

УДК 551.56/58

## Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат

А. С. Гинзбург, Д. П. Губанова, В. М. Минашкин

*АЛЕКСАНДР САМУИЛОВИЧ ГИНЗБУРГ — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией математической экологии Института физики атмосферы РАН (ИФА РАН). Область научных интересов: физика земной и планетных атмосфер, перенос излучения, теория климата.*

*119017, Москва, Пыжевский пер., 3, ИФА РАН, тел. (495)951-07-10, факс (495)953-16-52,  
E-mail gin@ifaran.ru*

*ДИНА ПЕТРОВНА ГУБАНОВА — старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» (ГУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»). Область научных интересов: атмосферные аэрозоли, взаимодействие озона с аэрозольными частицами, дистанционное зондирование Земли, учет влияния атмосферы на гиперспектральную космическую информацию, атмосферная коррекция спутниковых данных.*

*123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7, ГУ «НИЦ «ПЛАНЕТА», тел. (495)605-21-06,  
факс (499)252-66-10, E-mail dgubanova@mail.ru*

*ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ МИНАШКИН — доктор технических наук, заведующий лабораторией динамики аэроколлоидов ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Область научных интересов: химия и физика атмосферы, исследования и разработка процессов получения аэрозолей с заданными свойствами.*

*105064 Москва, ул. Воронцово поле, 10, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, тел. (495)917-89-04,  
факс (495)917-24-90, E-mail minash@cc.nifhi.ac.ru*

### Введение

В области метеорологии и климатологии вторая половина XX века ознаменовалась не только бурным развитием наук об атмосфере, но и ростом внимания к возможным негативным последствиям глобального потепления, прогнозированием атмосферных и климатических изменений. При этом климатологи в своей деятельности все более активно используют химические методы исследования. Это, в частности, нашло свое отражение в переименовании Международной ассоциации по метеорологии и физике атмосферы в Международную ассоциацию по метеорологии и атмосферным наукам и включением в состав этой ассоциации секции химии атмосферы.

Доклады Межправительственной группы экспертов изменения климата (МГЭИК) отражают все возрастающее понимание климатологами всего мира, важности того момента, что без учета химических, геохимических и биогеохимических процессов в климатической системе Земли невозможно описать современные и грядущие изменения климата, а также разработать механизмы смягчения негативных последствий этих изменений.

На современном этапе развития мировой экономики значительно возрастают антропогенные выбросы углекислого газа, метана, оксида азота(I) и химически активных газов, таких как диоксид серы, оксиды азота, монооксид углерода и углеводороды, способствующие образованию вторичных загрязнителей, включая аэрозольные частицы и тропосферный озон [1]. Вследствие этого природные биогеохимические циклы существенно изменяются, а нелинейное взаимодействие между климатической и биогеохимической системами Земли может как усиливать, так и ослаблять возмущения, возникающие в результате хозяйственной деятельности человека.

В одном из первых обзоров о состоянии российских исследований в области атмосферной химии [2] подробно описываются гетерогенные процессы в тропосфере, играющие ключевую роль в образовании кислотных дождей и в изменении параметров озонового слоя Земли. В частности, рассматривается возможность аэрозольных частиц не только рожать озоноразрушающие компоненты, но и способствовать сохранению озонового слоя при одновременном разрушении фтор- и хлорорганических соединений. Огромное значение для по-

нимания и описания локальных и региональных климатических и экологических составляющих имеет изучение химии атмосферы над урбанизированными территориями — выброс в атмосферу промышленными предприятиями, транспортом и другими объектами городского хозяйства широкого спектра химических соединений в газовой, жидкой и твердой фазах приводит к развитию чрезвычайно сложного комплекса физико-химических процессов, влияющих на местный климат.

В настоящее время изучение формирования и динамики не только регионального, но и глобального климата, прогноз экстремальных метеорологических явлений и разработка методов их снижения, оценка экологических последствий климатических и погодных изменений уже невозможны без учета химических процессов в атмосфере. Для понимания динамики климата важны также знания о геохимических процессах в литосфере и Мировом океане и о биогеохимических процессах, регулирующих циклы углекислого газа, метана и других климатически активных примесей.

Как можно судить по имеющимся публикациям, при изучении химии атмосферы и химических циклов в климатической системе Земли основное внимание уделяется малым газовым составляющим атмосферы, хотя одними из важнейших регуляторов атмосферных и океанических процессов являются аэрозоли и гидрозоли различного происхождения и химического состава.

Данная статья представляет собой краткий обзор наиболее важных с точки зрения химии и физики атмосферы и теории климата возможностей влияния атмосферных аэрозолей (природных и антропогенных) на метеорологические и климатические процессы. При этом мы оставляем в стороне воздействие атмосферных аэрозолей на химический состав воздуха и соответственно не обсуждаем экологическую ситуацию в районах возникновения и распространения аэрозольных образований.

