

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

УДК551.51
ББК 28.08

Л.С. Ивлев

АЭРОЗОЛИ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА*

Обсуждается влияние аэрозолей природного и антропогенного происхождения на климатические процессы. Показано, что учёт аэрозольного воздействия на климат в настоящее время выполнен недостаточно корректно в первую очередь из-за неточности сведений о процессах генерации и физико-химических свойствах атмосферных аэрозолей. Изложено современное состояние знаний по этим вопросам.

Ключевые слова:

альbedo, вулканический материал, глобальные изменения климата, природные и антропогенные аэрозоли, стратосфера, сульфаты, фазовые переходы воды.

Комплексные исследования аэрозолей. Комплексные исследования реальной совокупности различных типов аэрозолей вызывают наибольший интерес и становятся все более многочисленными и разнообразными. Например, в работе [31] обсуждены результаты уникальной трехлетней серии одновременных измерений химических и оптических (поглощения и рассеяния) свойств аэрозолей, выполненных в Барроу (Аляска). Все результаты получены при относительной влажности воздуха $\leq 40\%$ и позволили детально проанализировать закономерности годового хода массовой концентрации аэрозолей, а также таких его компонентов как морские соли, несолевые сульфаты (nss), метаносульфат или MSA^- , NH_4^+ и nssK^+ , Mg^{+2} и Ca^{+2} для диапазонов субмикронных и супермикронных размеров. Максимумы концентрации субмикронных фракций nssSO_4^{2-} , NH_4^+ , nssK^+ , Mg^{+2} и Ca^{+2} имеют место зимой и ранней весной, что соответствует времени поступления устойчивой Арктической дымки. Значения концентрации неморских сульфатных аэрозолей nssSO_4^{2-} сопоставлялись с данными наблюдений в других точках Аляски: Покер Флэт (ракетный полигон), Национальный Парк Денали и Гомер за 1997–1998 гг. и 1998–1999 гг. в периоды, когда возникали явления Арк-

тической дымки. Максимальные значения концентрации имели место в Барроу и уменьшались с широтой в последовательности Покер Флэт – Денали – Гомер, являя, тем самым, наличие меридионального градиента плотности Арктической дымки.

Одним из наиболее трудных аспектов учета разнообразия оптических свойств аэрозолей является проблема свойств аэрозолей, имеющих смешанный состав. На основе комбинированного применения дифференциального анализатора подвижности и оптического счетчика частиц исследовались оптические свойства аэрозолей смешанного состава по данным наблюдений в Цукубе (Япония) [32]. В среднем, около 50% всех исследованных частиц были классифицированы как принадлежащие к категории оптически внешних смесей. 71% величины коэффициента рассеяния аэрозолей обусловлены вкладом сульфата аммония, уменьшаясь в отдельные периоды времени до 41%. Учет неферрических частиц показывает, что их доля иногда достигает 50%.

Однако имеющиеся данные об оптических свойствах аэрозолей очень фрагментарны. Особенно это относится к комплексному показателю преломления (КПП) частиц аэрозолей и его зависимости от длины волны. Почти отсутствуют данные о КПП для таких, например, ти-

* Окончание. Начало – см. № 4 за 2012 г., с. 238–244.

пов частиц аэрозолей, как состоящих из серной кислоты, тригидрата азотной кислоты, окиси алюминия, хлористого калия, сульфата аммония, для различных видов пылевых аэрозолей. Спектры поглощения и эмиссии в среднем ИК диапазоне (длины волн 2–20 мкм) для сульфата аммония (AMS: $(NH_4)_2SO_4$), карбоната кальция (CAC: $CaCO_3$) и нитрата аммония (AMN: NH_4NO_3) изучаются на основе использования методики Фурье-спектроскопии при высоком спектральном разрешении.

Влияние атмосферных аэрозолей как загрязняющего атмосферу и климатообразующего компонента существенно зависит от фазового состояния частиц (жидких или твердых), их водосодержания, а также от распределения летучих компонентов между аэрозолями и газообразной фазой. Необходимы поэтому модели аэрозолей, пригодные для предвычислений состава и состояния аэрозолей в широком диапазоне изменений температуры и влажности воздуха. Хотя вполне допустимо предположение о наличии термодинамического равновесия, даже в этом случае фазовое состояние частиц аэрозолей может быть достаточно сложным, поскольку: 1) существуют различные возможности формирования твердой фазы; 2) поведение жидкой фазы аэрозолей является, по-видимому, в сильной степени неидеальным при высокой концентрации раствора в условиях низкой температуры. Значительная часть массы аэрозолей состоит во многих случаях из неорганических электролитных соединений, которые претерпевают диссоциацию в воде, что приводит к образованию ионов.

