

К.Я. Кондратьев

Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 2. Полевой наблюдательный эксперимент ACE-Asia

*НИИ Центр экологической безопасности РАН/Международный Нансеновский фонд
окружающей среды и дистанционного зондирования, г. Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 16.09.2005 г.

Обсуждены результаты комплексных исследований атмосферного аэрозоля и его трансформации в процессе дальнего переноса, выполненных в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia.

Введение

Естественно, что (при исключительной актуальности численного моделирования) основу понимания реальных изменений климата составляет анализ данных наблюдений, в особенности региональных комплексных полевых наблюдательных экспериментов. В контексте проблематики «аэрозоль и климат» важное значение имело опубликование за последние годы тематических выпусков журнала «Оптика атмосферы и океана», посвященных разработкам в рамках программы «Аэрозоли Сибири». Особое место занимают в этой связи результаты осуществления полевой наблюдательной программы Aerodyne Characterization Experiment-Asia (ACE-Asia), посвященной исследованиям атмосферного аэрозоля и его воздействий в регионах Юго-Восточной Азии и Северо-Западного сектора Тихого океана, которые были выполнены в рамках программы ACE полевых экспериментов с целью изучения свойств аэрозоля (что касается других аналогичных программ, то они были рассмотрены в [18]). Анализ результатов ACE-Asia составляет главное содержание настоящего обзора, но прежде чем обратиться к обсуждению этой проблематики, следует кратко упомянуть о других направлениях аналогичных разработок, которые составляют контекст для ACE-Asia. Подобные разработки охватывают практически весь широкий диапазон проблематики — от процессов, связанных с образованием и эволюцией свойств отдельных частиц аэрозоля, до динамики глобального распределения аэрозоля.

На наблюдательной станции Техасского университета College Station в 2002–2003 гг. регулярно функционировал масс-спектрометр, предназначенный для измерений химического состава отдельных частиц ультрамелкого атмосферного аэрозоля различных размеров. В декабре–марте были осуществлены три серии наблюдений, разделенных интервалами времени, равными 6 нед. Всего заре-

гистрировано 128 тыс. масс-спектров для частиц с аэродинамическим диаметром от 30 до 300 нм, которые подверглись последующей классификации.

Glagolenko и Phares [9] идентифицировали и описали 15 статистически существенных классов. Наиболее часто наблюдались ионы нитрата калия, углерода и кремния/оксида кремния. Присутствие нитрата в большинстве частиц можно объяснить как результат воздействия сельскохозяйственной активности вблизи пункта наблюдений. Частота обнаружения нитрата коррелирует с приземной температурой воздуха и относительной влажностью. Другой класс частиц, идентифицируемый как амин, характеризуется наличием сильной зависимости от относительной влажности, проявляющейся, однако, лишь в условиях низкой относительной влажности. По-видимому, некоторые из зарегистрированных частиц возникали в крупных городах и покрывались пленкой из нитрата, сульфата и органических соединений в процессе дальнего переноса.

При помощи двух дифференциальных анализаторов подвижности (TDMA) 9–12 августа 2002 г. на станции наблюдений Техасского университета в College Station Santarpià и др. [32] провели измерения подвижности заряженных частиц аэрозоля для анализа состояния гидратации аэрозоля в зависимости от размеров частиц. В процессе наблюдений аэрозоль подвергался увлажнению в воздухе с относительной влажностью $RH = 80\%$ до и вскоре после захода Солнца (RH в атмосфере варьировала в пределах 50–70%). Исследовались частицы атмосферного аэрозоля размером от 160 до 320 нм. Рассмотрение результатов измерений показало, что гигроскопически обусловленный рост размеров частиц был ниже уровня, рассчитанного для таких неорганических соединений, как сульфат аммония. Это свидетельствует о том, что частицы представляли собой смеси растворимых и нерастворимых компонентов. Те частицы, которые характеризовались

наличием гистерезиса гигроскопического роста, почти всегда представляли собой метастабильные водные растворы.

Анализ данных наблюдений несолевого (nss) сульфатного аэрозоля в удаленном (фоновом) морском пограничном слое атмосферы (УПСА) свидетельствует о возможности наличия существенной доли фракции nss-аэрозоля в виде грубодисперсного (супермикронного) морского солевого аэрозоля. Образование nss-аэрозоля может быть лишь частично объяснено механизмами, учитывающими влияние водной фазы. Sievering и др. [39] обработали пробы атмосферного аэрозоля, собранные в Baring Head (Новая Зеландия) в условиях ясного неба и обычной облачности, которые позволили оценить вклад обусловленного приземным озоном (O_3) механизма окисления в формирование грубодисперсной фракции частиц nss.

Согласно данным наблюдений, массовая концентрация грубодисперсного аэрозоля при ясном небе была больше 8 нмоль nss/m^3 , а при средних условиях облачности — меньше 3 нмоль nss/m^3 . Эти данные получены при сильном ветре (~11 м/с), минимизирующем время жизни частиц грубодисперсного аэрозоля и, следовательно, возможности его взаимодействия с облаками. Во всех случаях состав аэрозоля характеризовался избыточностью кальция (Ca), превосходящей в 200 раз (по отношению к нормальной), и соответственно щелочность аэрозоля была в 30–40 раз больше, чем у основной массы морской воды. В таких условиях происходило усиление обусловленного O_3 окисления в водной фазе, которое способно объяснить наличие грубодисперсной фракции частиц несолевого аэрозоля.

Согласно данным спутникового дистанционного зондирования, Южнополюсный океан в наветренной стороне от Baring Head обладает примерно в три раза более высокой первичной продуктивностью (при соответствующем усилении концентрации биогенного Ca) по сравнению с открытым океаном. Наличие мощного источника биогенного Ca и сильного ветра определяет аномальность УПСА в регионе Baring Head. Из корабельных наблюдений в условиях более типичного УПСА в Западном секторе Тихого океана в южном полушарии следует, что усиление щелочности морского солевого аэрозоля за счет морских биогенных источников может достигать лишь от ~1 до ~2,5 раза (по сравнению с основной массой морской воды). Для грубодисперсного аэрозоля типичен интенсивный процесс его осаждения на поверхности океана, следствием которого является быстрое рециклирование поступающей из океана серы. Такого рода процесс не был, однако, учтен в предложенных ранее моделях бюджета серы в УПСА. Одним из важных последствий подобной ситуации оказался неадекватный учет вклада в образование новых частиц аэрозоля биогенной океанической серы УПСА, связанный с тем, что обусловленный озоном процесс окисления в частицах морского солевого аэрозоля оказывается более энергетически выгодным, чем одно- и двухатомная нуклеация.

Сжигание биомассы оказывает существенное региональное и глобальное воздействие на химические процессы в тропосфере. Согласно существующим оценкам вклад сжигания биомассы в формирование глобального бюджета CO составляет 15–30%, а в случаях O_3 равен ~9% и NO_x ~14–18%. В глобальных масштабах сжигание биомассы служит доминирующим источником органического углеродного аэрозоля (OC) и примерно вдвое превосходит вклад выбросов за счет сжигания ископаемых топлив в бюджет OC. Роль этих двух источников примерно одинакова в случае аэрозоля из «черного углерода» (BC). Важно также, что в процессе сжигания биомассы в атмосферу поступают различные парниковые газы. Актуальной проблемой в этом контексте являются оценки роли лесных пожаров как фактора регионального загрязнения атмосферы.

De Bell и др. [6] рассмотрели случаи лесных пожаров, возникших в провинции Квебек (Канада) в начале июля 2002 г. на площади около 10^6 га. Образовавшийся от них дымовой шлейф был замечен на спутниковых изображениях региона Восточного побережья США. Одновременно на сети наземных станций в штате Нью-Хемпшир и на станции в Гарвардском лесу (штат Массачусетс) были зарегистрированы высокие значения концентрации окиси углерода CO. Наблюденный уровень отношения смеси CO оказался на 525–1025 млрд⁻¹ выше, чем в предшествующий и последующий периоды.

Наличие источника сжигания биомассы подтверждали также данные наблюдений, отображавшие возрастание содержания в составе аэрозоля таких компонентов, как K^+ , NH_4^+ , NO_3^- и $C_2O_4^{2-}$. Дополнительная информация о содержании K, органического и элементного углерода в составе аэрозоля свидетельствовала о том, что шлейф дыма от лесного пожара охватывал значительную часть Восточного побережья США между штатами Мэйн и Вирджиния. Сравнение с результатами наблюдений отношения смеси CO на станциях, где длина рядов достигала 10 лет и более, позволило считать, что обсуждаемое событие было крупнейшим эпизодом сжигания биомассы, случившимся на Восточном побережье США за последние 10 лет. Из данных наблюдений отношения смеси CO, а также коэффициентов рассеяния, рассчитанных по данным о счетной концентрации частиц аэрозоля диаметром меньше 2,5 мкм (PM-2,5), следует, что масштабы рассматриваемого события сравнимы с воздействиями крупных событий антропогенных загрязнений и формирования дымки, время от времени проявляющимися в сельских регионах Новой Англии. Степень возрастания содержания в шлейфе от лесных пожаров таких компонентов, как O_3 , NO_y , NO_3^- , NH_4^+ и SO_4^{2-} , характеризовалась наличием значительной зависимости от высоты и от широты, что было связано, вероятно, с изменчивостью дальнего переноса и процессов осаждения на подстилающую поверхность.

Eldering и др. [8] выполнили восстановление вертикальных профилей объемной концентрации

частиц сульфатного аэрозоля и коэффициента экстинкции по данным за 1992, 1993 и 1994 гг. установленного на ТКК Space «Shuttle» инфракрасного спектрометра высокого спектрального разрешения ATMOS. Поскольку наблюдения происходили в период после происшедшего в июне 1991 г. мощного извержения вулкана Пинатубо, анализ полученных результатов позволил проследить эволюцию вулканического сульфатного аэрозоля на протяжении трех лет после извержения. В работе [8] приведены результаты восстановления вертикальных профилей объемной концентрации аэрозоля для трех регионов земного шара в диапазоне высот от 10 км (в полярных широтах) до 20 км (в субтропических широтах) и выше. Объемная концентрация аэрозоля достигала $2-3,5 \text{ мкм}^3/\text{см}^3 \pm 10\%$ в 1992 г. и уменьшилась до $0,2-0,5 \text{ мкм}^3/\text{см}^3 \pm 20\%$ в 1994 г., что согласуется с другими аналогичными данными наблюдений. Хорошее согласие результатов восстановления получено и в случае вертикальных профилей коэффициента экстинкции.

Ramachandran [30] обсудил результаты судовых наблюдений изменчивости и трендов аэрозольной оптической толщины (АОТ) в интервале длин волн 400–850 нм, выполненных во время рейсов 1996–2000 гг. в периоды северо-восточного зимнего муссона в регионах Аравийского моря (АМ) и тропиков Индийского океана (ТИО). Было обнаружено наличие очень сильного широтного градиента АОТ по мере движения судна от побережья Индии (ПИ) в глубь океана. Наблюдаются тренды возрастания АОТ вблизи ПИ и АМ, но уменьшения АОТ в зоне ТИО в течение всего 5-летнего периода наблюдений. Среднемесячные значения АОТ декабрь–апрель возрастают в регионах ПИ и АМ, но уменьшаются в зоне ТИО. Проанализированы и сопоставлены тренды АОТ в двух пунктах наблюдений на суше [Trivandrum (TVM) и Visharakatnam (VSK)] на Индийском п-ове и в двух точках в регионе океана, находящихся на направлении преобладающих ветров со стороны Индийского субконтинента. Для средних за 5 лет значений АОТ во всех случаях наблюдается менее сильный широтный градиент, а значения АОТ близки по величине. За четырехлетний период в TVM зарегистрирован тренд возрастания АОТ, но в VSK заметного тренда не обнаружено. В двух упомянутых точках региона Индийского океана имеет место такой же тренд убывания АОТ, который типичен и для всего океана. В декабре – апреле как на суше, так и над океаном наблюдается возрастание средних месячных значений АОТ.

По данным судовых наблюдений спектральной аэрозольной оптической толщины над Аравийским морем и тропиками Индийского океана в периоды северо-восточного зимнего муссона в 1996–2000 гг. Ramachandran [31] рассчитал параметры Ангстрема α и β с целью анализа их пространственно-временной изменчивости (оптическая толщина $\tau = \beta \lambda^{-\alpha}$, где λ – длина волны). Для осредненного за 5 лет значения экспоненты Ангстрема α получены значения, составляющие около 1,5 для регионов прибрежной

Индии, АМ и ТИО, 5-летнее среднее значение параметра мутности β равно примерно 0,14 над ПИ; 0,10 над АМ и 0,05 над ТИО. Изменчивость α и β характеризуется наличием межгодовых вариаций и изменениями значений этих параметров от месяца к месяцу. Средние за 5 лет значения α и β в двух пунктах наблюдений на суше (TVM и VSK) и в двух морских точках наблюдений [Minicoy (MCY) и Kaashidoo (KCO)] составляют около 1 и 0,2 соответственно. Отчетливо проявляется зависимость АОТ на длине волны 500 нм за период 1996–2000 гг. от среднесуточной скорости ветра. Оценка расстояния, на котором сказывается влияние континентального аэрозоля на оптические свойства атмосферы над Индийским океаном, дала значение, равное 1500 км. Получены также оценки осредненного за 5 лет антропогенного вклада в формирование АОТ на длине волны 500 нм, который оказался более 90% над ПИ и АМ, но был более слабым (74%) над ТИО. В случаях MCY и KCO этот вклад меньше 70%.

Поскольку пылевой аэрозоль, возникающий главным образом под воздействием пылевых бурь в пустынях, является одним из главных компонентов глобального аэрозоля, Martonchik и др. [21a] предприняли сравнение результатов восстановления аэрозольной оптической толщины по данным дистанционного зондирования при помощи спутникового многоуглового видеоспектрорадиометра MISR с данными четырех станций AERONET наблюдений при помощи солнечных фотометров, расположенных в пустынях, за период с декабря 2000 г. по ноябрь 2002 г. Сравнение двух серий данных выявило хорошее согласие (при отсутствии систематических расхождений), что свидетельствует об адекватности данных MISR об АОТ в видимой и близкой ИК-областях спектра над подстилающей поверхностью с высоким альбедо. Случайные погрешности восстановления АОТ по данным MISR составляют 0,08, при пространственном разрешении данных, равном 17,6 км. При снижении последнего до 52,8 км погрешность уменьшается до 0,05. Таким образом, данные MISR по АОТ вполне могут быть использованы для достоверных количественных оценок изменчивости запыления атмосферы в регионах пустынь.

