

ИНФОРМАЦИЯ

К.Я. Кондратьев

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «АЭРОЗОЛЬ—ОБЛАКА— КЛИМАТ». Ч. 1. АЭРОЗОЛЬ (К ИТОГАМ СИМПОЗИУМА МАМФА В ВЕНЕ, 13—20 АВГУСТА 1991 г.)

Сделан обзор докладов, посвященных исследованиям микрофизических и радиационных характеристик атмосферного аэрозоля, а также оценкам влияния аэрозоля на климат. Проанализировано взаимодействие между аэрозолем и облаками. Продемонстрирована существенная климатообразующая роль атмосферного аэрозоля.

По инициативе Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы (МАМФА) в период XX Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза (МГС), состоявшейся в Вене 11—24 августа 1991 г., был организован третий симпозиум Взаимодействия «аэрозоль—облака—климат», который оказался наиболее продолжительным (6 дней) по сравнению со всеми другими симпозиумами в рамках программы Ассамблеи, хотя значительное количество предложений было отклонено программным комитетом. Подобное внимание к обсуждаемой проблематике не является случайным. Как известно, двумя главными нерешенными проблемами теории глобальных изменений климата являются: 1) необходимость более адекватного понимания (и, на этой основе, — параметризации) динамики облачного покрова, а также взаимодействия облачности и радиации; 2) потребность дальнейших исследований (и более полного учета при численном моделировании климата) взаимодействия атмосферы и океана (в первую очередь — выявления роли глубинной циркуляции океана). Именно эти обстоятельства определили, например, выделение в национальной программе США «Глобальные изменения» проблематики, связанной с изучением облачного покрова, как наиболее важной. Хотя с таким определением приоритетов в изучении глобальных изменений трудно согласиться, первостепенная актуальность исследований взаимодействий «аэрозоль—облака—климат» не вызывает сомнений.

Отмечу сразу: организацию обсуждаемого симпозиума (и его программу) нельзя признать безупречной: практически отсутствовала проблематика численного моделирования глобального климата — главное звено системы «аэрозоль—облака—климат» (ведущие специалисты в области численного моделирования участвовали в других симпозиумах, а масштабы Ассамблеи и территориальная разбросанность мест заседаний крайне затрудняли даже неформальное общение). Выступивший в начале симпозиума его главный руководитель проф. П. Хоббс (США) ограничился формальным сообщением по организационным вопросам вместо концептуального обоснования задач симпозиума. При большом обилии докладов (классифицированных на 21 сессию, каждая из которых имела отдельного председателя) главный концептуальный аспект проблемы — анализ роли атмосферного аэрозоля как климатообразующего фактора и учет аэрозоля в численных моделях климата — оказался освещенным крайне неадекватно.

Вместо системного обсуждения проблемы с четким выделением приоритетов дело ограничилось фрагментарным рассмотрением ее отдельных (в ряде случаев — второстепенных) аспектов. Докладчики, выступившие по приглашению и располагавшие вдвое большим временем (30 мин вместо 15), не смогли задать соответствующий тон симпозиуму и, как правило, ограничились весьма необъективными обзорами довольно частного характера. Поскольку в числе докладчиков по приглашению не было ни одного советского специалиста, результаты советских исследований в области, где наш вклад очень значителен, а в ряде случаев — уникален, оказались даже не упомянутыми. Это тем более прискорбно, поскольку доля докладов советских ученых была незначительной. Полное отсутствие обсуждения докладов (и даже необходимого времени для ответов на вопросы) исключало возможность дополнения выступлений докладчиков.

Хотя отмеченное не исчерпывает моих критических замечаний (я вернусь к ним в конце обзора), обращусь к краткой характеристике содержания работы симпозиума, следуя структуре его программы.

