

К.Я. Кондратьев

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «АЭРОЗОЛЬ—ОБЛАКА—КЛИМАТ».

Ч. 2. ОБЛАКА (К ИТОГАМ СИМПОЗИУМА МАМФА В ВЕНЕ, 13—20 АВГУСТА 1991 Г.).

Сделан обзор докладов, посвященных исследованиям закономерностей пространственного распределения, изменчивости микроструктурных и радиационных свойств облаков. Детально проанализирована роль взаимодействия облачности и радиации как одного из основных климатообразующих факторов. Обсуждены возможности параметризации процессов облакообразования в моделях климата. Рассмотрены результаты спутниковых наблюдений стратосферного аэрозоля и полярных стратосферных облаков.

1. Облака в тропосфере

1.1. Микрофизические процессы в облаках. В обзорном докладе _А. Хеймсфилда (США), который далеко не охватил проблематики в целом, предложена следующая классификация облаков (с точки зрения особенностей их микроструктуры):

- 1) «теплые» (водные при температуре верхней границы облаков (ВГО) $T_c > 0^\circ\text{C}$);
- 2) «переохлажденные» (водно-ледяные, $T_c < 0^\circ\text{C}$);
- 3) «холодные» (ледяные).

К первой категории относятся, например, морские слоистокучевые и тропические орографические облака, а ко второй — конвективные и высококучевые облака. Типичными для третьей категории являются перистые облака, образующиеся под воздействием синоптических и орографических факторов, а также в районах грозовой облачности. Проанализированы физические процессы, определяющие формирование облаков различных категорий. М. Платт (Австралия) обратил внимание на то, что по данным наблюдений с самолета ER-2 в районе штата Висконсин (США), выполненных 2 ноября 1986 г., в рассматриваемом случае перистые облака характеризовались сравнительно высоким альбедо на длине волны 3,7 мкм по отношению к облакам, расположенным в других слоях атмосферы. Восстановление эффективного радиуса частиц перистых облаков (в предположении их сферичности) дало значение около 8 мкм. Используя данные СВЧ- радиометра SMM/I, установленного на спутнике DMSP, а также результаты судовых наблюдений при помощи одноканального СВЧ-радиометра (рассматриваемые наблюдения выполнены в районе Северного моря в 1989 г.). У. Харгенс_(ФРГ) выполнила сравнение величин водосодержания, восстановленных по спутниковым и судовым данным. Сравнение продемонстрировало хорошее их согласие. Отмечена возможность повышения пространственного разрешения спутниковых СВЧ данных путем их комбинирования с данными спутника «Метеосат».

Браун и др. (ФРГ) охарактеризовали микрофизические процессы в перистых облаках по данным полевого эксперимента ICE-1985 (Международный эксперимент по изучению перистых облаков), осуществленного в районе Северного моря. Анализ самолетных данных по микроструктуре, относящихся к одному из случаев, выявил высокую пространственную однородность микроструктуры облаков: изменения ледосодержания были обусловлены главным образом вариациями счетной концентрации частиц. В других случаях микроструктура и форма частиц оказались довольно изменчивыми. Полученные данные сопоставлены с результатами модельных расчетов нуклеации перистых облаков.

В. Гийеме и Х. Исака (Франция) изучили влияние осадков в виде ледяных кристаллов на эволюцию расположенной ниже облачности по данным самолетных наблюдений в период осуществления программы ICE, выполнив сравнение с результатами расчетов на основе модели микрофизических процессов в облаках (наблюдались случаи как чисто водных, так и чисто ледяных облаков). Р. Енике и др. (ФРГ) предложили интересную голографическую методику для измерений микроструктуры в малых объемах (около 0,5 л) облаков (измерения сделаны на вершине горы поблизости от Франкфурта).

Т. Хайасака и др (Япония) кратко охарактеризовали задачи осуществляемой с 1987 г. в рамках ВПИК (Всемирной программы исследований климата) подпрограммы эксперимента по изучению облачно-радиационного взаимодействия в северо-западном регионе Тихого океана. Исследования, осуществленные в январе 1990 г. и в январе 1991 г. с использованием двух самолетов Cessna-4, на которых была установлена актинометрическая аппаратура для измерений потоков КВ (коротковолновой) и ДВ (длинноволновой) радиации, спектрометр (500—1100 нм), аппаратура для микрофизических измерений, СВЧ-радиометр и фотоаппаратура, позволили получить обширную информацию о микрофизических и радиационных свойствах морских слоисто-кучевых облаков.