Schaap и др. [36] предложили модель мелкодисперсной фракции атмосферного аэрозоля для Западной Европы применительно к условиям 1995 г. с учетом ВС, опирающуюся на результаты новой инвентаризации антропогенного первичного аэрозольного вещества. Оценки годичных выбросов ВС в Западной Европе и в России за 1995 г. привели к значениям, равным соответственно 0,47 и 0,26 Тг при максимальных вкладах выбросов в формирование аэрозоля за счет транспорта и домашнего хозяйства. Согласно предложенной модели концентрация ВС изменяется от $\leq 0,05 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в удаленных фоновых регионах до $> 1 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в густо населенных регионах. Модельные значения концентрации составляют около 25% по отношению к суммарной концентрации первичного аэрозоля.

Для воспроизведения поля концентрации суммарного антропогенного мелкодисперсного аэрозоля в работе [36] составлена комбинация полей первичного аэрозоля и рассчитанного ранее распределения концентрации вторичного аэрозоля. Рассмотрение такого рода данных привело к выводу, что доля модельного ВС составляет лишь 4–10% по сравнению с массой суммарного мелкодисперсного аэрозоля, тогда как вклады сульфата и нитрата достигают 25–50 и 5–35% соответственно. Сравнение с данными наблюдений продемонстрировало заниженность модельных значений концентрации аэрозоля PM-2,5, которая обусловлена главным образом преуменьшением массы общего органического вещества (как ВС, так и ОС), примерно в два раза. Подобное преуменьшение могло быть отчасти следствием неполного учета локальных выбросов, погрешностей наблюдений, не вполне адекватного учета природных источников и влажного осаждения. Однако главный источник расхождений мог быть связан с недостаточной достоверностью инвентаризации выбросов ВС (и общего PM). По сравнению с полученными ранее данными новые оценки выбросов ВС оказались примерно вдвое ниже, что обусловлено более надежным определением различных факторов выбросов, хотя соответствующие оценки все еще нуждаются в дальнейшем уточнении.

Недавние наблюдения привели к выводу, что за период 1979–1998 гг. в штате Нью-Йорк произошло уменьшение концентрации в атмосфере SO₄ и общей серы (SO₂ + SO₄), причем концентрация SO₄ была линейно связана с выбросами SO₂ в восьми штатах, расположенных на наветренной стороне по отношению к штату Нью-Йорк. Главным источником SO₂ в этих восьми штатах было сжигание каменного угля, которое порождало также выбросы пепла в атмосферу, содержавшие различные трассерные и летучие компоненты. Результатом конденсации последних стало образование частиц аэрозоля. В число природных компонентов аэрозоля входили частицы почвенного происхождения, морские солевые частицы и продукты лесных пожаров.

Husain и др. [12] выполнили анализ ежедневных проб аэрозоля (за период около 20 лет), собранных в Mayville и в горах Whiteface, расположенных на расстоянии 530 км по направлению преобладающего ветра (высота 1,5 км), на содержание K, Sc, Mn, Fe, Zn, As, Se, Sb, Hg и Pb. За весь период наблюдений имелись данные о концентрациях [SO₂] и [SO₄], анализ которых показал, что концентрация общей серы в Mayville была примерно в 4 раза выше, чем в Whiteface. В течение 1979–2002 гг. концентрация [SO₄] уменьшилась на 59% в Whiteface, а в Mayville (1984–2002 гг.) на 30%. Уменьшение концентрации SO₂ за период 1979–2002 гг. в восьми упомянутых штатах составило 49%. По данным наблюдений в двух пунктах имело место линейное соотношение между [SO₄] и концентрацией общей серы. Из этих данных следует, что дальнейшее сокращение выбросов SO₂ повлечет за собой пропорциональное уменьшение

[SO₄] и концентрации общей серы в штате Нью-Йорк и, возможно, во всем Северо-Восточном регионе США. Из данных для Whiteface вытекает, что начиная с 1997 г. спад концентрации [SO₄] и общей серы по сравнению с выбросами SO₂ мог происходить быстрее, чем раньше.

Подобно концентрации [SO₄] и общей серы, содержание трассерных элементов в Mayville оказалось в 2–5 раз выше, чем в Whiteface, причем в обоих пунктах имели место тренды спада концентрации, наиболее сильно проявившиеся для таких элементов, как Hg (16 и 10%/год соответственно в Mayville и Whiteface) и Pb (14 и 10%). В остальных случаях (K, Mn, Sc, Fe), за исключением Sb, уменьшение концентрации варьировало в пределах 3–5%/год. Тренды Sb в Whiteface и Mn в Mayville выявить не удалось (по-видимому, ввиду наличия поблизости источников их выбросов). Несомненно, что следствием снижения уровней выбросов SO₂ и аэрозоля стало уменьшение содержания в атмосфере трассерных элементов и улучшение качества воздуха.

Характерным явлением в Арктике, возникающим зимой и весной, является образование «арктической дымки», важным компонентом которой служит «черный углерод», образующийся преимущественно под воздействием антропогенных источников загрязнений, находящихся в Европе, бывшем СССР и Северной Америке, и затем претерпевающий дальний перенос в Арктику. Подобный «черный углерод», будучи взвешенным в атмосфере (в составе аэрозоля) или находясь внутри снежного покрова, оказывает существенное воздействие на формирование радиационного возмущающего воздействия, обусловленного арктической атмосферой. Sharma и др. [37] обсудили результаты регулярных наблюдений ВС в составе атмосферного аэрозоля на ст. Alert (82,5° с.ш.; 62,5° з.д.), производившихся с 1989 г.

В течение трех лет были осуществлены интенсивные наблюдения с целью сравнения результатов, полученных с применением термического анализа и по методике оптического поглощения, что дало, в частности, возможность изучить годовой ход «оперативных» значений поперечника поглощения аэрозоля. Анализ полученного временного ряда показал, что изменения концентрации черного углерода характеризуются наличием сильного годового хода, налагающегося на долговременный тренд, который проявился как уменьшение концентрации ВС в 1989–2002 гг. на ст. Alert примерно на 55%. Оценки таких факторов подобной изменчивости, как выбросы в атмосферу и дальний перенос, привели к выводу, что главной причиной тренда спада было уменьшение выбросов ВС в бывшем СССР. Вклады дальнего переноса из регионов Северной Америки и Западной Европы были менее существенными.

Во всевозрастающей степени источником информации о свойствах глобального аэрозоля становятся результаты спутникового дистанционного зондирования. При этом возникает, однако, про-

блема их верификации. Решению этой проблемы на основе сопоставления данных наземных, самолетных и спутниковых наблюдений посвящена недавняя серия статей [1, 2а, 12а, 19а, 20а, 31а, 41а], главный вывод которых состоит в констатации наличия существенных расхождений, их устранение требует дальнейших разработок.

Упомянутые выше некоторые результаты недавних исследований иллюстрируют фрагментарность многих разработок, тогда как решение проблем изменчивости климата требует комплексного подхода к изучению атмосферного аэрозоля. Обратимся теперь к анализу итогов осуществления программы ACE-Asia как одной из наиболее успешных комплексных наблюдательных программ.

1. Полевой наблюдательный эксперимент ACE-Asia

1.1. Метеорологические условия

Merrill и Kim [24] обсудили основные особенности метеорологической обстановки в период с 30 марта по 4 мая 2001 г., когда осуществлялись наблюдения атмосферного аэрозоля в рамках программы периода интенсивных наблюдений полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia. Наблюденные аномалии структуры атмосферной циркуляции оказались в центре диапазона межгодовой изменчивости при пространственной ограниченности и малой величине аномальных изменений. Близки к среднеклиматической повторяемость и пространственное распределение циклонов в средних широтах, которые оказывают воздействие на формирование атмосферной циркуляции и пространственной структуры дальнего переноса аэрозоля. Анализ данных наблюдений аэрозоля выявил наличие сильного рассеяния, обусловленного грубодисперсной фракцией аэрозоля и возникающего на малых высотах в постфронтальной зоне холодного фронта в периоды пылевых бурь, когда возникают интенсивные выбросы пылевого аэрозоля в атмосферу. Очень сильное рассеяние связано со смешанной модой микроструктуры аэрозоля в зонах пылевых шлейфов из регионов загрязнения.

С целью изучения зависимости состава атмосферного аэрозоля от метеорологических условий Park и др. [28] проанализированы полученные в Госане (Южная Корея) данные наземных наблюдений за период 10 лет (с марта 1992 г. по февраль 2002 г.). Госан расположен на западной оконечности о-ва Jeju, который находится на расстоянии около 100 км от южной части Корейского п-ова (примерно в 500 км от Западного региона Китая и в 200 км к востоку от Японских о-вов). О-в Jeju характеризуется наличием очень чистой атмосферы. Поэтому выполненные здесь наблюдения весьма репрезентативны с точки зрения анализа воздействия поступления воздушных масс с континента на свойства атмосферы. Согласно полученным данным наблюдений, средняя концентрация неорганического аэрозоля составила $6,74 \text{ мкг/м}^3$, т.е. оказалось более

высокой, чем зарегистрированная в различных фоновых регионах земного шара. Показано, что наблюдаемый высокий уровень концентрации сульфата в аэрозоле был обусловлен поступлением воздушных масс извне. Обнаружена тесная взаимосвязь между отношениями концентрации неорганического сульфат/аммоний/nss-калий, натрий/хлорид/магnezий и nss-кальций/нитрат, что свидетельствует о наличии у них общего источника и(или) сходных путей дальнего переноса. Вполне вероятно, что имеет место уменьшение отношения концентраций nss-сульфат/нитрат, связанное с возрастанием концентрации нитрата. Предполагается, что подобный тренд обусловлен динамикой выбросов в Китае. Результаты вычислений «обратных» траекторий привели к выводу, что примерно половина траекторий воздушных масс исходит из Северного, а одна четверть из Южного регионов Китая. На основе применения кластерного анализа показано, что в воздушных массах, поступающих из Китая, имеет место наиболее высокая концентрация nss-сульфата, аммония и нитрата.

1.2. Микроструктура, химический состав и оптические характеристики аэрозоля

В период полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia по изучению свойств атмосферного аэрозоля в регионе, охватывающем территории и акватории Китая, Кореи и Японии, в пяти случаях удалось выполнить совмещенные (синхронизированные во времени и в пространстве) наблюдения с использованием аппаратуры, установленной на спутнике «Терра» (многоугольной видеоспектро радиометр MISR), двух самолетах-лабораториях и наземной сети станций AERONET. Условия наблюдений включали случаи чистой, загрязненной и запыленной атмосферы. Kahn и др. [13] выполнили детальные сравнения полученных результатов и проанализировали возникшие расхождения данных. Как и ожидалось, в пределах нижних нескольких километров толщи тропосферы доминировала смесь пылевого и антропогенного (главным образом промышленного) аэрозолей. В рассмотренных пяти случаях микроструктура средне- и крупнодисперсного аэрозоля изменялась незначительно, но вариации аэрозольной и оптической толщины всей толщи атмосферы достигали 4 раз, а доля пыли в приземном аэрозоле варьировала в пределах 25–50%. Количество поглощающего компонента субмикронной фракции аэрозоля (альbedo однократного рассеяния около 0,8) оказалось максимальным в таких условиях, когда ветер пересекал регионы Пекина и Корейского п-ова.

Быстрое промышленное развитие Китая стимулирует научные разработки с целью исследований воздействий выбросов в атмосферу различных малых газовых компонентов (МГК) и аэрозоля на окружающую среду и экосистемы, имея в виду в первую очередь такие последствия подобных выбросов, как образование кислотных осадений,

«фотохимического» приземного озона и региональной дымки. Согласно имеющимся оценкам в период с 1980-х по середину 1990-х гг. наблюдался рост антропогенных выбросов таких МГК, как NO_x и SO_2 . Однако меры по совершенствованию технологий, осуществленные в Китае, обеспечили снижение выбросов: данные наблюдений зарегистрировали тренды спада концентрации NO_x и SO_2 в 1995–2000 гг. В этой связи Wang и др. [47] обсудили результаты наблюдений концентрации различных МГК и мелкодисперсного аэрозоля в Lin'an, расположенном в сельскохозяйственном регионе Восточного Китая, в период с 18 февраля по 30 апреля 2001 г., который совпадает по времени с полевым экспериментом ACE-Asia.

Программа наблюдений включала измерения концентрации O_3 , CO , NO , NO_y^* , SO_2 , CH_4 , неметановых углеводородных соединений (NMHC) C_2 – C_8 , углеводородных соединений C_2 – C_8 и химического состава аэрозоля PM-2,5. Среднечасовые значения отношений смеси (\pm дисперсия) CO , SO_2 и NO_y^* составили соответственно (677 ± 315) , $(15,9 \pm 14,6)$ и $(13,8 \pm 7,2)$ млрд⁻¹. Среднедневное отношение смеси приземного озона было равно (41 ± 19) млрд⁻¹. В числе NMHC наиболее высокой концентрацией обладал этан (3189 ± 717) трил⁻¹, за которым следовали этин (2475 ± 1395), этен (1679 ± 1455) и толуэн (1529 ± 1608) трил⁻¹. Осредненная концентрация аэрозольного органического вещества (ПОМ как органический углерод $\text{OC} \times 1,4$) и элементного углерода в PM-2,5 была равна соответственно $(21,5 \pm 7)$ и $(2,5 \pm 7)$ мкг/м³, а уровни концентрации сульфата и нитрата достигали соответственно $(17,3 \pm 6,6)$ и $(6,5 \pm 4)$ мкг/м³.

Обнаружена сравнительно высокая корреляция между отношениями смеси CO , NO_y^* ($r^2 = 0,59$), OC ($r^2 = 0,65$), CH_3Cl ($r^2 = 0,59$), растворимым калием ($r^2 = 0,53$) и многими NMHC, отображающая наличие такого источника, как сжигание биотоплива и биомассы. Имеет место также корреляция между концентрациями CO и таким промышленным индикатором, как C_2Cl_4 , что свидетельствует о влиянии промышленных выбросов. С другой стороны, концентрация SO_2 коррелировала с элементным углеродом (EC) ($r^2 = 0,56$), отображая влияние сжигания каменного угля. Содержание аммония было достаточно значительным (по-видимому, за счет сельскохозяйственной активности) для полной нейтрализации сульфата и нитрата. Для концентрации кремния и кальция характерна низкая корреляция с железом и алюминием, отображающая наличие иных источников Si и Ca, кроме почвы. Анализ отношений концентрации $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CO}$, $\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_2\text{H}_6$, нитрат/(нитрат + NO_y^*) и сульфат/(SO_2 + сульфат) привел к выводу, что пункт наблюдений находился в относительно свежей воздушной массе. Сравнение наблюдаемых значений отношения концентраций с соответствующими данными инвентаризации показало, что если расхождение наблюдавшегося в марте

отношения $\text{SO}_2/\text{NO}_y^*$ ($1,29$ млрд⁻¹/млрд⁻¹) с данными инвентаризации было -20% , то в случае CO/NO_y^* наблюдаемое среднее значение (37 млрд⁻¹/млрд⁻¹) оказалось примерно на 200% выше. Значения отношения CO/NMHC (с учетом этана, пропана, бутана, этена и этина) также свидетельствовали о наличии избыточного CO , откуда следует, что значения концентрации CO , полученные ранее для Восточного Китая, были заниженными.

