

## ДАЛЬНИЙ ПЕРЕНОС И ПРОЦЕССЫ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ: ОБЗОР

*доктор физ.-мат наук, профессор В.Ф. Крапивин<sup>1</sup>,  
кандидат техн. наук И.И. Потапов<sup>2</sup>,  
кандидат физ.-мат. наук В.Ю. Солдатов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова,  
Российская академия наук, Москва, Российская Федерация.  
E-mail: vkrpivin\_36@mail.ru*

<sup>2</sup>*Всероссийский институт научной и технической информации,  
Российская академия наук) Москва, Российская Федерация.  
E-mail: ipotapov37@mail.ru*

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. Таким же соображением определяется и лапидарность освещения проблем дальнего переноса продуктов сжигания биомассы и антропогенных выбросов на акваторию Индийского океана

Следует 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. Достоверная оценка путей распространения аэрозоля возможна при совместном использовании соответствующих моделей и данных спутникового мониторинга.

**Ключевые слова:** окружающая среда, климат, аэрозоли, дальний перенос, глобальные проблемы, моделирование, обзоры.

## LONG-RANGE TRANSPORT AND DEPOSITION OF AEROSOLS. OVERVIEW

*Krapivin V.F., Potapov I.I., Soldatov V.Yu.*

### 1. Введение

Сравнительно длительное (до 2-3 недель) 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 пы-

левых бурь в Сев. Африке и последующий трансатлантический перенос частиц, хотя иногда возникают и меридиональные потоки ПА, направленные в Зап. 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 [4, 60]).

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

Parrish и Law [91] кратко охарактеризовали содержание программы ИГСТ, главной целью которой являются исследования дальнего (межконтинентального) переноса и химической трансформации аэрозоля и оксидантов, а также их предшественников. Для получения с этой целью данных наблюдений было бы целесообразно воспользоваться аппаратурой, установленной на «лагранжевой» платформе, перемещающейся вместе с исследуемой воздушной массой. Практически осуществимы, однако, лишь «псевдолагранжевые» наблюдения с использованием одной или более самолетов-лабораторий, совершающих многократное зондирование определенной воздушной массы. Именно это составляет основную задачу программы ИГСТ, первый этап осуществления которой летом 2004 г. составили самолетные наблюдения в регионе Сев. Атлантики, сконцентрированные на изучении выбросов предшественников аэрозоля и тропосферного озона в Сев. Америке, включающем анализ их дальнего переноса и химической трансформации над акваторией Сев. Атлантики, а также последующего воздействия на атмосферу Зап. Европы.

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

С целью изучения закономерностей межконтинентального переноса загрязнений атмосферы Stohl и др. [110] 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 главный вклад в формирование Арктической дымки. Трассеры поступают с континента, где происходят выбросы, на другой континент в верхней тропосфере, как правило, – спустя примерно 4 суток. После этого могут поступать и трассеры, переносимые в нижней тропосфере.

Если принять характерное время жизни трассеров равным 2 суткам, 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 суткам, 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 медленнее, 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 Сев. Америки.

Предвычисление пространственного распределения пылевого (минерального) аэрозоля (ПА) 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, Люо и др. [24] выполняли сравнения наблюдаемой пространственно-временной изменчивости распределения аэрозоля с результатами численного моделирования с комбинированным применением модели MATSN 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 поблизости от Австралии расхождения вычисленного пространственного распределения аэрозольной оптической толщины 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 н около 6 суток.

Важные результаты, характеризующие влияние аэрозоля на атмосферу в процессе дальнего переноса получили Meloni и др. [82]. 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 теневым экраном (MFRSR) для измере-

ний 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  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ , что позволило оценить уровень образования  $\text{O}(\text{D})$ .

Meloni и др. [81] 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 АОР 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 (АОР 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 вычисления потока АПР среднеклиматический (вместо наблюдаемого) профиль концентрации аэрозоля, то это порождает изменения АПР, не выходящие за пределы  $\pm 3\%$  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 ( $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(\text{D})$ ), 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.

## 2. Африканский аэрозоль

Reid и др. [96] 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 часам. 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 неалюмо-силикатных 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 [99] 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 (ПА). Основной наземный пункт наблюдений располагался на о-ве Cabras (18,21° с.ш.; 65,60° з.д.), расположенном на расстоянии нескольких сотен метров от главного острова Пуэрто Рико. Здесь находились 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 Сев. 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 измерения

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. [98] в период полевого наблюдательного эксперимента PRIDE, осуществленного в регионе Пуэрто Рико, наблюдалось шесть событий поступления сахарского пылевого аэрозоля (ПА), 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 аэрозольной оптической толщины (АОТ) в средней части видимой области спектра варьировали от соответствующих условиям чистой морской атмосферы (0,07) до сильно запыленной атмосферы (АОТ > 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 АОТ до 0,8. Полученные в регионе Пуэрто Рико величины АОТ оказались несколько ниже наблюдававшихся 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, наблюдававшихся 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 флуктуации. 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. [98] 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 оседания и обу-

словенного 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 аэрозоля к изменчивости микроструктуры, химического состава и формы частиц аэрозоля. Что касается последнего фактора, то он мало существенен для таких частиц как гидратированные солевые или возникающие при сжигании биомассы, но имеет очень важное значение в случае 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. [96] 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 сферической 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 методик определения микроструктуры аэрозоля.

Livingston и др. [69] обсудили результаты самолетных наблюдений (21-го полета) аэрозольной оптической толщины 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) солнечного фотометра (AATS-6), снабженного системой автоматизированного наведения на Солнце. Наблюдения выполнены в период 28 июня - 24 июля 2000 г. в наблюдательно-го эксперимента PRIDE по изучению свойств пылевого аэрозоля, посту-

павшего в атмосферу в Сев. 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 (Erdeмли: 36°33' с.ш., 34°15' в.д.) в рамках программы AERONET глобальной сети наблюдений при помощи солнечных фотометров с целью восстановления аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы Kubılay и др. [64] 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 уровня) коэффициента Ангстрема; 2) наличием сильного рассеяния при значениях альбедо однократного рассеяния более  $0,95 \pm 0,03$  и при показателе преломления  $1,51 \pm 0,07$  на длине волны 0,44 мкм (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 0,44 мкм и  $0,0075$  на длине волны 0,87 мкм; 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 мкм 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 по-



глощения, 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 суток (повторность этих данных составляет 30 мин.) Wang и др. [123] восстановили поля аэрозольной оптической толщины атмосферы в регионе осуществления полевого эксперимента PRIDE ( $14^\circ$  с.ш. -  $26^\circ$  с.ш.;  $73^\circ$  з.д. -  $63^\circ$  з.д.), цель которого состояла в исследовании сахарского пылевого аэрозоля (ПА) и его дальнего переноса через Атлантический океан. Восстановление значений АОТ по данным спутниковых наблюдений уходящей коротковолновой радиации (УКР) в видимой области спектра осуществлено путем сравнений 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 0,55 мкм.

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 0,67 мкм 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 альбедо 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 [48] 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 в случае 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 в случае 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 цен-

тральном регионах Зап. Европы, обусловленное дальним переносом пылевого (минерального) аэрозоля (ПА), 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. [21], 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 суток отчетливо продемонстрировал, что источником ПА была Сахара при поступлении аэрозоля в Европу через 1-2 суток после его выбросов. Полученные по данным лидарных зондирований значения отношения деполяризации, экспоненты Ангстрема и отношения extinction 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. [37] предприняли численное моделирование выбросов, дальнего переноса сахарского пылевого аэрозоля через Атлантический океан и осадения 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 аэрозольной оптической толщины (АОТ), наблюдаемого в Пуэрто Рико, практически не зависит от времени выбросов ПА в регионе Сахары. Это означает, что в атмосфере Сев. 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 [48], привело к оценке выбросов частиц ПА размером меньше 10 нм в Африке и Аравии в июле 2000 г., составляющей 214 Тг. При этом 19 % массы аэрозоля претерпевает перенос на запад от Африки (над Сев. 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 Сев. Атлантики дальний перенос сахарского пылевого аэрозоля к Карибскому региону, изучены достаточно хорошо. Холодный и влажный воздух, поступающий с северо-востока к Сев. 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 (SAL). 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 происходит 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. [37,38] 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 Южн. Америки был обнаружен даже в пограничном слое атмосферы. Данные спутниковых самолетных и наземных наблюдений, выполненных в период 28 июня - 24 июля 2000 г. в регионе Пуэрто Рико и включающие 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 суток 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 Сев. 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. [71] 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. Дефи-

цит 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. [31] восстановили средние для всей толщи атмосферы значения альbedo однократного рассеяния (АОР) и индикатрисы рассеяния минерального сахарского аэрозоля. Наблюдения были выполнены в июле и августе 1998 г. в форте Джефферсон, на о-ве Драй Тортугас ( $24^{\circ}37,7'$  с.ш.;  $82^{\circ}52,5'$  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 АОР оценена как равная 0,02. Восстановленные значения АОР 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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , 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. [104] программа наблюдений включала определение вертикальных профилей (в нижней тропосфере) температуры и относительной влажности воздуха, концентрации сернистого газа ( $\text{SO}_2$ ), озона ( $\text{O}_3$ ), 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 Южн. 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  $\text{млн}^{-1}$ ; 369 и 463  $\text{млрд}^{-1}$ ; 1753 и 1758  $\text{млрд}^{-1}$ ; 79 и 88  $\text{млрд}^{-1}$ ; 2,6 и 5,5  $\text{мкг/м}^3$ ; 13,2 и 14,3  $\text{мкг/м}^3$ ). Это объясняется влиянием интенсивного сжигания биомассы в Замбии и окружающих ее районах. В секторе Южн. Африки максимумы средней концентрации  $\text{SO}_2$ , сульфатного аэрозоля и  $\text{CN}$  (составившие, соответственно, 5,1  $\text{млрд}^{-1}$ ; 8,3  $\text{мкг/м}^3$  и 6400  $\text{см}^{-3}$ ) 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  $\text{млрд}^{-1}$ ; 76  $\text{млрд}^{-1}$  и 310  $\text{млрд}^{-1}$ , соответственно), которые были близки 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:  $386 \pm 8 \text{ млн}^{-1}$  ( $\text{CO}_2$ );  $261 \pm 81 \text{ млрд}^{-1}$  ( $\text{CO}$ );  $2,5 \pm 1,6 \text{ млрд}^{-1}$  ( $\text{SO}_2$ );  $64 \pm 13 \text{ млрд}^{-1}$  ( $\text{O}_3$ );  $2,3 \pm 1,9 \text{ мкг/м}^3$  (аэрозольный черный углерод);  $6,2 \pm 5,2 \text{ мкг/м}^3$  (аэрозольный органический углерод);  $26,0 \pm 4,7 \text{ мкг/м}^3$  (суммарная концентрация аэрозоля);  $0,4 \pm 0,1 \text{ мкг/м}^3$  (калевые частицы). Эти значения сравнимы с соответствующими 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 ( $\sim 0,5$  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 Paraspiropoulos и др. [90] 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 измерения 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 сжигание 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 тропопазузы.

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 в случае калия при очень низкой концентрации в период июля-января 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.

### 3. 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 возросшего населения является значительное усиление загрязнения окружающей среды, включая атмосферу, где осуществляется сравнительно ринга выноса загрязнений с континента Азии на акваторию Тихого океана 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 Зап. Европы и даже из Сев. 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 Сев. Америки, составляющее иногда всего несколько суток.

Martin и др. [73] 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 НАСА в рамках полевого наблюдательного эксперимента PEM West-B с целью мониторинга(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 (МГК) как метановые углеводородные и углеводородные соединения, а также окись углерода были получены при помощи аппаратуры, установленной на принадлежащих НАСА самолетах-лабораториях DC-8 и P-3В, 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 субтропическом тихоокеанского антициклона с последующим переносом на юго-запад под воздействием пассатных ветров в нижней тропосфере. Время пе-

переноса частиц воздуха, достигавших западного сектора Тихого океана вблизи побережья Новой Гвинеи, составляло 20-25 суток. По-видимому, аналогичные («зеркально отраженные») процессы дальнего переноса проявляются и в южном полушарии, особенно при переносе продуктов сжигания биомассы в Южн. Африке и Южн Америке.

Осуществленные за последние два десятилетия полевые наблюдательные эксперименты в удаленных регионах земного шара обнаружили наличие в атмосфере этих регионов присутствия 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 РЕМ-Tropics (РЕМТ) самолетных наблюдений состава атмосферы над тропиками Тихого океана были выполнены в 1996 г. (РЕМТ-А) и в 1999 г. (РЕМТ-В).

Выполненный Моог и др. [83] 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 РЕМТ-А шлейфы загрязнений наблюдались преимущественно в южном полушарии, тогда как во время РЕМТ-В 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 саже подобных компонентов со свойствами летучести.

Исследования зависимости летучести от размеров частиц привели к выводу о присутствии аммония в частицах аэрозоля. Определение альbedo однократного рассеяния  $\tilde{\omega}$  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 морском пограничном слое атмосферы (МПСА). Анализ вертикальных профилей аэрозоля выявил наиболее плотные шлейфы в сухом воздухе (при относительной влажности меньше 40 %) при меньших значениях  $\tilde{\omega}$ , чем в МПСА.

Тихоокеанская исследовательская миссия РЕМ-Tropics А 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, отобразившие существенное загрязнение «фоновой» атмосферы над океаном в южном полушарии, особенно в тропиках Атлантического океана. В частности, в субтропиках южного полушария наблюдался протяженный (>15000 км) шлейф меандров СО вокруг земного шара, постепенно распространяющийся вдоль круга широты  $\sim 20^\circ$  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. [34] предприняли численное моделирование для двух ситуаций, включающих данные PEM-Tropics A и B за периоды 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 позволила восстановить картину эволюции шлейфа в целом. Формирование шлейфа в южном полушарии определяется аккумуляцией загрязнений вблизи подстилающей поверхности в Африке и Южн. 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. Аналогична 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 Сев. 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. [53] 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 MATSN 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 Сев. Америки эта доля достигает максимума при значениях времени переноса порядка 8 суток в верхней тропосфере и на 6 суток 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 суток. 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 координатами (43,8° - 53,3° с.ш.) × (115,3° - 124, 7° з.д.). Степень корреляиро-



ванности 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. [74] 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, поступившего 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 Нагоей 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. [68] 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. тонн 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. [35] 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 реалистичским. 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. Фербенка на Аляске), Cahill [30] получил информацию о микроструктуре и химическом составе аэрозоля (химический анализ обеспечивал определение содержания 42 элементов от натрия до винца с помощью методики синхротронной рентгеновской флуоресценции). Анализ элементного состава аэрозоля в сочетании с ре-

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. [120] описали модель CFORS дальнего переноса малых газовых компонентов (МГК) 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 [120] 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. [76] выполнили регулярные наблюдения различных характеристик атмосферного аэрозоля, включая содержание элементного углерода (ЕС). В работе [76] 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.