Тропосферный аэрозоль

1. Пространственное распределение. Сделанный по приглашению обширный доклад проф. Р. Енике (ФРГ) содержал много интересного материала, включая новые данные о роли образования аэрозоля *in situ*, значительном вкладе биогенного аэрозоля, о большей роли пустынь в производстве атмосферного аэрозоля, чем океана. Серьезный интерес представляют новые оценки образования частиц аэрозоля в облаках (при испарении капель), согласно которым глобальная масса подобного аэрозоля достигает 3000 тераграмм в год, тогда как остальные источники характеризуются следующими цифрами (Тг/год): 1500 (*in situ*), 450 (биосфера), 2000 (подстилающая поверхность,

лишенная растительности), 1000–2000 (океаны). Важное значение имеют данные о глобальном распределении ядер конденсации (ЯК), а также результаты трехмерного численного моделирования распределения аэрозоля, выявившие вклад пустынь (в связи с этим в особенности вызывает недоумение полное игнорирование результатов советских исследований, неоднократно обсуждавшихся, в частности, и в публикациях на английском языке). Х. Роде и И. Лангнер (Швеция) описали интересную трехмерную глобальную модель образования, трансформации и переноса сульфатного аэрозоля, охватывающую толщину 1000–100 гПа на сетке 10° широты $\times 10^\circ$ долготы (к сожалению, докладчики не знакомы с аналогичными, но более полными советскими моделями). Перенос рассчитан по известному полю ветра при задании как природных (DMS, H₂S), так и антропогенных (SO₂) источников образования сульфатного аэрозоля, процессы трансформации которого сильно зависят от концентрации оксидантов (ОН) и условий облачности (проблема взаимодействия аэрозоля и облаков привлекла большое внимание на симпозиуме и составляет одно из актуальных новых направлений разработок). Что касается стоков аэрозоля, то они определяются главным образом процессами сухого и влажного (вымывание осадками) осаждения. Расчеты глобального распределения концентрации сульфатного аэрозоля у земной поверхности выявили наличие максимумов в Западной Европе и на ЕТС (как это ни странно, подобный максимум отсутствует в восточной части США). Примерно на 50% поверхности северного полушария концентрация сульфатного аэрозоля на уровне 900 гПа возросла за последнее столетие более чем вдвое, что, вероятно, оказало существенное воздействие на климат.

Осуществленный А. Кларке (США) анализ большого объема сделанных весной 1990 г. самолетных наблюдений вертикальных профилей ЯК в слое 8–12 км (70° с.ш. – 58° ю.ш. над Тихим океаном) обнаружил наличие отрицательной корреляции между концентрацией ультрамелкодисперсной фракции ЯК (диаметр 3–20 нм) и площадью поверхности более крупных частиц. Главным источником ЯК служит верхняя тропосфера. Рассмотрение процессов эволюции и роста размеров ЯК указывает на то, что, попадая в пограничный слой атмосферы (ПСА), они могут служить «новыми» облачными ЯК. Р. Хусар и В. Вильсон (США), обработав данные сетевых наблюдений метеорологической дальности видимости на территории США за последние 40 лет, а также имеющиеся сведения о химическом составе аэрозоля, пришли к выводу, что на северо-востоке США имел место тренд спада счетной концентрации аэрозоля, тогда как на юго-востоке наблюдался противоположный тренд. Используемый в качестве индикатора аэрозольный коэффициент ослабления B_H возрос почти вдвое, что коррелирует с усилением выбросов сернистого газа. Сопутствующие этому изменения климатических параметров проявились в уменьшении разности приземной температуры воздуха (ПТВ) «полдень – полночь», повышении точки росы, относительной влажности и повторяемости туманов.