На основе комбинированного рассмотрения уравнений для газообразной фазы (с учетом констант равновесного образования газообразной и твердой фазы) и алгоритма Гиббса минимизации свободной энергии А. Векслер и С. Клетт, [36] разработали модель равновесного распределения фаз для неорганических атмосферных аэрозолей. Эта модель позволяет предвычислить водосодержание, фазовое состояние и распределение компонентов между аэрозольной и газообразной фазами при заданных ионном составе, температуре и относительной влажности. Функционирование модели характеризуется следующими диапазонами ее адекватности: температура от < 200 до 328 К для подсистем ($H^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- - Cl^- - Br^- - H_2O$) и ($H^+ - NH_4^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- - H_2O$); $298,15$ К в случае ($H^+ - NH_4^+ - Na^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- - Cl^- - H_2O$).

Рассматриваемая модель не содержит каких-либо упрощающих предположений, позволяя учесть все возможные виды твердой фазы, в том числе различные формы гидратированных и двойных солей. Получены значения постоянной закона Генри для H_2SO_4 в зависимости от температуры и уточнен процесс растворимости HBr в водном растворе H_2SO_4 . Рассчитаны фазовые диаграммы для системы $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4/H_2O$ в широком диапазоне температуры (до 210 К). В период 4–14 апреля 2000 г. на научной станции Мельпитц, близ Лейпцига (Германия) был проведен полевой наблюдательный эксперимент INTERCOMP-2000 в рамках программы EUROTRAC-2 AEROSOL. Одна из целей этого эксперимента состояла в получении данных наблюдений для оценки возможности замыкания данных о покомпонентном химическом составе аэрозолей. Производился забор проб аэрозолей одновременно на четыре фильтра: тонкий и грубый нуклеопоровые поликарбонатные фильтры Gent PM10 и два кварцевых фибровых фильтра Ватмана QM-A. Полученные пробы были подвергнуты анализу для определения распределения по массе 42 элементов с комбинированным применением методик индуцированной рентгеновской эмиссионной спектроскопии, нейтронного активационного анализа и ионной хроматографии.

Анализ проб на кварцевых фильтрах сделан с целью определения содержания органического и элементного углерода с помощью термическо-оптической трансмиссионной методики. Расчеты покомпонентного замыкания баланса массы различных компонентов аэрозолей сделаны отдельно для тонкодисперсной ($PM_{2.5}$, < 2.5 мкм) и грубой дисперсной (PM_{10} , $2.5-10$ мкм) фракций аэрозолей. При этом учитывались 9 типов аэрозолей. В число главных компонентов грубодисперсной фракции входило вещество грунта, органические аэрозоли и нитраты. Доминирующими компонентами мелкодисперсной фракции являются органические аэрозоли, нитраты и сульфаты. Ученные компоненты позволяют объяснить 11% и 86% массы грубо- и тонкодисперсной фракций аэрозолей, соответственно.

Атмосферные аэрозоли представляет собой смесь многих компонентов, которыми являются, в частности, неорганические кислоты (например, H_2SO_4 , HNO_3), их соли (в том числе $(NH_4)_2SO_4$, NH_4NO_3) и вода. Поскольку значительная часть компонентов является в высшей степени гигроскопич-

ной, масса содержащейся в частицах аэрозолей воды часто превосходит их сухую массу, особенно в условиях влажной нижней тропосферы. Многокомпонентность состава атмосферных аэрозолей до сих пор не учитывается в глобальных моделях химических процессов в атмосфере и в моделях климата, поскольку это требует сложных расчетов, связанных с большими затратами машинного времени.

С. Метцгер и др. предложили вычислительно эффективную модель для расчета распределения между аэрозольной и газообразной фазами для полувolatile компонентов неорганических аэрозолей, которая может быть использована как блок, описывающий химические процессы в глобальной атмосфере в моделях климата [26; 27]. Главную роль в новой аэрозольной модели играет новая методика учета равновесного распределения газ/аэрозоли в рамках приближенной аэрозольной модели EQSAM [26; 27].