Упо и др. [119] выполнили численное моделирование дальнего переноса и трансформации свойств аэрозоля с использованием региональной модели CFORS с целью воспроизведения данных наблюдений концентрации черного углерода (BC) по программам VAMAP и APEX на пяти удаленных островах Японского архипелага в период осуществления полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia весной 2001 г. Предполагается, что BC-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 поверхность океана (суши).

В работе [119] обсуждены результаты двух численных экспериментов: 1) контрольного, в котором учтены все выбросы BC; 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  $25^{\circ}$  с.ш.,  $115^{\circ}$  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 BC при различном режиме атмосферной циркуляции. Главные особенности синоптической ситуации наблюдений (Rishiri и Sado) относятся главным образом к высотам меньше 2 км, а вклад продуктов сжигания биомассы в формирование BC оказался меньше 20 %. В случае 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.

Takemura и др. [115] применили комбинированную модель SPRINTARS дальнего переноса аэрозоля и переноса излучения для воспроизведения крупномасштабного трансатлантического переноса продуктов пылевых бурь в Азии в Сев. Америке применительно к условиям в период весенних сезонов 2001 и 2002 гг. Расчеты показали, что около 10-20 % азиатского ПА, поступающего в регион Японии, достигает Сев. 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 (OC) с использованием ИК Фурье-спектрометра (FTIR) для регистрации спектров пропускания. Спектральный анализ выявил присутствие таких компонентов как силикаты, карбонаты, алкен, ароматические соединения, алкоголи, карбонил, амин и органосульфатные группы. Для анализа элементного состава аэрозоля использована методика рентгеновской флуоресценции. Измерения массовой концентрации OC 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. [72] рассмотрение соотношений между значениями концентрации окиси углерода и OC (наклона прямой, соответст-

вующей зависимости CO/OC) позволило установить наличие 10 категорий воздушных масс, характеризующихся специфическими данными инвентаризации выбросов с азиатского континента. Данные о наклоне CO/OC использованы для распознавания источников выбросов и их влияния на состав органических компонентов аэрозоля. 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  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $nss-Ca^{2+}$  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. [77] результаты свидетельствуют о сосуществовании  $nss-SO_4^{2-}$  и  $NH_4^+$  в мелкодисперсном аэрозоле, а  $NO_3^-$  и  $nss-Ca^{2+}$  - в крупнодисперсной фракции аэрозоля.

Возникающие на континенте ионы  $NO_3^-$  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  $nss-SO_4^{2-}$ , появляются первыми, а за ними следуют абсорбировавшие

$NO_3^-$  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. [89] выполнили наблюдения микроструктуры аэрозоля и содержания озона в период с января 1999 г. по ноябрь 2002 г. на ст. Murodo-

daira (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 час - 05 час по местному времени), которые свидетельствуют о слабой изменчивости концентрации тропосферного озона (дисперсия составляла 4 млрд<sup>-1</sup>) при средней концентрации O<sub>3</sub> 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 слабой 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 SO<sub>2</sub> 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 значительной 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 трех часов. Периодом особо интенсивной активности явления «коза» был 2001 г., когда события «коза» возникали, начиная с января, и продолжались до начала июля.

Schmid и др. [102] выполнили названное «замкнутым» анализом сравнение определенного по данным наблюдений общего ослабления коротковолновой радиации на длине волны 550 нм за счет аэрозоля, характеризуемого 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 методов) вертикальных профилей  $\sigma_{\text{ep}}$  обнаружало вполне удовлетворительное согласие при наличии расхождений абсолютных значений  $\sigma_{\text{ep}}$ , которые зависели от высоты. Значения  $\sigma_{\text{ep}}$ , вычисленные по измеренной 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 аэрозодем, с измеренными при по-

мощи солнечного фотометра выявило, что первые занижены примерно на 13 % по отношению к 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. [95] 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  $630 \pm 50 \text{ нм}$ ) аппаратуры AVHRR для экватории в пределах  $25^\circ \text{ ю.ш.} - 25^\circ \text{ с.ш.}; 40^\circ \text{ в.д.} - 100^\circ \text{ в.д.}$

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 удаленности 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 регион Бенгальского залива и в тропиках Индийского океана существенно сказывается поступление аэрозоля с индийского субконтинента и из юго-восточной 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  $5^\circ \text{ ю.ш.} - 10^\circ \text{ с.ш.}$  Гигантский шлейф аэрозоля (при АОТ более 1,0) в тропиках Индийского океана в сентябрь-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 бо-

ле 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. [67] 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 ( $35,41^\circ$  в.д.;  $32,99^\circ$  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 Вост. 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 в случае 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), Wylie и Hudson [124] 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 ЯК и 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 суток 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.

#### 4. 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. [127] 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 [127] 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 тонн/км<sup>2</sup> (их экспорт составлял, однако, лишь 8, 42 тонн/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. [45] 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 атмо-

сферы. В работе [45] 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  $k_1 = 0,0012221g(z_0) + 0,003906$ ;  $k_2 = 0,009$ . Здесь  $z$  – высота,  $L$  – параметр устойчивости Обухова;  $u^*$  – динамическая скорость. Gallagher и др. [15] подчеркивали 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). Noppel и др. [54] 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 [54] 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 радиусом 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.

Учет в моделях крупно-масштабного переноса аэрозолей процессов их осаждения, как показали Zlatev и др. [128], является важной составляющей их точности. Для процесса осаждения в Эйлеровской модели LRTAP (Long-Range Transport of Air Pollution) использована линейная аппроксимация:  $H_j = (\kappa_{j,1} + \kappa_{j,2})c_j$ , где  $c_j$  – концентрация аэрозоля  $j$ -го типа,  $\kappa_{j,1}$  и  $\kappa_{j,2}$  – коэффициенты скоростей сухого и влажного осаждения, соответственно, рассчитанные по формулам:  $\kappa_{j,1} = g_{j,1} / H_{mix}$ ,  $\kappa_{j,2} = g_{j,2} / H_{mix}$ . Здесь  $g_{j,1}$  – скорость сухого осаждения аэрозоля  $j$ -го типа,  $H_{mix}$  – высота перемешивания атмосферы,  $I$  – интенсивность дождя,  $g_j$  – безразмерный коэффициент вымывания аэрозоля  $j$ -го типа.

## 5. Численное моделирование дальнего переноса аэрозоля

### *Соотношение масштабов физических процессов перемешивания атмосферы и выбор типа модели*

Опыт многих исследований по моделированию атмосферных процессов переноса загрязнителей говорит о необходимости классификации этих процессов в соответствии с соотношением пространственных и временных масштабов [19, 40]. Необходимость такой классификации обоснована во многих международных программах, таких как «Глобальные изменения», «Программа по химии глобальной атмосферы (IGAC), «Моделирование глобальных биогеохимических круговоротов» (MBGC) и др.. Потребность и даже необходимость классификации физических процессов перемешивания атмосферы диктуется параметрами систем измерения (мониторинга) характеристик атмосферы, требованиями к простоте моделей переноса аэрозолей и газов в атмосфере, а также ограничениями имеющихся и формируемых баз данных. Взаимосвязь этих причин приводит к достаточно естественной градации пространственных масштабов, обеспечивающей эффективную параметризацию процессов распространения атмосферного загрязнения и согласующейся с международными стандартами. В настоящее время наиболее распространенным является стандарт GEODAS, устанавливающий 9 уровней пространственного разрешения от одного градуса до полсекунды по широте и долготе. При этом обеспечивается 7 масштабов картографического воспроизведения данных (табл. 1).

Таблица 1

#### **Перечень характерных для развитых систем мониторинга масштабов представления картографической информации.**

Пространственное разрешение, км	Масштаб	Пространственное разрешение, км	Масштаб
0,5x0,5	1:1250	40x40	1:50000
1x1	1:2500	250x250	1:250000
5x5	1:10000	500x500	1:625000
10x20	1:25000		

Получение данных в указанных масштабах возможно путем синтеза спутниковых данных и данных национальных систем мониторинга. Последние важны, так как они конкретизируют предметную область и выделяют характерные для данного региона приоритеты. Например, для развитых стран важны оперативные оценки качества атмосферного воздуха в зонах мегаполисов и крупных промышленных предприятий. Для развивающихся стран принципиальными являются контроль трансграничных переносов загрязнителей и оценка возможного изменения атмосферного воздуха в связи со строительством промышленных предприятий. Приведенное в табл. 1 соотношение масштабов полностью отвечает большинству ситуаций мониторинга атмосферы.

Наряду с задачей выбора масштабов пространственного разрешения стоит задача их согласования с масштабами времени. Эта задача важна для формирования структуры математических моделей, обеспечивающих опи-

сание динамики загрязнителей в атмосфере. Согласно предварительным оценкам Международной Геосферно-Биосферной Программы существует шкала переходов во временном и пространственном измерениях между сложностью и глубиной иерархической структуры учитываемых в модели связей. Развивавшиеся до настоящего времени модели практически не учитывали этого положения, а потому часто оказывались неприменимыми к изучаемому природному объекту. Предложенная Nitu et al. [85,86] согласованная шкала дискретизации природных явлений для целей использования при создании моделей, позволяет осуществить классификацию природных явлений с отражением их иерархической подчиненности по шкалам времени и пространства. Эта классификация основывается на фундаментальном понятии иерархического порядка в общей теории систем. Согласно этой теории поведение любой сложной системы определяется триадой частот ее изменчивости, обеспечивающей согласование между связностью и устойчивостью системы. Такой взгляд позволяет исключить из рассмотрения излишние детали в структуре модели по априорно установленной шкале времени или установить минимальный временной шаг по данным о пространственной шкале. Например, если в модели шаг по времени выбран равным одному году, то нет смысла учитывать в ней такие процессы как атмосферная турбулентность. Другими словами, в этом случае атмосферу можно с уверенностью описывать точечной моделью и все попытки строить сложные конструкции описания процессов атмосферного движения не смогут повысить достоверность модели, но приведут к росту ее сложности.

Более строгое теоретическое обоснование данного подхода к выбору структуры модели дает совместное описание динамических процессов, имеющих разные характерные масштабы времени, порождает в математическом описании параметры, относящиеся к разным процессам и сильно (на порядки) отличающиеся друг от друга. Это позволяет разбить рассматриваемые процессы на три группы:

- процессы, относящиеся к выбранному масштабу времени;
- процессы, которые по отношению к выбранному масштабу времени можно рассматривать как находящиеся в динамическом равновесии (квазистационарные) и для которых можно ввести на этом основании некоторую параметризацию (быстропротекающие процессы);
- процессы, которые можно рассматривать по отношению к выбранному масштабу времени как не изменяющиеся, т.е. как статические (медленно текущие процессы).

В качестве примера приведем математическую модель биогеохимического круговорота углерода, который включает в себя как процессы геологического масштаба времени, так и очень быстрые процессы (фотосинтез, дыхание). Если целью построения модели является изучение динамики содержания углекислого газа в атмосфере на протяжении нескольких десятков лет, то следует исключить из рассмотрения геологические процессы с характерными временами в миллионы лет и параметризовать процессы с характерными временами в сутки, например, процессы образования живой биомассы при фотосинтезе [11]. В общем возникающие здесь задачи еще не решены и не создан конструктивный механизм согласования пространственно-временных шкал. Каждый исследователь следует своим принципам отбора элементов модели для их последующей реализации. К сожалению, именно на этом этапе возникают неустраняемые в дальнейшем отклонения модели от реальности.

Характерные временные интервалы изменчивости для большинства природных процессов достаточно хорошо известны. Укажем лишь некоторые из них:

- процессы осаждения – минуты, часы;
- транспирация растений – часы, дни;
- формирование биомассы растений – дни, месяцы;
- изменения в сообществах растений и животных – месяцы, годы;
- формирование почвы – годы, столетия;
- геоморфологические процессы – века, тысячелетия.

Поэтому, синтезу системы моделей должна предшествовать систематизация временных шкал принимаемых к рассмотрению процессов. В результате удастся расставить приоритеты среди моделей и их блоков и тем самым определить структуру программного обеспечения.

Таблица 2

**Фрагмент шкалы для разработки структуры модели динамики атмосферного загрязнения**

Пространственное разрешение модели	Рекомендуемые для учета в модели процессы
Индустриальный регион, ландшафт, мегаполис, город (до 50 км).	Использование моделей Гауссовского типа. Сжигание отходов, сведение лесов и реконструкция земных покровов, загрязнение питьевой воды и водоемов, индустриальные выбросы загрязнителей, загрязнение почвы, вымывание загрязнителей осадками, производственные процессы, медико-биологическая оценка территории, разбиение атмосферы на много уровней.
Крупный регион, область, страна (до 1000 км).	Использование моделей Лагранжа и Эйлера. Крупномасштабная циркуляция атмосферы с выделением верхней и нижней атмосферы, ирригационные и другие водные системы, интегральные площадные источники загрязнения биосферы, биогеохимические круговороты, эрозия, крупные пожары, опустынивание и заболачивание, сукцессия земных покровов, речной сток, взаимодействия на шельфах.
Континент, весь Земной шар (свыше 1000 км)	Использование блочных моделей. Усредненные характеристики атмосферы и климата, циркуляция океана, взаимодействия в системе «атмосфера-суша-океан», био-геохимические циклы, сукцессия крупных лесных массивов.

В связи со сложностью параметризации атмосферных процессов количество моделей динамики атмосферы многообразно. Тип модели сильно коррелирует с пространственным масштабом. Учет в модели тех или иных процессов физического перемешивания атмосферы совместно с химическими процессами определяется уровнем заложенной в ней точности. В развитых моделях в зависимости от пространственного масштаба учитываются процессы физической трансформации загрязнителей, начиная от микропроцессов в облаках и кончая крупномасштабными движениями атмосферы. В зависимости от этого модели делятся на дисперсионные, гауссовские, эйлеровские и лагранжевы. Внутри этой градации имеется иерархия моделей, учитывающих или не учитывающих вертикальную структуру атмосферы, взаимодействие атмосферы с поверхностью земли (суши и во-

ды), обменные процессы между облаками и вертикальные потоки воздуха в зависимости от соотношения синоптических и физических параметров атмосферы. Одним из примеров подобных исследований является серия версий модели ICLIPS с пространственным разрешением 500x500 км и временным шагом 1 год [Integrierte Abschätzung von Klimaschutzstrategien [10, 118]. Более точная модель ECMWF (European Centre for Medium Range Weather-Forecast) имеет пространственное разрешение 150x150 км и шаг по времени 6 часов [49].