2. Методика, результаты измерений и природа. О. Прайнинг и др. (Австрия) обратили внимание на несовместимость данных различных счетчиков атмосферного аэрозоля (АА) и ЯК, обусловленную неунифицированностью методик, и предложили провести на базе университета Вены международные сравнения аппаратуры. Данные самолетных (ДС-8) наблюдений счетной концентрации АА над Тихим океаном (ноябрь 1989 г.) при помощи фотоэлектрического счетчика и волоконного импактора обсудили Р. Пушел и др. (США). Обработка данных для диапазона радиусов 0,03–3,0 мкм привела к следующим значениям параметров логнормального распределения частиц по размерам: $0,05 < r_g < 0,6$ мкм; $12 < N < 64$ см⁻³; $1,23 < \sigma < 1,30$. Следующие элементы преобладали в составе аэрозоля (по счетной концентрации): S (около 50%); Cl (31%); Si (15%); Na (7%) и Mg (5%). Достаточно однородное распределение сульфатного АА в тропосфере свидетельствует о пространственно однородном процессе их образования. В противоположность этому счетная концентрация частиц (СК), содержащих хлор и натрий, быстрее убывает с высотой, что, по-видимому, отображает тот факт, что они образуются вблизи земной поверхности. Сульфатный компонент АА в свободной атмосфере составляет менее 20%, а объемная концентрация частиц диаметром 0,3–20 мкм, как правило, флуктуирует вблизи 0,01 мкм³/см³. Иногда (при температуре, близкой к точке насыщения над льдом, и при наличии перемещения, обусловленного Oroграфией или гравитационными волнами) наблюдается скачкообразный рост СК на несколько порядков величины.

Судовые наблюдения, выполненные К.О. Доудом и др. (Великобритания, Ирландия) в северо-восточной Атлантике, показали, что воздушные массы арктического происхождения характеризуются очень низкими СК преимущественно сульфатного аэрозоля аккумуляционной моды, тогда как для морского воздуха типично преобладание сульфата аммония (до 80–90%), но также низкая СК. Радикальное изменение состава и СК аэрозоля вызывает поступление воздушных масс из Великобритании и Центральной Европы: СК увеличивается по меньшей мере на порядок величины, причем в составе АА преобладает сульфат аммония (65–85%). Доля сажевого компонента варьирует в пределах от 2–6% (чистый полярный или морской воздух) до 10–30% (воздушные массы континентального происхождения).

Подчеркнув сильную пространственно-временную изменчивость свойств АА, А. Ярман и Б. Суббарайя (Индия) изложили результаты исследований оптических параметров АА в интервале длин волн от УФ- до ИК-диапазона на высотах до 30 км по данным ракетных и аэростатных фотометрических зондирований, начатых в 1980 г. на полигонах в Тумбе (8,5° с. ш.) и в Хайдерабаде (17,5° с. ш.). Выполнено сравнение измеренных вертикальных профилей аэрозольного коэффициента ослабления с различными модельными значениями. Ф. Валеро и др. (США) восстановили по данным самолетных измерений вертикальных профилей суммарной и рассеянной радиации в Арктике при помощи 7-

канального радиометра для интервала длин волн 780–1064 нм (вне сильных полос молекулярного поглощения) аэрозольную оптическую толщину атмосферы (АОТ) на различных высотах. Спектральная зависимость АОТ использована для определения микроструктуры аэрозоля.

3. Воздействия (влияние) на климат. О. Прайнинг (Австрия) использовал нульмерную теплбалансовую модель климата для сравнительной оценки вкладов CO₂ и аэрозоля в изменение среднеглобальной ПТВ. Получив вклады примерно одинаковой величины (но разного знака), докладчик привлек внимание к необходимости корректного учета АА как климатообразующего фактора.

Более сложную одномерную (5-слойная атмосфера и 2-слойная почва) модель для оценки климатообразующего вклада аэрозоля применили И. Кнап и И. Йонг (КНР). Расчеты продемонстрировали обусловленное аэрозолем понижение температуры поверхности и почвы, а также температуры на уровне 100 гПа. Проанализирована зависимость климатического воздействия аэрозоля от его оптических свойств и альbedo подстилающей поверхности. Проиллюстрирована важная роль аэрозоля пустынь как регионального климатообразующего фактора, М. Лагран (Франция) проанализировал роль атмосферного аэрозоля в контексте проблемы атмосферной коррекции для ИК-диапазона.