Опираясь на данные прямых измерений, Д. Митчелл и С. Чан (США) предложили следующую аналитическую аппроксимацию распределения счетной концентрации N по диаметру D для случая слоистых облаков: $N(D) = N_0 D^v \exp(-\lambda D)$, которая может быть использована при численном моделировании облаков как климатообразующего фактора. Обоснованы эмпирические зависимости параметров N_0 , v и λ от водосодержания облаков. И. Енсен (Австралия) обобщил результаты самолетных наблюдений микроструктуры и термодинамических параметров облаков различных типов, уделив осо-

бое внимание анализу изменений микроструктуры, происходящих при переходе от недождящих к дождящим облакам, а также в результате процесса вовлечения.

Применив двухмерную модель ПСА. П. Бехтольд и др. (Франция) изучили процессы эволюции облачности в морском ПСА при изменении температуры поверхности океана (ТПО), обратив главное внимание на анализ мезомасштабного взаимодействия облачности, радиации и турбулентного перемешивания при перемещении холодной воздушной массы с континента в районе побережья Калифорнии на более теплую поверхность Тихого океана. Ж.-Ф. Дувель и др. (Франция) описали динамику облачных скоплений в регионах тропической Арктики и Атлантического океана по ИК данным (канал 10,5–12,5 мкм) на спутнике «Метеосат». Обработка ИК изображений показала, что при осреднении по относительно большим площадям число скоплений может быть аппроксимировано как пропорциональное r^{-2} (r — радиус скоплений). Если над океаном наличие четкого суточного хода типично только для очень крупных скоплений, то над сушей наблюдается сложный суточный ход, зависящий от размеров скоплений. Важную роль играет ежесуточная изменчивость облачных скоплений.

1.2. Пространственное распределение облаков. Б. Вьелички (США) подвел итоги осуществления Международной программы по спутниковой климатологии облачного покрова (ISCCP). Соответствующий архив данных содержит осредненные за трехчасовые интервалы глобальные массивы значений количества, ВГО и оптической толщины облаков. Сравнение наблюдаемых глобальных полей количества облаков с данными численного моделирования климата продемонстрировало наличие значительных расхождений, которые существенно превосходят изменчивость наблюдаемых полей по данным для различных климатических массивов (ISCCP и ERBE). Несомненно, что подобный результат свидетельствует о необходимости радикального совершенствования параметризации динамики облачного покрова в моделях климата.

И. Мазин (СССР) обсудил результаты сравнений наземных визуальных и самолетных визуальных оценок количества перистых облаков за 15 лет (самолетные наблюдения выполнены в 1958–1973 гг. в 8-ми регионах СССР), которые показали, что имеет место вполне удовлетворительное согласие (в пределах погрешности, не превосходящей 10%). К. Ву (США) предложил методику усвоения данных спутниковых наблюдений уходящей длинноволновой радиации (УДР) в рамках модели численного прогноза погоды с целью более надежного диагноза полей количества облаков. В основе примененной методики нелинейного программирования лежит уточнение данных по облачности путем минимизации разности наблюдаемых и вычисленных значений УДР. Радиационно-оптимизированный диагноз количества облаков позволяет (по данным для одного из численных экспериментов) уменьшить стандартное отклонение вычисленных значений УДР от измеренных на 50%, сведя его до уровня шумов. Обсуждаемая оптимизация очень важна при прогнозе температуры поверхности, но практически не играет роли в других случаях.