Дать однозначную связь между масштабностью модели и ее внутренней инфраструктурой невозможно без учета других характеристик модели. Поэтому, приведенные в табл. 2 оценки, следует рассматривать как рекомендательные, нацеленные на ориентировку разработчика модели и дающие ему возможность оценить целесообразность включения в модель тех или иных компонентов.

### ***Взаимосвязь вида модели и типа аэрозоля***

Формирование полей загрязнения атмосферы из природных и антропогенных источников в значительной степени зависит от физических характеристик загрязнителей. Анализу возникающих здесь задач посвящены разделы физики облаков и осадков, где детально изучаются механизмы протекания микрофизических и макрофизических процессов образования и роста облаков загрязнителей. Ясно, что для полного понимания процессов образования облаков и осадков необходимо рассматривать все динамические микрофизические процессы в комплексе. Эти процессы определяются сочетанием физико-химических параметров самой атмосферы и загрязнителей, которые имеют широкий диапазон изменения таких характеристик как вес, размер, форма, фазовое состояние и электрический заряд. Например, принятая Национальным Агентством США по окружающей среде классификация загрязнителей атмосферы включает три базовых класса и восемь подклассов. Эта классификация достаточна для использования в моделях, не учитывающих размеры аэрозолей и частиц и не включающих процессы на ионном уровне. Существующая классификация частиц по размерам охватывает диаметры частиц от 0,0001 микрона до 1 см. В рамках этого диапазона твердые частицы с диаметрами от 0,0001 до 1 микрона рассматриваются как компоненты дыма, жидкие частицы являются элементами тумана. Частицы, превышающие в диаметре 1 микрон интерпретируются как пыль или брызги. В зависимости от размера меняется и роль частиц в динамических процессах атмосферного загрязнения. Частицы с размерами менее 1 микрона образуют смог, десятки микрон – облака и туман, сотни микрон – дымку и изморось, тысячи микрон – дождь. Такая классификация упрощает выбор структуры модели, если определен характер процесса загрязнения атмосферы. В более сложной ситуации, когда спектр загрязнений достаточно широк, разграничение загрязнителей по их физическим и химическим характеристикам позволяет синтезировать сложную модель как совокупность иерархически подчиненных частных моделей и тем самым упрощать процедуру расчета динамических характеристик загрязненной атмосферы [18].

Физические характеристики атмосферных загрязнений включают также скорость гравитационного оседания, время жизни в атмосфере, фазовое состояние. Некоторые из газообразных компонентов воздуха, такие как  $N_2$ ,  $O_2$ , He, Ne, Ar, Kr, Xe и  $H_2$  имеют чрезвычайно продолжительное время жизни.

Другие, как например,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  имеют время жизни от нескольких до десятков лет. Такие же газы как  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{I}_2$  обладают временем жизни в атмосфере всего лишь несколько дней или недель. В зависимости только от этой характеристики для описания динамики различных газов в атмосфере можно выбирать адекватную модель с минимальными требованиями к базе данных [2, 85].

Для выбора типа модели динамики загрязненной атмосферы важным является такой параметр как размер частицы загрязнителя. Указанные выше градации лишь частично охватывают возможную классификацию аэрозолей. К этому необходимо добавлять информацию об источнике загрязнителя, которая доопределяет параметрическое пространство модели. Знание причины возникновения ситуации загрязнения облегчает выбор типа модели. Конечно, классификация и типизация аэрозолей и газов может быть более детальной. Одних типов дыма насчитываются десятки. Размеры частиц дыма могут принимать значения 1-0,01 (мкм) для смоляного дыма, 0,15-0,01 для табачного дыма и т.д. Здесь в модели уже необходимо отражать микропроцессы, связанные с движением этих частиц. Например, средний пробег частицы углеродистого дыма за  $t$  секунд равен  $0,00068t/D$  см. Наполнение базы знаний системы мониторинга такими зависимостями является одной из приоритетных проблем экоинформатики [14].

При моделировании рассеивания газов и частиц в атмосфере важно знать различие между загрязненной и незагрязненной атмосферой. Также всегда необходимо иметь в виду вертикальную неоднородность атмосферы. В глобальном масштабе формирование качества атмосферного воздуха зависит от всех уровней атмосферы: тропосферы, стратосферы, хемосферы и ионосферы. Если, например, рассматривается проблема влияния авиации на атмосферу, то необходимо учитывать взаимодействие тропосферы и стратосферы. При изучении потоков загрязнителей из наземных источников в первую очередь рассматривают движение нижней атмосферы. Конечно, здесь важным является пространственный масштаб, а следовательно, и временной промежуток реального нахождения загрязнителя в атмосфере. Известные данные для чистой атмосферы следует использовать при контрольных имитационных экспериментах.

### ***Пассивное и активное распространение загрязнителей в атмосфере***

Выброшенный в атмосферу загрязнитель подвергается воздействию силы гравитационного оседания, турбулентному перемешиванию, ветровому переносу и вымыванию дождем. Совокупность этих воздействий определяет характер поведения облака загрязнителя, вид и форму потока загрязнителя, а также пространственную структуру распределения плотности загрязнителя над данной территорией.

Дым и другие атмосферные аэрозоли подвержены воздействию гравитационных сил и взаимодействуют с солнечным излучением, газами и ионами. В приземном слое к этому взаимодействию добавляются различные эффекты влияния земной поверхности (растительного покрова, почвы, шероховатости поверхности суши и взволнованность водной поверхности).

Роль седиментации проявляется в большей степени для достаточно крупных частиц, по диаметру много больших субмикронных размеров. Мелкие частицы оседают значительно медленнее их переноса движущейся атмосферой и поэтому во многих моделях этой вертикальной составляющей пренебрегают. Заметим, что для процесса седиментации важен не столько диаметр частицы, сколько ее плотность. Например, сажевые струк-

туры с низкой эффективной плотностью и большим аэродинамическим сечением легко переносятся ветром и оседают значительно медленнее, чем компактные частицы той же массы. В среднем скорость выпадения частиц с диаметром от 0,1 до 1 мкм равна 0,001 м/с, что пренебрежимо мало по сравнению со скоростью атмосферного переноса.

В сильно загрязненных местах можно наблюдать процесс фотофтороза, состоящий в подвеме частиц из-за неоднородного нагрева солнечным светом. Однако, возможность этого явления и его характеристики слабо исследованы, поэтому в первом приближении многие авторы им пренебрегают. Тем более, что на интервалах времени больших суток в силу броуновского движения нерегулярность нагрева частиц уменьшается. Наконец, отметим такой физический процесс как коагуляция частиц, состоящая в захвате одних частиц другими из-за различных скоростей движения. В этом случае частицы могут слипаться или отгаликаться, так что многообразие ситуаций их взаимодействия определяет форму облака загрязнителя и может удлинять время их жизни в атмосфере.

Весьма важным процессом удаления загрязнений из атмосферы является их вымывание. Здесь возможны две ситуации. Одна связана с простым захватом частиц каплями дождя, другая – с так называемым процессом нуклеации. Этот процесс связан с конденсацией перенасыщенного водяного пара на поверхности аэрозольных частиц, что приводит к образованию капель воды или кристалликов льда с последующим выпадением на поверхность земли. Поэтому одним из путей уточнения моделей динамики аэрозолей в атмосфере является включение в них блока параметризации круговорота воды в различных ее фазовых состояниях.

Окончательная оценка времени пребывания данного загрязнителя в атмосфере осуществляется на основе соответствующих моделей. Наиболее полно и подробно эта оценка дается в работе [93]. Здесь дано описание метеорологических особенностей распространения загрязнителей в атмосфере, проведен анализ масштабов переноса и рассеивания загрязнений, построены предсказывающие концентрацию загрязнителей модели, описаны алгоритмы параметризации процессов формирования облаков и струй загрязнителей, приведены соотношения для описания вертикальной структуры атмосферы. Анализируются компоненты радиационного баланса Земли и указываются простейшие характеристики взаимосвязей между давлением, ветром, температурой и влажностью. Классификация состояний атмосферы на нейтральную, неустойчивую и устойчивую осуществлена по шкале вертикального градиента температуры, что значительно упрощает процесс параметризации вертикальных градиентов и скоростей. Также определена шкала атмосферных явлений в диапазоне времени от 1 сек. до 1 месяца и при вариации пространственных масштабов от 20 км до 10 тыс. км. В рамках этой шкалы анализируются процессы переноса и рассеяния загрязнителей атмосферы от точечных, движущихся и занимающих конечную территорию источников.

В общем виде изменение концентрации любого загрязнителя  $C$  опишем уравнением:

$$\frac{\partial C(t, \phi, \lambda, h)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{V}C = \nabla D \cdot \nabla C + R \quad (1)$$

где  $\vec{V}(V_\phi, V_\lambda, V_h)$  - скорость ветра,  $\phi$  - широта,  $\lambda$  - долгота,  $h$  – высота,  $t$  - время,  $D$ - коэффициент молекулярной диффузии,  $R$  – изменения за счет атмосферной турбулентности, эмиссии и перемешивания.



Детализация компонентов уравнения (1) требует анализа частных процессов атмосферного распространения загрязнителей и построения соответствующих блоков общей модели (динамических, корреляционных, вероятностных, системных, эволюционных и т.д.). В качестве примеров таких блоков рассмотрим параметризацию, которые успешно используются в моделях ICLIPS, ECMWF и др.

Вопросы химического взаимодействия загрязнителей атмосферы также важны и их учет при моделировании еще более усложняет исследование. Поэтому большинство моделей распространения загрязнителей в атмосфере априори предполагают, что все компоненты являются взаимно нейтральными. Однако, в некоторых случаях параметризация процессов химического превращения загрязнителей становится возможной благодаря применению статистических характеристик химических реакций или путем описания закономерностей фазовых переходов. В частности, достаточно эффективной оказалась простая модель превращения  $\text{SO}_2$  в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [62]:

$$d[\text{H}_2\text{SO}_4]/dt = d[\text{SO}_4]/dt = W[\text{SO}_2]$$

где  $W=0,1$  %/сут в дневное время и  $0,01$ %/сут ночью.

Множество различных моделей создано для описания процесса осаждения загрязнителей. Так, например, Sinik et al. [105] предложили несколько параметризаций для коэффициента вымывания аэрозолей из атмосферы:

$$r = 10^{-4} I^{1/2}; \quad r = \theta \cdot I^a; \quad r = -C^{-1} dC/dt; \quad r = 3,3 \cdot 10^{-4} I^{0,9};$$

где  $I = RR/(24N)$  – интенсивность осадков (мм/час),  $RR$  – количество осадков в месяц (мм),  $N$  – число дней с осадками,  $\theta$  и  $a$  – параметры.

Широко используется диффузионное уравнение

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_\phi \frac{\partial C}{\partial \phi} + V_\lambda \frac{\partial C}{\partial \lambda} + V_h \frac{\partial C}{\partial h} = -\frac{\partial}{\partial \phi}(\overline{V_\phi C}) - \frac{\partial}{\partial \lambda}(\overline{V_\lambda C}) - \frac{\partial}{\partial h}(\overline{V_h C}) \quad (2)$$

Если предположить, что в (2) адвекция преобладает над диффузией в направлении  $h$ , т.е.  $\partial(\overline{V_h C})/\partial h \ll V_h \partial C/\partial h$ , то интегрирование (8.2) по  $\lambda$  дает:

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial t} + V_h \frac{\partial C_\phi}{\partial h} + V_\lambda \frac{\partial C_\phi}{\partial \lambda} = -\frac{\partial}{\partial \lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{V_\lambda C} d\phi,$$

где

$$C_\phi = \int_{-\infty}^{\infty} C d\phi$$

В результате такого преобразования задача сводится к двумерной.

Chobadian et al. [32] предложили две формулы для оценки глубины перемешанного слоя атмосферы, что важно при определении вертикальной структуры модели:

$$H = 8,8x_1U_a^{-1}\Delta\theta, \quad H = \frac{U_*}{U_a} \left\{ \frac{x_1|\theta_1 - \theta_2|}{|\Delta\theta / \Delta x_3|} \right\}^{1/2},$$

где  $x_1$  – скорость смещения относительно поверхности суши (м/с),  $\Delta\theta$  – вертикальный градиент потенциальной температуры в инверсионном слое ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_*$  – скорость трения над подветренной поверхностью,  $\theta_1$  – нижний уровень потенциальной температуры над источником загрязнения атмосферы ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $|\Delta\theta/\Delta x_3|$  – абсолютное значение скорости движения над источником.

Стремление к упрощению параметрических описаний отдельных подпроцессов динамики загрязнений атмосферы приводит многих авторов к созданию достаточно простых и эффективных моделей, требующих небольшой информационной базы. Большое число работ посвящено классификации ситуаций, возникающих в реальной атмосфере при выбросах загрязнителей из точечных источников (трубы предприятий и т.п.). Достаточно полную классификацию можно найти в работе [103], где даны 10 градаций в поведении струи загрязнителя (дыма) в окрестности изолированного точечного источника (трубы): петлеобразное, винтовое, флагообразное, оседающее, расширяющееся, разбухающее, разрывающееся, бифуркационное, окуривающее и поднимающееся. В каждом из этих случаев возможно применение гауссовской модели с минимальной входной информацией. Системе мониторинга необходимо лишь уметь различать эти ситуации, основываясь на измерениях метеопараметров. Например, петлеобразная форма струи загрязнителя может возникать из-за шероховатости поверхности (высокие здания, холмистая местность) в ясную солнечную погоду. Частицы дыма движутся по ветру зигзагообразными путями внутри расширяющейся и постепенно оседающей струи. Разрывающаяся струя типична для второй половины дня летом, когда атмосфера хорошо прогрета и конвективные движения воздуха преобладают.

Один из блоков модели атмосферного загрязнения является описание процесса эмиссии загрязнителя в окружающую среду. В большинстве случаев используется гауссовский закон:

$$C(r, h) = f(h) \frac{M}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-r^2 / (2\sigma_r^2)\right), \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние до центра струи загрязнителя,  $\sigma_r$  – горизонтальный размер струи,  $f(h)$  – вертикальное распределение массы загрязнителя,  $M=Q\Delta t$  – масса загрязнителя в струе,  $Q$  – скорость эмиссии из источника,  $\Delta t$  – шаг во времени. Функцию  $f$  – можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$f(h)=1/H$  при  $0,5H < h < 1,5H$  и 0 в противном случае ( $H$  – эффективная высота струи). Например, в работе [39] для вычисления  $H$  предложена формула:

$$H = \begin{cases} Z + 0,29V^{-1}Q_h^{1/2}, & \text{нормальные условия стабильности,} \\ Z + 0,49V^{-1}Q_h^{0,29} & \text{для слабых условий стабильности,} \end{cases}$$

где  $Q_h$  – скорость термального потока из источника (трубы), кал/сек;  $Z$  – высота источника, м.