Расчеты показали, что соотношение между аэрозольной и газообразной фазами оказывает сильное влияние на газофазные концентрации при относительно низкой температуре. В течение всего года ночью, а также круглосуточно зимой рассчитанная концентрация аэрозолей (включая содержащуюся в его частицах воду) оказывается значительно более высокой, если учесть распределение фаз газ/аэрозоли. Это происходит потому, что газообразная азотная кислота вблизи подстилающей поверхности часто нейтрализуется аммонием и, таким образом, становится практически полностью сконцентрированной в аэрозольной фазе в виде нитрата аммония NH_4NO_3 . Подобные аэрозоли имеет более продолжительное время жизни в атмосфере, чем его газы-предшественники NH_3 и HNO_3 , и поэтому может претерпевать перенос на большие расстояния (например, – из Индии в Африку и Европу).

Одним из наиболее стабильных источников образования частиц аэрозолей в атмосфере является механизм газофазных процессов трансформации малых газовых компонентов в частицы с участием паров серной кислоты (целый ряд фактов указывает на существование высокой корреляции между H_2SO_4 и вновь образовавшимися частицами). Возможным ключевым участником подобной трансформации является также аммиак. Д. Хансон и Ф. Эйзеле [19] выполнили лабораторные измерения в проточной кювете концентрации ионно-молекулярных кластеров $HSO_4^-(H_2SO_4)_{n-1}(NH_3)_m$, соответствующих

нейтральным компонентам $(H_2SO_4)_n(NH_3)_m$, для значений n от 2 до 6 и m от 0 до $n-1$ при температуре до 285 К. Внутри кюветы происходило образование кластеров в смеси паров воды, серной кислоты и аммиака (при отсутствии аммиака кластеры не возникали). Типичные значения концентрации NH_3 и H_2SO_4 составляли 2×10^6 см⁻³, что соответствует отношению смеси около 100 трил⁻¹ (по объему) при нормальном атмосферном давлении. Оценки концентрации кластеров, образующихся в этих условиях, дали значения порядка 10^6 см⁻³. По-видимому, каждый кластер, который способен участвовать в образовании частицы аэрозолей, содержит две молекулы H_2SO_4 при температуре 275 К. Полученные результаты согласуются с известным фактом образования новых частиц аэрозолей из кластеров $(H_2SO_4)_2NH_3$.

Последние годы отмечены возрастающим интересом к наночастицам в атмосфере (НЧ), который определяется двумя обстоятельствами: 1) НЧ предшествуют образованию в атмосфере более крупных частиц аэрозоля, оказывающих существенное воздействие на климат; 2) загрязняющие атмосферу НЧ очень важны как фактор влияния на здоровье человека. Кроме того НЧ участвуют в гетерогенных химических реакциях, обуславливающих изменения химического состава атмосферы. В химии, физике и материаловедении НЧ определяются как частицы таких размеров, свойства которых отличаются от свойств составляющего их вещества. Однако в исследованиях атмосферных аэрозолей НЧ определяются как частицы с диаметром меньше 50 нм. Крупные частицы аэрозолей нередко обладают наноструктурой, которая проявляется в виде агломератов минеральных зерен, сажевых сферул, поверхностных пленок и оказывают влияние на различные свойства аэрозолей. Так, например, специфика наноструктур влияет, по-видимому, на усвоение воды частицами посредством капиллярной конденсации, а жидкие поверхностные пленки воздействуют на ход гетерогенных химических процессов. К. Анастасио и С. Мартин [12] сделали подробный обзор имеющейся информации о наночастицах в атмосфере, особенно с точки зрения процессов их образования и роста, химических, физических и механических свойств.

Важный аспект многокомпонентности аэрозолей связан с его ролью в гетерогенных химических реакциях на поверхности частиц аэрозолей, которые оказывают

228 | существенное воздействие на концентрацию в атмосфере различных малых газовых компонентов.

В условиях арктического морского пограничного слоя атмосферы (МПСА) часто возникают события спада (низкого уровня отношения смеси) содержания озона во время полярного восхода Солнца. Гетерогенные реакции на поверхности частиц морских солей и вулканического происхождения с участием галогенов рассматриваются как важный механизм разрушения озона в МПСА весной. События спада содержания озона сопровождаются уменьшением концентрации неметановых углеводородных соединений и изменением их состава.