А. Аркинг (США) составил массив характеристик облачного покрова (количество, высота верхней границы, оптическая толщина, альbedo, излучательная способность, микрофизический индекс) по данным УРОВР за два года (апрель 1986 г. — март 1988 г.) в районе 30–50°с.ш., 60–140°з.д., где осуществляется первый региональный эксперимент ISCCP (FIRE). Наличие подобного массива позволяет проанализировать специфику свойств облаков над океаном и сушей, годовой ход и межгодовую изменчивость. А. Бриссон и др. (Франция) разработали пригодную для оперативного применения автоматизированную методику классификации облаков по данным спутников «Метеосат», а Т. Иноуэ (Япония) предложил методику классификации по данным спутников НУОА для «расщепленного» канала (длины волн 11 и 12 мкм) в окне прозрачности атмосферы. Показано, в частности, что разность яркостных температур $ВТД = T_{11} - T_{12}$ является надежным индикатором для распознавания оптически толстых (кучевых, кучево-дождевых) и перистых облаков, а классификация в целом может быть выполнена с использованием значений ВТД и T_{11} . Обработка данных показала, например, что перистые облака являются преобладающим типом облачности в тропическом поясе Тихого океана.

С. Янг и др. (США) оценили информационное содержание данных дистанционного зондирования при помощи аппаратуры TOVS, устанавливаемой на спутниках НУОА, с точки зрения восстановления средних месячных значений количества и высоты верхней границы (ВВГ) облаков. Сравнение с другими аналогичными данными выявило наличие значительных расхождений. Г. Кемпбелл и др. (США) привели пример обработки данных индийского геостационарного спутника INSAT с целью восстановления количества облаков, УДР и индекса осадков. Ю. Хоу и др. (США) описали систему CLAVR обработки данных усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (УРОВР) с целью восстановления характеристик облачного покрова в реальном времени, проиллюстрировав ее применение примером, относящимся к 8 февраля 1990 г. Д. Рейнке и др. (США) сравнили данные архива ISCCP по облачности с обладающими более высоким разрешением данными спутников GOES.

1.3. Радиационные свойства и воздействие облаков на климат. Довольно поверхностный обзор радиационных свойств облаков, сделанный М. Кингом (США), был крайне неполным уже потому, что в нем полностью игнорируются многочисленные и разнообразные результаты исследований, выполненных в СССР (это, пожалуй, в особенности относится к самолетным наблюдениям и теоретическим исследованиям). При сравнительном обилии упомянутых результатов доклад оказался фрагментарным и лишенным концептуальной увязки с проблемой климата (что, вообще говоря, и должно было бы составить главное содержание доклада).

Располагая стандартным временем, составляющим 12 мин, я тезисно обсудил в своем докладе два направления разработок:

1) созданную В.И. Хворостьяновым мезомасштабную трехмерную модель, учитывающую все главные процессы, определяющие образование и развитие облаков (думаю, что это в настоящее время наиболее совершенная модель), и ее применения;

2) являющуюся продуктом многолетних усилий и кооперации с Н.И. Москаленко и его сотрудниками схему учета глобального аэрозоля и его радиационных эффектов, которая может быть, в частности, использована при численном моделировании климата (пока что эта схема не имеет аналогов, и это определяет необходимость энергичных усилий для обоснования ее как предмета международного сотрудничества).

Э. Шеттле (США) описал данные наблюдений и расчетов яркости облаков в спектральных интервалах 3–5 и 8–12 мкм, а К. Лиоу (США) обсудил проблему параметризации микрофизики ледяных частиц в теории переноса излучения (в рамках дельта-четырёхпоточкового приближения). Результаты проиллюстрированы расчетами зависимости альbedo и излучательной способности облаков от их ледосодержания. Р. Девис и др. (США) привлекли внимание к важности учета влияния горизонтальной неоднородности (топографии) верхней границы облаков на потоки и притоки длинноволновой радиации. Расчеты показали, что радиационное выхолаживание зависит от кривизны поверхности ВГО: выпуклая поверхность выхолаживается более эффективно, чем вогнутая. В целом неоднородности топографии ВГО ослабляют радиационное выхолаживание и задерживают конвективное «переворачивание» (расчеты конвекции сделаны с использованием одномерной модели).