Для упрощения процесса имитации поля загрязнителя в зоне источника применяют дискретизацию потока на отдельные образования (клубы дыма, пыли), каждое из которых рассматривается индивидуально как однородное облако. В частности, для дискретизации потока на  $n$  частей за время  $\Delta t$  можно использовать следующую формулу:  $n=2V\Delta t/H$ . Например, при скорости ветра  $V = 5$  м/с и  $Z=100$  м получаем, что отдельные густки будут выбрасываться из трубы каждые 10 секунд. В результате процесс моделирования динамики всей выбрасываемой струи значительно упрощается. Так, например, при моделировании распространения серы можно дополнительно разделять серообразующие компоненты.

### ***Типы моделей и их информационные базы***

Модели динамики атмосферного загрязнения делятся на гауссовские, эйлеровские и лагранжевы по методике параметризации описываемых процессов рассеивания загрязнителей. Внутри каждого типа выделяются статистические, боксовые, корреляционные и детерминированные модели. Наиболее важным сечением пространства моделей является сечение по применяемым методам, так как именно в этом случае наблюдается сильное разграничение моделей по их информационным базам.

Модели гауссовского типа требуют сведений о высоте источника загрязнения и дисперсионных характеристиках внутри облака загрязнителя. Различные аппроксимации гауссовской струи в окрестности точечного источника зависят от параметров устойчивости приземного слоя атмосферы. На конфигурацию модели влияют геофизические характеристики. Так при размещении источника в зоне перехода от водной поверхности к суше возможно выделение кластеров с устойчивым и неустойчивым поведением струи загрязнителя. При этом, по отношению к горизонтальной координате  $x$  на суше для направления ветра вдоль этой координаты возможно выделение трех зон с характерными признаками: зона невозмущенной дисперсии, зона оседания и зона задержки.

В зоне невозмущенной дисперсии распределение потока загрязнителя формируется под влиянием однородного и устойчивого слоя:

$$C(\phi, \lambda, h) = \frac{Q}{2\pi V \sigma_\lambda \sigma_h} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right\} \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h-Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h+Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] \right\}$$

где  $\varphi$  - направление ветра,  $\lambda$  - координата в горизонтальной декартовой системе,  $h$  - вертикальная координата,  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_p$  - горизонтальная и вертикальная дисперсия (рассеивание).

Во второй зоне поведение облака загрязнителя формируется в условиях неустойчивости и поэтому вычисление концентрации загрязнителя требует расширения информационной базы. Обозначим:  $\phi'$  - подветренное расстояние в пересечении облака и верхней части пограничного слоя,  $\sigma'$  - среднее значение рассеяния на границе между устойчивой и неустойчивой зонами,  $p' = [L(\phi) - Z] / \sigma_h$ ,  $L(\varphi)$  - высота пограничного слоя в подветренном направлении  $\varphi$ . Тогда

$$C(\phi, \lambda, h) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}} \int_0^\phi \frac{1}{\sigma' \sigma_h(V, \phi, \phi') V} \exp \left\{ -\frac{(p')^2}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma'} \right)^2 \right\} \left\{ \exp \left[ \frac{-(h-Z)^2}{2\sigma_h^2(V, \phi, \phi')} \right] + \exp \left[ -\frac{(h+Z)^2}{2\sigma_h^2(V, \phi, \phi')} \right] \right\} \frac{\partial p'}{\partial \phi'} d\phi'$$

Третья зона имеет свою специфику, связанную с условиями формирования облака загрязнителя. Это облако полностью находится внутри пограничного слоя атмосферы и концентрацию загрязнителя в нем можно рассчитать по формуле:

$$C(\phi, \lambda, h) = \frac{Q}{2\pi V \sigma_\lambda \sigma_h} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma_h} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h-Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h+Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] \right\}$$

для  $\sigma_h < 0,47L(\varphi)$ ;

$$C(\phi, \lambda, h) = \frac{Q}{\pi V \sigma_\lambda L(\phi)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right]$$

для  $\sigma_h > 0,8L(\varphi)$ . Внутри интервала  $0,47 \leq L(\varphi) \leq 0,8L(\varphi)$  концентрация  $C$  рассчитывается по интерполяционной формуле между точками  $\sigma_h = 0,47L(\varphi)$  и  $\sigma_h = 0,8L(\varphi)$ .

Приведенная модель хорошо описывает поля загрязнителя над территориями с масштабами до 100 км. Для больших территорий применяются другие типы моделей.

Информационная база моделей Эйлера и Лагранжа формируется согласно задаче Коши для уравнения (1). В зависимости от многообразия реальных ситуаций состав базы данных, обеспечивающей реализацию модели переноса загрязнителя, становится иерархическим. Эта иерархия определяет соотношение пространственных и временных масштабов, она управляет точностью модели и другими ее характеристиками. Известны многочисленные глобальные базы данных. Они, как правило, состоят из информационных уровней с предметной ориентацией.

### **Моделирование поля ветра**

Знание компонентов поля ветра является необходимым элементом моделирования процессов распространения загрязнителей атмосферы над территорией региона независимо от пространственного масштаба. При наличии в регионе многих источников загрязнения атмосферы требуется информация о трехмерном ветровом поле, а это возможно лишь за счет сочетания измерений и моделирования. Обычно для крупных регионов или при изучении условий распространения загрязнений на границе «суша-вода» применяют сеточную модель Эйлера:

$$\begin{aligned} \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z &= 0, \\ \partial u / \partial t + u \partial u / \partial x + v \partial u / \partial y + w \partial u / \partial z &= f(v - v_g) + \partial(K_M \partial u / \partial z) / \partial z, \\ \partial v / \partial t + u \partial v / \partial x + v \partial v / \partial y + w \partial v / \partial z &= f(u_g - u) + \partial(K_M \partial v / \partial z) / \partial z, \\ \partial T / \partial t + u \partial T / \partial x + v \partial T / \partial y + w \partial T / \partial z &= \partial(K_H (\Gamma + \partial T / \partial z)) / \partial z, \end{aligned}$$

где  $f$  – параметр Кориолиса,  $\Gamma$  – скорость сухого адиабатического опускания,  $T$  – температура атмосферы,  $K_M$  и  $K_H$  – коэффициенты диффузии,  $u_g$  и  $v_g$  – составляющие теплового ветра:

$$u_g = -\frac{gT}{f} \int_0^z \frac{1}{T^2} \left( \frac{\partial T(t, x, y, \xi)}{\partial y} \right) d\xi, \quad v_g = \frac{gT}{f} \int_0^z \frac{1}{T^2} \left( \frac{\partial T(t, x, y, \eta)}{\partial x} \right) d\eta.$$

Для практического применения необходимо учесть: отклонение и подъем потока над холмами, тепловое трение, туннельный эффект в долинах, тепловые воздействия островов, озер и гор. Дополнения к приведенной системе уравнений осуществляются исходя из реальной конфигурации и топологии региона.

### **Модели гауссовского типа**

Модели гауссовского типа, как правило, применяются для параметризации процессов распространения загрязнителей вблизи высоких источников. Наиболее хорошо известен ряд модификаций дисперсионной модели PGT (Pasquill-Gifford-Turner), хорошо описывающей приземные потоки загрязнителей и менее точно потоки, формируемые от высоко размещенных ис-

точников. Raaschou-Nielsen et al. [94] модифицировали PGT-модель, придав ей более универсальные функции для произвольного точечного источника. Модификация основана на базовой модели гауссовского типа для описания концентрации загрязнителя в приземном слое атмосферы:

$$C(\phi, \lambda, 0) = \frac{Q}{\pi \bar{u} \sigma_z \sigma_\lambda} \exp \left[ -0,5 \left( \frac{h_{ef}}{\sigma_z} \right)^2 \right] \exp \left[ -0,5 \left( \frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right] + \quad (4)$$

*члены отражения*

где  $Q$  – мощность источника,  $h_{ef}$  – средняя высота облака загрязнителя,  $\bar{u}$  – эффективная скорость переноса.

Одними из важных параметров модели (8.4) являются параметры рассеивания струи загрязнителя. Они являются сложными функциями метеорологической ситуации. Теоретические и экспериментальные исследования многих авторов показали, что турбулентность и дисперсионность конвективного пограничного слоя контролируются двумя важными параметрами: высотой перемешивания  $z_i$  и масштабом конвективной скорости  $w_*$ :

$$w_* = \left( \frac{g}{T \rho c_p} Y z_i \right)^{1/3} \quad (5)$$

где  $Y$  – поток поверхностного осязательного тепла,  $g$  – ускорение гравитационного притяжения Земли,  $T$  – температура воздуха,  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Вертикальная  $\sigma_v$  и горизонтальная  $\sigma_h$  составляющие скорости отклонения турбулентного потока от центра конвективного облака пропорциональны величине  $w_*$  и следовательно зависят от  $z_i$ . При этом полная энергия турбулентности является композицией двух энергий, генерируемых механическими ( $\sigma_{wm}$ ) и конвективными ( $\sigma_{wc}$ ) силами:

$$\sigma_w^2 = \sigma_{wm}^2 + \sigma_{wc}^2. \quad (6)$$

Здесь предполагается, что механические и конвективные силы не коррелируют. Тогда по аналогии можно записать:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zm}^2 + \sigma_{zc}^2. \quad (7)$$

Величина  $\sigma_{zc}^2$  вычисляется при предположении, что

$$\frac{d}{dt} \sigma_{zc} = \sigma_{wc}(z'), z \partial e \quad t = \phi / \bar{u}. \quad (8)$$

Здесь  $z'$  - эффективная высота, на которой рассчитывается характеристика вертикальной турбулентности. Зависимости от высоты для  $\sigma_{wc}$  параметризуем соотношениями:

$$\sigma_{wc}^2 = \begin{cases} 1,54w_*^2 (z/z_i)^{2/3} & \text{для } z < 0,1z_i; \\ 0,33w_*^2 & \text{для } z \geq 0,1z_i; \end{cases} \quad (9)$$

где уровень  $z=0,1z_i$  соответствует одинаковым значениям вертикальной составляющей турбулентности.

Пусть  $h_s$  будет высотой струи загрязнителя и  $t$  имеет масштаб  $x/\bar{u}$ . Тогда, используя уравнения (8) и (9), получаем в зависимости от соотношения  $h_s$  и  $z_i$ . Для  $h_s \geq 0,1z_i$  справедлива следующая аппроксимация:

$$\sigma_{zc}^2 = 0,33w_*^2 t^2 \quad (10)$$

При  $h_s < 0,1z_i$  имеем:

$$\sigma_{zc}^2 = \begin{cases} 1,54w_*^2 (h_s/z_i)^{2/3} t^2 & \text{для } \sigma_{zc} < h_s, \\ \left(0,83w_*z_i^{-1/3}t + 0,33h_s^{2/3}\right)^3 & \text{для } h_s \leq \sigma_{zc} < 0,1z_i, \\ \left(0,581w_*t + 0,231h_s^{2/3}z_i^{1/3} - 0,05z_i\right)^2 & \text{для } \sigma_{zc} \geq 0,1z_i \end{cases}$$

Механическая составляющая в уравнении (7) рассчитывается при предположении, что вариация вертикальной скорости вследствие механического перемешивания постоянна в пограничном слое и определяется соотношением:

$$\sigma_{zm}^2 = 1,2u_*^2, \quad (11)$$

где  $u_*$  - скорость трения.

Для параметра механического рассеивания  $\sigma_{zm}$  отношение к скорости механической турбулентности  $\sigma_{mm}$  не является таким простым как в случае конвективной турбулентности. Это связано с тем, что размер шкалы, характеризующей механическое рассеивание в противоположность конвективному случаю изменяется с высотой, а поэтому он меньше конвективной шкалы. Поэтому для неустойчивого состояния используются зависимости:

$$\sigma_{zm}^2 = \begin{cases} \sigma_{zmu}^2 = 1,2u_*^2 t^2 \exp(-0,6tu_*/h_s) & \text{для } tu_*/h_s < 1, \\ \sigma_{zmu}^2 = 1,2u_*^2 t^2 \exp(-0,6) & \text{для } tu_*/h_s \geq 1 \end{cases}$$

Для устойчивых условий справедлива аппроксимация:

$$\sigma_{zm}^2 = \sigma_{zmu}^2 / (1 + 1,1tu_* / L),$$

где  $L$  – длина Монина-Обухова.

Таким образом, оба члена справа в формуле (7) определены. Теперь перейдем к определению параметра  $\sigma_\lambda$  в (4). Характеристика горизонтального рассеивания загрязнителя достаточно точно аппроксимируется формулой:

$$\sigma_\lambda = \left( \frac{0,25w_*^2}{1 + 0,9\phi w_* / uz_i} + u_*^2 \right)^{1/2} \frac{\phi}{\bar{u}} \quad (12)$$

В этом выражении в скобках первый и второй члены представляют вклад от конвективной и механической турбулентности, соответственно. Для ночных условий первый член равен нулю. Для устойчивой атмосферы и при слабом ветре отношение  $u_* / \bar{u}$  убывает быстро с возрастанием стабильности. Тем не менее, многие наблюдения показали, что горизонтальное рассеивание при часовом усреднении может превышать значения при неустойчивой атмосфере. При этом горизонтальная скорость флуктуирует с постоянной амплитудой около 0,5 м/с. По мере того как горизонтальное рассеивание остается пропорциональным флуктуациям горизонтального ветра параметр  $u_*$  в (12) для случая устойчивой стратификации можно заменить на 0,5 м/с. А это означает, что  $\sigma_\lambda$  никогда не будет меньше, чем  $0,5\phi / \bar{u}$ .

Определим параметр горизонтального рассеивания:

$$\sigma_\lambda f = (\Delta d / \sqrt{2\pi}) \phi,$$

где  $\Delta d$  – изменение направления ветра в радианах.

Согласно (4) точность расчета концентрации загрязнителя в точке с координатами  $(\phi, \lambda)$  существенно зависит от скорости ветра. От того как точно она определена на данной высоте зависит оценка плотности загрязнителя в данном объеме пространства. Например, в случае неустойчивой стратификации скорость ветра аппроксимируется ее величиной на высоте источника, а в стабильных условиях скорость ветра вычисляется путем усреднения ее значений по высоте. Согласно Монину и Обухову [15] имеем:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) - \psi_m \left( \frac{z}{L} \right) + \psi_m \left( \frac{z_0}{L} \right) \right], \quad (13)$$

где  $z_0$  – линейный размер шероховатости поверхности,  $\psi_m$  – универсальные функции подобия, рассчитанные например в работе [92]. Исходя из этих



расчетов скорость ветра оценивается по формуле (13) при  $\tilde{x} \leq \tilde{x}_B$  и принимается равной  $u(\tilde{x}) = u(\tilde{x}_B)$  для всех высот  $\tilde{x} > \tilde{x}_B$ , где  $\tilde{x}_B = \max\{0, 1, \tilde{x}_s, |L|\}$ .