Arimoto и др. [1a] обсудили результаты анализа ионного и элементного состава атмосферного аэрозоля по данным регулярных наблюдений в Zhenbeitai (ZBT) ($39,3^\circ$ с.ш.; 109° в.д.) в Китае в период 8–30 апреля 2001 г. и в Gosan (GOS) ($34,28^\circ$ с.ш.; $126,17^\circ$ в.д.) в течение двух периодов времени: 25 марта – 1 мая 2001 г. и 1 мая – 30 сентября 2001 г. (только в течение семи избранных дней) в рамках программы ACE-Asia. По данным анализа проб мелкодисперсного аэрозоля PM-2,5, в ZBT концентрация 24 исследованных элементов коррелирует с Al (служащим индикатором пылевого аэрозоля), а отношения концентрации всех изученных элементов к концентрации Al близки к отношениям, соответствующим стандартному лёссу. Однако вторая группа исследованных элементов оказалась обогащенной по отношению к первой группе, что произошло, вероятно, за счет антропогенных выбросов в атмосферу. Концентрация воднорастворимых (WS) катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), как правило, коррелировала с концентрацией Al в обоих пунктах наблюдений, за исключением воднорастворимого K^+ в ZBT, где, по-видимому, сказалось влияние сжигания биомассы.

По данным наблюдений в ZBT доля растворимого кальция приближалась к 100% , тогда как в GOS она составляла лишь $\sim 60\%$. Отношение воднорастворимого Ca^{2+}/Al было также более высоким в ZBT. Молярное отношение концентраций сульфата к воднорастворимому Ca^{2+} было $\sim 0,1$ в ZBT, но возрастало почти до единицы в GOS, где отношение нитрат/растворимый Ca^{2+} оказалось в десятки и даже в сотни раз выше, чем в ZBT (по-видимому, за счет антропогенного воздействия). Наблюдаемые различия характеристик аэрозоля в двух рассмотренных пунктах можно объяснить как конечный результат сочетания вкладов различных компонентов и сложных процессов газофазной трансформации, зависящего от размеров частиц аэрозоля фракционирования и перемешивания аэрозоля.

Одним из регионов Северо-Западного Китая, который является существенным источником пылевого (минерального) аэрозоля (ПА) является пустыня Гоби. В рамках полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia в период с 30 марта по 1 мая 2001 г. на станции мониторинга, свободной от местных источников загрязнений и расположенной в 5 км к северу от г. Yulin ($38^\circ 20'$ с.ш.; $109^\circ 43'$ в.д., 118 м над уровнем моря), на базе Института окружающей среды Академии наук Китая были выполнены комплексные наблюдения с целью исследования химических, физических и радиаци-

онных характеристик аэрозоля, поступающего в атмосферу в условиях пустыни [48].

Средние значения и дисперсии (в скобках) наблюдаемых величин коэффициентов поглощения σ_{ap} , рассеяния σ_{sp} и альbedo однократного рассеяния составили соответственно 6 Мм^{-1} (11 Мм^{-1}), 158 Мм^{-1} (193 Мм^{-1}) и $0,95$ ($0,05$). Значения σ_{ap} и σ_{sp} характеризовались наличием отчетливого суточного хода, обусловленного суточным ходом турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы, а также проявлениями вкладов загрязнений от сжигания ископаемого топлива в утренние часы и интенсификации выбросов пыли в послеполуденное время. Хи и др. [48] выявили существование двух отчетливо различающихся популяций аэрозольной эффективности рассеяния $\text{Escat}_{2,5}$ для аэрозоля, в котором доминирует ПА ($\sim 1,0 \text{ м}^2/\text{г}$), и аэрозоля, обусловленного местными источниками загрязнений ($\sim 30 \text{ м}^2/\text{г}$). За все время наблюдений имели место три эпизода пылевых бурь, средняя продолжительность которых достигала нескольких суток.

Последствием наиболее мощной пылевой бури было возрастание среднесуточного значения массовой концентрации частиц PM-2,5 мелкодисперсной фракции аэрозоля до $453 \text{ мкг}/\text{м}^3$ при пике σ_{sp} , достигшем 2510 Мм^{-1} 8 апреля. Средняя концентрация частиц PM-2,5 за период всех трех пылевых бурь была около $169 \text{ мкг}/\text{м}^3$, что примерно в 4 раза больше среднего значения ($44 \text{ мкг}/\text{м}^3$), наблюдаемого в периоды воздействия местных загрязнений. В таких условиях, когда последние вносят доминирующий вклад в формирование мелкодисперсного аэрозоля, главным компонентом состава аэрозоля оказывалось органическое вещество (ОМ), вклад которого в формирование массы частиц PM-2,5 составляет 41%, а следующие по важности вклады принадлежат почвенному компоненту (29%), сульфату (17%) и элементному углероду (13%). В периоды пылевых бурь около 51% массы мелкодисперсного аэрозоля возникало за счет почвенного компонента, а следующие места занимали CO_3^{2-} (11%) и ОМ (9,5%). Определение фактора обогащения отдельными элементами привело к выводу, что существенными источниками местных загрязнений являются сжигание каменного угля и биомассы, а также различные мобильные источники.

Bates и др. [2] обсудили результаты наблюдений химического состава и микроструктуры аэрозоля, выполненных на борту НИС «Ronald H. Brown» в период с 14 марта по 20 апреля 2001 г. в рамках полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia по изучению характеристик аэрозоля. Проанализированы, главным образом, полученные в Японском море пробы, относящиеся к предфронтальной и постфронтальной воздушным массам за время с 6 по 15 апреля 2001 г., имея в виду выявление контрастных свойств аэрозоля в зависимости от метеорологических условий в морском пограничном слое атмосферы близости от Восточного побережья Азиатского континента. В предфронтальной воздушной массе доминировала аккумуляционная мода

аэрозоля, состоящая, в основном, из продуктов загрязнений и вулканического аэрозоля. В составе аэрозоля преобладали сульфат аммония и органический углерод, но в небольшом количестве присутствовал и пылевой аэрозоль, возникший в результате осаждения из тропосферы испытывавшего дальний перенос аэрозоля, который был выброшен в атмосферу в пустыне Такла-Макан. Обнаруженный также морской солевой субмикронный и супермикронный аэрозоль характеризовался сильным спадом содержания хлорида, обусловленным реакциями с парами серной и азотной кислот. Наблюденное 10 апреля прохождение мощного центра низкого давления, окруженного взвешенной в атмосфере пылью, породило возрастание концентрации субмикронного и супермикронного пылевого аэрозоля из пустыни Гоби. Супермикронные частицы пылевого аэрозоля характеризовались наличием высокой концентрации сульфата, нитрата, органического и элементного углерода.

В течение периода интенсивных наблюдений, осуществленных весной 2001 г. в рамках полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, были выполнены комплексные наблюдения физико-химических характеристик и радиационных свойств пылевого аэрозоля, возникшего после происшедших в Китае трех пылевых бурь. Наблюдения осуществлялись в Kwangju (Южная Корея) 22 марта, 11–13 апреля и 25–26 апреля 2001 г. и включали непрерывные измерения коэффициентов экстинкции, рассеяния и поглощения ПА с использованием трансмиссометра, интегрирующего нефелометра и эталометра соответственно. Результаты этих наблюдений сопоставлены с аналогичными данными измерений в условиях чистой морской и содержащей дымку городской атмосферы.

Характеристики ПА первой из пылевых бурь были вполне типичными для возникающих в регионе пустынь на северо-западе Китая. В случае второй пылевой бури свойства ПА существенно изменились в процессе дальнего переноса под воздействием перемешивания с загрязняющими компонентами в атмосфере, следствием чего стало увеличение в составе аэрозоля концентрации сульфата и органического углерода. Kim и др. [15a] проанализировали особенности химического состава и оптических свойств аэрозоля в условиях чистой континентальной, юго-восточной морской и застойной загрязненной атмосферы. Для трех событий пылевых бурь определены значения массового коэффициента рассеяния и альbedo однократного рассеяния для мелкодисперсной и грубодисперсной мод аэрозоля. При помощи эталометра измерена концентрация ВС в составе мелко- и грубодисперсной мод аэрозоля. Обнаружено, что содержание ВС в грубодисперсной моде возрастало за счет агломерации частиц ВС и большой концентрации ПА. В условиях трех рассмотренных пылевых бурь значения альbedo однократного рассеяния увеличились до $0,93$; $0,90$ и $0,84$ соответственно, тогда как среднее значение в другие периоды времени было равно $0,85$.

Рассмотренные McNaughton и др. [23] результаты «квазилагранжевых» самолетных измерений позволили получить информацию о характеристиках процессов образования вторичного аэрозоля и о его конденсационном росте в атмосфере регионов Желтого моря, Восточно-Китайского и Японского морей в период осуществления полевых наблюдательных экспериментов ACE-Asia и TRACE-P. В условиях обсуждаемых самолетных наблюдений удельная площадь поверхности частиц аэрозоля смешанного состава, включавших продукты загрязнений и минеральную пыль, достигала $1200 \text{ мкм}^2/\text{см}^3$. Концентрация паров серной кислоты была, как правило, недостаточно высокой для развития процесса бинарной нуклеации. Однако данные наблюдений и результаты численного моделирования свидетельствуют о функционировании механизма тройной нуклеации $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O—NH}_3$. Скорость роста частиц, равная $\sim 2 \text{ нм/ч}$, может быть объяснена воздействием конденсации серной кислоты со скоростью $(2 \pm 1) \cdot 10^6 \text{ молек./}(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. Наличие летучести аэрозоля предполагает усиление нейтрализации аэрозоля в процессе роста размеров частиц.

Из данных измерений микроструктуры аэрозоля следует, что характерной особенностью атмосферы рассматриваемого региона было слабое образование новых частиц аэрозоля (средняя расчетная концентрация ядер конденсации (CN) размером 3–13 нм составляла около 500 см^{-3}). Однако в постфронтальных воздушных массах, связанных с офшорными потоками при ясном небе, происходило усиление образования новых частиц, достигавшее порядка величины (средняя концентрация CN размером 3–13 нм достигала 5 тыс. см^{-3}). Важную роль в развитии региональных процессов нуклеации играли туманы и облака, порождавшие вымывание из атмосферы вторичного аэрозоля, а также спад концентрации газофазных предшественников аэрозоля за счет гетерогенных химических реакций. Согласно обсуждаемым результатам всего лишь 10–30% всей популяции аэрозоля состоит из «старого» вторичного аэрозоля спустя примерно 2 сут после начала дальнего переноса аэрозоля из его источника. Несмотря на высокую продуктивность образования вторичного аэрозоля в периоды событий нуклеации, вторичный аэрозоль, подвергаясь адвекции в регион Тихого океана, оказывает лишь слабое влияние на косвенное радиационное вынуждающее воздействие (РВВ), а на прямое РВВ — практически никакого влияния по сравнению с выбросами первичного аэрозоля и теми малыми газовыми компонентами, которые конденсируются на его частицах.

Полученные в работе [23] результаты контрастируют с теми данными, которые касаются образования вторичного аэрозоля в удаленной (фоновой) свободной тропосфере. В этих условиях след за нуклеацией, происходящей в воздухе, где имело место обусловленное облаками вымывание аэрозоля, возникает медленный рост частиц при слабой коагуляции, что определяет важную роль возникающих частиц как дополнения к существующим CN,

а также (иногда в условиях чистой атмосферы) как фактора экстинкции за счет рассеяния. Это означает необходимость учета при численном моделировании воздействий аэрозоля на формирование РВВ вторичной нуклеации, которая оказывается несущественной в условиях загрязненной атмосферы.

До сих пор информация о свойствах атмосферного аэрозоля остается фрагментарной и, в частности, несомненно недостаточной для верификации результатов численного моделирования пространственно-временной изменчивости свойств аэрозоля (микроструктуры, химического состава), особенно его органических компонентов и элементного углерода. Именно поэтому в программе полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, осуществленного весной 2001 г. в Азиатско-Тихоокеанском регионе с главной целью исследовать выносы аэрозоля с Азиатского континента на акваторию Тихого океана, специальное внимание было уделено самолетным наблюдениям (самолет-лаборатория C-130) содержания ЕС и ОС в составе аэрозоля. Для получения проб аэрозоля использовались кварцевые фильтры, применение которых оказалось достаточно надежным, хотя было обнаружено, что примерно на одной трети фильтров происходило значительное испарение проб.

Полученные Huebert и др. [11] результаты обработки проб привели к выводу, что концентрация общего углерода (ТС) и ОС была более высокой в пограничном слое атмосферы (средние значения составили $7,6 \text{ мкгТС/м}^3$ и $5,8 \text{ мкгОС/м}^3$), чем в свободной тропосфере ($3,1 \text{ мкгТС/м}^3$ и $3,9 \text{ мкгОС/м}^3$). Такова же, по-видимому, ситуация и в отношении ЕС, хотя недостаточный объем данных наблюдений не позволил получить достоверные количественные оценки. Данные наблюдений свидетельствуют также о том, что концентрация ОС оказалась более изменчивой, чем ЕС. В условиях свободной тропосферы отношение концентрации ТС и несолевого сульфатного аэрозоля варьировало в пределах 3,2–6,0, т.е. углеродный аэрозоль был в большей степени сконцентрирован в верхней тропосфере, чем псс-сульфатный аэрозоль.

Если учесть массу пылевого (минерального) аэрозоля, то относительное содержание органического вещества в мелкодисперсном аэрозоле изменялось в пределах 0,1–0,7. Значения отношения ТС/ЕС варьировали от 2 до 15 при среднем значении $\sim 4\text{--}5$. Атмосфера в регионах Желтого моря, Корейского пролива и Японского моря характеризовалась, как правило, наличием более высокой концентрации ОС, чем в Восточно-Китайском море, на Тихом океане и к востоку от Японии. Данные наблюдений отображают наличие на всех высотах очень сильной изменчивости концентрации различных компонентов аэрозоля. Изменение отношения максимальной концентрации к минимальной достигало нескольких порядков величины.