И. Джозеф и И. Кауфман (Израиль, США) изучили (используя изображения высокого пространственного разрешения со спутника «Лэндсат») зависимость отражательной способности отдельных конвективных облаков от их эффективного радиуса, фрактального размера периметра облаков и пространственного распределения соседних облаков с целью обосновать оценки вклада облаков различных размеров в количество облаков и альbedo, определяемые для целого цикла, в зависимости от количества облаков. Полученные результаты использованы для учета влияния «подсеточных» облаков при восстановлении альbedo подстилающей поверхности и вегетационного индекса. П. Флайтай и др. (США) сообщили новые результаты исследований рассеяния света на несферических ледяных частицах гексагональной и кубической формы, опирающихся на применение приближения дискретных диполей. Полученные результаты сопоставимы с данными расчетов для «эквивалентных» сферических частиц. Рассмотрены также приближения аномальной диффракции и геометрической оптики.

И. Такано и др. (США) проанализировали влияние пустот, возникающих вблизи концов частиц кристаллов перистых облаков, имеющих форму столбиков. Результаты расчетов рассеяния и поглощения на частицах по методу Монте Карло и радиационных потоков (с использованием метода слоения слоев) позволили изучить влияние несферичности частиц на угловое распределение отражательной способности перистых облаков и параметризацию индикатрисы рассеяния. Целью работы Р. Боерса и Р. Митчелла (Австралия) было теоретическое исследование взаимосвязи между изменениями альbedo, оптической толщины, микроструктуры и водосодержания облаков под воздействием антропогенного аэрозоля и процессами перемешивания в облаках, а С. Твохи и др. (США) проследили влияние облачных ЯК на микроструктуру и радиационные свойства морских слоисто-кучевых облаков по данным самолетных наблюдений у побережья Северной Калифорнии.

В обзорном докладе Э. Рашке (ФРГ) детально охарактеризованы предварительные результаты осуществленного в период с 15 сентября по 21 октября 1989 г. полевого эксперимента над Северным морем в рамках программы ICE (изучались не только перистые, но также конвективные облака и инверсионные следы самолетов). Главное внимание уделено в докладе анализу данных для наблюдавшихся 28 сентября 1989 г. в струйном течении многослойных перистых облаков на высотах от 7 до 9,5 км (эти облака характеризовались высокой горизонтальной однородностью). Г. Стефенс (США) попытался ответить на вопрос о влиянии ярких перистых облаков на климат, используя комбинированные данные по РБЗ (ERBE) и результаты наблюдений в рамках программы FIRE. Важный результат работы состоит в выявлении существенной заниженности расчетных значений альbedo облаков по сравнению с наблюдаемыми (речь, таким образом, идет об аномалии, проявляющейся как «яркие перистые облака»),

Э. Енсен и др. (США) предложили одномерную модель образования и эволюции перистых облаков с учетом взаимодействующих микрофизических и радиационных процессов, сопоставив результаты вычислений вертикальных профилей потоков КВ и ДВ радиации (на основе двухпоточкового приближения) с данными FIRE за 1986 г. Сравнение выявило вполне удовлетворительное согласие. Главной целью разработки модели был анализ зависимости чувствительности радиационных свойств перистых облаков к изменениям таких входных параметров, как концентрация ЯК, удельная влажность, и вертикальная скорость. Расчеты обнаружили сильное возрастание концентрации кристаллов и оптической толщины облаков с ростом вертикальной скорости. Увеличение концентрации ЯК сопровождается уменьшением среднего размера частиц облаков со 100 до 70 мкм. Предпринята попытка воспроизвести образование перистых облаков, наблюдавшихся 1 ноября 1986 г. Р. Саундерс (Англия) использовал результаты самолетных измерений вертикальных профилей потока ДВ радиации, счетной концентрации и микроструктуры плотных и тонких перистых облаков (Северное море, сентябрь-

октябрь 1989 г.) для обоснования параметризации переноса ДВ радиации в перистых облаках. С. Кинне и др. (США) обобщили данные самолетных наблюдений перистых облаков (FIRE-86) с целью обоснования эмпирической модели оптических свойств облаков (альbedo однократного рассеяния, фактор асимметрии индикатрисы рассеяния, вертикальный профиль коэффициента экстинкции). Осредненные значения оптической толщины (на длине волны 0,5 мкм) и коэффициента экстинкции составляют соответственно около 3 и 0,8 км⁻¹.