Практическое применение моделей гауссовского типа имеет много аспектов, возникающих в зависимости от множества факторов окружающей природно-антропогенной среды. Это и эффект плавучести загрязнителя в атмосфере, и перемеживание различных слоев атмосферы и многое другое. Raaschou-Nielsen et al. [94] предложили в формуле (8.4) величину  $h_f$  рассчитывать по следующим формулам:

$$H_{ef} = h_s + \Delta h,$$

где

$$\Delta h = \min\{\Delta h_{in}, \Delta h_f\}, \quad \Delta h_{in} = 1,6 \left(\frac{F}{u}\right)^{1/3} \phi^{2/3}, \quad F = \frac{V}{\pi} \frac{g}{T_e} (T_e - T_a),$$

Здесь  $F$  – поток плавучести,  $h_s$  – высота трубы,  $V$  – объем потока,  $T_e$  – температура выходящего из трубы потока,  $T_a$  – температура окружающей атмосферы.

Высота подъема струи выброшенного загрязнителя за счет эффекта ее плавучести рассчитывается по формуле:

$$\Delta h_f = \begin{cases} 1,3 \frac{F}{uu_*^2} \left(1 + \frac{h_s}{\Delta h_f}\right), & \text{нейтральные условия,} \\ 4,3 \left(\frac{F}{u}\right)^{3/5} \left(\frac{Yg}{T_a \rho c p}\right)^{-2/5}, & \text{условия конвекции,} \\ 2,6 \left(\frac{F}{us}\right)^{1/3}, & \text{условия устойчивости,} \end{cases}$$

где  $s = (g/T_a) \partial \theta_a / \partial \tilde{x}$ . Здесь  $\partial \theta_a / \partial \tilde{x}$  есть градиент потенциальной температуры воздуха на уровне трубы.

Множество возможных ситуаций при применении модели гауссовского типа определяется топологией местности, наличием границ типа “море-суша” и горных образований и т.п. Учет конкретной ситуации позволяет упростить расчетные формулы и повысить их достоверность. В частности, Wang and Christiansen [122] рассмотрели такие ситуации на границе между озером и сушей. На границе между водной средой и суши воздушный поток непрерывно приспосабливается к конфигурации ветрового поля, формируясь в соответствующие механическим и температурным условиям струи. В условиях устойчивого берегового теплового слоя возникает ста-

бильный градиент концентрации загрязнителя, зависящий от удаленности источника от берега. Здесь справедлива формула:

$$\frac{3X}{\beta'^2 U s z_b^3} = \frac{3}{2} \left[ \frac{z_{eq}}{z_b} \right]^2 \left[ \frac{z_{eq}}{z_b} - 1 \right] + \frac{2}{9}, \quad (14)$$

где  $z_{eq}$  – устойчивая высота струи над трубой,  $z_b$  – высота основания устойчивого слоя атмосферы над трубой,  $U$  – скорость ветра на высоте трубы,  $\beta'$  – эффективный коэффициент захвата частиц загрязнителя ( $\beta' \cong 0,4$ ),  $s$  – параметр стабильности,  $X$  – параметр плавучести струи. Параметр  $s$  зависит от градиента потенциальной температуры  $\theta$  и температуры окружающей среды  $T_a$ :  $s = (g/T_a) \partial\theta/\partial z$  ( $g$  – коэффициент гравитации). Параметр  $F$  может быть рассчитан как функция скорости  $v$  выхода струи из трубы, внутреннего радиуса  $R$  трубы и температуры  $T$  выбрасываемой струи:

$$F = gvR_2(T - T_a) / T$$

При известном значении  $z_d$  из (14) легко находится  $z_{eq}$  и эффективная высота  $Y$  струи определяется как сумма:  $Y = z_{eq} + h_s$ , где  $h_s$  – высота трубы. Вся зона распространения облака загрязнителя при направлении ветра с водного пространства на сушу разбивается на зоны стабильности, неустойчивости и опускания облака аэрозоля. Такая дискретизация пространства упрощает модель, сокращая требуемую базу данных и повышает ее достоверность. В каждой зоне использование гауссовской модели приводит к упрощенной параметризации процесса рассеивания загрязнителя и облегчает интерпретацию результатов моделирования.

В невозмущенной дисперсионной зоне распределение струи загрязнителя, попавшей в однородный устойчивый слой атмосферы, описывается базовым гауссовским уравнением рассеивания:

$$C(\phi, \lambda, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_\lambda \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right] \times \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-Y}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+Y}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

где  $U$  – скорость ветра,  $Y$  – эффективная высота струи,  $\sigma_\lambda$  и  $\sigma_z$  – параметры горизонтальной и вертикальной дисперсии.

В зоне окуривания вступают в действие силы, вызывающие искажение струи загрязнителя вследствие неустойчивости тепловых потоков в приземном слое. В этой зоне справедлива аппроксимация:

$$C(\phi, \lambda, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}} \int_0^\phi \frac{1}{\sigma' \sigma_z(u, \phi, \phi') U} \exp \left[ -\frac{1}{2} (p'^2 + \left(\frac{\lambda}{\sigma'}\right)^2) \right] \times \\ \left\{ \exp \left[ -\frac{(z-Y)^2}{2\sigma_z^2(u, \phi, \phi')} \right] + \exp \left[ -\frac{(z+Y)^2}{2\sigma_z^2(u, \phi, \phi')} \right] \right\} \frac{dp'}{d\phi'} d\phi',$$

где  $\phi'$  - подветренное расстояние пересечения струи загрязнителя с верхней границей внутреннего теплового пограничного слоя (ВТПС),  $p' = [L(\phi) - Y] / \sigma_{\tilde{x}}(s, \phi)$ ,  $L(\phi)$  - высота ВТПС на расстоянии  $\phi$ ,  $\sigma_{\tilde{x}}(s, \phi)$  - значение  $\sigma_{\tilde{x}}$  для устойчивого слоя атмосферы на расстоянии  $\phi$ ,  $\sigma_{\tilde{x}}(s, \phi)$  - величина  $\sigma_{\tilde{x}}$  для устойчивого слоя атмосферы на расстоянии  $\phi$ ,  $\sigma_{\tilde{x}}(u, \phi, \phi')$  - значение  $\sigma_{\tilde{x}}$  для неустойчивой атмосферы на расстоянии  $\phi$  после прохождения подветренного расстояния  $\phi'$ ,  $\sigma_{\tilde{x}}(u, \phi, \phi')$  - значение  $\sigma_{\tilde{x}}$  для неустойчивого слоя на расстоянии  $\phi$  после прохождения подветренного расстояния  $\phi'$ ,

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_{\tilde{x}}^2(s, \phi) + \sigma_{\tilde{x}}^2(u, \phi, \phi')}$$

В зоне, где верхняя граница облака загрязнителя близка к  $L(\phi)$  и оно полностью находится внутри ВТПС справедливы аппроксимации:

$$C(\phi, \lambda, z) = \begin{cases} xEG / \sigma_z(u, \phi) & \text{для } \sigma_z < 0,47L(\phi), \\ xE / L(\phi) & \text{для } \sigma_z > 0,8L(\phi), \end{cases} \quad (15)$$

где обозначено

$$x = Q / [\pi U \sigma_{\tilde{x}}(u, \phi)], \quad E = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{\sigma_{\tilde{x}}(u, \phi)} \right)^2 \right],$$

$$G = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-Y}{\sigma_z(u, \phi)} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+Y}{\sigma_z(u, \phi)} \right)^2 \right].$$

Для подветренного расстояния  $\phi$ , где  $0,47L(\phi) \leq \sigma_{\tilde{x}}(\phi) \leq 0,8L(\phi)$ , концентрация загрязнителя рассчитывается путем интерполяции между ее оценками в пограничных зонах в соответствии с формулой (15).

## Моделирование планетарного пограничного слоя

Моделирование процессов распространения загрязнений в приземном слое связано с описанием зависимостей скорости ветра, температуры и влажности атмосферного воздуха как трехмерных функций времени и пространственных координат. Одна из таких моделей планетарного пограничного слоя (ППС) охарактеризована в работе [28]. Модель содержит два блока. Первый блок описывает ППС в аналитической форме. Поле загрязнителя усредняется и представляется одномерной структурой. Другой переходной слой атмосферы описывается гидродинамическими и термодинамическими уравнениями, решаемыми численно с применением конечно-разностных схем. Уравнения переходного слоя атмосферы выводятся при предположении, что атмосфера несжимаема и гидростатична, пары воды не меняют свойств, потенциальная температура рассчитывается по формуле  $\theta = T + \Gamma z$ , где  $T$  – температура атмосферы,  $\Gamma$  – скорость сухого адиабатического охлаждения,  $z$  – вертикальная координата. Уравнения переходного слоя атмосферы имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_M}{\partial x} + f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + K_H \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_M}{\partial y} + f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + K_H \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$g \frac{(T_M + T_n)}{\theta_a} - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_M}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial(u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\theta)}{\partial y} + \frac{\partial(w\theta)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) +$$

$$K_H \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_a c_p} \frac{\partial Q_N}{\partial z}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} + \frac{\partial(wq)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( Kq \frac{\partial q}{\partial z} \right) + K_H \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right),$$

где

$$u_g = -\frac{1}{f\rho_a} \frac{\partial p_n}{\partial y}, \quad v_g = \frac{1}{f\rho_a} \frac{\partial p_n}{\partial x},$$

$(u, v, w)$  – проекции скорости ветра на прямоугольные координаты  $x, y$  и  $z$  соответственно,  $K_H$  – коэффициент горизонтального вихревого движения,  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $q$  – удельная влажность. Строгое решение этих уравнений невозможно в общем случае и поэтому требуется подбор подходящей дискретной сетки, на которой эти уравнения заменяются конечно-разностными уравнениями. Шаг дискретизации времени и размеры дискретной пространственной сетки должны удовлетворять условию:

$$\Delta t \leq \min \{ \Delta x/u, \Delta y/v, \Delta z/w \}.$$

На практике часто вместо этой достаточно громоздкой схемы применяют имитационные схемы, опирающиеся на приемлемую дискретизацию пространства. В этом случае территория региона или всего Земного шара делится, как правило, на однородные участки с линейными размерами  $\Delta\phi$  по широте и  $\Delta\lambda$  по долготе:  $\Omega = \{ \Omega_{ij}; i=1, \dots, n; j=1, \dots, m \}$ . Задавая вертикальную структуру атмосферы и учитывая физические и химические процессы трансформации загрязнителей, составляются рекуррентные по временному шагу  $\Delta t$  соотношения для пересчета их концентраций. При наличии контрольных замеров в нескольких точках пространства  $\Xi = \{ (\phi, \lambda, z), (\phi, \lambda) \in \Omega, 0 \leq z \leq H \}$  шаги дискретизации географической сетки и времени оптимизируются на базе одного или совокупности критериев точности. Как правило, такой подход обеспечивает необходимую устойчивость результатов моделирования [11].

### Модели эйлеровского типа

Обозначим через  $C_s(t, \phi, \lambda, h)$  концентрацию загрязнителя  $s$ -того типа на высоте  $h$  над точкой с географическими координатами  $(\phi, \lambda)$  в момент времени  $t$ . Для модели эйлеровского типа общие уравнения переноса загрязнителя в окружающем пространстве согласно (1) имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s}{\partial t} + V_\phi \frac{\partial C_s}{\partial \phi} + V_\lambda \frac{\partial C_s}{\partial \lambda} + V_h \frac{\partial C_s}{\partial h} &= \frac{\partial}{\partial \phi} \left( K_\phi \frac{\partial C_s}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( K_\lambda \frac{\partial C_s}{\partial \lambda} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial h} \left( K_h \frac{\partial C_s}{\partial h} \right) + E_s(t, \phi, \lambda, h) + P_s(C_1, \dots, C_q) - v_{1s} - v_{2s} \end{aligned}$$

где  $K_\phi$ ,  $K_\lambda$  и  $K_b$  – коэффициенты турбулентной диффузии,  $E_s$  – характеристическая функция источников эмиссии загрязнителя  $s$  – го типа,  $P_s$  – оператор, описывающий физические и химические превращения загрязнителя,  $v_1$  – скорость вымывания загрязнителя осадками,  $v_2$  – скорость сухого осаждения,  $V = \{V_\phi, V_\lambda, V_b\}$  – компоненты скорости ветра.

Модель такого типа используется для расчетов концентрации загрязнителей в атмосфере, как правило, при масштабах территории больших 50 км. Упрощенные схемы расчета функции  $C$  строятся путем разбиения пространства на блоки  $\Delta\phi \times \Delta\lambda \times \Delta b$  и на каждой высоте  $h_k$  осуществляется пошаговый расчет концентрации  $C_s(t, \phi, \lambda, h_k)$ . Схема расчета может упрощаться и дальше путем расчленения всей процедуры на два этапа. Сначала для каждого уровня вертикальной дискретизации пространства находятся распределения  $C_s(t, \phi, \lambda, h_k)$ , а затем учитываются процессы вертикального переноса загрязнителей. Такая схема позволяет легко переходить к усредненным уровням по высоте в зависимости от имеющейся информации о параметрах вертикальной стратификации атмосферы. Сходимость такой процедуры зависит от соотношения величин  $\Delta t, \Delta\phi, \Delta\lambda, \Delta b$ .

Модель эйлеровского типа содержит много степеней свободы вплоть до рассмотрения сценариев. В базу знаний имитационной системы (ниже дается описание ИСФАЗ) заносятся наборы параметризаций частных процессов трансформации загрязнителей, а конкретный выбор предоставляется пользователю. Вся информация в базах данных и знаний структурируется согласно множеству пространственных и предметных идентификаторов – матричных структур  $\{A_m\}$ . В частности, в режиме «по умолчанию» используются следующие параметризации.

**Эмиссия загрязнителя.** В соответствии со структурой идентификатора, описывающего источники загрязнения, в каждом компартменте  $\Delta\phi \times \Delta\lambda$  может задаваться паспортная информация о скоростях эмиссии  $s$  – го загрязнителя: минимальная и максимальная скорости  $E_{s, \min}$  и  $E_{s, \max}$  соответственно. Если отсутствует дополнительная информация о каком-то источнике, значение  $E_s$  рассчитывается согласно процедуре равномерного распределения на интервале  $[E_{s, \min}, E_{s, \max}]$  или принимается другой закон распределения (например, гауссовский).