При описании и классификации аэрозольных эффектов в атмосфере следует иметь в виду, что эти эффекты очень сильно зависят не только от свойств аэрозолей, но и от временных и пространственных масштабов изучаемых процессов. Даже непосредственные воздействия аэрозолей на атмосферные процессы различных пространственных и временных масштабов приводят к широко варьирующим эффектам — вплоть от предотвращения осадков до потенциально возможной «ядерной зимы». Все это вызывает определенные трудности при исследовании воздействия аэрозолей на климат и погоду.

Для численного моделирования динамики климата и прогноза погоды требуются модели образования и трансформации аэрозоля на соответствующих временных и пространственных масштабах. Разработка таких моделей — чрезвычайно трудная задача в связи с необходимостью учитывать не только гидродинамические и физические процессы, но и химические реакции, протекающие в такой сложной гетерогенной среде как атмосфера. Современное состояние этой проблемы подробно описано в серии статей академика К.Я. Кондратьева [3].

Схематическое представление о влиянии аэрозолей на атмосферные процессы дает рис. 1.

Действие аэрозолей, вызывающее метеорологические и климатические эффекты, имеет двойное направление: воздействие на процессы облако- и осадкообразования путем изменения микроструктуры облачных частиц; воздействие на процессы переноса солнечной и тепловой радиации в атмосфере и тем самым на температурный режим климатической системы Земли.

Воздействие аэрозолей обычно подразделяется на прямое и косвенное. Прямое воздействие заключается в том, что аэрозоли рассеивают и поглощают солнечное и тепловое излучение и тем самым изменяют радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности.

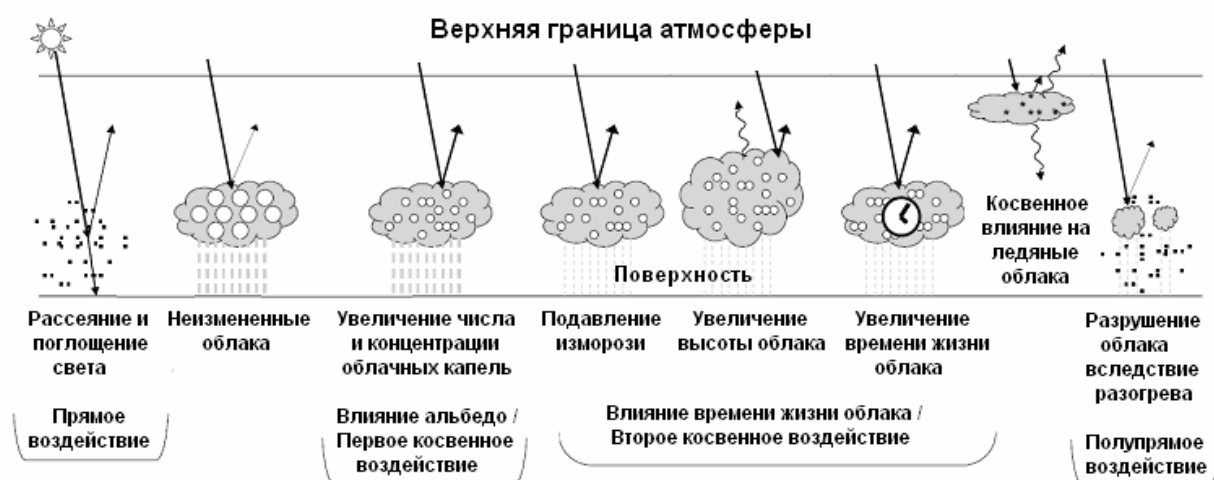


Рис. 1. Схематическое представление механизмов влияния на облака аэрозолей и радиационного воздействия.

Маленькие черные точки — аэрозольные частицы, большие открытые белые кружки — облачные капли; прямые линии — падающее и отраженное солнечное излучение, волнистые линии — тепловое излучение; вертикальным пунктиром изображены осадки

Существенное прямое воздействие на потоки солнечного и теплового излучения оказывают аэрозоли, содержащие сульфаты, органический углерод и сажу от сжигания топлива и биомассы, а также пыль, попадающие в атмосферу и на поверхность Земли в результате хозяйственной деятельности.

Основными оптическими параметрами аэрозолей, определяющими вызываемый ими радиационный эффект, являются альbedo единичного рассеяния, коэффициент ослабления электромагнитного излучения и индикатриса рассеяния. Все эти параметры зависят от длины волны излучения, содержания аэрозоля в атмосфере, относительной влажности воздуха. Необходимо также знать горизонтальное и вертикальное распределение аэрозольных слоев, оптические свойства облаков и подстилающей поверхности Земли. Наличие в атмосфере рассеивающих аэрозолей приводит к негативному радиационному эффекту, т.е. к охлаждению поверхности Земли. Однако даже частично поглощающие аэрозольные образования над яркими (рассеивающими) поверхностями (облака, снег, лед, пустыни) могут способствовать росту приповерхностной температуры воздуха, а над темными (поглощающими) поверхностями (океан или лес) — ее снижению.

Косвенное климатическое воздействие аэрозолей проявляется преимущественно в изменении под их влиянием радиационных свойств (поглощения и отражения) облаков, а также времени их жизни в атмосфере.