Г. Броньез и др. (Франция) изложили данные осуществленных в Нордхольце (ФРГ) в рамках программы ICE-89 лидарных зондирований, а также наземных наблюдений перистых облаков при помощи ИК-радиометра, солнечного и ореольного фотометров, используя их для восстановления параметров микроструктуры облаков. Дарен Лу и др. (КНР) проанализировали структуру и свойства облаков по комбинированным наземным и спутниковым (УРОВР) данным, полученным в Пекине в рамках международного эксперимента ECLIPS, а также оценили возможности восстановления оптической толщины атмосферы по данным УРОВР над сушей. Продуктом участия в осуществлении программы ECLIPS (поисковые лидарные исследования облаков) явилась также работа М. Платта и др. (Австралия), целью которой была разработка методик восстановления высот нижней и верхней границ облаков, а также вертикального профиля коэффициента экстинкции по данным лидарного зондирования. Определение высоты нижней границы облаков (ВНГО) требует тщательного отфильтровывания (если это необходимо) вкладов подоблачной дымки и слабых осадков. Наличие систематических расхождений величин эффективного радиуса облачных капель по данным *in situ* и дистанционного зондирования побудили Т. Накаджима и др. (Япония, США) осуществить (путем сравнения тех и других данных) поиск причин расхождения. По-видимому, одной из важных причин является неучет континуального поглощения водяным паром.

К. Мак Гаффи и А. Хендерсон-Селлерс (Австралия) оценили потенциал фотографий небосвода и данных наблюдений на сети метеостанций Канады (158 станций в 1985 г. и 5 станций в 1970–1979 гг.) и Австралии (14 станций в 1979–1988 г.) как источников информации о пространственной структуре и радиационных свойствах облаков. Так, например, характерная длина облаков, испытывающая значительный годовой ход, варьирует, в среднем, в пределах 0,4–3,4 км. Разнообразную информацию о горизонтальной пространственной структуре облачного покрова дал анализ 400 фотографий небосвода. Ф. Бергер (ФРГ) использовал данные УРОВР (каналы 1, 2, 4) для классификации облаков с использованием двухмерных гистограмм и метода максимального правдоподобия. Расчет оптических характеристик облаков по данным УРОВР (альbedo, пропускание, поглощение/излучательная способность) позволил осуществить последующие вычисления облачно-радиационного вынуждающего воздействия (CRF) для системы «подстилающая поверхность–атмосфера» и подстилающая поверхность. В первом случае имеет место сильное ДВ нагревание и КВ выхолаживание системы. В суммарных значениях CRF отображается известный эффект выхолаживания за счет облаков нижнего и среднего яруса, тогда как тонкие перистые облака обуславливают потепление. В обзорном докладе М. Платта (Австралия) содержится общая характеристика программы ECLIPS.

Д. Хартманн (США) выступил с обзорным докладом о роли облаков в формировании климата, в котором содержалась информация, хорошо известная по научной литературе (отметим в очередной раз, что результаты советских исследований не были даже упомянуты). В докладе рассмотрены результаты вычислений пространственно-временной изменчивости CRF по данным ERBE, причем сделана попытка выявить зависимость CRF от типа облаков. Обсуждая взаимосвязь между изменчивостью CRF и температурой поверхности океана (ТПО), автор выразил сомнение относительно справедливости недавней (1991 г.) работы Раманатана и Коллинза, в которой утверждается, «что изменчивость альbedo облаков контролирует вариации ТПО: сопоставление глобальных карт аномалий ТПО за весенний сезон (1987–1985 гг.) и карт CRF не выявило существования корреляции. В целом, автор полагает, что рассчитываемые по спутниковым данным значения CRF вполне достоверны.

Последующие доклады были посвящены главным образом обсуждению спутниковых данных по РБЗ. Г. Гибсон и др. (США) подвели итоги осуществления эксперимента по РБЗ (ERBE) с точки зрения анализа климатообразующей роли облаков (главным образом, в контексте данных о CRF, полученных за 3 года). Динамика глобальных и региональных полей CRF (для ДВ и КВ компонентов, а также РБЗ) наглядно отображает ключевую роль облачности в формировании климата. Выявлено наличие аномалий CRF в некоторых районах земного шара. Д. Кури и Э. Эберт (США) обсудили закономерности рассчитанного годового хода оптических свойств облаков над Арктическим океаном, согласующиеся со спутниковыми данными по УДР (ERBE) и данными советской сети актинометрических станций в Арктике (кажется, это единственный случай, когда зарубежные специалисты использовали данные наблюдений в СССР). Особое внимание уделено анализу чувствительности радиационных потоков к изменениям радиационных свойств облаков, а в этой связи – зависимости последних от различных факторов (в том числе – поступления загрязнений в Арктику, которые проявляются в образовании дымки).