**Сухое осаждение.** Функциональное описание для  $v_1$  и  $v_2$  важно и от него зависит адекватность модели. Поэтому этому вопросу посвящено много исследований. Многие авторы доказывают, что наиболее приемлемой является линейная аппроксимация функций  $v_1$  и  $v_2$ :

$$V_{is} = K_{is} C_s, \quad i=1,2$$

Коэффициент пропорциональности  $K_{ij}$  может быть функцией времени и пространственных координат, а также зависеть от физического состояния земной поверхности. С помощью идентификатора  $|\mu_{ij}|$  можно расширить эту зависимость. Например, вариант  $\mu_{ij} = 0$  может означать, что сухое осаждение в модели вообще не учитывается. При  $\mu_{ij} = 1$  учитывается схема, предложенная в работе [128]:

$$K_{2s} = K_{2s}^* v_{ds} d / H_{mix}(t, \phi, \lambda),$$

где  $K_{2S}^*$  - множитель пропорциональности,  $v_{ds}$  - скорость осаждения загрязнителя  $s$ -го типа (например,  $v_{ds} = 0,008$  м/с для  $SO_2$ ,  $0,002$  м/с для  $SO_4$ ,  $0,001$  м/с для  $NO_2$  и  $HNO_3$ ),  $H_{mix}$  - высота перемешанного слоя атмосферы (м),  $d$  - параметр учета физического состояния земной поверхности ( $d=1$  для сухой поверхности,  $d=2$  для влажной поверхности и т.п.).

С помощью параметра  $\mu_j$  система моделирования может управлять выбором различных заложенных в базу знаний зависимостей скорости сухого осаждения в широком диапазоне от синоптических параметров и других характеристик окружающей среды. Например, при  $\mu_j=2$  выбирается модель:

$$v_{2s} = \begin{cases} 0,002U_* & \text{при } L \geq 0, \\ 0,002U_* \left[ 1 + (-300/L)^{2/3} \right] & \text{при } L < 0, \end{cases}$$

где  $L$  - длина Монины-Обухова (м),  $U_*$  - скорость трения.

**Вывывание.** Аналогично предыдущему случаю скорость мокрого осаждения загрязнителей из атмосферы при моделировании также целесообразно рассматривать с различных позиций, так как величина  $v_{1s}$  в общем случае является функцией многих факторов, некоторые из которых не всегда достоверно оценены. Для удобства компьютерного моделирования вводится идентификатор  $||v_{1j}||$  и, например, при  $v_{1j}=0$  автоматически считается  $v_{1s}=0$  (вывывания нет). При  $v_{1j}=1$  отождествляется вариант, когда

$$v_{1s} = K_{2S}^* C_s r,$$

где  $r$ -интенсивность осадков.

Задание  $v_{1j}=2$  соответствует модели вымывания:

$$\partial C_s / \partial t = -\varphi r(t, \phi, \lambda) C_s(t, \phi, \lambda, h)$$

При  $\phi = \text{const}$  получаем простую явную схему пересчета  $C_s$  в каждой ячейке:

$$C_s(t + \Delta t, \phi_i, \lambda_j, h_k) = C_s(t, \phi_i, \lambda_j, h_k) \exp \left\{ -\varphi r(t, \phi_i, \lambda_j, h_k) \Delta t \right\}$$

## 6. Экспериментальная система для физики атмосферного загрязнения

### Структура экспертной системы

На рис. 1 приведен перечень блоков имитационной системы для физики атмосферного загрязнения (ИСФАЗ). Состав software для ее функционирования перечислен в табл. 3. Предполагается, что вся входная информация в ИСФАЗ сосредотачивается в тематических файлах, формирование которых может осуществляться на основе различных источников, таких как удаленные датчики, линии информационной связи, переносимые стандартные

и нестандартные накопители данных измерений, непосредственный ввод данных с клавиатуры или другого совместимого вводного устройства. Базовый вариант ИСФАЗ рассчитан на последний случай. Переключение ИСФАЗ на другие режимы требует дополнительных элементов software, согласующих носитель информации и обеспечивающих ее преобразование в файловый накопитель. Взаимодействие всех элементов ЭСФАЗ описывается схемой рис. 2.



Рис. 1. Структура ИСФАЗ с функциями комплексной оценки атмосферного загрязнения над заданной территорией.



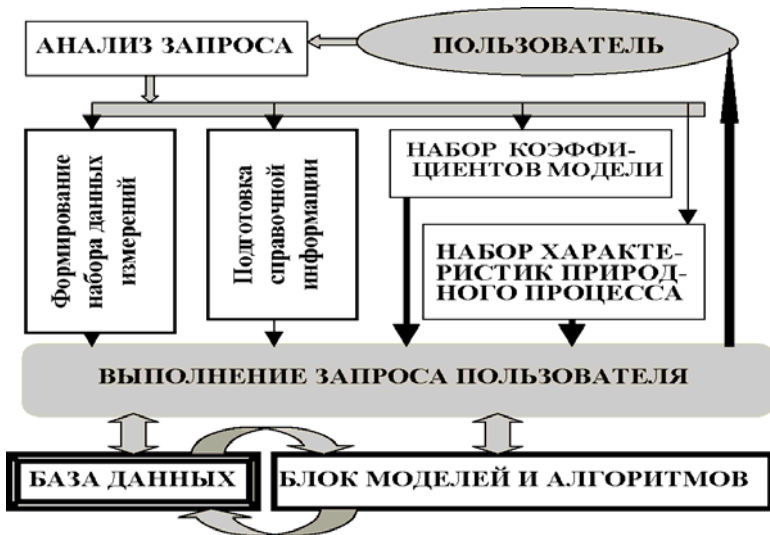


Рис. 2. Примерная схема функционирования ИСФАЗ в режиме диалога с пользователем.

Таблица 3

### Программное обеспечение ИСФАЗ

Идентификатор программного продукта	Характеристика программного продукта
STANDARD	Калибровка и масштабирование входной информации.
FILTER	Фильтрация входных данных.
ASSENT	Пространственно-временное согласование разнотипных данных.
APPROX	Интерполяция данных измерений по пространству и формирование пространственных образов.
RESTOR	Восстановление данных.
GAUSS	Гауссовская модель.
EULER	Эйлеровская модель.
DEVIDE	Выбор сетки пространственной дискретизации и переход к блочному моделированию.
CHOICE	Изъятие необходимой для моделирования информации из базы данных.
ATMOSEA	Моделирование процессов переноса загрязнителей за счет взаимодействия атмосферы и моря.
ATMOLAND	Моделирование процессов переноса загрязнений с учетом функционирования системы «атмосфера-растительность-почва».
SULPHU	Модель потоков серы в окружающей среде.
MAP	Картографическое представление результатов моделирования.
SIGNAL	Анализ данных моделирования и их визуализация с учетом уровней ПДК.
IBMMEN	Человеко-машинный интерфейс.
NITROG	Модель потоков азота в окружающей среде.
OXIGEN	Модель баланса кислорода в природно-антропогенной среде.
CARBON	Модель круговорота углекислого газа в окружающей среде.
MAIN	Управление и взаимосвязь блоков ИСФАЗ.

### Формирование фрагментов базы данных

Алгоритмы формирования и обработки баз пространственных данных достаточно хорошо апробированы в ГИС-технологии. Выберем для привязки ИСФАЗ к конкретному объекту матричную иерархическую топологическую структуру (пространственный идентификатор), отражающую пространственную и предметную структуру территории  $\Omega$ , так что

$$\Omega = \bigcup_{(i,j)} \Omega_{ij}, \quad \Omega_{ij} = \bigcup_{(s,l)} \Omega_{i_s j_l} \quad \text{и т.д.}$$

Схематически это отражено на рис. 3. Согласно такому алгоритму территории  $\Omega$  в базе данных ИСФАЗ представляется совокупностью матриц

$$A_k = \left\| a_{ij}^k \right\|, \quad k = \overline{1, N};$$

где

$$a_{ij}^1 = \begin{cases} 0 & \text{при } (\phi, \lambda) \notin \Omega, \\ a_1 & \text{при } (\phi, \lambda) \in \Omega, \end{cases}$$

$$a_{ij}^2 = \begin{cases} A - & \text{лесная растительность,} \\ B - & \text{травяная растительность,} \\ C - & \text{с/х растительность (злаковые),} \\ D - & \text{пахотная земля,} \\ E - & \text{шоссейная дорога,} \\ F - & \text{болотистая местность,} \\ G - & \text{городская территория,} \\ H - & \text{промышленная зона,} \\ J - & \text{с/х растительность (плодовые деревья),} \\ I - & \text{с/х растительность (прочее),} \end{cases}$$

$$a_{ij}^3 = \begin{cases} A - & \text{нет источников загрязнения,} \\ B - & \text{источник загрязнения типа "B",} \\ C - & \text{источник загрязнения типа "C",} \\ & \text{другие типы источников загрязнения} \end{cases}$$

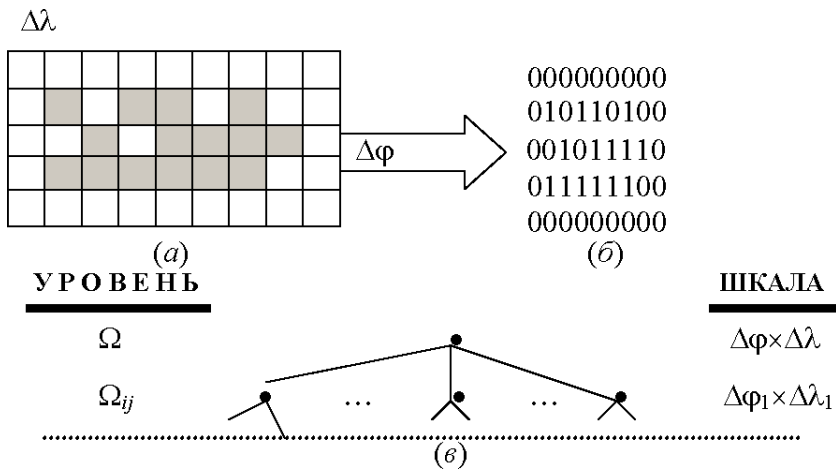


Рис. 3. Процедура топологической привязки территории к фрагментам базы данных ИСФАЗ: (а) – контуры территории  $\Omega$ , (б) – вид идентификатора  $A_1$  в базе данных, (в) – иерархия уровней базы данных, соответствующая пространственной и тематической структуре  $\Omega$ .

Матрицы  $A_4$  и  $A_8$  содержат географическую информацию об уровнях территории по отношению к уровню моря и данные об интенсивности осадков соответственно. Идентификатор  $A_5$  задает распределение плотности населения региона. Структуры  $A_6$  и  $A_7$  определяют средние статистические данные о скорости и направлении ветра над территорией  $\Omega$ . Вся информация задается за определенный отрезок времени и, следовательно, в базе данных ИСФАЗ хранятся наборы матриц  $\{A_i\}$ , помеченные принадлежностью к временному интервалу. Каждый элемент этих матричных структур иерархически расшифровывается по уровням, но не обязательно однородным образом. В матрице  $A_3$  учитываются представленные в табл. 4 типы источников загрязнения. Для более гибкого освоения ИСФАЗ в базе данных предусмотрены возможности идентификации источников загрязнения атмосферы с набором загрязнителей. Структура элементов идентификатора  $A_9$  отождествляет каждую пространственную ячейку  $\Omega_{ij}$  с типом загрязняющего предприятия.

### *Подсистема принятия статистических решений*

Совокупность блоков SIGNAL и IBMEN обеспечивает реализацию функций принятия решений о выдаче сигнала для пользователя в соответствии с априорно заданной элементной структурой ПДК. Для сохранения общности полагается, что ПДК могут устанавливаться в каждой ячейке  $\Omega_{ij}$  или их некоторой совокупности по независимому набору элементов. Эту информацию содержит идентификатор  $A_{10}$ .

## Классификация источников загрязнения атмосферы.

Категория источника загрязнения	Примеры предприятий данной категории	Загрязнители атмосферы
Химические заводы.	Переработка нефти, деревообработка, выработка суперфосфата, изготовление цемента.	Окислы серы, сульфиды, фтористые соединения, органические пары, частицы, ароматические вещества
Разбрызгивание и рапыление в сельском хозяйстве.	Контроль за вредителями и сорняками.	Органические фосфаты, хлорированные углеводороды, мышьяк, свинец.
Дробление, размалывание, просеивание.	Строительные дорожные заводы.	Минералы и органические вещества.
Разрушение.	Восстановление городов.	Минералы и органические частицы.
Выжигание полей.	Сжигание стерни и вырубок.	Дым, пепел, сажа.
Сжигание топлива.	Силовые станции.	Окислы серы и азота, окись углерода, дым и ароматические вещества.
Производство топлива.	Рассеивание газа.	Фтористые соединения.
Производство типографской краски.	Изготовление фотографий и типографская деятельность.	Фтористые соединения.
Металлургические заводы.	Плавка металлов, производство стали и алюминия.	Свинец, мышьяк, цинк, фтористые соединения, окислы серы.
Мельницы, автомобильные моторы.	Элеваторы, транспортные средства.	Окислы серы и азота, ароматические вещества, окись углерода, дым.
Использование ядерного топлива.	Ядерные реакторы.	Аргон-41.
Добыча руды.	Размалывание, дробление, просеивание.	Пыль урана и бериллия.
Сжигание мусора и отходов.	Свалки, перерабатывающие мусор заводы.	Окислы серы, дым, пепел, органические пары, ароматические вещества.
Переработка отходов.	Склады металлолома, автосвалки, перерабатывающие вторсырьё заводы.	Дым, органические пары, ароматические вещества, сажа.

В процессе измерений или расчетов для каждого загрязнителя типа  $\xi$  формируется функция распределения концентрации  $P(\varphi, \lambda, h, t)$ . В каждой точке  $(\varphi, \lambda, h)$  с течением времени формируется ряд данных  $P_{\xi 1}, P_{\xi}^2, \dots, P_{\xi}^n, \dots$ . Из-за ошибок измерений и вычислений на основе не-точных данных выбор ситуаций  $P_{\xi} < \text{ПДК}_{\xi}$  или  $P_{\xi} \geq \text{ПДК}_{\xi}$  осуществляется в каждый момент времени  $t$  на основе соответствующей статистической оценки при разграничении двух вариантов: (1) решение принимается по совокупности показателей и (2) решение принимается по каждому показателю отдельно. В последнем случае осуществляется проверка устойчивости неравенства  $P_{\xi} \geq \text{ПДК}_{\xi}$  в течение заданного промежутка времени  $\Delta t$ . В случае выполнения условия  $P_{\xi} \geq \text{ПДК}_{\xi}$  в течение этого времени на дисплее выдается сигнал с соответствующей информацией. Время  $\Delta t$  определяется на экспертном уровне в процессе эксплуатации системы с целью минимизации количества ложных тревог или из условия максимизации вероятности не пропустить ситуацию с нарушением ПДК. Реальный выбор  $\Delta t$  зависит от множества локальных производственных и других факторов и относится к компетенции пользователя. Для облегчения получения экспертной оценки или принятия решения в реальном режиме времени, особенно в случае использования интегрального критерия, пользователь получает оценки всех показателей в однородной нормированной шкале.