Микрофизическое воздействие аэрозолей на концентрацию и размеры облачных капель при фиксированном содержании капельной влаги, изменяющее альbedo облаков, иногда называется первым косвенным эффектом, или эффектом Тумей [1]. Этот эффект состоит в том, что увеличение в воздухе концентрации аэрозольных ядер конденсации по-разному влияет на альbedo оптически тонких и оптически плотных облаков. Облака с большой оптической толщиной в отсутствие аэрозольных частиц сами имеют высокое альbedo, поэтому добавление в облачную среду поглощающих солнечное излучение ядер конденсации (например, сажевых) уменьшает их отражательную способность. Тонкие полупрозрачные облака характеризуются относительно низким альbedo, поэтому добавление в них аэрозольных частиц может увеличивать их отражательную способность. Таким образом, «загрязнение» облаков аэрозолями делает оптически толстые облака темнее, а тонкие — ярче. Поэтому тонкие стратосферные облака, загрязненные антропогенными ядрами конденсации, выхолаживают стратосферу, а толстые кучевые нагревают приземный слой атмосферы.

Микрофизическое воздействие аэрозолей на содержание воды в облаках, высоту расположения и время их жизни называют вторым косвенным эффектом, или эффектом Альбрехта.

В последние годы стали также рассматривать так называемые полупрямые эффекты, когда поглощение солнечной радиации тропосферными аэрозолями ведет к нагреву воздуха и изменению относительной влажно-

сти, что влияет на процессы формирования и время жизни облачности.

### Активное воздействие аэрозолей на процессы облако- и осадкообразования

Впервые возможность аэрозольного воздействия на облака с образованием осадков была указана в 1946 году Бернардом Воннегутом. Он обнаружил, что микроскопические кристаллы иодида серебра могут служить ядрами конденсации водяного пара и способствовать образованию ледяных кристаллов [4, 5].

Иодид серебра до сих пор наиболее широко используется для так называемого засева облаков, хотя теперь это уже далеко не единственный препарат, вызывающий искусственное образование осадков.

Для генерации ледяных частиц при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  могут быть использованы также сухой лед и жидкая углекислота, жидкий азот, жидкий пропан и др. Они распыляются с самолетов в верхней части облачности.

Засев теплых облаков иодидом серебра и сухим льдом малоэффективен в случае относительно высоких температур воздуха. В 1951 году Ленгмюр предложил для формирования дождевых капель впрыскивать в теплые облака аэрозоль гигроскопических веществ, например NaCl, с размерами частиц порядка 25 мкм [6].

Исторически сложилось так, что в СССР, а затем и в России работами по активному региональному воздействию на облака, туманы и осадки для предотвращения опасных и/или нежелательных метеорологических явлений, занимались и продолжают заниматься учреждения Росгидромета РФ (в прошлом Гидрометслужбы СССР) [7, 8]. Искусственное вмешательство в процессы облако- и осадкообразования в переохлажденных облаках и туманах осуществляется преимущественно с помощью иодида серебра и твердой углекислоты.

Исследования возможностей крупномасштабного воздействия на климатические и метеорологические процессы, связанные с самыми различными явлениями, начиная от больших лесных и торфяных пожаров и заканчивая аэрозольными эффектами, вызванными гипотетической ядерной войной, проводились в академических институтах с участием специалистов из многих советских (а затем российских) научных учреждений различных министерств и ведомств.

В последние годы развернулись работы по поиску новых и развитию существующих методов и технологий аэрозольного воздействия на локальные и крупномасштабные метеорологические и климатические процессы и ситуации. В частности, в программу фундаментальных исследований Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы» в 2006 году было включено направление «Гидрометеорологические и геофизические процессы катастрофического характера». В рамках одного из проектов этого направления ведутся исследования возможностей и последствий аэрозольного воздействия на экстремальные гидрометеорологические процессы и ситуации. Цель этих

исследований — активизация ориентированных на практические нужды фундаментальных научных работ, выполняемых в институтах РАН и других ведомств, по созданию методов активного воздействия на экстремальные гидрометеорологические и климатические процессы.

В результате реализации этого проекта должна быть выстроена иерархия возможностей аэрозольного воздействия на экстремальные гидрометеорологические процессы и ситуации, рекомендации по возможному применению аэрозольного воздействия на погодные и климатические процессы и ситуации.

Искусственный дождь из теплых облаков и туманов можно вызвать путем воздействия на них аэроионов, образующих аэрозольные ядра конденсации. Соответствующие научные работы ведутся в рамках программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН «Атмосферное электричество».

В ряде метеорологических процессов часто возникают неустойчивые критические состояния, чувствительные к внешним вмешательствам. Получив относительно небольшое внешнее воздействие искусственного характера — «активное воздействие», естественный процесс может развиваться в желательном направлении. Для осуществления таких воздействий нужны технологии рассеивания туманов на аэродромах и технологии вызывания осадков из градоопасных облаков.

В первом случае технологическим оборудованием являются баллоны со сжатым воздухом и компрессоры, в странах с теплым климатом — генераторы гигроскопических веществ [7, 8]. При адиабатическом расширении газа образуются зоны с пониженной температурой, где выпадает искусственный дождь. Воздействие на градоопасные облака осуществляется с помощью ракет, снаряженных иодидом серебра и гигроскопическими веществами, а также минеральными аэрозольными частицами, в частности, цемента. [8—10]. Существует практика рассеяния холодных туманов путем распыления жидкого азота.