Maxwell-Meier и др. [22] осуществили забор проб аэрозоля в свободной тропосфере с самолета-лаборатории C-130 с последующим лабораторным анализом проб на содержание неорганических ком-

понентов. В работе [22] обсуждены результаты, полученные во время трех полетов в рамках полевого эксперимента ACE-Asia в пограничном слое атмосферы (ПСА) над Желтым морем. Целью обработки данных наблюдений было исследование процессов формирования шлейфов ПА, возникавших весной 2001 г. в условиях, когда эти процессы определялись сочетанием интенсивной фронтальной активности в таком обширном аридном регионе, как пустыня Гоби, а также сухих сельскохозяйственных полей, обработанных для подготовки к севу. Возникавшие в подобных условиях пылевые бури порождали образование большого количества ПА, а его дальний перенос определял существенное влияние аэрозоля на радиационный режим и климат.

Анализ проб аэрозоля показал, что главными компонентами воднорастворимой минеральной пыли являются Mg^{2+} и Ca^{2+} . Изучение ионных балансов мелкодисперсного и общего аэрозоля продемонстрировало, что значительная доля ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} существовала в форме карбонатов. В смеси загрязненного воздуха и пыли, которая подверглась адвекции из больших городов за 0,5–1 сут, большая часть мелкодисперсного аэрозоля, содержащего нитрат и сульфат (около 80%), была связана с аммонием или кальцием, причем последний входил, по-видимому, в составе минеральной пыли. Только в таких воздушных массах, которые находились 2–5 сут над Желтым морем, было зарегистрировано наличие отчетливого спада концентрации Cl^- . Обсуждаемые данные наблюдений можно объяснить, если принять значения первоначальных массовых коэффициента аккумуляции меньше 0,1 для усвоения SO_2 или HNO_3 частицами ПА в городских шлейфах аэрозоля, содержащих компоненты выбросов, обусловленных сжиганием ископаемых топлив и биомассы. Из данных наблюдений следует, что коэффициент аккумуляции зависит от относительной влажности воздуха.

Kline и др. [17] обсудили результаты ионно-хроматографического анализа фильтровых и импакторных проб аэрозоля, полученных на борту самолета-лаборатории C-130 в период осуществления полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia весной 2001 г. в регионе Юго-Восточной Азии. Рассматриваемые результаты включают информацию о составе (анализ сделан на содержание сульфата, аммония, нитрата, кальция, калия, хлорида, натрия, магнезия и оксалата) и концентрации частиц мелко- и крупнодисперсной фракций аэрозоля. Эти результаты отображают наличие значительных различий между составом аэрозоля в свободной тропосфере (СТ) и в ПСА. Так, например, осредненное молярное отношение нитрата к растворимому кальцию составляло 1,8 в ПСА, но было равно лишь 0,2 в СТ. Нитрат и кальций часто характеризовались идентичной микроструктурой грубодисперсной фракции, тогда как для сульфата и аммония было типично сходство микроструктуры мелкодисперсной фракции.

Для пылевого аэрозоля характерно преобразование NCl в нитрат грубодисперсной фракции аэ-

розоля. Если содержание сульфата в аэрозоле СТ близко к содержанию полунейтрализованного бисульфата аммония, то несольевой сульфат в ПСА обычно подвергается почти полной нейтрализации до сульфата аммония. При наличии ПА до 50% nss -сульфата входит в состав грубодисперсной моды (по-видимому, это происходит за счет усвоения SO_2 содержащимся в составе ПА $CaCO_3$). Осредненное содержание растворимого кальция в грубодисперсной фракции ПА составляет 5–8%. Как правило, особенности химического состава аэрозоля в ПСА не оказываются репрезентативными индикаторами ионного состава аэрозоля. Важной особенностью аэрозоля в Азиатско-Тихоокеанском регионе является очень сильная пространственно-временная изменчивость его свойств, определяемая наличием четко выраженных аэрозольных слоев, перемежающихся с чистой атмосферой. В таких условиях нельзя рассматривать осредненные характеристики аэрозоля как репрезентативную информацию. Подобным же образом нельзя считать, что результаты наземных наблюдений могут отображать свойства аэрозоля в пограничном слое атмосферы и в свободной тропосфере.

Для оценки адекватности различных методик измерений неорганического химического состава аэрозоля в тропосфере на трех самолетах-лабораториях, участвовавших в осуществлении программ полевых наблюдательных экспериментов TRACE-P и ACE-Asia весной 2001 г., были использованы пять видов аппаратуры (фильтры, пятиступенчатый импактор (MOI), камера туманов (MS), аппаратура PILS). Выполненные Ma и др. [20] сравнения данных идентичных PILS, установленных на двух самолетах, выявило наличие между ними высокой корреляции (в случае сульфатного аэрозоля $r^2 = 0,95$), но, с другой стороны, – систематических расхождений (10 ± 5 %). Сопоставление данных PILS и MS для мелкодисперсного сульфатного аэрозоля привело к значению $r^2 = 0,78$ при систематическом расхождении (39 ± 5 %). Согласно данным MOI и PILS, по ионному составу аэрозоля они согласуются в пределах (14 ± 6 %) при $r^2 = 0,87$. Для большей части ионов расхождения не выходили за пределы ± 30 %. В целом, можно считать, что данные самолетных наблюдений состава мелкодисперсной фракции аэрозоля согласуются в пределах расхождений не более 30–40%.

Zhang и Iwasaka [50] выполнили сравнения размеров и химического состава отдельных частиц атмосферного аэрозоля до и после их водного диализа с целью удаления растворимых в воде компонентов в пробах аэрозоля, поступившего в Юго-Западный регион Японии с Азиатского континента. Сравнение показало, что после диализа микроструктура аэрозоля, представлявшего собой смесь минерального (пылевого) и морского солевого аэрозоля, претерпела смещение в сторону преобладания более мелких частиц по сравнению с аэрозолем, изученным до диализа. Подобное смещение усиливалось с возрастанием содержания морской соли в частицах, тогда как процесс диализа не

порождал заметных изменений размеров или морфологии частиц, если в них отсутствовала морская соль. Исследования всего пылевого аэрозоля привели к выводу, что его перемешивание с морской солью вызывало смещение микроструктуры в сторону увеличения размеров частиц, составлявшего 0,4–0,8 мкм. Таким образом, взаимодействие пылевых частиц с морской солью является, по-видимому, важным фактором изменения их размеров и состава в ходе дальнего переноса, что, в свою очередь, влияет на перенос излучения в атмосфере и на процесс осаждения минеральной пыли на подстилающую поверхность.

Весной 2001 г. в регионе Тихоокеанского побережья Азии были осуществлены две крупномасштабные полевые наблюдательные программы: полевые эксперименты TRACE-P по изучению дальнего переноса и химической трансформации воздушных масс над Тихим океаном (при поддержке NASA) и ACE-Asia – с целью исследования характеристик аэрозоля (при поддержке Национального научного фонда США – ННФ). Задачей обоих полевых наблюдательных экспериментов были исследования последствий поступления в атмосферу на акватории Тихого океана загрязнений в виде МГК и аэрозоля, обусловленных такими факторами, как сжигание биомассы, городские и промышленные загрязнения, пылевой аэрозоль, образовавшийся под воздействием пылевых бурь в пустынях Китая.

Программа TRACE-P была сконцентрирована на самолетных измерениях МГК и аэрозоля в марте–апреле при помощи комплекса аппаратуры, установленной на самолетах-лабораториях DC-8 и P3-B, которые базировались в Гонконге и на базе ВВС США в Йокоте (Япония). Главные задачи полевого эксперимента ACE-Asia состояли в самолетных наблюдениях характеристик аэрозоля и радиационных потоков в апреле–мае при базировании самолета-лаборатории C-130 на базе ВМС США в Ивакуни (Япония).

Моогге и др. [25] выполнили сравнение результатов упомянутых самолетных измерений характеристик аэрозоля: счетной концентрации, микроструктуры, химического состава и оптических свойств. Наилучшее согласие (как правило, случайные погрешности не превосходили неопределенностей, обусловленных аппаратурой) имело место при сравнении микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля, включая счетную концентрацию ядер конденсации, коэффициенты рассеяния, а также микроструктуру аккумуляционной моды аэрозоля по данным измерений с помощью дифференциального анализатора подвижности и оптического счетчика частиц (ОРС). Большие расхождения (выходящие за пределы аппаратурных неопределенностей) часто наблюдались в случае параметров микроструктуры крупнодисперсного (супермикронного) аэрозоля. Это относится и к данным о коэффициентах рассеяния и поглощения, а также к концентрации растворимых компонентов химического состава, которые обычно содержатся в боль-

ших частицах аэрозоля (например, Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} и Mg^{2+}). Некоторые наблюдаемые расхождения связаны со спецификой забора проб аэрозоля и особенностями конструкций аппаратуры. Для горизонтальных трасс самолетов различной протяженности рассчитаны средние значения и дисперсия ряда одновременно измеренных параметров с последующим анализом корреляционных связей между ними, что имело значение, в частности, для оценки адекватности функционирования аппаратуры.

Начиная с 1 января 2001 г. в течение 18 мес в трех ключевых пунктах наблюдений по программе полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia (Гонконг, о-в Cheju в Южной Корее и о-в Sado в Японии) каждую среду и воскресенье производились регулярные наблюдения массовой концентрации химического состава мелкодисперсной (PM-2,5) и крупнодисперсной (PM-10) фракций атмосферного аэрозоля. Согласно данным, полученным Cohen и др. [4], средние суточные значения концентрации за весь период наблюдений в трех упомянутых пунктах составили соответственно: 29, 16 и 9,1 мкг/м³ (PM-2,5) и 33, 14, 11 мкг/м³ (PM-10). Соответствующие максимальные значения концентрации равны 109, 81, 78 мкг/м³ (PM-2,5) и 101, 162 и 253 мкг/м³ (PM-10). Химический анализ проб аэрозоля сделан на содержание следующих элементов: F, Na, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Br и Pb, при уровне предела обнаружения меньше 1 нг/м³. Средний весовой состав компонентов аэрозоля PM-2,5 характеризуется для всех трех пунктов такими данными: (8,4 ± 4)% черный углерод, (7,7 ± 7)% компоненты почвенного происхождения, (43 ± 14)% сульфат аммония, (11 ± 16)% органическое вещество, (10 ± 12)% морской солевой аэрозоль и (0,6 ± 0,3)% трассерные компоненты.

В работе [4] идентифицированы почвенные фанггерпринты состава аэрозоля в Восточно-Азиатском регионе с использованием данных измерений содержания окислов Al, S, K, Ca, Ti, Mn и Fe. Полученные результаты отображают в случае крупнодисперсной фракции аэрозоля преобладание сдутых ветром частиц почвы (23%) и морского солевого аэрозоля (48%). Массовая концентрация серы, имевшей преимущественно (98%) антропогенное происхождение, составила в трех рассматриваемых пунктах соответственно 8,7; 4,8 и 2,9 мкг/м³ при наличии сильно выраженного годового хода (особенно в Гонконге), достигая максимума зимой. Средняя доля сульфатного компонента аэрозоля варьировала в пределах 30–32% (по отношению к суммарной массе), а массовая концентрация сульфатного компонента PM-2,5 оказалась в трех пунктах равной 30, 19 и 12 мкг/м³. Для концентрации «черного углерода» получились средние значения, составившие 1,8; 1,1 и 0,77 мкг/м³ при очень сильном годовом ходе с максимумом зимой. Доля «черного углерода» в общей массе аэрозоля изменялась от 8 до 9%. Осредненное отношение масс PM-10/PM-2,5 равно 2,1 ± 0,4. Доминирующими компонентами грубодисперсной фракции аэрозоля бы-

ли: морской солевой аэрозоль (59 ± 25)% и сдуваемая ветром пыль (17 ± 11)%.

В период ACE-Asia весной 2001 г. (с марта по май) Shimizu и др. [38] выполнили непрерывные аэрозольные зондирования атмосферы при помощи поляризационных лидаров, установленных в Пекине, Нагасаки и Цукубе (использована вторая гармоника Nd:YAG-лазера на длине волны 532 нм). По данным этих наблюдений осуществлена классификация вертикальных профилей пылевого аэрозоля (точнее, «несферического» аэрозоля) и сферических частиц, а также определены такие характеристики, как частота событий повышенной запыленности атмосферы, концентрация аэрозоля и параметры облачного покрова на высотах до 6 км. Частота максимальной запыленности зафиксирована в Пекине во всем диапазоне высот. В Нагасаки наблюдался максимум частоты событий запыленности вблизи подстилающей поверхности. В Цукубе слои пылевого аэрозоля часто имели место в свободной тропосфере. По данным об отношении деполяризации рассчитаны вклады ПА и сферических частиц аэрозоля в формирование суммарного коэффициента обратного рассеяния (предполагается, что оба вида рассматриваемого аэрозоля представляют собой внешние смеси).

Данные по вертикальным профилям коэффициента обратного рассеяния ПА и сферическим частицам отображают разнообразие характеристик аэрозоля. Средние месячные значения этого коэффициента, обусловленные ПА, вблизи подстилающей поверхности составили: $0,03 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (Пекин), $0,001\text{--}0,002 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (Нагасаки) и $0,0006 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (Цукуба). Значение осредненного коэффициента обратного рассеяния за счет сферических частиц во всех трех пунктах наблюдений было равно $0,002\text{--}0,004 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Сравнение наблюдаемых значений коэффициента обратного рассеяния с вычисленными на основе использования модели CFORS показало, что модель достаточно достоверно воспроизводит вертикальную структуру распределения ПА и возрастание содержания сферических частиц в течение всего периода наблюдений. Авторы [38] детально описали результаты, полученные в ходе одновременных зондирований при помощи пяти лидаров в Японии 16–19 мая 2001 г.

Simoneit и др. [40] выполнили анализ проб аэрозоля, полученных с борта самолета-лаборатории C-130 в условиях загрязненной тропосферы Восточного сектора Азиатско-Тихоокеанского региона. Главной целью анализа было изучение органических соединений различного типа с применением методики капиллярной газовой хроматографии — масс-спектрометрии. В составе аэрозоля обнаружены более 70 органических компонентов, которые были классифицированы на несколько функциональных групп, включающих *n*-алканы, полициклические углеводородные соединения, жирные кислоты, дегидроабетическую кислоту, алканоли, воднорастворимые сахара (в том числе глюкозу, сахарозу, микозу и левоглюкозан), монокарбоксылную и дикарбоксылную кислоты, мочевины и фа-

талаты. Важный факт состоит в том, что доля воднорастворимых соединений (их концентрация варьировала в пределах $72\text{--}133 \text{ нг/м}^3$) достигала $16\text{--}50\%$ (в среднем 34%) по отношению к суммарной исследованной массе аэрозоля (ТСМ). Органические соединения были классифицированы также в зависимости от их источников.