Т. Хаясака и др. (Япония) представили результаты наземных нефелометрических наблюдений (Саппоро и Сандай, 1986–1987 гг.) индикатрис рассеяния для ортогональных компонентов поляризации с последующим использованием этих данных для восстановления микроструктуры АА. Анализ фильтровых проб позволил получить данные о содержании различных компонентов АА (сажа, органический углерод; сульфаты, образовавшиеся не из морских солей; нитраты, сульфат аммония, морские соли, почвенный компонент, вода). Наиболее сильное влияние на оптические свойства АА оказывает обладающий сильным годовым ходом сажевый компонент.

А. Дипак и Г. Вали (США) подвели итоги большой работы по обоснованию Международной программы по изучению глобального аэрозоля (ЮАР), отображающей возрастающую актуальность исследований аэрозоля в контексте проблемы взаимодействий в системе «геосфера–биосфера». Главные задачи программы – разработки в области глобальной климатологии аэрозоля, углубление понимания процессов взаимодействия аэрозоля и облаков и, в конечном счете, – адекватный учет АА как фактора глобальных изменений климата. Достижению этих целей должны быть посвящены разнообразные экспериментальные и теоретические исследования. На заседании Международной комиссии по радиации было поддержано предложение о создании Рабочей группы по дальнейшей разработке программы.

Л. Стоув и др. (США, СССР) обсудили результаты сравнений значений АОТ, восстановленных по спутниковым данным (усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения – УРОВР) и найденных по данным судовых наблюдений при помощи облачного фотометра (НИС «Академик Вернадский»), Главный результат работы, осуществленной в рамках советско-американского сотрудничества (рабочая группа «Науки о Земле»), состоит в установлении значительных расхождений, выявление причин которых требует дальнейших исследований. Это можно проиллюстрировать, например, следующим рядом значений АОТ на длине волны 0,5 мкм:

АОТ (спутник)	0,03	0,08	0,00	0,17	0,28	0,25
АОТ (судно)	0,07	0,03	0,03	0,26	0,42	0,48

Как видно, имеет место систематическая заниженность «спутниковых» значений АОТ.

С. Крейденвейс и др. (США) описали интересную трехмерную глобальную модель переноса, трансформации и осаждения нуклеационной и аккумуляционной мод сульфатного аэрозоля (GRANTOUR), в основе которой лежит учет следующих реакций: $DMS + OH \rightarrow SO_2$; $SO_2 + OH \rightarrow SO_4^-$; $SO_2 \rightarrow SO_4^-$. Приближенная параметризация газофазного процесса образования сульфатного аэрозоля: $S \text{ (газ)} \rightarrow SO_x^- \text{ (аэрозоль)}$, в результате которого возникают новые частицы и укрупняются существующие, предназначена для использования в интерактивной модели «аэрозоль–климат» на базе разработанной сотрудниками Национального центра исследований атмосферы (США) климатической модели CCM-1. Модель GRANTOUR применена для расчета глобальных полей ЯК и АА при заданных антропогенных выбросах сернистого газа за счет сжигания ископаемых топлив и природных выбросах демитилсульфида с целью сравнительных оценок роли этих выбросов в формировании глобальных полей АА. Один из регионов наиболее интенсивной генерации сульфатного аэрозоля расположен в восточном Средиземноморье.

Целью лидарных аэрозольных зондирований и наблюдений *in situ*, выполненных Э. Даттоном и др. (США) в Булдере, была оценка оптических параметров дымового облака, которое возникло после лесных пожаров. Максимальная АОТ облака на длине волны 0,5 мкм достигла 2, а обусловленное им снижение суммарной радиации составляло около 28%. Влияние дымового облака на потоки теплового излучения обнаружено не было.