#### **Атмосферные эффекты от воздействия крупных аэрозольных выбросов**

Выше кратко были описаны локальные воздействия аэрозолей на атмосферные процессы. На метеорологические и климатические процессы в региональном и глобальном масштабах особенно сильное воздействие оказывают фотохимические смоги в случае интенсивных сильных производственных газовых выбросов, крупные пылевые выносы, лесные и нефтяные пожары, вулканические извержения, воздушные и наземные ядерные взрывы.

Постановка проблемы антропогенного потепления климата, подписание и ратификация Россией и рядом других стран Киотского протокола снова пробудили интерес к проблеме активных воздействий на атмосферу.

Масштабные работы по изучению влияния аэрозолей на климат были проведены в 80-х годах XX века в рамках исследований климатических последствий возмож-

ного глобального ядерного обмена. В СССР эти исследования проводились кооперативно институтами Академии наук (Вычислительный центр, Институт физики атмосферы, Институт оптики атмосферы), НИФХИ им. Л.Я. Карпова и другими научными учреждениями ряда министерств и ведомств. Среди основных исполнителей этих работ были и авторы данной статьи.

Экспериментально исследованы оптические свойства множества дымов различного происхождения и сделана оценка оптических толщин аэрозольных слоев, которые могли бы вызвать долговременное глобальное похолодание — так называемую ядерную зиму.

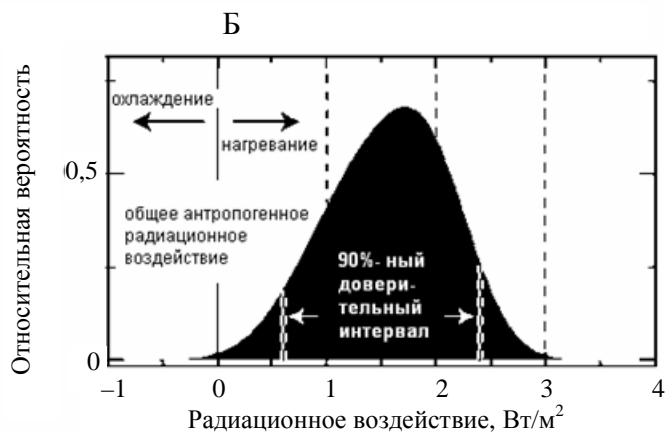
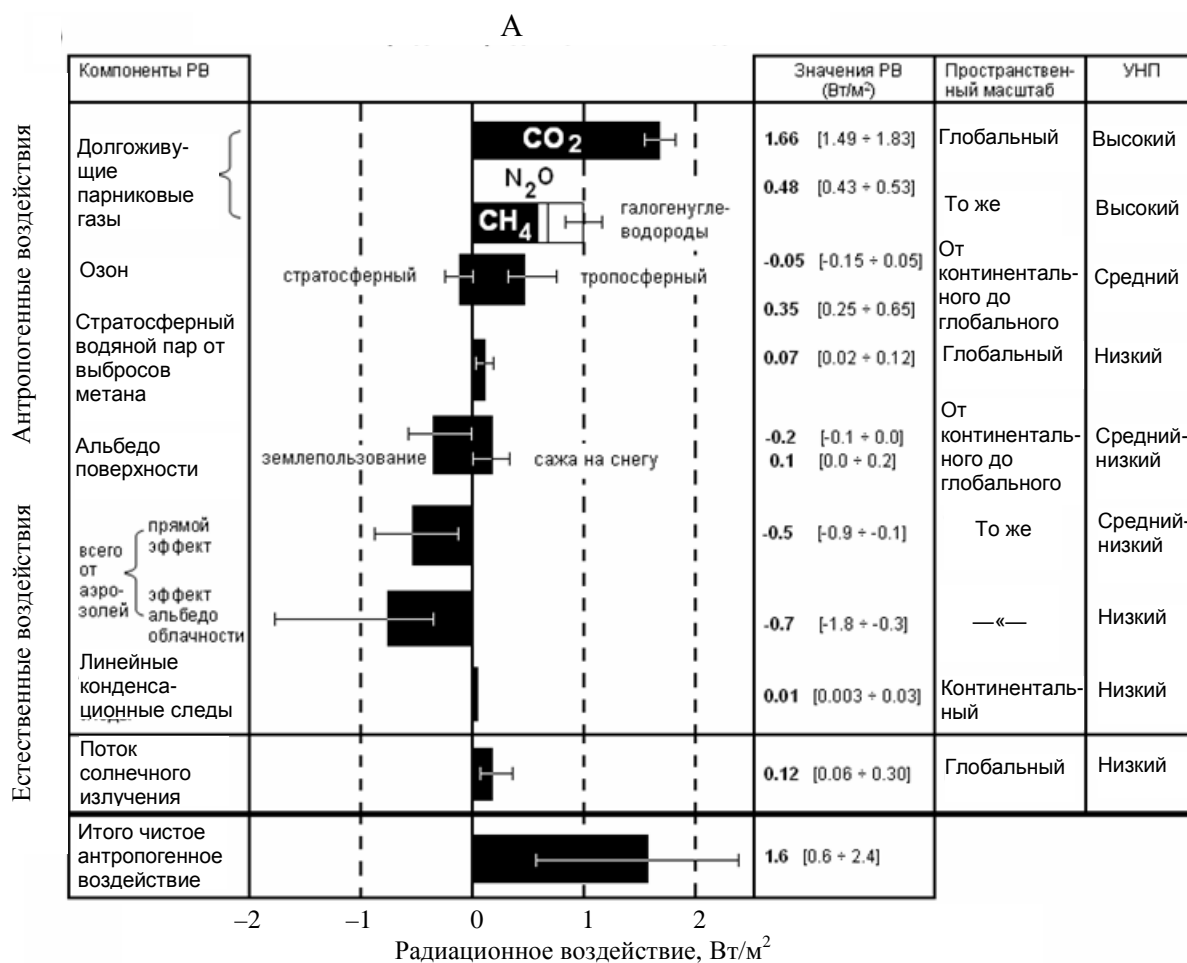
В работах НИФХИ и ИФА РАН показано, что климатические эффекты существенно зависят не только от количества аэрозолей и их оптических свойств, но и от высоты подъема аэрозольного слоя. Проведенные расчеты нашли свое подтверждение при описании температурных эффектов наиболее мощных массовых лесных, торфяных и нефтяных пожаров XX века: в Сибири в 1915 г., в Канаде в 1950 г., на Европейской территории СССР в 1972 г. [11—13].