Наиболее существенным источником ТСМ было сжигание ископаемых топлив, вклад которого изменялся в интервале $33\text{--}80\%$ (при среднем значении 50%), а на последующих местах располагались почвенные ресуспензии ($5\text{--}25\%$, при среднем значении 19%) и вторичные продукты окисления ($4\text{--}15\%$, среднее 9%). В противоположность этому вклады таких природных источников, как растительный воск и морские липиды (жирные кислоты и алканоли), были относительно малыми (соответственно $3,4$ и $9,4\%$ в среднем). В случае азиатского аэрозоля весной доля продуктов сжигания биомассы оказалась незначительной ($1,4\%$, если судить по данным о левоглюкозане). Возможно, однако, что левоглюкозан подвергался отчасти гидролизу и(или) окислению в процессе дальнего переноса аэрозоля, и поэтому измеренные значения характеризуют нижний предел его концентрации. Рассматриваемый состав органических соединений исследованных проб аэрозоля сильно отличается от состава частиц аэрозоля в атмосфере над Атлантическим океаном и от более ранних данных для срединного региона Тихого океана с точки зрения содержания таких воднорастворимых компонентов, как сахара, ангидросахариды и вторичные дикарбоксылные кислоты. Полученные результаты убедительно иллюстрируют возможность дальнего переноса органических компонентов в составе аэрозоля и позволяют надежнее распознать источники органических компонентов аэрозоля в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

Simoneit и др. [41] проанализировали содержание трассерных органических компонентов, а также органического углерода и элементного углерода в пробах аэрозоля, полученных в ACE-Asia весной 2001 г. в Gosan и на о-ве Jeju (Южная Корея), Sapporo (Япония), на о-ве Chichi-jima в Западном секторе Тихого океана в южном полушарии, а также на борту НИС «Ronald H. Brown». Применение методики газовой хроматографии и масс-спектрометрии обеспечило различение полярных и алифатических соединений. Зарегистрированные во время эпизода выноса с Азиатского континента в начале апреля 2001 г. продукты пылевой бури значительной концентрации всего аэрозоля и таких его компонентов, как органическое вещество, липиды и сахара, оказались значительно выше, чем в другие периоды времени.

Происхождение органического вещества было связано с наличием семи его источников и с образованием вторичных органических продуктов в ходе дальнего переноса аэрозоля за счет процессов окисления. Обнаруженные по данным наблюдений на суше природные фоновые соединения представляли собой липиды — продукты минерального

воска, поступающие в атмосферу путем прямых выбросов или как часть пылевого аэрозоля, возникшего во время пылевых бурь. Несомненно также присутствие продуктов сжигания ископаемых топлив за счет транспорта и промышленности. Сахариды составляли главную часть полярных (воднорастворимых) углеродных фракций, возникших в результате ресуспензии частиц ночью (сельскохозяйственная активность). Во всех пробах и в течение всего времени присутствовали продукты сжигания биомассы, составлявшие до 13% всех воднорастворимых компонентов. Одним из источников органики в частицах аэрозоля служило сжигание отходов. Изменчивые уровни содержания липидов морского происхождения налагались на основной состав аэрозоля в ходе его дальнего переноса над океаном. Содержание в составе аэрозоля вторичных продуктов, образующихся в результате окисления, возрастает в процессе дальнего переноса. Важный факт состоит в том, что исследованный в период ACE-Asia аэрозоль является не только аэрозолем, возникшим во время пылевых бурь в пустынях, но также включает такие компоненты, как аэрозоль почвенного происхождения, дымы от сжигания биомассы и отходов, выбросы продуктов сжигания ископаемых топлив в городских условиях.

Хорошо известно, что обусловленное аэрозолем радиационное возмущающее воздействие (АРВВ), определяющее уровень влияния аэрозоля на формирование климата, сравнимо с «парниковым» РВВ (среднеглобальное значение АРВВ варьирует от 0 до -2 Вт/м²). Однако неопределенности оценок АРВВ остаются очень существенными, что в значительной мере обусловлено сильной пространственно-временной изменчивостью концентрации и свойств аэрозоля. В связи с тем что характеристики аэрозоля в атмосфере над Восточным регионом Азии (микроструктура, оптическая толщина аэрозоля, экспонента Ангстрема α , альbedo однократного рассеяния) весьма специфичны, Kim и др. [14] выполнили анализ их изменчивости по данным наземных наблюдений прямой солнечной и рассеянной радиации на семи длинах волн: 315, 400, 500, 675, 870, 940 и 1020 нм в 1998–2000 гг. на восьми станциях, расположенных в Китае, Южной Корее и Японии.

Анализ результатов наблюдений показал, что для годового хода аэрозольной оптической толщины характерно наличие максимума весной и минимума осенью. По сравнению с пунктами наблюдений, находящимися в регионах пустынь Китая (Dunhuang, Mandalgovi), данные, полученные в Sri-Samrong и Yinchuan, обнаруживают более отчетливый годовой ход АОТ. Как правило, микроструктура аэрозоля оказывается бимодальной и характеризуется наличием мелкодисперсной (с характерным размером частиц около 0,2 мкм) и грубодисперсной (2–5 мкм) мод. Подобно АОТ и α , спектры объемной концентрации ($dV(r)/d\ln r$, см³/см²) также сильно изменяются в зависимости от местоположения пункта наблюдений и времени года. Если в Dunhuang крупнодисперсная мода

аэрозоля одинаково проявляется в течение всех сезонов, то в Mandalgovi и Sri-Samrong имел место сильный годовой ход суммарного объема частиц мелкодисперсной моды.

Значения альbedo однократного рассеяния (АОР) аэрозоля над Восточной Азией на длине волны 500 нм были близки к 0,9 и хорошо соответствовали данным наблюдений на сети AERONET, но превосходили полученные ранее в Восточно-Азиатском регионе (0,63–0,89). Оптические свойства аэрозоля в регионах Южной Кореи и Японии оказались сходными с наблюдавшимися в таких пунктах наблюдений пылевого аэрозоля, как Dunhuang и Mandalgovi, хотя значения АОР были меньшими (особенно в периоды пылевых бурь в пустынях Китая). Несомненно, что на свойства аэрозоля, наблюдавшегося в Южной Корее и Японии, существенное воздействие оказывал дальний перенос антропогенного аэрозоля из Китая (особенно в условиях западно-восточного переноса). Таким образом, изменчивые свойства аэрозоля в рассматриваемом регионе определяются процессами перемешивания и дальнего переноса аэрозоля различного происхождения (пылевого, городского и возникшего за счет сжигания биомассы).

В период осуществления весной 2001 г. полевого эксперимента ACE-Asia на борту НИС «Ronald H. Brown» были выполнены комплексные наблюдения оптических свойств аэрозоля с целью изучения воздействий атмосферного аэрозоля на химические процессы в атмосфере и климат. Измерения характеристик аэрозоля, сделанные в Западном регионе Тихого океана в северном полушарии, включали определение микроструктуры и химического состава аэрозоля, а также оптических параметров (коэффициенты рассеяния и поглощения, коэффициент обратного рассеяния в полусфере). Кроме того, измерялись аэрозольная оптическая толщина и аэрозольный коэффициент обратного рассеяния под углом 180°.

Выполненный Quinn [29] анализ полученных результатов привел к выводу, что аэрозоль в регионе полевого эксперимента ACE-Asia представлял собой сложную смесь, химический состав которой обусловлен наличием многих источников аэрозоля (морских, промышленных, вулканических и пылевых бурь). В работе [29] детально воспроизведены и обсуждены данные наблюдений следующих величин: относительная массовая концентрация главных компонентов химического состава аэрозоля, вклад каждого из компонентов в формирование обусловленного аэрозолем рассеяния, массовый коэффициент рассеяния отдельных компонентов, коэффициенты аэрозольного рассеяния и поглощения, альbedo однократного рассеяния, экспонента Ангстрема, АОТ и вертикальный профиль аэрозольной экстинкции (все эти характеристики получены для уровня относительной влажности, равного $(55 \pm 5)\%$).

Переопределенность полученных результатов благоприятствовала осуществлению сравнений измеренных и рассчитанных характеристик аэрозоля, оценке внутренней согласованности и источников

неопределенности обсуждаемых данных. Сравнения измеренных и вычисленных коэффициентов рассеяния, сделанные с учетом поправки к измеренной микроструктуре за счет несферичности частиц, выявили вполне удовлетворительное согласие (в пределах погрешностей измерений). Однако соответствующие расхождения значений коэффициента поглощения оказались значительными и могут быть объяснены как неадекватностью расчетов по формулам Ми, так и предположением о внутренней перемешанности однородных сферических частиц аэрозоля. Значения массового коэффициента рассеяния несульфатного и морского солевого аэрозоля, а также субмикронных частиц органического вещества и пыли согласуются с полученными ранее результатами по данным ACE-1, Aerosols-99 и INDOEX. Уникальной особенностью данных ACE-Asia была высокая доля пылевой фракции аэрозоля, что определило ее доминирующий вклад в формирование оптических свойств аэрозоля, а также важную роль взаимодействия пылевого и сажевого аэрозоля.

В связи с тем что сохраняется сильная неопределенность в данных об аэрозольно обусловленном радиационном возмущающем воздействии, Lee и др. [19] выполнили анализ изменчивости свойств аэрозоля по данным наблюдений при помощи спутниковой аппаратуры SeaWiFS широкоугольного радиометра для обзора океана, полученным в период осуществленного весной 2001 г. полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia. Восстановлены значения AOT и экспоненты Ангстрема над сушей и океаном при пространственном разрешении 1×1 км с использованием разработанной сотрудниками университета Бремена (Германия) методики BAER. Восстановленные значения AOT сопоставлены с данными наблюдений на наземной сети AERONET. Осуществленная таким образом валидация спутниковых данных показала, что значения коэффициента корреляции за период интенсивных наблюдений ACE-Asia $r > 0,89$. Согласно данным SeaWiFS, восстановленные значения AOT в интервале длин волн 443–670 нм были высокими (около 0,8), а величина экспоненты Ангстрема равна 0,51 (это значение получено в Госане (Южная Корея) в период пылевой бури 13 апреля 2001 г.). После завершения пылевой бури значения AOT уменьшились до 0,30, а экспонента Ангстрема составила 1,12.

Как отметили Satsumabayashi и др. [35], 8 июля 2000 г. началось извержение вулкана Мiуакe, расположенного в Северо-Западном регионе Тихого океана в 200 км от Токио. Обусловленные этим извержением максимальные выбросы SO_2 в атмосферу достигли $6 \cdot 10^4$ т/сут, что примерно соответствует уровню антропогенных выбросов SO_2 в Северо-Восточной Азии и в 20 раз больше выбросов в Японии. За два года до этого события в рассматриваемом регионе (в горах Нарро, находящихся на расстоянии 330 км от вулкана) были начаты регулярные (ежедневные) наблюдения аэрозоля, осадков и некоторых газообразных загрязняющих компонентов атмосферы (пары HCl и HNO_3). Обра-

ботка данных этих наблюдений выявила увеличение концентрации сернистого газа (SO_2) в 3,8 раза, а концентрация SO_4^{2-} в аэрозоле и осадках повысилась за время наблюдений соответственно в 1,5 и 1,7 раза. Имело место, однако, уменьшение содержания NO_3^- и Cl^- в аэрозоле, обусловленное влиянием вулканических выбросов. Подобные процессы были связаны с образованием SO_4^{2-} при переносе SO_2 , что порождало прежде всего спад концентрации газообразного аммония в связи с образованием аэрозоля из $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и, вслед за тем, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ занимало место NO_3^- и Cl^- в составе аэрозоля, что иногда проявлялось в образовании сернокислотной дымки. Такого рода процесс можно описать как установление многокомпонентного равновесия в системе «газ—частицы аэрозоля». Что касается выведения HNO_3 и HCl из атмосферы, то оно могло осуществляться посредством процессов сухого и влажного осаждения, способствуя закислению окружающей среды.

На борту самолета-лаборатории «Twin Otter», функционировавшего весной 2001 г. в рамках программы полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, были установлены два типа аппаратуры для спектральных измерений коротковолновой радиации на различных высотах в тропосфере. Используемый для спектральных измерений восходящих и нисходящих полусферических потоков коротковолновой радиации радиометр SSFR обеспечивал измерения в диапазоне длин волн 300–1700 нм при абсолютной погрешности в пределах 1–3%. Солнечный фотометр AATS-14 (14-канальный) служил для измерений прямой солнечной радиации с целью последующего расчета аэрозольной оптической толщины. Bergstrom и др. [2a] обсудили результаты наблюдений, относящихся к двум ситуациям: 1) умеренно толстый аэрозольный слой (12 апреля); 2) относительно тонкий аэрозольный слой (16 апреля). В течение обоих этих дней выполнены неоднократные измерения вертикальных профилей радиационных потоков в районе Корейского пролива, вблизи г. Госан. Анализ результатов, полученных 12 апреля, показал, что имело место возрастание альбедо однократного рассеяния с длиной волны от 0,8 на длине волны 400 нм до 0,95 нм при практическом постоянстве AOP в диапазоне 950–1700 нм. По данным за 16 апреля аэрозольное поглощение было очень небольшим, а AOP несколько уменьшалось с ростом длины волны в видимой области спектра.

Результаты измерений интерпретируются как обусловленные наличием двух поглощающих аэрозольных компонентов: минеральной пыли и «черного углерода». Если 12 апреля проявлялось воздействие смеси минеральной пыли и «черного углерода», то 16 апреля доминирующий вклад в аэрозольное поглощение вносил, по-видимому, «черный углерод» в смеси с непоглощающим аэрозолем антропогенного происхождения. Сравнения данных за 12 апреля с результатами спутниковых наблюдений

при помощи аппаратуры SeaWiFS, судовых измерений на борту НИС «Twin Otter» и «Ronald H. Brown», а также в Госане (Южная Корея) и в Японии позволили сделать вывод о довольно сложной природе аэрозольного поглощения. Последнее обусловлено, вероятно, совместным воздействием смеси аэрозоля индустриального происхождения (в том числе «черного углерода»), входящего в состав антропогенных загрязнений атмосферы, и природной минеральной пыли. Важную задачу составляют распознавание и количественные оценки вкладов этих двух компонентов аэрозоля в поглощение коротковолновой радиации. Существенным результатом в этой связи является хорошее согласие данных по спектральному нисходящему потоку коротковолновой радиации в диапазоне длин волн 300–1700 нм, полученных на высоте 2 км (над слоем аэрозоля) 12 апреля 2001 г., с рассчитанными значениями.

В период полевых наблюдательных экспериментов TRACE-P (Исследования переноса и химической трансформации воздушных масс над Западным регионом Тихого океана) и ACE-Asia, осуществленных весной 2001 г., были выполнены комплексные наблюдения счетной концентрации, микроструктуры, состояния перемешанности частиц аэрозоля и оптических свойств аэрозоля различных типов (пылевой, «черный углерод» и другие компоненты аэрозоля в шлейфах, образовавшихся под воздействием городских/промышленных загрязнений и пылевых бурь в пустынях Китая). Применение оптических счетчиков частиц в сочетании с методикой прогревания обеспечило извлечение летучих компонентов и определение размеров частиц пылевого аэрозоля и сажи, которые обычно вносят доминирующий вклад в поглощение коротковолновой радиации.