Ш. Гупта и др. (США) сделали расчеты глобального распределения КВ'тг^ДВД<омпонентов CRF на сетке 2,5X2,5° (по широте и долготе) для различных месяцев с использованием метеорологических данных архива 1СССР и значений альbedo для ясного неба по данным ERBE. Полученные результаты сопоставлены с оценками на основе моделей климата. Аналогичную разработку осуществили С. Аккерман и др. (США) по данным наблюдений при помощи аппаратуры, установленной на

спутнике NOAA-9: датчики РБЗ, УРОВР и аппаратура дистанционного зондирования. Данные последней позволили изучить спектральное распределение CRF. Э. Харрисон и др. (США), используя трехлетний ряд данных ERBE, изучили особенности радиационных аномалий в экваториальном поясе Тихого океана в период ЭНЮК (Эль Ниньо/Южное колебание), наблюдавшегося в 1987 г. и сопровождавшегося очень большим отрицательным значением индекса Южного колебания. Период максимального развития Эль Ниньо (март—май 1987 г.) отмечен сильной отрицательной аномалией УДР, сравнимой с наблюдавшейся в период Эль Ниньо в 1983 г. Сильные положительные аномалии УДР имели место по обе стороны (к северу и к югу) от экваториальной зоны «волноводного» режима. Анализ данных по РБЗ дополнен метеорологической информацией из архива ISCCP.

Используя этот же архив за 1983—1986 гг. Д. Кей и др. (США) выполнили расчеты радиационных потоков и CRF на уровне подстилающей поверхности в Арктике, задав микрофизические и оптические характеристики облаков нижнего, среднего и верхнего ярусов. Цель расчетов состояла прежде всего в анализе, чувствительности радиационных потоков к изменчивости входных параметров. Хотя задаваемые для вычислений радиационных потоков входные параметры отягощены значительными погрешностями, данные расчетов климатологии представляют интерес с точки зрения результатов численного моделирования климата. Также по метеоданным ISCCP К. Рёч-Хефтер и Э. Рупрехт (ФРГ) выполнили расчеты УДР на основе двухпоточкового приближения для выявления роли облачности в формировании парникового эффекта атмосферы.

Д. Коакли и Д. Джадж (США) обсудили по данным УРОВР (NOAA-7, 1984) различия отражательной способности облаков небольших горизонтальных размеров и (практически) бесконечно протяженных облаков, а также зависимость отражательной способности облаков от их микроструктуры и водосодержания. К сожалению, не состоялся (ввиду отсутствия автора) доклад О. Кярнера (Эстония), содержащий анализ 6-летнего ряда данных спутника «Нимбус-7» по РБЗ с целью выявления взаимодействия и радиации. Д. Мольнар (США) применил архив данных ISCCP для оценки зависимости динамики облачного покрова над океаном в тропиках от изменений ТПО с использованием двухмерной радиационно-динамической модели климата. Продемонстрирована существенная зависимость возможного потепления климата, обусловленного ростом концентрации парниковых газов, от особенностей функционирования облачно-радиационной обратной связи, что серьезно затрудняет прогнозы изменений глобального климата.

