *Stohl A., Eckhardt S., Forster C., James P., Spichtinger N.* On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACH6/1–ACH6/17.
  - 43a. *Stohl A., Huntrieser H., Richter A., Beirle S., Cooper O.R., Eckhardt S., Forster C., James P., Spichtinger N., Wenig M., Wagner T., Burrows J.R., Platt U.* Rapid intercontinental air pollution transport associated with a meteorological bomb // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3. P. 969–985.
  44. *Suzuki K., Nakajima T., Numaguti A., Takemura T., Kawamoto K., Higurashi A.* A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observations // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. N 2. P. 179–194.
  45. *Takemura T., Uno I., Nakajima T., Sano L.* Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 24. P. 11/1–11/4.
  46. *Uno I., Carmichel G. R., Streets D., Satake S., Takemura T., Woo J.-H., Uematsu M., Ohta S.* Analysis of surface black carbon distributions during ACE-Asia using a regional-scale aerosol model // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE4/1–ACE4/11.
  47. *Uno I., Carmichel G. R., Streets D. G., Tang Y., Yienger J. J., Satake S., Wang Z., Woo J.-H., Guttikunda S., Uematsu M., Matsumoto K., Tanimoto H., Yoshioka K., Iida T.* Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island station during the ACE-Asia experiment // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE36/1–ACE36/17.
  48. *Wang J., Christopher S.A., Reid J.S., 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. 11/1–11/15.
  49. *Wylie D.P., Hudson J.G.* Effects of long-range transport and clouds on cloud condensation nuclei in the springtime Arctic // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 16. P. AAC13/1–AAC13/11.
  50. *Zhao T.L., Gong S.L., Zhang X.Y., McKendry I.G.* Modeled size-segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia 2001: Implications for trans-Pacific transport // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 23. P. ACE33/1–ACE33/9.

**K.Ya. Kondratyev. From nano- to global scales: properties, processes of formation, and aftereffects of the atmospheric aerosol impacts. 6. Long-range transport and sedimentation processes.**

The processes of long-range transport and sedimentation of atmospheric aerosol are overviewed.