#### **Роль аэрозолей в формировании и изменении глобального климата**

В глобальном масштабе аэрозоли являются главным, после облаков (которые являются тоже аэрозольными образованиями), регулятором потоков солнечной радиации в земной атмосфере. Аэрозольные слои поглощают также тепловое (собственное) излучение атмосферы и подстилающей земной поверхности, оказывая дополнительное влияние на энергетический баланс климатической системы Земли.

За последние два с половиной века (с доиндустриальных времен) в атмосфере Земли не только сильно увеличилась концентрация парниковых газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и др.), но и существенно изменился состав и содержание аэрозоля, влияющего на радиационные потоки в атмосфере.

На рис. 2 приведены данные о накопленном глобальном среднем радиационном воздействии парниковых газов и аэрозолей, начиная с доиндустриальной эпохи (1750 г.) и по настоящее время (2005 г.). Этот рисунок наглядно показывает, что в отличие от парниковых газов, рост содержания которых в атмосфере однозначно ведет к потеплению, роль аэрозолей зачастую неопределенна не только по величине, но и по знаку. Проведенное группой ученых из Потсдамского института климата сравнение математических прогнозов с тем, что реально происходило за последние 15 лет [14], показало, что были хорошо предсказаны изменения содержания в атмосфере углекислого газа и приемлемо ход температуры. Оба эти показателя, как видно из рис. 3, возрастают в соответствии с ранее выявленными трендами. А вот средний уровень Мирового океана повышался быстрее, чем ожидалось. С 1990 по 2005 г. он увеличился примерно на 4 см, а предсказывалось прибавление только на 2 см.



**Рис. 2. Накопление глобального радиационного воздействия антропогенных и естественных факторов за период от доиндустриальной эпохи.**

А — глобальные средние радиационные воздействия (РВ) и их 90%-ные доверительные интервалы (по данным на 2005 год).

Справа указаны наилучшие оценки и доверительные интервалы (значения РВ), пространственный масштаб воздействия и уровень научного понимания или достоверности (УНП). Погрешности измерения концентрации для CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и галогенуглеводородов объединены. Здесь не указаны дополнительные воздействующие факторы, имеющие очень низкий уровень достоверности. Вулканические аэрозоли не учтены в виду эпизодического характера извержений. Эффект линейных конденсационных следов не включает другие возможные влияния авиации на облачность.