1.4. Параметризация аэрозоля и облачности в численных моделях прогноза погоды и моделях климата. Обсуждение этой наиболее актуальной проблематики началось с обзорного доклада Х. Сундквиста (Швеция) о параметризации динамики облачности в крупномасштабных моделях климата, автор которого ограничился, однако, лишь рассмотрением (по отдельности) параметризации микрофизических процессов в водных и ледяных облаках, определяющих формирование их микроструктуры, а также мезомасштабных процессов образования кучевых и слоистых (включая слоисто-кучевые) облаков. Не вызывает, однако, сомнений, что: 1) оба типа процессов должны описываться как взаимосвязанные; 2) требует специального анализа проблема встроенной мезомасштабной сетки. Х. Сундквист справедливо подчеркнул важность проблемно-ориентированных полевых экспериментов. Ж.-Ж. Моркретт (Англия) охарактеризовал особенности учёта взаимодействия облачности и радиации в спектральной модели общей циркуляции атмосферы, разработанной в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды. На примере реализации модели, относящейся к июлю 1987 г., проанализированы результаты, полученные при различном горизонтальном разрешении (от T-21 до T-106). Применение разных схем параметризации облачности при варьированном разрешении показало, что среднеглобальные оценки общего количества облаков изменяются мало (в пределах 0,49—0,60). Обсуждено влияние CRF на чувствительности результатов численности моделирования к горизонтальному разрешению и параметризации влажной конвекции.

Т. Прачер (Венгрия), применив предложенную Г. Марчуком в 60-х гг. методику сопряженных уравнений, выполнила, на основе использования боксовой термодинамической модели климата, анализ чувствительности климата к облачно-радиационной обратной связи, а также к взаимосвязи между температурой и влажностью, обратив особое внимание на физический смысл сопряженных функционалов как определяющих пропускание природных сигналов в климатической системе. Л. Доннер (США) рассмотрел особенности параметризации ледяных облаков и их радиационных воздействий в модели климата ССМ, предусматривающей дифференцированный учет двух типов; ледяных облаков: 1) образующихся в синоптических масштабах при наличии восходящих движений; 2) связанных с конвекцией в кучевых облаках. В обоих случаях ледяные частицы образуются из водяного пара при подъеме воздуха и удаляются посредством седиментации. Кроме того, во втором случае дополнительный конденсат поступает в ледяные облака из ячеек кучевых облаков. Анализ результатов предварительных расчетов показал, что облака второго типа обладают высокой излучательной способностью (ИС) и формируются на таком уровне, где возможно интенсивное длинноволновое CRF. Крупномасштабные (протяженные) ледяные облака имеют умеренную ИС на уровне около 35 гПа, но существенно меньшую ИС вблизи уровня 15 гПа (возможно, последняя оценка ненадежна и является следствием неадекватности модели).

Анализу взаимно компенсирующих климатических воздействий облачно-радиационной обратной связи (ОРОС) и изменений снежного покрова с использованием модели ССМ-1 посвящена работа

К. Тэйлора и П. Норриса (США), в которой авторы привлекли внимание к сдерживающей проявление других обратных связей роли ОРОС. Дело в том, что альбедная обратная связь порождает вторичную ОС, проявляющуюся в изменчивости облачного покрова, которая практически полностью компенсирует альбедную ОС, обусловленную вариациями протяженности снежного покрова и альbedo поверхности. Этот вывод демонстрирует необходимость корректного учета синергизма климатообразующих процессов.

К. Боуер и Т. Чулартон (Англия) составили сводку микрофизических характеристик облаков различных типов (в первую очередь водосодержания и вертикального профиля эффективного радиуса капель) и проанализировали влияние процессов вовлечения на микроструктуру кучевых облаков. Предложена простая параметризация эффективного радиуса, которая пригодна для моделей климата. Выполненный Л. Рикусом (Австралия) анализ данных глобальной спектральной модели климата по облачному покрову, сопоставленных с результатами спутниковых наблюдений, обнаружил неспособность модели воспроизвести обширные зоны слоисто-кучевых облаков над океанами южного полушария, обусловленную использованием грубой схемы параметризации облачности по пороговому значению относительной влажности. Более удачные результаты получаются при дополнительном учете зависимости образования облаков нижнего яруса от статистической устойчивости. Д. Вестфаль и др. (США) предложили методике выбора наиболее адекватных схем параметризации процессов облакообразования с использованием входных параметров, оптимизированных на основе данных наблюдений, верифицируемых результатами численного прогноза погоды, И. Фойо-Морено и др. (Испания) выполнили проверку различных методик расчета суммарной радиации по данным 5-летней серии наблюдений на 6 станциях в Испании.