Пусть  $q(l, i, j, k)$  является показателем качества атмосферы в компартменте  $\Omega_{ijk}$  по  $l$ -му параметру. Чтобы свести все показатели к единому масштабу, нормируем их:

$$Q_l = Q(l, i, j, k) = q(l, i, j, k) / \max_{i, j, k} q(l, i, j, k)$$

Далее осуществляется сглаживание результатов нормировки по высоте ( $k$ ), широте ( $j$ ), долготе ( $i$ ) и всей территории  $\Omega$ . Сглаженные результаты используются для оценки качества воздуха тех или иных территорий по выбору пользователя. Окончательное решение принимается на основе сопоставления оценок  $Q_l$  с заложенным в базу данных набором пороговых величин. Комплексная оценка состояния атмосферы над заданной частью территории  $\Omega$  осуществляется по векторному параметру  $Q = (Q_1, \dots, Q_n)$ . Этот  $n$ -мерный вектор принадлежит некоторому признаковому пространству  $X$ , каждая точка которого соответствует конкретному сочетанию ПДК $_{\xi}$  (задаваемому пользователем). Всё пространство  $X$  разбивается на две части:  $X_0$  – загрязнение не превышает допустимых уровней,  $X_1$  – загрязнение достигло опасного уровня. Конкретная реализация  $Q$  оценивается по принадлежности одному из этих подпространств.

Таким образом, основные этапы функционирования ИСФАЗ вписываются в схему, представленную на рис. 4. Безусловно, качество принимаемых решений зависит от полноты заложенной в базу данных информации. Пример фрагмента базы данных дан в табл. 5. Управление этими фрагментами базы данных и различными модификациями параметрических описаний частных процессов трансформации загрязнителей осуществляется совокупностью идентификаторов, которые пользователю доступны через

такие схемы взаимодействия с системой как окна прокрутки и иерархические меню. Поэтому множество идентификаторов используется на уровне диспетчера системы, который следит за совместимостью ее функций.



Рис. 4. Основные компоненты функционирования ИСФАЗ.

Таблица 5

Фрагмент базы данных ИСФАЗ.

Элемент идентификатора $A_2$	Скорость сухого осаждения, см/с	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
Водная поверхность	0,2-1,5	0,01-0,04
Известковая поверхность	0,3-1,0	0,03-0,1
Кислая сухая почва	0,1-0,5	0,01-0,05
Кислая мокрая почва	0,1-0,8	0,01-0,08
Растительность ниже 10 см	0,1-0,8	0,02-0,25
Растительность от 10 см до 1 м	0,2-1,5	0,4-0,7
Лес	0,2-2,0	0,1-0,8

### *Подсистема управления и визуализации*

ИСФАЗ обеспечивает широкий иерархический диалог пользователя с компьютерной версией имитационной системы распространения аэрозолей в атмосфере. Адаптация к территории реализуется в режиме диалога за счет совокупности идентификаторов, обеспечивающих формирование фрагментов базы данных, отвечающих за структуру земных покровов, метеорологическую обстановку и параметры окружающей среды, включая сведения об источниках аэрозолей и их характеристиках. Схематически взаимодействие оператора представлено на рис. 5.

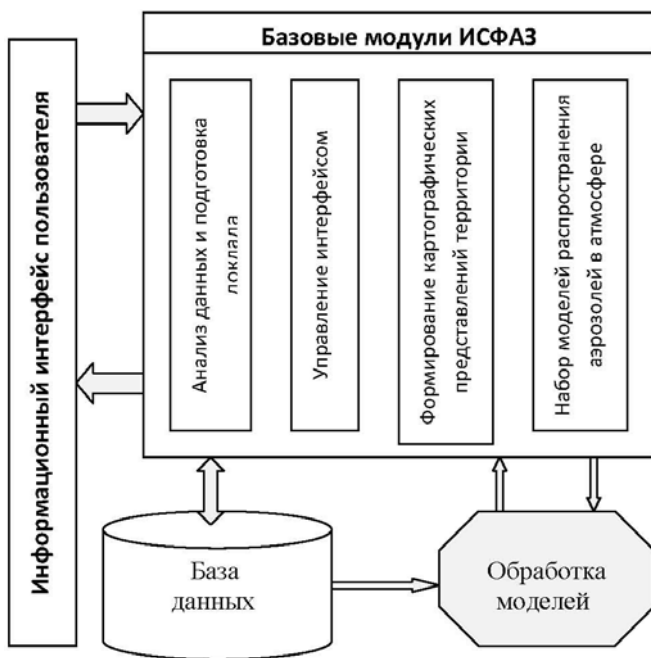


Рис. 5. Примерная схема взаимодействия оператора с ИСФАЗ в режиме ее адаптации к специфике конкретных условий имитационного эксперимента по оценке распространения аэрозолей над заданной территорией.

ИСФАЗ оперирует с карто-схемами, содержащими условно знаковые изображения поверхности земли или распределений параметров атмосферы. Графическое изображение результатов моделирования связано с их преобразованием в одну из следующих форм распределения оцениваемого параметра:

- графическое изображение (одномерное, двумерное и трехмерное);
- символическое изображение двумерного образа;
- табличное представление по набору форматов;
- псевдо-цветовое изображение, отражающее представление результата моделирования по фиксированной числовой шкале;
- картографическое представление с нанесением изолиний на основе ГИС-технологии.

### 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 рас-

сматривалось здесь, чтобы избежать повторов [10, 26]. Таким же соображением определяется и латидарность освещения проблем дальнего переноса продуктов сжигания биомассы и антропогенных выбросов на акваторию Индийского океана, обсужденных в предшествующих частях этого обзора [7,8].

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. Ясно, что достоверная оценка путей распространения аэрозоля возможна при совместном использовании соответствующих моделей и данных спутникового мониторинга [12, 57].

Проведенные выше численные расчеты показали, что надежная оценка пространственных распределений уровней рН зависит от многих факторов, среди которых важными и определяющими являются точности параметров уравнений блока МГКС и форма его привязки к ГИМ. Одним из очень сложных и вносящих большие неопределенности в численные расчеты является способ параметризации потоков серы в пространстве. Как показано в работе [80] использование для этой цели моделей Гауссовского типа с различными модификациями позволяет добиться высокой точности описания пространственной структуры потоков серы при минимальном наборе входных параметров. На примере четырех силовых станций, расположенных в западной части штата Техас (США), было показано, что применение модифицированной Гауссовской модели позволило решить задачу оценки индивидуальных вкладов точечных источников в формирование уровней рН с точностью до 60-80% в зависимости от расстояния и синоптических параметров.

Для повышения достоверности прогноза кислотных осадков необходимо дальнейшее совершенствование блока МГКС путем его наполнения новыми элементами и установления связей с биогеохимическими круговоротами других химических веществ, таких как сероуглерод и сернистый ангидрид [1]. Концентрация внимания в моделях глобального круговорота серы только на диоксиде серы, сульфатах и сероводороде ограничивает точность этих моделей. К сожалению, большинство международных и национальных программ по исследованию круговорота серы ограничиваются именно этими элементами [20].

Повышение роли глобальной модели круговорота серы в оценке рН дождей и расчета кислотности водоемов требует разработки перспективных сценариев антропогенной активности, таких как сценарии – стратегии, описанные в [20]. Согласно Канадской Программе по кислотным осадкам, например, в провинции Онтарио планируется к 2015 г. сократить выбросы SO<sub>2</sub> на 50% (с 885 до 442,5 килотонн/год), а в Квебеке на 40% (с 500 до 300 килотонн/год). Знание и учет в блоке МГКС таких данных позволит рассчитать оптимальные стратегии по всем странам и дать рекомендации по планированию выбросов серы. Тем более, что эти стратегии являются производными совокупности стратегий управления экономикой конкретного региона земного шара.

## Литература

1. Биненко В.И., Храмов Г.Н., Яковлев В.В. *Чрезвычайные ситуации в современном мире и проблемы безопасности жизнедеятельности*. Изд-во Центра «Интеграция», Санкт-Петербург, 2004, 398 с.



2. Братусь А.С., Мещерин А.С., Новожилов А.С. Математические модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой. // *Вестник МГУ, сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика*, 2001, № 1, с. 23-28.
3. Буй Та Лонг. Применение ГИС-технологии в задаче вычислительного эксперимента физики атмосферного загрязнения. // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*, 1998, № 1, с. 2-11.
4. Григорьев Ал. А., Кондратьев К. Я. *Экодинамика и геополитика*. Т. 2. Экологические катастрофы. СПб НЦ. 2001, 684 с.
5. Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. Изд-во «Химия», Москва, 1991, 139 с.
6. Иванов А. П., Чайковский А. П. Лазерный луч исследует атмосферу. ИФ НАИ Беларуси; Минск. – 2002, 12 с.
7. Кондратьев К. Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 1. Полевые наблюдательные эксперименты. Африка и Азия. // *Оптика атмосферы и океана*, 2005, том 18, с. 3-18.
8. Кондратьев К. Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 2. Полевые наблюдательные эксперименты. Америка, Зап. Европа и высокие широты. // *Оптика атмосферы и океана*, 2005, том 18, с. 19-31
9. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савинных В.П. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. Логос, Москва, 2003, 573 с.
10. Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф., Филиппс Г. В. *Проблемы загрязнения высокоширотной окружающей среды*. С.-Петербург, НЦ РАН. 2002, 280 с.
11. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: эcoinформатика. Федеральный Экологический Фонд, Санкт-Петербург, 2002, 724 с.
12. Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Потапов И.И., Нгуен Хонг Шон. Измерение гидрофизических и геофизических параметров. // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*, 2003, № 1, с. 26-29.
13. Крапивин В.Ф., Назарян Н.А. Математическая модель для исследования глобального цикла серы. // *Математическое моделирование*, 1997, том 9, № 8, с. 36-50.
14. Крапивин В.Ф., Потапов И.И. *Методы эcoinформатики*. ВИНИТИ, Москва, 2002, 496 с.
15. Монин А.С., Обухов А.М. Пространственные характеристики турбулентности в поверхностном слое атмосферы. // *Докл. АН СССР*, 1954, том 93, с. 223-226.
16. Фан Ван Бик. Некоторые результаты обследования и оценки качества воздушной среды СРВ. В сб.: *Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы*, Ленинград, Гидрометеониздат, 1986, том 2, с. 267-269.
17. Чан Лый Кыонг. *Имитационная система для вычислительного эксперимента в физике атмосферного загрязнения*. Кандидатская диссертация, Институт радиотехники и электроники РАН, 1994, 115 с.
18. Alastuey A., Querol X., Rodroquez S., Plana F., Lopez-Soler A., Ruiz C., and Mantilla E. Monitoring of atmospheric particulate matter around sources of secondary inorganic aerosol. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol. 38, no. 30, pp. 4979-4992.
19. Aloyan A.E. Numerical modeling of minor gas constituents and aerosols in the atmosphere. // *Ecological Modelling*, 2004, vol. 179, no. 2, pp. 163-175.
20. 2001 *Annual Progress Report on the Canada-Wide Acid Rain Strategy for Post-2000*. Quebec, 2002, 16 pp.

21. Ansmann A., Bösenberg J., Chaikovskiy A., Camerón A., Eckhardt S., Eixmann R., Freudenthaler V., Ginoux P., Komguem L., Linné H., López Marqués M. A., Matthias V., Mattis I., Mitev V., Müller D., Music S., Nickovic S., Pelov J., Souvage L., Sobolevsky 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.*, 2003, vol. 108, no. D24, pp. AAC12/1-AAC12/15.
22. Augustine J. A., Cernwall 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, vol. 42, no. 2, pp. 266-278.
23. Ayras M., Niskavaara H., Bogatyrev I. et al. Regional patterns of heavy metals (Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur in terrestrial moss samples as indication of airborne pollution in a 188,000 km<sup>2</sup> area in northern Finland, Norway and Russia. // *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, no. 58, pp. 269-281.
24. Bates T.S., Lamb B.K., Guenther A., Dignon J., Stoiber R.E. Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources. // *Journal Atmospheric Chemistry*, 1992, vol. 14, no. 1-4, pp. 315-337.
25. Berndt T., Boge O., and Stratmann F. Atmospheric particle formation from the ozonolysis of alkenes in the presence of SO<sub>2</sub>. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.14, pp. 2145-2153.
26. 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 pp.
27. Bodenberder J., Wassmann R., Papen H., and Rennenberg H. Temporal and spatial variation of sulfur-gas-transfer between coastal marine sediments and the atmosphere. // *Atmospheric Environment*, 1999, vol. 33, no. 21, pp. 3487-3502.
28. Bornstein, R. Urban induced convergence zones and air pollution episodes. Preprint Vol., Inter. Conf. cum Workshop on Air Quality Management, Brunei Darussalam, 1999, 3 pp.
29. 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 Rlying laboratory) // AFO Newslwttter. 2003, No 4, p. 11-14.
30. Cahill C. F. Asian aerosol transport to Alaska during ACE-Asia. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE32/1-ACE32/8.
31. Catrall 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.*, 2003, vol. 108, no. D9, pp. AAC10/1-AAC10/11.
32. Chobadian A., Goddard A.J.H., Gosman A.D. Numerical simulation of coastal internal boundary layer developments and a comparison with simple models. In: *Air Pollution Modeling and Its Application*. IV, Plenum Press, New York, 1985, pp. 343-358.
33. Chang L.-S., Park S.-U. Direct radiative forcing due to anthropogenic aerosols in East Asia during April 2001. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.27, pp. 4467-4482.
34. 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.*, 2003, vol. 108, no. D16, pp. ACH1/1-ACH1/20.