Выполненная Clarke и др. [3] обработка данных наблюдений показала, что частицы ВС были внутренне перемешанными с летучим аэрозолем в ~85% частиц аккумуляционной моды и составляли около 5–15% массы всех частиц. Наличие подобных оптически активных частиц определяло микроструктуру сажевого и пылевого аэрозоля, а также значение мнимой части комплексного показателя преломления $k = 0,0006 \pm 0,0001$. Это обусловило альbedo однократного рассеяния ω на длине волны 550 нм, варьирующее в случае пылевого аэрозоля от 0,99 (при диаметре частиц $d_p < 1$ мкм) до ~0,90 ($d_p = 10$ мкм) при среднем (интегральном) значении $0,97 \pm 0,01$. Типичное значение массового коэффициента рассеяния для ПА составляло примерно $0,3 \text{ м}^2/\text{г}$, а массового коэффициента поглощения $\text{MAE} = 0,009 \text{ м}^2/\text{г}$. Меньшее количество ПА в атмосфере южнее 25° с.ш. и наличие более интенсивных сигнатур сжигания биомассы определили более низкие значения $\omega \sim 0,82$ в шлейфах загрязнений в тропосфере.

Концентрация элементного углерода коррелировала с обусловленным ВС поглощением света ($r^2 = 0,40$), а объем сажевых частиц размером 0,1–0,5 мкм характеризовался высокой корреляцией

($r^2 = 0,79$) с поглощением коротковолновой радиации. Коэффициент поглощения MAE для ВС достигал $-7 + 2 \text{ м}^2/\text{г}$ и превосходил расчетное значение $\text{MAE} = 5 \text{ м}^2/\text{г}$. Наблюдавшееся возрастание массовой доли сажевого аэрозоля и ВС в обусловленном загрязнении аэрозоля при наличии пылевых слоев в свободной тропосфере происходило за счет усвоения летучих компонентов на крупных частицах ПА. В этих условиях возникает уменьшение ω для аккумуляционной моды с 0,84 до ~0,74. Результаты расчетов на основе использования модели дальнего переноса с учетом химических реакций оказались в хорошем согласии с наблюдаемыми величинами поглощения за счет ВС для большей части региона Юго-Восточной Азии, а также для шлейфов продуктов сжигания биомассы, но вычисленные величины концентрации ВС занижены примерно в три раза в случае загрязнений от двигателей внутреннего сгорания в регионе к северу от 25° с.ш.

В марте 2001 г., в период осуществления полевого наблюдательного эксперимента TRACE-P Marj и др. [21] выполнили две серии самолетных наблюдений загрязнения атмосферы при наличии холодного фронта (полеты совершались из Yokota, Япония). Анализ данных наблюдений производился путем сравнения с результатами трехмерного мезомасштабного численного моделирования. Особое внимание уделено рассмотрению воздействия циклонических систем на дальний перенос загрязнений с Азиатского континента, включая оценки относительной роли конвекции и восходящих потоков воздуха в теплых конвейерных поясах, связанных с рассматриваемыми циклонами.

Хотя во время одного из полетов наблюдались благоприятные условия для выноса загрязненных воздушных масс с Азиатского континента (вблизи региона источников выбросов в атмосферу имел место теплый конвейерный пояс – WCB), численное моделирование не выявило заметного загрязнения нижней и средней тропосферы в центральной части Тихого океана. Развитию дальнего переноса загрязненных воздушных масс препятствовали эффективная «вентиляция» WCB прибрежной конвекцией, обусловленная антициклональным потоком адвекция выше уровня 700 гПа, и нисходящие движения в области максимума атмосферного давления над Тихим океаном. В период другого полета конвейерные пояса располагались в удаленном регионе океана. Шлейф загрязненного воздуха был расщеплен восходящими потоками в теплом конвейерном поясе, который обеспечивал перенос обедненного CO воздуха на север, а также конвекцией в океане, которая ответственна за перенос чистого воздуха вверх. Эти механизмы обусловили растворение поступающих из Восточной Азии загрязнений в WCB на пути их дальнего переноса к Северной Америке и определили эпизодический характер воздействий выносов загрязненных воздушных масс с Азиатского континента путем фрагментации шлейфа загрязнений.

2. Дальний перенос и трансформация свойств аэрозоля: численное моделирование

Выполненные за несколько последних десятилетий разработки обеспечили значительный прогресс в изучении пространственного распределения и свойств аэрозоля. Главная мотивация подобных исследований была связана с необходимостью достоверных оценок воздействий аэрозоля на климат и его влияния на атмосферу как фактора загрязнения, ответственного, в частности, за ухудшение условий видимости. Наиболее значительный вклад в понимание процессов формирования и свойств аэрозоля внесли спутниковое дистанционное зондирование аэрозоля по данным наблюдений при помощи такой аппаратуры, как SAGE, видеоспектро-радиометр умеренного разрешения MODIS и многоугловой видеоспектро-радиометр MISR, а за последние годы — лидарное спутниковое зондирование. Пионерские разработки на первоначальном этапе дистанционного зондирования были выполнены космонавтами на борту пилотируемых космических аппаратов. Широко развернувшиеся исследования при помощи обычных (наземных, самолетных, аэростатных) средств наблюдений сыграли важную роль в получении комплексной информации об аэрозоле, включавшей данные о микро-структуре и химическом составе аэрозоля.

Важным этапом для установления взаимосвязей между данными обычных и спутниковых наблюдений, а также для пространственно-временного обобщения результатов обычных наблюдений стало численное моделирование с применением трехмерных региональных и глобальных моделей. Особое внимание привлекла динамика сульфатного аэрозоля (СА), образующегося преимущественно посредством окисления таких его газовых предшественников, как сернистый газ (SO_2), диметилсульфид (DMS), сероводород (H_2S) и карбонилсульфид (OCS).

Kittaka и др. [16] предприняли численное моделирование дальнего переноса СА с Азиатского континента на акваторию Тихого океана с использованием разработанной в Висконсинском университете (США) негидростатической модели UWNMS в сочетании с модулем, воспроизводящим химические реакции в жидкой фазе с участием серы. Расчеты сделаны применительно к условиям полевого наблюдательного эксперимента TRACE-P по изучению дальнего переноса с учетом химической трансформации аэрозоля и малых газовых компонентов из региона Северо-Восточной Азии на акваторию Тихого океана, осуществленного зимой—весной 2001 г. Рассмотрены данные за период с 7 марта по 3 апреля 2001 г., включающие регионы восточной половины Китая, Корейский п-ов, Юго-Восточную Россию, Японские о-ва и Северо-Западный регион Тихого океана.

Модель охватывает 20-км толщю атмосферы при горизонтальном (вертикальном) разрешении 110 км (0,4 км). Сравнение результатов численного

моделирования с данными наблюдений выявило завышенность расчетных значений отношения смеси СА на 20% в слое 1–6 км, но заниженность около 30% вблизи подстилающей поверхности и до 50% — выше 6 км. Расчеты, сделанные при наличии конвективной облачности, обеспечили превосходное согласие с наблюдениями фонового СА, но обнаружили заниженность (до двух раз) значений отношения смеси СА в регионах облачной атмосферы. Численное моделирование показало, что значительное количество СА (общая масса сульфата во всем рассмотренном объеме атмосферы варьировала в пределах $(1,5\text{--}7,5) \cdot 10^6$ кг) выбрасывается в атмосферу после образования СА внутри облаков посредством обусловленного перекисью водорода окисления сернистого газа. Мгновенная масса СА внутри облаков изменялась в интервале $(0,2\text{--}3,5) \cdot 10^6$ кг, а масса сульфата, подвергшаяся вымыванию осадками, составляла $(0,01\text{--}1,8) \cdot 10^6$ кг. В ледяных облаках масса сульфата была на два порядка величины меньше, чем в водных облаках. Полученные в работе [16] результаты свидетельствуют о том, что в условиях Восточно-Азиатского региона поступление СА в атмосферу превосходит его удаление за счет вымывания осадками. Таким образом, весной этот регион может быть значительным источником СА, наличие которого (с учетом дальнего переноса) может компенсировать потери СА атмосферой (при вымывании аэрозоля) в других регионах земного шара.

Нап и др. [10] разработали модель формирования микро-структуры атмосферного аэрозоля с учетом основных физических процессов (образование, дальний перенос, сухое и влажное осаждение аэрозоля). В сочетании с региональной моделью качества воздуха (RAQM) предложенная модель использована для воспроизведения пылевых бурь в Азии, происшедших в период 15–24 марта 2002 г. Расчеты полей метеорологических параметров сделаны с применением негидростатической мезомасштабной модели MM-5. Верификация результатов численного моделирования выполнена с использованием имеющихся данных наблюдений и продемонстрировала вполне удовлетворительную достоверность модели с точки зрения адекватного предвычисления эволюции пылевого аэрозоля и его дальнего переноса, а также распределения массы аэрозоля по отдельным фракциям размеров частиц. Одна из важных характерных особенностей, выявленных как численным моделированием, так и данными наблюдений, состоит в наличии смещения микро-структуры аэрозоля в ходе дальнего переноса от источника ПА от сконцентрированности массовой концентрации в грубо- к мелкодисперсной моде. Рассчитанный максимум осредненной за 10 сут массовой концентрации ПА в регионе границы Китая и Монголии составил 3000 мкг/м^3 . Суммарное сухое осаждение ПА достигало в пустыне Гоби (вдоль границы Китая и Монголии) 30 г/м^2 . Пространственное распределение и величина сухого осаждения существенно варьировали и изменяли концентрации ПА и зависящих от размеров частиц

интенсивностей сухого осаждения аэрозоля и вымывания его из атмосферы. При этом вклад воздействия сухого осаждения доминировал в процессе удаления частиц из атмосферы в пределах или вблизи источника ПА, тогда как роль влажного осаждения усиливалась по мере дальнего переноса ПА при более эффективном удалении частиц грубодисперсной моды (> 2 мкм) и очень низкой эффективности в случае аккумуляционной моды. Из суммарной массы выбросов ПА (43,2 Мт) около 71% возвращалось на уровень подстилающей поверхности посредством сухого осаждения, но только 6% — в результате влажного осаждения, а остальные 23% оставались взвешенными в атмосфере или претерпевали дальний перенос.

Начиная с 2000 г. в Японии регулярно наблюдались события повышенного содержания минерального ПА, источниками которого были пылевые бури, возникавшие в пустынях Китая, хотя, с другой стороны, установлено, что со второй половины 1970-х гг. частота возникновения пылевых бурь снизилась. Мукаи и др. [27] предприняли численное моделирование образования пылевых бурь и последующего дальнего переноса ПА в регионе Восточной Азии в период 1981–2002 гг. Расчеты сделаны на основе модели дальнего переноса SPRINTARS, разработанной сотрудниками Центра исследований климатической системы Токийского университета и Национального института исследований окружающей среды в университете Kyushu. Эволюция полей скорости ветра, удельной влажности, влажности почвы и глубины снежного покрова задана по данным реанализа, осуществленного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды.

Анализ полученных результатов продемонстрировал, что существенное влияние на формирование выбросов пыли оказывает приземное поле ветра, а ранней весной важным фактором оказывается также состояние снежного покрова. Из результатов численного моделирования следует, что выбросы в атмосферу ПА в Северо-Восточном Китае оказывают сильное воздействие на массовую концентрацию ПА в атмосфере наветренных регионов, включая города Северо-Восточного Китая, Кореи и Японии. В периоды частых событий повышенной запыленности атмосферы в Японии в регионе Северо-Восточного Китая формировались центры низкого давления, благоприятствовавшие усилению скорости ветра. Согласно данным численного моделирования, в 2000–2001 гг. имело место ослабление выбросов ПА в пустыне Такла-Макан и в Северо-Западном Китае, но усиление в пустыне Гоби и в Северо-Восточном регионе Китая. Следует поэтому считать, что дальний перенос ПА происходил главным образом из второго региона под воздействием западно-восточного переноса весной, как это и наблюдалось. Несмотря на это общее согласие между результатами расчетов и данными наблюдений, имеют место серьезные расхождения оценок частоты событий запыления атмосферы и концентрации ПА, что свидетельствует о необходимости

совершенствования модели. Известную роль могла сыграть также эволюция процессов опустынивания в Северо-Восточном Китае.

Возрастающая экологическая активность и связанные с нею выбросы в атмосферу различных МГК и аэрозоля в Восточном регионе Азии порождают озабоченность относительно воздействия антропогенных выбросов на тихоокеанскую атмосферу, которые особенно сильно проявляются весной. Ту и др. [45] обсудили данные наблюдений дальнего переноса сернистого газа (SO_2) из Восточной Азии весной 2001 г. в Центральный регион Тихого океана в северном полушарии, полученные во время регулярных рейсов самолетов в рамках осуществленных при поддержке NASA исследований дальнего переноса и химической трансформации МГК по программе TRACE-P. К числу существенных особенностей пространственного распределения концентрации SO_2 принадлежат слои повышенной концентрации, связанные с малым содержанием водяного пара и слабой турбулентностью, которые, как правило, изолированы от морского пограничного слоя атмосферы (МПСА).

Очень важным фактором пространственного распределения SO_2 в марте–апреле 2001 г. была динамика атмосферы. Анализ траекторий дальнего переноса SO_2 привел к выводу, что упомянутые слои могли быть связаны с воздействиями находящихся в Восточной Азии вулканических или антропогенных источников SO_2 . Данные о траекториях указывают также на то, что частицы воздуха обычно перемещаются на 2 км выше источника, после чего движутся на восток в средних широтах (30° – 60° с.ш.), достигая Центрального региона Тихого океана через 2–3 сут. Сернистый газ, претерпевший дальний перенос на высотах 2–4 км, доминирует в формировании поля концентрации SO_2 над Центральным регионом Тихого океана. Сравнение с результатами численного моделирования на основе использования модели дальнего переноса с учетом химической трансформации показало, что удаление SO_2 из атмосферы обусловлено главным образом процессами, происходящими в облаках. Поэтому в условиях безоблачной атмосферы протяженность дальнего переноса возрастает, если траектории переноса не связаны с МПСА. В период марта–апреля 2001 г. важным фактором формирования поля концентрации SO_2 были выбросы SO_2 вулканом Miyake-jima, вклад которых иногда превосходил уровень выбросов за счет шести антропогенных источников SO_2 в Восточной Азии.