А. Робок (США) предпринял новые оценки «вулканического сигнала» в изменениях климата по данным о широтной изменчивости и годовом ходе ПТВ за последние 140 лет, имея в виду, что это представляет большой интерес с точки зрения распознавания «парникового сигнала». Если отфильтровать изменения ПТВ, обусловленные ЭНЮК (Эль Ниньо–Южное колебание), то проявляется отчетливая корреляция между ПТВ и индексом вулканической активности DVI: в течение нескольких

лет после крупных извержений имеет место спад ПТВ, усиливающийся в районах полюсов зимой, что демонстрирует проявление альбедной обратной связи. Наиболее отчетливая корреляция $DVI \rightarrow T$ имела место в период 1928–1988 гг.

4. Взаимодействия «аэрозоль — облака». Как уже отмечалось, эта важная тема привлекла большое внимание. В обзорном докладе П. Хоббса (США) проанализированы два ее аспекта: 1) влияние АА на структуру и свойства облаков; 2) воздействие облаков на АА. Общеизвестно, что АА определяет первоначальную концентрацию и микроструктуру облачных капель (следовательно, — оптические свойства облаков). Неясным остается, однако, вопрос о том, в какой степени влияние аэрозоля ослабляется по мере того, как облака различных типов эволюционируют и стареют. Много неопределенностей существует и относительно роли облаков в образовании ледяных частиц. Важная (и уже упоминавшаяся) деталь — связь между концентрацией диметилсульфида и ЯК. С одной стороны, попадание аэрозоля, который функционирует как ЯК, в капли порождает изменение химического состава облаков и осадков (следовательно, — кислотные выпадения). С другой стороны, продуктом происходящих в каплях химических реакций оказывается аэрозоль, остающийся после испарения капель. Поскольку подобный процесс может циклически повторяться в слое облачного покрова, возникает значительная трансформация микроструктуры аэрозоля. При выпадении осадков происходит удаление аэрозоля из атмосферы. Таким образом, облака могут служить как источниками, так и стоками аэрозоля (отмечу в этой связи, что значительную роль играет взаимодействие аэрозоля, облачности и радиации). Увлажнение воздуха, окружающего облака (распространяющееся на значительные расстояния от облаков), благоприятствует нуклеации новых частиц.

И. Кауфман и Минг-Да Чоу (США) применили двухмерную многослойную энергобалансовую модель климата с целью оценки влияния антропогенного сернистого газа на климат и сопоставления с вкладом парникового эффекта. Расчет роста оптической толщины (и альбедо) облаков за счет газофазного образования ЯК привел к выводу, что «парниковое» потепление в значительной степени компенсируется в результате роста альбедо облаков. Важное значение имеет в этой связи тот факт, что каждая молекула SO_2 в 50–1100 раз более эффективна как охладитель, чем молекула CO_2 как нагреватель. Именно поэтому современные выбросы сернистого газа могут скомпенсировать до 70% «парникового» потепления, а к 2060 г. повышение ПТВ составит лишь 60% по отношению к чисто «парниковому». Поскольку время жизни молекул CO_2 в атмосфере значительно дольше, чем SO_2 , резкое сокращение использования ископаемых топлив сначала ускорит глобальное потепление и лишь позднее произойдет возврат к невозмущенному состоянию. Замечу, что, разумеется, реалистичность рассматриваемых результатов оценить трудно. Ясна, однако, острая актуальность проблемы «аэрозоль и климат».

С. Калса (США) изучил по данным самолетных зондирований различные пути поступления аэрозоля в облака, а Э. Картер и Р. Борис (США) осуществляли полевой эксперимент с целью сравнения химического состава аэрозоля и облачных капель в зависимости от их размеров. Сравнения выявили сходство состава аэрозоля и облаков, но наблюдаются различия, зависящие от размеров капель, что следует учитывать при разработке моделей влажного осаждения.