Исследования химического состава арктических аэрозолей показали, что концентрация дикарбоксильных кислот с короткими цепями возрастает в 5–20 раз в марте–апреле по сравнению с предшествующими месяцами полярной зимы. Подобные результаты свидетельствуют о том, что низкомолекулярные карбоксильные кислоты образуются посредством интенсивного фотохимического окисления летучих органических соединений, в частности вулканического происхождения, которые претерпевают дальний перенос и накапливаются в арктической атмосфере в период полярной зимы. Образование дикарбоксильных кислот связано с химией галогенов.

Химический состав и физическое состояние (например, – жидкое или кристаллическое) частиц атмосферных аэрозолей оказывают существенное влияние на их оптические свойства, химическую активность и время жизни в атмосфере. Поэтому учет фазового состояния частиц имеет очень важное значение для численного моделирования воздействия аэрозолей на процессы в атмосфере. Хотя для решения соответствующих задач были созданы различные термодинамические модели, их использование серьезно осложняется при понижении относительной влажности, когда трудно моделировать динамику фазы частиц, ввиду преобладания метастабильности фазового состояния, обусловленной медленностью кинетики нуклеации.

Частицы одного из характерных типов представляют собой нерастворимые компоненты земной коры, покрытые растворимыми электролитами. Примером нерастворимых компонентов служат частицы минеральной пыли в пустынях Гоби и Сахара. Отмеченные обстоятельства стимулировали лабораторные исследования влияния включений из минеральной

пыли на фазу частиц (например, – путем гетерогенной нуклеации). Присутствие нерастворимого компонента обеспечивает наличие поверхности, которое ведет к значительному уменьшению критического пересыщения, необходимого для кристаллизации сульфата аммония.

Д.-Х. Хан и др. [18] обсудили дальнейшие результаты исследований образования частиц из минеральной пыли, покрытой нитратом аммония, который представляет собой типичный компонент состава частиц атмосферных аэрозолей и имеет главным образом антропогенное происхождение. С этой целью выполнены лабораторные эксперименты в проточной кювете для изучения влияния относительной влажности (RH) и включений минеральной пыли на физическое состояние частиц из NH_4NO_3/H_2O . Показано, что в случае чисто жидких частиц эфлоресценция отсутствует, но возникает при наличии минеральных включений диаметром 150–400 нм, если RH составляет 3–10% при температуре 298 К. Покрытие слоем NH_4NO_3/H_2O осуществлялось при выборе в качестве включений гематита ($\alpha-Fe_2O_3$), корунда ($\alpha-Al_2O_3$), муллита ($Al_6Si_2O_{13}$) и аморфного кремния ($am-SiO_2$) с применением методики испарения-конденсации с последующей нейтрализацией с помощью NH_3 . Степень внутренней перемешанности изменяется в пределах 7–27% в зависимости от диаметра частиц минеральной пыли.

Анализ хода выполненных экспериментов показал, что функционирует механизм гетерогенной нуклеации с последующими хемосорбцией нитрата на поверхности окисленных минералов и образованием кристаллического NH_4NO_3 . В реальных атмосферных условиях содержащие нитрат частицы можно разделить на две подгруппы, соответственно их гигроскопическим свойствам. Поскольку гетерогенная химия и радиационные свойства сложных частиц сильно зависят от их физического состояния, свойства воздушных масс, содержащих нитратные частицы, сильно изменяются при наличии минеральной пыли.

Анализ полученных при помощи 12-ступенчатых импакторов проб [26; 27] был сделан с учетом их морского или континентального происхождения, причём модальные параметры (аэродинамический диаметр и дисперсия) найдены по данным о микроструктуре каждого из компонентов аэрозолей. Аэрозоли характеризуются наличием двух субмикронных мод (конденсационная мода $0,30 \pm 0,05$ мкм и капельная мода $0,65 \pm 0,15$ мкм) и одной или

двух супермикронных мод (первая из них (3,5–4,5 мкм) связана с морскими компонентами аэрозолей, а вторая (5–6 мкм) – с минеральными компонентами). Состав аэрозолей определяется как внешняя смесь nss (неморского) сульфата, аммония и органических кислот в субмикронных модах. Аэрозоли супермикронных мод представляет собой смесь nss-сульфата, аммония, нитрата и органических кислот с компонентами морского и континентального происхождения. Летом и зимой доля массы супермикронной фракции, как правило, уменьшается при переходе от морских к континентальным воздушным массам.