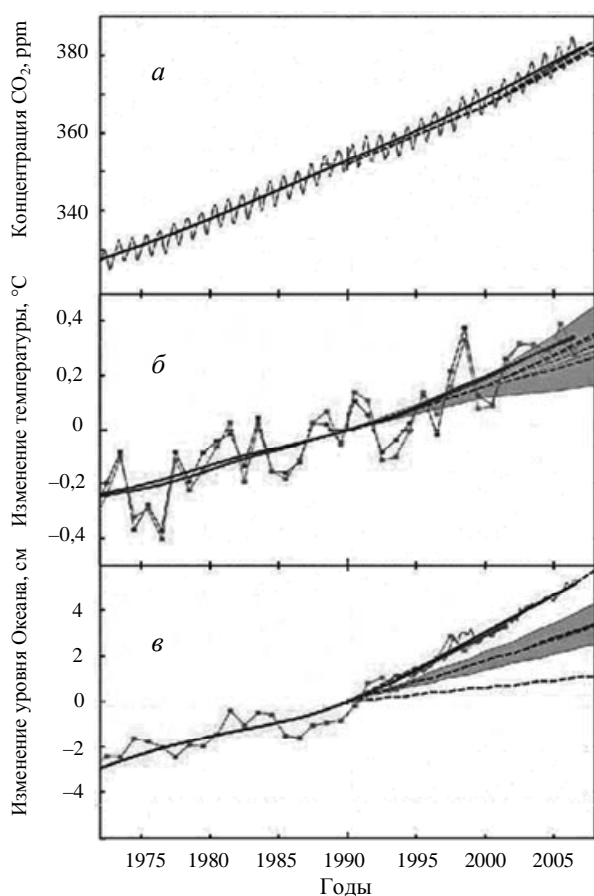


Рис. 3. Изменения содержания в атмосфере  $\text{CO}_2$  (а), средней температуры на поверхности Земли (б) и среднего уровня Мирового океана (в) с 1973 г. по настоящее время.

Ломанные сплошные линии — реальные данные, прямые сплошные — усредненные реальные данные, показывающие основной тренд. Пунктирные линии — данные прогнозов и доверительные интервалы (закрашенные серые области). Изменения температуры и уровня Океана даны как отклонения от линии тренда в месте пересечения ею отметки 1990 года (принято за нуль).

Рисунок взят с сайта <http://elementy.ru/news/430518>

Мы считаем, что некоторое расхождение между прогнозом по модели и действительностью связано с тем, что углекислый газ на самом деле оказывает более сильный эффект на температуру, чем ожидалось. Другое возможное объяснение — следствие недооценки охлаждающего воздействия аэрозолей как естественного происхождения, так и антропогенного. Недоцениваются как прямые, так и косвенные эффекты влияния аэрозолей на климат (см. рис. 1).

#### Климатические эффекты от выбросов сульфатных аэрозолей

Одним из основных компонентов глобальных биогеохимических циклов является круговорот серы в атмосфере, Мировом океане и на суше. По модельным расчетам среднее время жизни серы в атмосфере со-

ставляет примерно сутки, а  $\text{SO}_2$  и сульфатов примерно трое суток.

С точки зрения оценки антропогенного воздействия на климатические процессы, например на замедление и даже на компенсацию глобального потепления, особый интерес представляет изучение химии сульфатного аэрозоля. Сульфатный аэрозоль состоит из частиц серной кислоты, частично или полностью нейтрализованной аммиаком в жидкой и частично в кристаллической фазах. Сульфаты образуются в ходе окисления  $\text{SO}_2$  при газофазных реакциях и при конденсационном росте частиц, а также в результате реакций, протекающих внутри облачных капель. Исследования последних лет показывают, что глобальное потепление климата, обусловленное ростом содержания углекислого газа в атмосфере, частично компенсируется рассеянием и отражением в космос солнечной радиации сульфатным аэрозолем, высокодисперсная фракция которого служит также ядрами конденсации при образовании дополнительного числа мелких облачных частиц. Таким образом, сульфатный аэрозоль дополнительно увеличивает альбедо облачности и влияет на осадкообразование.

В последние десятилетия XX века был осуществлен ряд международных программ по глобальной инвентаризации выбросов и стоков серы [15]. Суммарные ежегодные выбросы серы в виде  $\text{SO}_2$  составляют около 90 Мт S в год, из этого количества примерно 67 Мт приходится на антропогенные выбросы, более 2 Мт — от сжигания биомассы, 8 Мт — продукты извержения вулканов, 12 Мт — продукты процессов окисления. Среднегодовой сток практически равен сумме выбросов за год (на уровне точности измерений и расчетов). На компоненты стока приходится: немного более 40 Мт — сухое осаждение, ~ 1,5 Мт — влажное осаждение, ~ 8 Мт — окисление в газовой фазе, почти 40 Мт — окисление в водной фазе.

Интересно отметить, что за последние два десятилетия общие выбросы  $\text{SO}_2$  в 25 странах Европы снизились радикально, с 18 до 4 Мт S в год, а в США с 12 до 8 Мт S в год. За это же время выбросы  $\text{SO}_2$  в Азии существенно выросли и составляют сейчас 17 Мт S в год.

По некоторым данным общемировое снижение антропогенных выбросов  $\text{SO}_2$  снизились с 73 до 54 Мт S в год. Региональный сдвиг выбросов происходит от Северной Америки, Европы и России в Юго-Восточную Азию.

Оптические свойства сульфатных аэрозолей хорошо известны. Они являются практически чисто рассеивающей средой в видимой части спектра (альбедо = 1) и слабо поглощающей средой в инфракрасной части спектра солнечного излучения. Однако сульфаты могут смешиваться с сажей, органическим углеродом, нитратами и пылью, образуя аэрозольные частицы сложного химического состава и с различными оптическими свойствами. Микрофизические и химические процессы образования и трансформации многокомпонентных частиц изучены пока очень слабо.