Ф. Парунго и др. (США) изучили влияние концентрации ЯК на количество облаков, а также КВ (коротковолновое) и ДВ (длинноволновое) облачно-радиационное вынуждающее воздействие CRF по данным УРОВР (канал 3,7 мкм) за сентябрь 1982 г. Одновременно выполнены судовые наблюдения концентрации ЯК вблизи юго-восточного побережья Китая, в западном и центральном секторах Тихого океана. Продемонстрирована высокая корреляция между концентрацией ЯК и количеством облаков, а также их альбедо. Конкретные данные о радиационных потоках и CRF не обсуждались.

В интересном (с концептуальной точки зрения) докладе Г. Шоу высказаны соображения о роли поступления диметилсульфида из океана как модулятора облачного покрова и, таким, образом, — климата. Целью доклада И. Кауфмана и Р. Фрезера (США) был анализ влияния дымки в бассейне р. Амазонки, обусловленной лесными пожарами, на микроструктуру и альбедо облаков. По данным УРОВР (каналы 0,63 и 8,7 мкм) восстановлены значения среднего размера частиц, оптической толщины (τ) и высоты верхней границы (ВВГ) облаков. При $\tau < 1,0$ наблюдается уменьшение размера частиц облаков с ростом концентрации частиц дымки. Наличие в дымке сажевого компонента определяет неоднородность влияния дымки на изменения альбедо облаков. А. Аккерман и др. (США), используя одномерную нестационарную модель, обсудили влияние судовых дымовых выбросов на морские слоисто-кучевые облака как пример аэрозольно-облачного воздействия.

Этой же теме был посвящен доклад М. Кинга и Л. Радке (США), содержащий анализ данных самолетных измерений углового распределения рассеянной радиации внутри слоисто-кучевых облаков (на 13 длинах волн в пределах интервала 0,5–2,3 мкм), оптические свойства которых были трансформированы под воздействием дымовых выбросов двух судов вблизи побережья Южной Калифорнии. Наблюдалось увеличение оптической толщины облаков, но ослабление обусловленного ими поглощения радиации.

Изучение пространственного распределения и микроструктуры аэрозоля в атмосфере, окружающей облака, по данным самолетных наблюдений посвящена работа Л. Баумгарднера и С. Твохи (США). Одновременно измерялась микроструктура облаков в морских воздушных массах у побережий Гавайских островов и Калифорнии, а также в континентальных воздушных массах на севере Германии и в восточной части штата Колорадо. Данные измерений счетной концентрации и микро-

структуры конвективной облачности в ходе ее развития указывают на то, что концентрация и масса аэрозоля сильно убывают вне облаков.

В связи с большим интересом к анализу возможного воздействия сульфатного антропогенного аэрозоля на оптические свойства облачного покрова и климат К. Чуанг и др. (США) предприняли расчеты влияния микроструктуры и химического состава АА, а также метеорологических условий на микрофизику облаков, применив для этой цели Лагранжев подход. При заданном глобальном распределении выбросов сернистого газа (rS/m^2) вычислено распределение концентрации сульфата аммония у земной поверхности. Обусловленные сульфатным газофазным аэрозолем изменения микроструктуры и оптических свойств облаков очень значительны. Среднеглобальные оценки свидетельствуют о возрастании альбедо системы «земная поверхность — атмосфера» примерно на 2%, что вызывает похолодание, эквивалентное $1,55 \text{ Вт}/\text{m}^2$ (эти оценки относятся к настоящему времени). Таким образом, аэрозольно-облачный эффект полностью компенсирует парниковый. Ведется работа с целью получения более детальных и достоверных оценок на основе использования комбинированной модели CCM-1+GRANTOUR.

Резюмируя, отметим, что за последние годы достигнут значительный прогресс в исследованиях аэрозоля как климатообразующего фактора, как с точки зрения его непосредственного воздействия, на климат, так и через посредство изменения микроструктуры и оптических свойств облаков.