Существенная и изменчивая часть субмикронных аэрозолей не является сульфатной, включая значительное количество $\text{nssSO}_4^{2-} + \text{NH}_4^+$, а также элементного (ЕС) и органического (ОС) углерода, что имеет важное значение для корректного определения оптических свойств аэрозолей. В воздушных массах, поступающих с Индийского субконтинента, наиболее высокой концентрацией субмикронных аэрозолей и долей массы характеризовался ЕС, который является поглощающим в видимой области спектра. ЕС обуславливает усиление ослабления поступающей к подстилающей поверхности солнечной радиации, но, с другой стороны, может приводить к испарению облаков в МПСА, что затрудняет оценки влияния ЕС на РВВ.

Аэрозольный шлейф, образующийся под воздействием выбросов в восточном регионе США, сходен по своим свойствам (масса аэрозолей, АОТ, экстинкция) с индийским и азиатским шлейфами. По данным TARFOX и NEAQS концентрация ОС в случае северо-американского шлейфа оказалась более высокой, чем в условиях азиатского шлейфа, а значения АОТ для этих шлейфов сравнимы. Аэрозоли азиатского шлейфа является (в отличие от ожиданий) слабо поглощающим. Среднее значение альбеда однократного рассеяния составило $0,94 \pm 0,03$.

Некоторые выводы. Общепринято, что обусловленное аэрозолями выхолаживание атмосферы сдерживает повышение приземной температуры воздуха. Однако оценки последних лет приводят к выводу о более слабом проявлении радиационного воздействия аэрозолей на этот процесс, а его численное моделирование с учётом только природных возмущающих воздействий не объясняет наблюдаемого потепления во второй половине XX века. Модели но-

сят подгоночный характер, учитывающий как парниковые газы, так и сульфатные аэрозоли, но они не способны объяснить наблюдаемое более медленное повышение температуры в свободной тропосфере, чем следует из расчётов. Вероятно, последнее может объясняться терригенной природой аэрозолей, имеющих значительное время жизни, особенно при вулканических извержениях. Кроме того, не учитываются открытость климатической системы к внешним космическим воздействиям. Внезапные изменения климата могут инициироваться тектоническими, в частности, вулканическими процессами. Это, как и антропогенные воздействия на климат способствует смещению климатической системы в сторону порогового уровня необратимых изменений климата.

Вышеизложенное позволяет сделать относительно объективные выводы о состоянии проблемы аэрозольного влияния на изменения климата Земли. Ключевым моментом этой проблемы является вопрос интерактивного взаимодействия падающей солнечной радиации, аэрозолей, облачности, возникающих при этом термодинамических и динамических процессов в атмосфере. При критически высоких концентрациях аэрозолей несомненна и роль гетерогенных процессов образования и разрушения газовых и новых аэрозольных составляющих атмосферы. Отметим следующие установленные факты аэрозольного воздействия на состояние атмосферы Земли:

1) Несомненно, наблюдается рост содержания аэрозолей во всех атмосферных слоях – тонкодисперсной фракции в средней и верхней атмосфере, органического происхождения и вторичных в нижних слоях атмосферы.

2) Суммарный эффект от присутствия аэрозолей разных типов заметно отличается от суммы эффектов от отдельных типов частиц.

3) Основную роль в радиационном климате Земли, за исключением облачных систем, играют стратосферные аэрозоли.

4) Присутствие аэрозолей ослабляет циркуляцию Гадлея, ослабляет пассаты в тропиках и западные планетарные ветры в субтропиках.

5) Наблюдаются сильные неоднородности химического состава и распределения частиц по размерам и морфологической структуре в зависимости от региона и локальных источников, которые могут существенно сказываться на локальных погодных условиях и циркуляции атмосферы.

6) Считается, что аэрозоли сами по себе не могут вызывать восходящие и нисходящие конвективные движения, но за счёт влияния на фазовые переходы воды выделяемая и поглощаемая теплоты могут существенно влиять на вертикальные движения атмосферы.

7) В высоких слоях атмосферы эффективны фотофоретические процессы движения аэрозольных частиц.