На основе использования модели CFORS дальнего переноса аэрозоля с учетом его химической трансформации в процессе переноса Satake и др. [33] выполнили расчеты переноса, химического состава и оптической толщины тропосферного аэрозоля (в частности, содержания в аэрозоле таких его компонентов, как пыль, сульфат, углеродсодержащие соединения и морские соли) применительно к условиям полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia, осуществленного весной 2001 г. Результаты вычислений детально сопостав-

лены с данными прямых наземных измерений (концентрации PM-10, сульфата и общего углеродного аэрозоля), лидарных зондирований и спутниковых наблюдений.

Согласие оказалось, в целом, вполне удовлетворительным. Сравнения выявили, в частности, наличие широтного градиента концентрации аэрозоля. Анализ осредненных за два месяца (март–апрель) полей концентрации аэрозоля и АОТ еще более отчетливо установил наличие упомянутого широтного градиента, а также сконцентрированность пылевого аэрозоля в полосе широт 30–45° с.ш., тогда как определяющее воздействие на поля сульфатного и углеродного компонентов аэрозоля оказывали их источники в Центральном регионе Китая и в Юго-Восточной Азии к северу от Японии (широты 25–45° с.ш.). Рассмотрение закономерностей горизонтального переноса аэрозоля продемонстрировало их тесную связь с изменчивостью поля ветра, причем каждый из компонентов аэрозоля характеризовался специфическими особенностями дальнего переноса. Основной поток ПА был направлен на восток вдоль параллели 45° с.ш. и располагался в свободной тропосфере.

Сульфатный и углеродный аэрозоли были сосредоточены в пограничном слое атмосферы при наличии направленного по часовой стрелке потока с дивергентной структурой в Центральном регионе Китая, что определяло интенсивное поступление загрязненных воздушных масс в северных широтах и ограничивало вынос воздушных масс с континента в южных широтах. Специфические траектории дальнего переноса, направленные вдоль 30° с.ш. от Таиланда и Лаоса, были типичны для углеродного аэрозоля на высотах 2–6 км. Оценки регионального бюджета тропосферного аэрозоля привели к выводу, что суммарные выбросы различных типов аэрозоля составляли: 105 Тг (пыль), 8,3 Тг SO₂ для серы (73% антропогенного происхождения, 27% за счет вулканической активности) и 3,07 Тг для углеродного аэрозоля. Вклады сухого осаждения, гравитационного оседания и выноса на север ПА составляли соответственно 33, 27 и 14% по отношению к суммарным выбросам. Вклады влажного осаждения, выноса на восток и сухого осаждения серы были равны соответственно 33, 27 и 21%. Что касается углеродного аэрозоля, то его вынос на восток оказался наиболее значительным (49%) при менее существенных вкладах сухого осаждения (16%) и выноса на север (14%). Осредненные вклады различных компонентов в формирование АОТ составили: 25% (сульфат), 24% (ПА) и 15% (морской солевой аэрозоль).

Для регулярно возникающих в Китае пылевых бурь характерно наличие отчетливо выраженной межгодовой изменчивости. Аномальное число пылевых бурь было зарегистрировано в 2000–2002 гг. при суммарных выбросах пыли в Восточно-Азиатском регионе, равных 100–200 Тг, что эквивалентно примерно 10% глобальных выбросов. Для пылевого аэрозоля типичен также четко выраженный годовой ход, определяемый главным образом

максимальной эрозией грунта пустыни Гоби весной. Все более актуальным становится анализ взаимодействия ПА и аэрозоля антропогенного происхождения, возникающего за счет функционирования промышленности и сельского хозяйства. В контексте осуществленного в рамках полевого наблюдательного эксперимента ACE-Asia в период интенсивных наблюдений весной 2001 г. Uno и др. [46] разработали методику численного моделирования дальнего переноса и химической трансформации аэрозоля в процессе дальнего переноса с целью воспроизведения и объяснения данных наблюдений ACE-Asia.

Региональная модель «Система прогноза химической погоды (CFORS)» реализована в сочетании с использованием таких вспомогательных данных наблюдений, как наземная метеорологическая информация, рассчитанный по спутниковым данным аэрозольный индекс (AI), результаты наземных измерений характеристик аэрозоля и аэрозольного лидарного зондирования. Анализ данных CFORS продемонстрировал, что они достаточно надежно воспроизводят многие наблюдаемые особенности дальнего переноса аэрозоля. В частности, рассчитанное вертикальное распределение аэрозоля хорошо согласуется со спутниковыми данными по AI, опирающимися на использование результатов наблюдений при помощи спектрометра TOMS для картирования общего содержания озона: перенос аэрозоля осуществляется в соответствии с «меандрированием» поля температуры на уровне 500 гПа в синоптических масштабах.

Вычисленные значения аэрозольной оптической толщины в большинстве случаев расходятся с данными лидарных зондирований по АОТ в пределах не более 20%. Анализ результатов численного моделирования позволил детально проанализировать структуру «идеальной» пылевой бури, наблюдавшейся в начале апреля. Эту пылевую бурю составляли два компонента в пограничном слое атмосферы и один — в свободной тропосфере выше 6 км, что было обусловлено воздействием двух крупных циклонических систем. Рассмотрение рассчитанных изменений полей содержания ПА со временем позволило корректно определить время зарождения пылевых бурь для каждого из пунктов наблюдений, но продемонстрировало завышенность вычисленной концентрации ПА в низких широтах. Оценки потока пыли за счет горизонтального переноса ПА вдоль параллели 130° в.д. в марте–апреле дали значение, равное 55,2 Тг (68% ПА в это время пришлось на долю трех периодов пылевых бурь).

На основе использования тайваньскими специалистами модифицированной модели качества воздуха TAQM-2 Tsai и др. [44] сделаны расчеты масс-супермикронной (диаметр частиц больше 1 мкм) и субмикронной (диаметр < 1 мкм) фракций частиц аэрозоля с целью воспроизведения результатов самолетных наблюдений свойств аэрозоля, осуществленных весной 2001 г. в рамках ACE-Asia в Северо-Западном секторе Тихого океана. Сравнение с данными наблюдений показало, что

рассчитанные вертикальные профили концентрации субмикронного аэрозоля вполне удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми по данным 19 полетов.

В периоды пылевых бурь и на уровне максимальной концентрации пылевого аэрозоля расчетная доля пылевой фракции в содержании супермикронного аэрозоля, как правило, превосходила 90%, а ПА был сосредоточен главным образом в нижней тропосфере (на высотах меньше 6 км). Даже при отсутствии пылевых бурь пылевой компонент супермикронной фракции аэрозоля выше пограничного слоя атмосферы ПСА оставался доминирующим. Согласно результатам численного моделирования преобладающим компонентом состава субмикронных частиц в период самолетных наблюдений были продукты загрязнений атмосферы. Рассчитанные вертикальные профили концентрации субмикронных частиц оказались над Восточной Азией чувствительными к результатам инвентаризации выбросов загрязнений. Наличие корреляции между наблюдаемым содержанием антропогенных летучих органических соединений и концентрацией субмикронного аэрозоля было использовано для оценки доли загрязняющих компонентов в субмикронных частицах. Соответствующие результаты хорошо согласуются с данными модельных расчетов для пылевой фракции аэрозоля. Согласно модельным оценкам доля пылевой фракции в субмикронном аэрозоле в ПСА была, как правило, меньше 28%. В периоды пылевых бурь эта доля превосходила 40%, но могла уменьшаться до 24% при наличии достаточно большого количества загрязняющих компонентов.

Tang и др. [43] выполнили численное моделирование дальнего переноса и химической трансформации атмосферного аэрозоля в Восточно-Азиатском регионе применительно к условиям полевых наблюдательных экспериментов TRACE-P и ACE-Asia с целью анализа данных наблюдений, полученных во время этих полевых экспериментов. Динамика химических процессов воспроизведена с применением модели STEM-2K3, которая включает термодинамический модуль SCAPE-II, позволяющий описать взаимодействие МГК с аэрозолем и химическое «старение» пылевого аэрозоля (в явном виде).

Рассмотрение результатов вычислений продемонстрировало, что численное моделирование обеспечивает достаточно адекватное воспроизведение многих особенностей наблюдаемой трехмерной пространственно-временной изменчивости свойств аэрозоля. Последствием происшедших в марте–апреле 2001 г. мощных выносов пылевого аэрозоля, возникшего под влиянием пылевых бурь в Китае, было сильное возрастание запыленности атмосферы. В условиях же низкого содержания пыли в атмосфере взаимодействие между МГК и аэрозолем в процессе дальнего переноса определялось конденсацией SO_2 и распределением газообразного аммония (подобная ситуация проиллюстрирована детальным обсуждением двух серий самолетных наблюдений в период TRACE-P).

Согласно данным численного моделирования, наличие ПА способствует перераспределению полетучих компонентов между газообразной и аэрозольной фазами, а также трансформации микроструктуры вторичного аэрозоля. Содержащийся в составе ПА кальций оказывает воздействие на равновесие в системе «газ–аэрозоль», проявляющееся как смещение баланса равновесия в сторону ограниченности содержания анионов, что благоприятствует усвоению частицами аэрозоля сульфата и нитрата, но уменьшает количество аэрозольного аммония. Происходящие на поверхности частиц ПА химические реакции обуславливают функционирование дополнительного механизма образования аэрозольного нитрата и сульфата. Специфика микроструктуры ПА играет решающую роль в формировании микроструктуры вторичного аэрозоля. Поскольку большая доля массы (70–90%) сконцентрирована в крупнодисперсной фракции аэрозоля, значительная часть сульфата и нитрата оказывается в составе именно этой фракции. Согласно данным наблюдений, в периоды пылевых бурь около 10–30% сульфата входят в состав супермикронной фракции, а в случае нитрата эта доля достигает 80%.

По данным численного моделирования и с учетом результатов самолетных наблюдений (самолет-лаборатория C-130) в рамках программы ACE-Asia, выполненных 4–14 апреля 2001 г., Tang и др. [42] изучили пространственное распределение и химический состав пылевого аэрозоля, а также его воздействия на газофазные химические процессы в тропосфере. Расчеты сделаны на основе использования комплексной модели STEM-2K1, позволяющей воспроизвести дальний перенос аэрозоля с учетом трансформации его химического состава в процессе дальнего переноса.

Результаты численного моделирования вполне удовлетворительно согласуются, в целом, с имеющимися данными наземных, самолетных и спутниковых наблюдений. В течение рассматриваемого периода в пустынях Такла-Макан и Гоби возникали пылевые бури, а образовавшийся при этом пылевой аэрозоль претерпевал дальний перенос, в ходе которого происходили изменения его химического состава. Наряду с этим важное значение имело дополнительное поступление аэрозоля (вдоль трасс дальнего переноса) за счет выбросов пыли на Loess Plateau и в сельскохозяйственных регионах. Данные самолетных наблюдений химического состава аэрозоля проанализированы для условий высокого и низкого содержания ПА в атмосфере.

Субмикронная фракция обогащенных ПА воздушных масс характеризовалась повышенными значениями отношений концентрации $\Delta\text{Ca}/\Delta\text{Mn}$, $\Delta\text{NH}_4^+/\Delta\text{SO}_4^{2-}$ и $\Delta\text{NO}_3^-/\Delta\text{CO}$ (Δ – разность между наблюдаемой и фоновой концентрациями). В работе [42] изучено воздействие на ПА гетерогенных реакций с участием O_3 , NO_2 , SO_2 и HNO_3 , которые оказывают значительное влияние на региональные химические процессы. Так, например, наблюдаемую во время одного из полетов низкую концентрацию тропосферного озона можно объяснить

влиянием гетерогенных реакций. Результаты расчетов, осредненные за весь период наблюдений, показали, что в приземном слое атмосферы за счет гетерогенных реакций произошло уменьшение концентрации O_3 , SO_2 , NO_2 и HNO_3 соответственно на 20, 55, 20 и 95%. Помимо этого, в регионах загрязненной атмосферы могло возникнуть увеличение концентрации NO , $HONO$ и дневной концентрации OH на 20, 30 и 4% соответственно.

В таких условиях, когда происходило смешение ПА со свежими загрязнениями, гетерогенные реакции могли приводить к сложным и разнообразным последствиям в отношении фотохимических процессов. Подобные реакции порождают также изменения химического состава аэрозоля различных фракций размеров. При высоком содержании ПА гетерогенные реакции могут приводить к возрастанию содержания сульфата (> 20%) и нитрата (> 70%) в грубодисперсной фракции аэрозоля. На ход фотохимических процессов могут оказывать влияние также обусловленные ПА изменения радиационных потоков. Так, например, вблизи подстилающей поверхности может происходить уменьшение концентрации OH на 20%. Влияние радиационного воздействия оказывается, однако, в большинстве случаев слабее, чем воздействие гетерогенных реакций.

Заключение

Осуществление программы ACE-Asia является иллюстрацией значительного прогресса, достигнутого в ходе дальнейшего развития комплексных наблюдательных экспериментов в рамках проблемы «аэрозоль—облака—климат». Однако с точки зрения полноты и системности такого рода полевых экспериментов все еще остается много нерешенных вопросов. Прежде всего это касается полноты экспериментов, состоящей в учете аэрозоля различных типов и его свойств, а также тех характеристик МГК и облаков, которые важны для адекватного воспроизведения взаимодействий «аэрозоль—МГК—облака». Наиболее слабым местом является, пожалуй, фрагментарность данных наблюдений радиационных характеристик аэрозоля и атмосферы в целом. К этому вопросу мы обратимся в третьей части обзора.