35. 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE22/1-ACE22/17.
36. Civerolo K.L., Brankov E., Rao S.T., and Zurbenko I.G. Assessing the impact of the acid deposition control program.// *Atmospheric Environment*, 2001, vol.35, no.24, pp. 4135-4148.
37. 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.*, 2003, vol. 108, no. D19, pp. PRD5/1-PRD5/20.
38. 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.*, 2003, vol. 108, no. D19, pp. PRD6/1-PRD6/16.
39. Despres A., Rancillac F., Bouville A. First result of the data processing of the VIth European campaign on remote – sensing of air pollution. In: Wispelaeere et al. (Eds.) *Air Pollution Modeling and Its Application V*, Plenum Press, New York, 1986, pp. 371-382.
40. Dimov I., Georgiev K., Ostromsky Tz., and Zlatev Z. Computational challenges in the numerical treatment of large air pollution models. // *Ecological Modelling*, 2004, vol 179, no. 2, pp. 187-203.
41. Dodembender J., Wassmann R., Papen H., and Rennenberg H. Temporal and spatial variation of sulfur-gas-transfer between coastal marine sediments and the atmosphere. // *Atmospheric Environment*, 1999, vol.33, no.21, pp. 3487-3502.
42. Eckhardt S., Stohl A., Forster C., James P. Climatology of ascending air-streams and their relation to the long-range transport of trace substances in the atmosphere (CARLOTTA). // *AFO Newsletter*, 2003, no. 4, pp. 3-6.
43. 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.* 2003. Vol. 108, No D16. P. AAC13/1-AAC13/11.
44. Fine J., Vuilleumier L., Reynolds S., Roth P., and Brown N. Evaluating uncertainties in regional photochemical air quality modeling. // *Annual Review Environment Resources*, 2003, no. 28, pp. 59-106.
45. Gallagher M. W., Nemitz E., Dorsey J. R., Fowler D., Sutton M. A., Flynn M., Duyzer 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.*, 2003, vol. 108, no. D12, pp. AAC8/1-AAC8/10.
46. Gallardo L., Olivares G., Langner J., Aarthus B. Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile. // *Atmospheric Environment*, 2002, vol.36, no.23, pp. 3829-3841.
47. Galle B., Oppenheimer C., Geyer A., McGonigle A.J.S., Edmonds M., and Horrocks L. A miniaturized ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: a new tool for volcano surveillance. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, vol. 119, no. 1-4, pp. 241-254.
48. Ginoux P. Effects of nonsphericity on mineral dust modeling. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D2, pp. AAC3/1-AAC3/10.

49. Gregory D., Morcrette J.-J., Jakob C., Beljaars A.C.M., and Stockdale T. Revision of convection, radiation and cloud schemes in the ECMWF Integrated Forecasting System. // *Qartely J. Roy. Met. Soc.*, 2000, no. 126, pp. 1685-1710.
50. Hadley A., Toumi R. A simple model which predicts some non-linear features between atmospheric sulphur and sulphur emissions. // *Environmental Pollution*, 2002, vol. 119, no. 3, pp. 365-374.
51. Hewitt C.N. The atmospheric chemistry of sulphur and nitrogen in power station plumes. // *Atmospheric Environment*, 2001, vol.35, no.7, pp. 1155-1170.
52. Holland D.M., Caragea P., and Smith R.L. Regional trends in rural sulfur concentrations. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.11, pp. 1673-1684.
53. 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.*, 2003, vol. 108, no. D22, pp. ACL11/1-ACL11/17.
54. 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.*, 2002, vol. 107, no. D19, pp. AAC7/1-AAC7/17.
55. Howarth R.W., Stewart J.W.B., and Ivanov M.V. (Eds.) *Sulphur cycling on the continents wetlands, terrestrial ecosystems, and associated water bodies*. Wiley, Chichester, 372 pp.
56. Hunton D.E., Ballenthin J.O., Borghetti J.F., Federico G.S., Miller T.M., Thorn W.F., and Viggiano A.A. Chemical ionization mass spectrometric measurements of SO<sub>2</sub> emissions from jet engines in flight and test chamber operations. // *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105, no. D22, pp. 26841-26855.
57. Hutchison K.D., Smith S., and Faruqui S. The use of MODIS data and aerosol products for air quality prediction. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol. 38, no. 30, pp. 5057-5070.
58. Hutjes R.W.A., Dolman A.J., Nabuurs G.J., Schelhaas M.J., Ter Maat H.W., Kabat P., Moors E., and Huygen J. Land use, climate and biogeochemical cycles: feedbacks and options for emission reduction. *Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change*, Report no. 410 200 107, 2001, The Netherlands, 220 pp.
59. Kim K.-H., Kim M.-Y. Comparison of an open path differential optical absorption spectroscopy system and a conventional in situ monitoring system on the basis of long-term measurements of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. // *Atmospheric Environment*, 2001, vol.35, no.24, pp. 4059-4072.
60. Kondratyev K. Ya., Grigoryev Al. A., Varotsos C. A. *Environmental Disasters: Anthropogenic and Natural*. Springer/PRAXIS. Chichester, U.K. 2002, 484 pp.
61. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. *Global Environmental Change: Modelling and Monitoring*. Springer-Verlag, Berlin, 2003, 319 pp.
62. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinikh V.P. and Varotsos C.A. *Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis*. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2004, 686 pp.
63. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. *Global Carbon Cycle and Climate Change*. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2003, 568 pp.
64. Kubilay N., Cokacar T., Oguz T. Optical properties of mineral dust out-brakes over the northeastern Mediterranean. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D21, pp. AAC4/1-AAC4/10.
65. Langmann B. Numerical modelling of regional scale transport and photochemistry directly together with meteorological processes. // *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, no. 21, pp. 3585-3598.

66. Lefohn A.S., Husar J.D., Husar R.B. Estimating historical anthropogenic global sulfur emission pattern for the period 1850-1990. // *Atmospheric Environment*, 1999, vol.33, no.21, pp. 3435-3444.

67. 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.*, 2003, vol. 108, no. D22, pp. AAC5/1-AAC5/14.

68. 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE21/1-ACE21/21.

69. 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.*, 2003, vol. 108, no. D19, pp. PRD4/1-PRD4/23.

70. Luo C., Mahowald N. M., del Corral J. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D15, pp. AAC5/11-AAC5/21.

71. 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.*, 2003, vol. 107, no. D21, pp. AAC7/11-AAC7/16.

72. 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE5/1-ACE5/14.

73. 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.*, 2003, vol. 108, no. D2, pp. PEM5/1-PEM5/18.

74. Matsuki A., Iwasaka Y., Osada K., Matsunaga K., Kido M., Inomata Y., Trochkin D., Nishita C., Nezuka 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.* 2003. Vol. 108, No D23. P. ACE31/1-ACE31/12.

75. Matsumoto K., Nagao I., Tanaka H., Miyaji H., Iida T., and Ikebe Y. Seasonal characteristics of organic and inorganic species and their size distributions in atmospheric aerosols over the Northwest Pacific Ocean. // *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 11, pp. 1931-1946.

76. 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE3/1-ACE3/6.

77. 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE34/1-ACE34/15.

78. McGonigle A.J.S., Oppenheimer C. A., Hayes A.R., Galle B., Edmonds M., Calabiano T., Salerno G., Burton M., and Mather T.A. Sulphur dioxide fluxes

from Mt. Etna, Vulcano and Stromboli measured with an automated scanning ultraviolet spectrometer. // *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, no. B9, pp. 2455-2456.

79. McGonigle A.J.S., Thomson C.L., Tsanev V.I., and Oppenheimer C. A. simple technique for measuring power station SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emissions. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.1, pp. 21-25.

80. Mehdizadeh F. and Rifal H. Modeling point source plumes at high altitudes using a modified Gaussian model. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.6, pp. 821-831.

81. Meloni D., diSarra A., Fiocco G., Junkermann W. Tropospheric aerosols in the Mediterranean: 3. Measurements and modelling of actinic radiation profiles. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no D10, pp. AAC6/1-AAC6/12.

82. 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, vol. 30, no 21, pp. ASC2/1-ASC2/5.

83. 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.*, 2003, vol. 108, no D2, pp. PEM8/1-PEM8/27.

84. 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, vol. 61, no 1, pp. 57-72.

85. Nitu C., Krapivin V.F., and Pruteanu E. *Intelligent Systems in Ecology*. Onesti, Bucharest, 2004, 410 pp.

86. Nitu C., Krapivin V.F., and Bruno A. *System modelling in ecology*. Printech, Bucharest, 2000, 260 pp.

87. O'Dwyer M., Padgett M.J., McGonigle A.J.S., Oppenheimer C., and Inguaggiato S. Real-time measurement of volcanic H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> concentrations by UV spectroscopy. // *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, no. 12, pp. 1652-1657.

88. Olivares G., Gallardo L., Langner J., Aarhus B. Regional dispersion of oxidized sulfur in Central Chile. // *Atmospheric Environment*, 2002, vol.36, no.23, pp. 3819-3828.

89. 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.*, 2003, vol. 108, no D23, pp. ACE35/1-ACE35/9.

90. Papaspiropoulos G., Martinsson B. G., Zahn A., Brenninkmeijer 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.*, 2002, vol. 107, no D23, pp. AAC3/1-AAC3/14.

91. Parrish D., Law K. Intercontinental Transport and Chemical Transformation (ITCT-Lagrangian – 2k4). // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no D15, pp. 8-13.

92. Paulsen C.A. The mathematical representation of wind and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. // *J. Appl. Meteor.*, 1970, no. 9, pp. 857-861.

93. Pickett E.E. (Ed.) *Atmospheric Pollution*. Springer-Verlag, 1987, Berlin, 286 pp.

94. Raaschou-Nielsen O, Hertel O, Vignati E, Berkowicz R, Jensen SS, Larsen VB, Lohse C. Evaluation of an air pollution model with respect to use in epidemiologic studies; comparison with measured levels of nitrogen dioxide and benzene. // *J. Exp. Anal. and Env. Epi.*, 2000, no.10, pp. 4-14.

95. 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, vol. 33, no 1, pp. 11-29.
96. 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.*, 2003, vol. 108, no D19, pp. PRD7/1-PRD7/22.
97. 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.*, 2003, vol. 108, no D19, pp. 9/1-9/22.
98. 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., Tanré 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.*, 2003, vol. 108, no D19, pp. PRD2/1-PRD2/27.
99. Reid J. S., Maring H. B. Foreword to special section on the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE). // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no D19, pp. PRD1/1-PRD1/2.
100. 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, vol. 61, no 8, pp. 919-930.
101. Safai P.D., Rao P.S.P., Momin G.A., All K., Chate D.M., and Praveen P.S. Chemical composition of precipitation during 1984-2002 at Pune, India. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.12, pp. 1705-1714.
102. 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.*, 2003, vol. 108, no D23, pp. ACE24/1-ACE24/22.
103. Scorer R.S. *Dynamics of Meteorology and Climate*. Wiley, New York, 1997, 350 pp.
104. 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.*, 2003, vol. 108, no D17, pp. ACH4/1-ACH4/23.
105. Sinik N., Loncar E., Vidic S. (1985) The use of field data in average wet deposition modeling. In: *Air Pollution Modeling and Its Application*. IV, Plenum Press, 1985, New York, pp. 155-161.
106. Sorokin A., Katragkou E., Arnold F., Busen R., and Schumann U. Gaseous SO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the exhaust of an aircraft gas turbine engine: measurements by CIMS and implications for fuel sulfur conversion to sulfur (VI) and conversion of SO<sub>3</sub> to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.3, pp. 449-456.
107. Stein A.F., Lamb D. The sensitivity of sulfur wet deposition to atmospheric oxidants. // *Atmospheric Environment*, 2000, vol.34, no.11, pp. 1681-1690.
108. Stig H.F. Hydrogen sulfide basins and stagnant period in the Baltic Sea. // *Journal of Geophysical Research*, 1963, vol. 68, no. 13, pp. 4009-4017.

109. Stoddard J.L., Kahl J.S., Deviney F.A. et al. Response of Surface Water Chemistry to the Clean Air Act Amendments of 1990. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/6201R-02/04, New York, 2003, 92 pp.
110. Stohl A., Eckhardt S., Forster C., James P., Spichtinger N. On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport. // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no D23, pp. ACH6/1-ACH6/17.
111. 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, vol. 3, pp. 969-985.
112. Streets D.G., Guttikunda S.K., Carmichael G.R. The growing contribution of sulfur emissions from ships in Asian waters, 1988-1995. // *Atmospheric Environment*, 2000, vol.34, no.26, pp. 4425-4439.
113. Streets D.G., Tsai N.Y., Akimoto H., Oka K. Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997. // *Atmospheric Environment*, 2000, vol.34, no.26, pp. 4413-4424.
114. 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, vol. 61, no 2, pp. 179-194.
115. 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, vol. 29, no 24, pp. 11/1-11/4.
116. Takeuchi M., Okochi H., Igawa M. Characteristics of water-soluble components of atmospheric aerosols in Yokohama and Mt. Oyama, Japan, from 1990 to 2001. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.28, pp. 4701-4708.
117. Terada H., Ueda H., Wang Z. Trend of acid rain and neutralization by yellow sand in East Asia – a numerical study. // *Atmospheric Environment*, 2002, vol.36, no.3, pp. 503-509.
118. Toth F., T. Bruckner, H.-M. Füssel, C. Helm, G. Hooss, M. Leimbach, J. van Minnen, G. Petschel-Held, H.-J. Schellnhuber, E. Tothne-Hizsnyik. *ICLIPS - Integrierte Abschätzung von Klimaschutzstrategien: Methodisch-naturwissenschaftliche Aspekte [in German]*. Research Report 01 LK 9605/0, Federal Ministry for Science and Research, Bonn, Germany, 2000, 115 pp.
119. Uno I., Carmichael 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.*, 2003, vol. 108, no D23, pp. ACE4/1-ACE4/11.
120. Uno I., Carmichael 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.*, 2003, vol. 108, no. D23, pp. ACE36/1-ACE36/17.
121. Venkatram A., Isakov V., Yuan J., Pankratz D. Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.28, pp. 4633-4641.
122. Wang H., Christiansen J.H. A reentry plume fumigation model. In: C. De Wispelaere et al. *Air Pollution Modeling and Its Application V*, Plenum Press, New York, 1986, pp. 565-579.
123. 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.*, 2003, vol. 108, no D19, pp. 11/1-11/15.

124. Wylie D. P., Hudson J. G., Effects of long-range transport and clouds on cloud condensation nuclei in the springtime Arctic. // *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, no D16, pp. AAC13/1-AAC13/11.

125. Xie S., Qi L., Zhou D. Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory. // *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, no.27, pp. 4457-4466.

126. Xu Y., Carmichael G.R. An assessment of sulfur deposition pathways in Asia. // *Atmospheric Environment*, 1999, vol.33, no.21, pp. 3473-3486.

127. 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.*, 2003, vol. 108, no D23, pp. ACE33/1-ACE33/9.

128. Zlatev Z., Chrisensen J., and Hov O. A Eulerian air pollution model for Europe with nonlinear chemistry. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, no. 15, pp. 1-37.