8) Велика роль аэрозолей в крупномасштабных процессах массопереноса вещества на Земле.

9) Гетерогенные процессы на аэрозольных частицах и в каплях, в частности при вулканических извержениях, ведут к быстрому уменьшению концентрации озона и окислению серосодержащих компонентов атмосферы.

Моделирование структуры атмосферных аэрозолей и их влияния на климатические процессы затруднено из-за сильной пространственно-временной изменчивости аэрозолей и недостаточно полных экспериментально полученных сведений о динамических процессах с их участием. В частности, неудовлетворительны сведения о структуре и поведении аэрозолей над океанами, в пустынях, в полярных

районах. Недостаточны ряды наблюдений за состоянием аэрозолей, например, для выводах о глобальных трендах в их состоянии. Требуют дальнейшего развития экспериментальные методы аэрозольного мониторинга. Проблемы заключаются в том, что не существует простых и эффективных методов получения всех характеристик, требуемых для моделирования аэрозольных процессов и структур. Общепринят следующий подход: постоянно измеряются небольшое количество параметров, чаще всего коэффициенты рассеяния и ослабления, а затем на базе этих данных и априорных модельных представлениях рассчитываются требуемые для конкретной климатической задачи характеристики. Такой подход требует постоянной сверки с данными имеющихся комплексных измерений. Однако в большинстве случаев ограничиваются априорными модельными представлениями. В настоящее время нарабатывается громадный массив данных в системе Aeronet. Использование этой системы бесспорно поможет решению многих задач проблемы климата, но несомненно требуются периодические комплексные исследования для верификации Aeronet-метода.

Список литературы:

- [1] Белан Б.Д., Толмачев Г.Н. Временная изменчивость аэрозоля над Западной Сибирью в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана*. Т.9. – 1996, № 1. – С. 99–105.
- [2] Ивлев А.С. Начала физики погодо- и климатообразования. Ч. 1. Т. 2. Влияние аэродисперсных систем на динамические и другие климатообразующие процессы в атмосфере. Природные и техногенные аэрозоли. – СПб.: ВВМ, 2009. – 285 с.
- [3] Ивлев А.С., Волгин В.М. Вулканы, как тепловые машины // Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли. VI. 7–10.2008 г.» / Сборник трудов. – СПб.: ВВМ, 2009. – 89–93 с.
- [4] Ивлев А.С. Кондратьев К.Я. Хворостовский С.Н. Влияние космического мусора на состав, оптические свойства и физические процессы в верхней и средней атмосфере // *Оптический журнал*. Т. 68. – 2001, № 4. – С. 3–12.
- [5] Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // *Исследования Земли из космоса*. – 2004, № 2, С. 61–96.
- [6] Кондратьев К.Я., Ивлев А.С. О воздействии антропогенного аэрозоля на климат // *Доклады АН*. Т. 340. – 1995, № 1. – С. 98–100.
- [7] Кондратьев К.Я., Ивлев А.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля: от нано – до глобальных масштабов. – СПб.: ВВМ, 2007. – 858 с.
- [8] Маккитрик Р. Тренды в данных о температуре воздуха, полученные с учетом внутренне обусловленной корреляции // *Изв. Русского геогр. об-ва*. Т. 134. – 2002, вып. 3. – С. 16–24.
- [9] Никольский Г.А., Черкасов А.А. Факторы, формирующие Эль-Ниньо, связанные с движением Земли // *Материалы между. конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 29.09–04.10.1997*. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 1998. – С. 73–82.
- [10] Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 366 с.
- [11] Сывороткин В.А. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. – М.: Геоинформцентр, 2002. – 250 с.
- [12] Anastasio C., Martin S.T. Atmospheric nanoparticles // *Rev. Miner. And Geochem*. V. 44. – 2001. – P. 293–349.
- [13] Angell J.K. Effect of exclusion of anomalous tropical stations on temperature trends from a 63-station radiosonde network and comparison with other analyses // *J. Climate*. V. 16. – 2003, № 13. – P. 2288–2295.
- [14] Christy J.R., Spencer R.W. Reliability of satellite data sets // *Sci*. V. 301. – 2003, № 5636. – P. 1046–1047.
- [15] Collins M., Senior C.A. Projections of future climate change // *Weather*. V. 57. – 2002, № 8. – P. 283–287.