1. *de Almeida Castanho A., Martins J.V., Hobbs P.V., Artahó P., Remer L., Yamasoe M., Colarco P.R.* Chemical characterization of aerosols of the East Coast at the United States using aircraft and ground-based Stations during the CLAMS experiment // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. 934–946.
- 1a. *Arimoto R., Zhang X.Y., Huebert B.J., Kang C.H., Savoie D.L., Prospero J.M., Sage S.K., Schloesslin C.A., Khaing H.M., Oh S.N.* Chemical composition of atmospheric aerosols from Zhenbeitai, China, and Gosan, South Korea, during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19504/1–D19504/15.
2. *Bates T.S., Quinn P.K., Coffman D.J., Covert D.S., Miller T.L., Johnson J.E., Carmichael G.R., Uno I., Guazzotti S.A., Sodeman D.A., Prather K.A., Rivera M., Russel L.M., Merrill J.T.* Marine boundary layer dust and pollutant transport associated with the passage of a frontal system over eastern Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19519/1–D19519/18.
- 2a. *Bergstrom R.W., Pilewskie P., Pommier J., Rabette M., Russel P.B., Schmid B., Redemann J., Higurashi A., Nakajima T., Quinn P.K.* Spectral absorption of solar radiation by aerosols during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19515/1–D19515/13.
- 2b. *Chowdhary J., Cairns B., Mishchenko M.I., Hobbs P.V., Cote G.F., Redemann J., Rutledge K., Holben B.N., Russel E.* Retrieval of aerosol scattering and absorption properties from photopolarimetric observations over the ocean during the CLAMS experiment // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 1093–1117.
3. *Clarke A.D., Shinozuka Y., Kapustin V.N., Howell S., Huebert B., Doherty S., Anderson T., Covert D., Anderson J., Hua X., Moore G., II, McNaughton C., Carmichael C., Weber R.* Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physicochemistry and optical properties // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15509/1–D15509/20.
4. *Cohen D.D., Garton D., Stelcer E., Hawas O., Wang T., Poon S., Kim J., Chui B.C., Oh S.N., Shin H.-J., Ko M.Y., Uematsu M.* Multielemental analysis and characterization of fine aerosols at several key ACE-Asia sites // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19512/1–D19512/18.
5. *Copsey D.* Aerosols: when smoke gets in our eyes // *Weather.* 2005. V. 60. N 7. P. 273–274.
6. *De Bell L.J., Talbot R.W., Dibb J.E., Munger J.W., Fischer E.V., Froking S.E.* A major air pollution event in the northeastern United States caused by extensive forest fires in Quebec, Canada // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19305/1–D19305/16.
7. *Deepshikla S., Satheesh S.K., Srinivasan J.* Regional distribution of absorbing efficiency of dust aerosol over India and adjacent continents inferred using satellite remote sensing // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L03811, doi: 10.1029/2004 GL022091.
8. *Eldering A., Kahn B.H., Mills F.P., Irion F.W., Steele H.M., Gunsor M.R.* Vertical profiles of aerosol volume from high spectral resolution infrared transmission measurements: Results // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 20. D20201/1–D20201/11.
9. *Glagolenko S., Phares D.J.* Single-particle analysis of ultrafine aerosol in College Station, Texas // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 18. D18205/1–D18205/12.
10. *Han Z., Ueda H., Matsuda K., Zhang R., Arao K., Kanai Y., Hasome H.* Model particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19205/1–D19205/22.
11. *Huebert B., Bertram T., Kline J., Howell S., Eatough D., Blomquist B.* Measurements of organic and elemental carbon in Asian outflow during ACE-Asia from NSF/NCAR C-130 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19511/1–D19511/16.
12. *Husain L., Parekh P.P., Dutkiewicz V.A., Khan A.R., Yang K., Swami K.* Long-term trends in atmospheric concentrations of sulfate, total sulfur, and trace elements in the northeastern United States // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 18. D18305/1–D18305/12.
- 12a. *Ignatov A., Minnis P., Loeb N., Wielicki B., Miller W., Sun-Mack S., Tanre D., Remer L., Laszlo I., Geier E.* Two MODIS aerosol products over ocean on the Terra and Aqua CERES SSF datasets // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 1008–1031.

13. Kahn R., Anderson J., Anderson T.L., Bates T., Brechtel F., Carrico C.M., Clarke A., Doherty S.J., Dutton E., Flagan R., Fronin R., Fukushima H., Holben B., Howell S., Huebert B., Jefferson A., Jonsen H., Kalashnikova O., Kim J., Kim S.-W., Kus P., Li W.-H., Livingston J.M., McNaughton C., Merrill J., Mukai S., Murayama T., Nakajima T., Quinn P., Redemann J., Rood M., Russel P., Sano I., Schindl B., Seinfeld J., Sugimoto N., Wang I., Welton E.J., Won J.-G., Yoon S.-C. Environmental snapshots from ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19514/1–D19514/30.
14. Kim D.-H., Sohn B.-J., Nakajima T., Takamura T., Takemura T., Choi B.-C., Yoon S.-C. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 2. D02209/1–D02209/18.
15. Kim Y.S., Iwasaka Y., Shi G.-Y., Nagatani T., Shibata T., Trochkin D., Matsuki A., Yamada M., Chen B., Zhang D., Nagatani M., Nakata H. Dust particles in the free atmosphere over desert areas on the Asian continent: Measurements from summer 2001 to summer 2002 with balloon-borne optical particle counter and lidar, Dunhuan, China // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19526/1–D19526/9.
- 15a. Kim K.W., He Z., Kim Y.J. Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19502/1–D19502/15.
16. Kittaka C., Pierce R.B., Crawford J.H., Hitchman M.H., Johnson D.R., Tripoli G.J., Chin M., Bandy A.R., Weller R.J., Talbot R.W., Anderson B.E. A three-dimensional regional modeling study of the impact of clouds on sulfate distributions during TRACE-P // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15511/1–D15511/14.
17. Kline J., Huebert B., Howell S., Blomquist B., Zhuang J., Bertram D., Carrillo J. Aerosol composition and size versus altitude measured from the C-130 during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19508/1–D19508/22.
18. Kondratyev K.Ya., Iolev L.S., Krapivin V.F., Varotsova C.A. Atmospheric Aerosol Properties, Formation Processes, and Impacts: From Nano- to Global Scales. Springer/Praxis, Chichester, U.K. 2005. 382 p.
19. Lee K.H., Kim Y.J., von Hoyningen-Huene W. Estimation of aerosol optical thickness over northeast Asia from Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) data during the 2001 ACE-Asia intensive observation period // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 9. D19516/1–D19516/14.
- 19a. Levy R.C., Remer L.A., Martins J.V., Kaufman Y.J., Plana-Fattori A., Redemann J., Wenny B. Evaluation of MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 974–992.
20. Ma Y., Weber R.J., Maxwell-Meier K., Orsini D.A., Lee Y.-N., Huebert B.J., Howell S.G., Bertram T., Talbot R.W., Dibb J.E., Scheuer E. Intercomparison of airborne measurements of aerosol ionic chemical composition during TRACE-P and ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. P. D15506/1–D15506/13.
- 20a. Magi B.I., Hobbs P.V., Kirchstetter T.W., Novakov T., Hegg D.A., Gao S., Redemann J., Schmid B. Aerosol properties and chemical apportionment of aerosol optical depth at locations off the U. S. East Coast in July and August 2001 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 919–933.
21. Mari C., Evans M.J., Palmer P.I., Jacob D.J., Sachse G.W. Export of Asian pollution during two cold front episodes of the TRACE-P experiment // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15517/1–D15517/12.
- 21a. Martonchik J.V., Diner D.J., Kahn R., Gaitley B., Holben B.N. Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L1602, doi:10.1029/2004GL019807.
22. Maxwell-Meier K., Weber R., Song C., Orsini D., Ma Y., Carmichael G.R., Streets D.G. Inorganic composition of fine particles in mixed mineral dust-pollution plumes observed from airborne measurements during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19507/1–D19507/20.
23. McNaughton C.S., Clarke A.D., Howell S.G., Moore K.G. (II), Brekhovskikh V., Weber R.J., Orsini D.A., Covert D.S., Buzorius G., Brechtel F.J., Carmichael C.R., Tang Y., Eisele F.L., Mauldin R.L., Bandy A.R., Thornton D.C., Blomquist B. Spatial distribution and size evolution of particles in Asian outflow: Significance of primary and secondary aerosols during ACE-Asia and TRACE-P // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19506/1–D19506/19.
24. Merrill J.T., Kim J. Meteorological events and transport patterns in ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19518/1–D19518/13.
25. Moore K.G., II, Clarke A.D., Kapustin V.N., McNaughton C., Anderson B.E., Winstead E.L., Weber R., Ma Y., Lee Y.-N., Talbot R., Dibb J., Anderson T., Doherty S., Covert D., Rogers D. A comparison of similar aerosol measurements made on the NASA P3-B, DC-8 and NSF C-130 aircraft during TRACE-P and ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15515/1–D15515/35.
26. Moorthy K.K., Satheesh S.K. Characteristics of aerosols over a remote island, Minicoy in the Arabian Sea: Optical properties and retrieved size characteristics // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005 (in press).
27. Mukai M., Nakajima T., Takamura T. A study of long-term trends in mineral dust aerosol distributions in Asia using a general circulation model // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19204/1–D19204/19.
28. Park M.H., Kim Y.R., Kang C.-H., Shim S.-G. Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19513/1–D19513/7.
29. Quinn P.K., Coffman O.J., Bates T.S., Welton E.J., Covert D.S., Miller T.L., Johnson D.E., Maria S., Russel L., Arimoto R., Carrico C.M., Rood M.J., Anderson J. Aerosol optical properties measured on board the «Ronald H. Brown» during ACE-Asia as a function of aerosol chemical composition and source region // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, N 19. P. D19501/1–D19501/28.
30. Ramachandran S. Spectral aerosol optical characteristics during the northeast monsoon over the Arabian Sea and the tropical Indian Ocean. 1. Aerosol optical depths and their variabilities // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19207/1–D19207/11.
31. Ramachandran S. Spectral aerosol optical characteristics during the northeast monsoon over the Arabian Sea and the tropical Indian Ocean. 2. Angström parameters and anthropogenic influence // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19208/1–D19208/12.
- 31a. Redemann J., Schmid B., Eilers J.A., Kahn R., Levy R.C., Russel P.B., Livingston J.M., Hobbs P.V., Smith W.L. (Jr.), Holben B.N. Suborbital measurements of spectral aerosol optical depth and its variability at subsatellite grid scales in support of CLAMS 2001 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 993–1007.

32. Santarpia J.L., Li R., Collins D.R. Direct measurement of the hydration state of ambient aerosol populations // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 18. D18209/1–D18209/16.
33. Satake S., Uno I., Takemura T., Carmichel G. R., Tang Y., Streets D., Sugimoto N., Shimizu A., Hematsu M., Han J.-S., Ohta S. Characteristics of Asian aerosol transport simulated with a regional-scale chemical transport model during the ACE-Asia observation // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19522/1–D19522/11.
34. Satheesh S.K., Srinivasan J. Enhanced aerosol loading over Arabian Sea during the pre-monsoon season: Natural or anthropogenic? // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 18. 1874. doi: 10/1029/2002 GL015687.
35. Satsumabayashi H., Kawamura M., Katsumo T., Futaki K., Murano K., Carmichel G. R., Kajino M., Horiguchi M., Ueda H. Effects of Miyake volcanic effluents on airborne particles and precipitation in central Japan // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19202/1–D19202/17.
36. Schaap M., Denier Van Der Gon H.A.C., Dentener F.J., Visschedijk A.J.H., Van Loon M., ten Brink H.M., Putaud J.-P., Guillaume B., Liouise C., Builthjes P.J.H. Anthropogenic black carbon and fine aerosol distribution over Europe // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 18. D18207/1–D18207/16.
37. Sharma S., Lovoué D., Cachier H., Barrie L.A., Gong S.L. Long-term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15203/1–D15203/10.
38. Shimizu A., Sugimoto N., Matsui I., Arao K., Uno I., Murayama T., Kagawa N., Aoki K., Uchiyama A., Yamazaki A. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19517/1–D19517/14.
39. Sievering H., Caine J., Harvey M., McGregor J., Nichol S., Quinn P. Aerosol non-sea-salt sulfate in the remote boundary layer under clear-sky and normal cloudiness conditions: Ocean-derived biogenic alkalinity enhances sea-salt sulfate production by ozone oxidation // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19317/1–D19317/12.
40. Simoneit B.R.T., Kobayashi M., Mochida M., Kawamura K., Huebert B.J. Aerosol particles collected on aircraft flights over the northwestern Pacific region during the ACE-Asia campaign: Composition and major sources of the organic compounds // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19509/1–D19509/13.
41. Simoneit B.R.T., Kobayashi M., Mochida M., Kawamura K., Lee M., Lim H.-J., Turpin B.J., Komazaki Y. Composition and major sources of organic compounds of aerosol particulate matter sampled during the ACE-Asia campaign // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19510/1–D19510/22.
- 41a. Smith W.L. (Jr.), Charlock T.P., Kahn R., Martins J.V., Remer L.A., Hobbs P.V., Redemann J., Rutledge C.K. EOS Terra aerosol and flux validation: An overview of the Chesapeake Lighthouse and Aircraft Measurements for satellites (CLAMS) experiment // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 903–918.
42. Tang Y., Carmichel G.R., Kurata G., Uno I., Weber R.J., Song C.-H., Guttikunda S.K., Woo J.-H., Streets D.G., Wei C., Clarke A.D., Huebert B., Andersen T.L. Impacts of dust on regional tropospheric chemistry during the ACE-Asia experiment: A model study with observations // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19521/1–D19521/21.
43. Tang Y., Carmichel G.R., Seinfeld J.H., Dabdub D., Weber R.J., Huebert B., Clarke A.D., Guazzotti S.A., Sodeman D.A., Pratter K.A., Uno I., Woo J.-H., Yienger J.J., Streets D.G., Quinn P.K., Johnson J.E., Song C.-H., Grassian V.H., Sandu A., Talbot R.W., Dibb J.E. Three-dimensional simulations of inorganic aerosol distributions in east Asia during spring 2001 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19523/1–D19523/32.
44. Tsai F., Liu T.-H., Liu S.C., Chen T.-Y., Anderson T.L., Masonis S.J. Model simulation and analysis of coarse and fine particle distributions during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19520/1–D19520/17.
45. Tu F.H., Thornton O.C., Bandy A.R., Carmichael G.R., Tang Y., Thornhill K.L., Sachse G.W., Blake D.R. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 15. D15518/1–D15518/17.
46. Uno I., Satake S., Carmichel G.R., Tang Y., Wang Z., Takemura T., Sugimoto N., Shimizu A., Murayama T., Cahill T.A., Cliff S., Uematsu M., Ohta S., Quinn P.K., Bates T.S. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19524/1–D19524/20.
47. Wang T., Wong C.H., Cheung T.F., Blake D.R., Arimoto R., Baumann K., Tang J., Ding G.A., Yu X.M., Li Y.S., Streets D.G., Simpson I.J. Relationships of trace gases and aerosols and the emission characteristics at Lin'an, a rural site in eastern China, during spring 2001 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. D19505/1–D19505/16.
48. Xu J., Bergin M.H., Greenwald R., Schauer J.J., Shafer M.M., Jaffrezo J.L., Aymoz G. Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N 19. P. D19303/1–D19303/14.
49. Yin Y., Carlslaw K.S., Feingold G. Vertical transport and processing of aerosols in a mixed-phase convective cloud and the feedback on cloud development // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. P. 221–245.
50. Zhang D., Iwasaka Y. Size change of Asian dust particles caused by sea salt interaction: Measurements in southwestern Japan // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 31. N 15. L15101/1–L15102/4.

K.Ya. Kondratyev. Aerosol and climate: The present state and future development. 2. Field observational experiment ACE-Asia.

Basic results have been discussed of complex field studies of atmospheric aerosol and its transformation in the process of long-range transport, which were conducted within the program of the field observational experiment ACE-Asia.