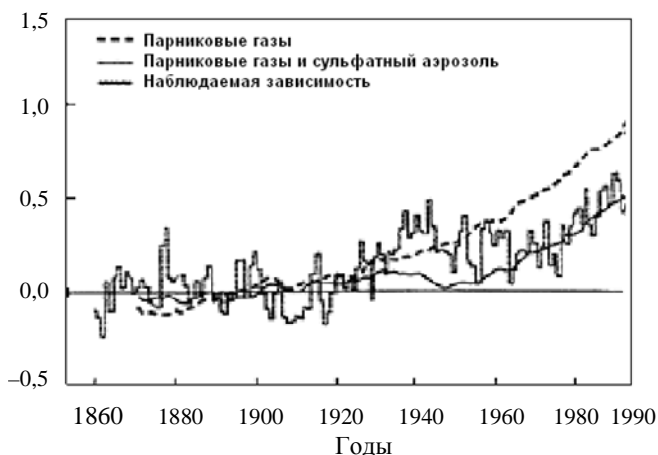


Рис. 4. Моделирование глобального потепления с 1860 по 1990 гг., роста содержания парниковых газов и сульфатного аэрозоля в сравнении с данными наблюдений.

Рисунок заимствован из Второго доклада МГЭИК

В Третьем докладе МГЭИК [16] потенциальная величина радиационного воздействия за счет сульфатных аэрозолей оценена в  $0,4 \text{ Вт/м}^2$ , что в четыре раза меньше, чем нижняя граница оценок суммарного воздействия парниковых газов при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  до  $2,0 \text{ Вт/м}^2$ . По данным [1], радиационный эффект от сульфатных аэрозолей оценивается в среднем в  $0,46 \text{ Вт/м}^2$  с разбросом разных оценок от  $0,21$  до  $0,96 \text{ Вт/м}^2$ .

На рис. 4 приведены результаты расчетов среднего глобального потепления с 1860 по 1990 гг. с учетом только парниковых газов и совместного воздействия парниковых газов и сульфатных аэрозолей в сравнении с данными наблюдений.

Величина радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на климат при одной и той же оптической толщине аэрозольного слоя существенно зависит от его состава и распределения частиц по размерам, определяющих оптические свойства слоя, а также от относительной влажности воздуха и гигроскопических свойств частиц, оптических свойств облачности и подстилающей земной поверхности. Приведенные на графике зависимости показывают, что учет выбросов сульфатного аэрозоля дает более точный прогноз изменения температуры, что не позволяет сделать только учет содержания парниковых газов.

Идея о возможности целенаправленного воздействия сульфатного аэрозоля на климатические процессы и замедления тем самым глобального потепления, вероятно, впервые была высказана известным советским климатологом М.И. Будыко в 70-е годы XX века [17]. В последние годы эта идея активно обсуждается в мировом научном сообществе по инициативе академика Ю.А. Израэля [18] и лауреата Нобелевской премии за работы по химии атмосферы П. Крутцена [15].

М.И. Будыко показал, что увеличение удельной массы стратосферных аэрозолей примерно на  $10^{-6} \text{ г/см}^2$  приводит к понижению средней температуры нижнего слоя атмосферы на  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  [17]. Ю.А. Израэль [18] предложил метод массивного воздействия на климат путем распыления в атмосферу  $200000 \text{ т}$  серы, которая при горении и взаимодействии с влагой воздуха образует  $600000 \text{ т}$  сернокислотных аэрозольных частиц. Предположительно при этой массе аэрозоля температура понизится на несколько десятых градуса. Такой массовый вброс в стратосферу позволил бы, по мнению автора предложения, предотвратить глобальное потепление. Более детальные расчеты эффектов стратосферного сульфатного аэрозоля приведены в работах [19—21].

Эксперимент по доставке в стратосферу и сжиганию в ней больших количеств серы (пирогенный синтез наночастиц) с последующим гидролизом триоксида серы водой можно осуществить имеющимися техническими средствами, поэтому к теоретическим и экспериментальным оценкам такого воздействия необходимо относиться очень серьезно.

Оценка изменения потоков излучения, а также температуры поверхности и тропосферы Земли, сделанная нами по модели Г.С. Голицына и А.С. Гинзбурга [22, 23], в которой рассматривается перенос энергии только за счет излучения на верхней границе атмосферы, показывает, что поглощение излучения происходит в верхних слоях тропосферы, там же происходит разогрев воздуха при охлаждении земной поверхности. При предполагаемом в [18] увеличении массы стратосферных аэрозолей охлаждение суши может достигать  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  при альбедо подстилающей поверхности, равном  $0,3$ .

Прямые наблюдения за составом стратосферных аэрозолей и, в частности, полярных стратосферных облаков показали, что это аэрозоли вулканического происхождения, которые содержат сульфатные частицы и сосредоточены в слое толщиной в несколько километров на высоте  $18\text{—}20 \text{ км}$  [24—26]. Они вероятнее всего и способствуют выхолаживанию стратосферы.

Но следует отметить и тот факт, что экзотермические процессы гидролиза триоксида серы и конденсации частиц серной кислоты, сопровождающиеся выделением большого количества теплоты, и нагрев аэрозольного слоя солнечным излучением, по-видимому, приведут, как показано в работах [27, 28], к меридиональному выносу аэрозолей в верхние слои стратосферы и возможному увеличению полярных стратосферных облаков.