- [16] Essex C., McKittrick R. Taken by Storm. The Troubled Science, Policy and Politics of Global Warming. – Toronto: Key Porter Books, 2002. – 320 p.
- [17] Haigh J.D. Climate variability and the influence of the Sun // *Sci.* V. 294. – 2001, № 5549. – P. 2109–2111.
- [18] Han J.-H., Hung H.-M., Martin S.T. Size effect of hematite and corundum inclusions on the efflorescence relative humidities of aqueous ammonium nitrate particles // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № 9–10. – P. AAC3/1–AAC3/10.
- [19] Hanson D.R., Eisele F.L. Measurement of prenucleation molecular clusters in the NH₃, H₂SO₄, H₂O system // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D12. – P. AAC10/1–AAC10/18.
- [20] Heintzenberg J., Okada K., Luo B.P. Distribution of optical properties among atmospheric submicrometer particles of given electrical mobilities // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D11. – P. AAC2/1–AAC2/10.
- [21] Jaworowski Z. Sun rules the climate // *21st Century Science and Technology*. Winter 2003/2004. – 2003. (In print).
- [22] Kondratyev K.Ya. Multidimensional Global Change // Chichester, U.K.: Wiley/PRAxis, 1998. – 761 pp.
- [23] Kondratyev K.Ya. Key issues of global change at the end of the second millennium // *Our Fragile World: Challenges and Opportunities for Sustainable Development*. V. 1. – EOLSS Vorruner, 2001. – P. 147–165.
- [24] Kondratyev K.Ya., Cracknell A.P. Observing Global Climate Change. – L.: Taylor & Francis, 1999. – 562 p.
- [25] Lean J., Rind D. Earth's response to a variable Sun // *Sci.* – 2001, v. 292. – P. 234–236.
- [26] Metzger S., Dentener F., Pardis S., Lelieveld J. Gas/aerosol partitioning. 1. A computationally efficient model // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D16. – P. ACH16/1–ACH16/24.
- [27] Metzger S., Dentener F., Krol M., Jenken A., Lelieveld J. Gas/aerosol partitioning. 2. Global modeling results // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D16. – P. ACH17/1–ACH17/23.
- [28] Moritz R.E., Bitz C.M., Steig E.J. Dynamics of recent climate change in the Arctic // *Sci.* – 2002, v. 297. – P. 1497–1502.
- [29] Narukawa M., Kawamura K., Hatsushika H., Yamazaki K., Li S.-M., Bottenheim J.W., Anlauf K.G. Measurement of halogenated dicarboxylic acids in the Arctic aerosols at polar sunrise // *J. Atmos. Chem.* – 2003, v. 44/ – P. 323–335.
- [30] Oreopoulos L., Marshak A., Cahalan R.F. Consistency of ARESE II cloud absorption estimates and sampling issues // *J. Geophys. Res.* V. 108. – 2003, № D1. – P. 13/1–13/16.
- [31] Quinn P.K., Miller T.L., Botes T.S., Ogren J.A., Andrews E., Shaw G.E. A 3-year record of simultaneously measured aerosol chemical and optical properties at Barrow, Alaska // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D11. – P. AAC8/1–AAC8/15.
- [32] Quinn P., Bates T. Comparison of regional aerosol chemical and optical properties from the European, Asian, and North American plumes // *IGACTiv Newsletter*. – 2003, № 28. – P. 24–30.
- [33] Shamir N.J., Veizer J. Celestial driver of Phanerozoic climate? // *GSA Today*. V. 13. – 2003, № 7. – P. 4–10.
- [34] Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC). A Project of the WMO/ICSU/IOC World Climate Research Programme (WCRP). SPARC Assessment of Stratospheric Aerosol Properties. Febr. 2006. WCRP-124, WMO/TD № 1295, SPARC Report № 4. – 322 pp.
- [35] The Carbon cycle / Eds. Wigley T.M.L., Schimel D.S. – Cheltenham, U.K.: Edward Elgar Publ. Co. Ltd., 2000. – 480 p.
- [36] Wexler A.S., Clett S.L. Atmospheric aerosol models for systems including the ions H⁺, NH₄⁺, Na⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Br⁻ // *J. Geophys. Res.* V. 107. – 2002, № D14. – P. ACH14/1–ACH14/14.