Так как коэффициент аккомодации озона на таких ледяных сульфатных частицах составляет порядка  $10^{-2}$  [29], количество озона в атмосфере изменится на достаточно большую величину ( $>6000 \text{ тонн}$ ), необходимую для того, чтобы увеличить поток ультрафиолетового и теплового излучения и, возможно, полностью изменить тепловой баланс планеты. К таким же выводам пришли и исследователи длительной вулканогенной депрессии стратосферного озона после извержения вулкана Пинатубо. За основу ими был принят анализ многовекового

поведения атмосферы, реконструированного из дендрохронологических данных [30, 31].

### Заключение

Под влиянием даже относительно небольшого физического и тем более химического активного воздействия на атмосферные и климатические процессы, естественный ход эволюции климата может быть нарушен и в дальнейшем развиваться как в желательном, так и в нежелательном для человечества направлении.

Решение о целесообразности вмешательства в физические и химические атмосферные процессы можно принимать только на основе долговременных международных и междисциплинарных исследований, включающих в себя фундаментальные теоретические и экспериментальные работы, натурные измерения и численное моделирование этих процессов.

При достижении научного консенсуса решение о попытке сохранения современного климата или его модификации может быть принято только всем мировым сообществом.

### ЛИТЕРАТУРА

- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ларин И.К. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 5, с. 712—720.
- Кондратьев К.Я. Оптика атмосферы и океана, 2006, т. 19, № 1, с. 5—22.
- Weather and Climate Modification Problems and Prospects. V. 1 и 2. NAS-NRS Publ. № 1350. Washington D.C. 1966.
- Берджерон Т. В сб.: Физика образования облаков. М.: Издательство, 1951, с. 31—40.
- Ленгмюр И. Там же, 1951, с. 50—73.
- Седунов Ю.С. В сб.: Достижения в области гидрометеорологии и контроля окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1987, с. 34—56.
- Бедрицкий А.И., Корицунов А.А., Шаймарданов М.З. Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экологию России. Обнинск: изд. ВНИИГМИ-МЦД, 2001, с. 30—36.
- Шеффер В. В сб.: Физика образования облаков. М.: Издательство, 1951, с. 73—80.
- Orawa J., Omoto J. Preliminary results of experiments using seeding rockets with combustible shells. 1974, WMO, Geneva, Sw.
- Golitsyn G.S., Ginzburg A.S. Tellus, 1985, v. 37B, № 3, p. 173.
- Andronova A.V., Minashkin V.M. e. a. Proceedings of the Eighth All-Union Symposium on Combustion and Explosion. Chemical Physics Institute of Academy of Sciences, 1988, p. 124.
- Голицын Г.С., Шукуров А.Х., Гинзбург А.С. и др. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1988, т. 24, № 3, с. 227—234.
- Ramstrorf S., Cazennave A. e. a. Science, 2007, v. 316, p. 709.
- Crutzen P.J. An Editorial Essay. Climatic Change, 2006, v. 77, № 6, p. 211.
- Изменения климата: Третий оценочный доклад Межправительственной группы экспертов изменения климата (IPCC), 2001. www.ipcc.ch.
- Будыко М.И. Изменения климата. Л.: Гидрометеоздат, 1974, 280 с.
- Израэль Ю.А. Метеорология и гидрология, 2005, № 10, с. 5—9.
- Израэль Ю.А., Борзенкова И.И., Северов Д.А. Там же, 2007, № 1, с. 5—14.
- Гинзбург А.С. Губанова Д.П. Минашкин В.М. Обвинцев Ю.И. В сб.: Тр. шестых юбилейных Петряновских чтений. Москва, МГИУ, 2008, с. 31—46.
- Cotton W.R., Pielke R.A. Sr. Human impacts on weather and climate. 2007. Cambridge Univ. Press. 308 p.
- Вельтицев Н.Н., Гинзбург А.С., Голицын Г.С. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1988, т. 24, № 3, с. 296—305.
- Ginzburg A. Ambio, 1989, v. XVIII, № 7, p. 384.
- Knollenberg R.G. J. Atmos. Sci., 1972, № 29, p. 1367.
- Turco R.P., Hamill P. Phys. Chem., 1992, № 96, p. 323.
- Turco R.P., Toon O.B., Hamill P. J. Geophys. Res., 1989, № 94, p. 1649.
- Гостинцев Ю.А. и др. Турбулентный термик в стратифицированной атмосфере. Москва, Препринт Института химической физики АН СССР, 46 с.
- Гинзбург А.С., Тросников И.В., Харитоненко В.М. Крупномасштабные эффекты больших аэрозольных выбросов в модели общей циркуляции атмосферы. 1990. Москва, Препринт ИФА АН СССР, № 12, 33 с.
- Dlugokencky, E.J., Ravishankara A.R. Geophys. Res. Lett., 2000, v. 19, № 1, p. 41.
- Зуев В.В. Лидарный контроль атмосферы. Новосибирск: Наука, 2004, 48 с.
- Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Исследование озоносферы методами дендрохронологии. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2007, 52 с.