Р. Соммервилл и С. Якобелис (США) обсудили различные приемы учета в моделях климата облачно-оптической обратной связи (CODE), проявляющейся через изменения оптической толщины облаков. Разнообразие воздействий CODE и ее чувствительности к изменчивости свойств облаков определяют необходимость дальнейших исследований этой обратной связи. Ин Хонг (КНР) применил одномерную радиационно-конвективную модель климата для оценки роли различных радиационных возмущающих воздействий. Л. Лемус и др. (Австралия) обосновали параметризацию оптической толщины облаков в зависимости от их влагосодержания и микроструктуры. В. Инграм (Англия) охарактеризовал параметризацию облачности в новой модели численного прогноза погоды и общей циркуляции атмосферы, разработанной сотрудниками Британской метеослужбы. В. Михеле и др. (Англия) сравнили результаты глобальных полей облачности и радиации на основе модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды с данными ERBE, обнаружив хорошее согласие средних месячных величин КВ и ДВ компонентов CRF. Однако рассчитанные амплитуды изменчивости плохо соответствуют наблюдаемым.

Ж. Сеже и пр (Франция) использовали архив данных ISCCP (данные C1) за четыре года для выявления закономерностей пространственно-временной изменчивости глобального распределения облачного покрова, включая вертикальное распределение и оптические свойства облаков, а также для анализа полезности рассматриваемых данных с точки зрения верификации модели климата, разработанной в лаборатории динамической метеорологии Политехнического института. Ч. Сеньор (Англия) применил эту модель климата для оценок изменения полей облачности и радиации, обусловленных удвоением концентрации CO₂, сопоставив результаты вычислений для современной атмосферы с данными ERBE. Важной особенностью упомянутой модели климата является параметризация облачности с рассмотрением водосодержания облаков как внутренней (предвычисляемой) переменной. Численное моделирование обнаружило сильную чувствительность результатов к выбору схемы параметризации облачного покрова, что определяет ненадежность оценок изменений климата при удвоении концентрации CO₂.

2. Стратосферный аэрозоль и облака

К сожалению, этой важной проблеме было уделено очень мало времени (половина дня из шести), но состоявшееся обсуждение привлекло внимание известных специалистов и оказалось весьма содержательным. Эта оценка относится, прежде всего к обзорному докладу П. Маккормика (США), который подвел итоги спутниковых наблюдений содержания стратосферного аэрозоля по глобальным данным аппаратуры SAGE-II за 6,5 лет и относящимся к полярным регионам данным SAM-II за 12,5 лет. Наблюдения, выполненные при помощи аппаратуры SAM-II, позволили получить также богатую информацию о содержании аэрозоля в верхней тропосфере. Детально проанализированы особенности годового хода аэрозоля и воздействия вулканических извержений на стратосферу. Масса аэрозоля в глобальной стратосфере варьирует от $(1-2) \cdot 10^5$ до $(300-400) \cdot 10^5$ тонн. Особое внимание привлекают данные о полярных стратосферных облаках (ПСО), возникающих при температуре ниже 200°К и играющих критически важную роль в процессах разрушения стратосферного аэрозоля.

Большой вклад в исследование как стратосферного, так и тропосферного аэрозолей внесли аэрозольные зондирования с применением фотоэлектрических счетчиков, осуществленные сотрудниками Вайомингского университета в Лавами (41°с.ш.). Обсуждая полученные за 20 лет результаты (что относится к частицам с радиусом более 0,15 и 0,25 мкм, тогда как продолжительность ряда данных по ЯК составляет 15 лет), Д. Хофманн (США) подчеркнул, что эти результаты характеризуют тренды природного континентального фонового сульфатного аэрозоля, нарушаемые сильными воздейст-

виями вулканических извержений (это относится, в частности, к извержению вулкана Пинатубо). Анализ данных выявил наличие сильного годового хода содержания аэрозоля в тропосфере и нижней стратосфере, достигающего максимальных значений весной на высотах меньше 10 км и зимой — выше (последнее связано, по-видимому, с преобладающим в это время переносом в стратосфере, направленным к северу). Для ЯК типично наличие широкого максимума в тропосфере в конце лета, что, вероятно, свидетельствует о существовании фотохимического источника ЯК. Что касается вертикального профиля отношения смеси ЯК, то он характеризуется максимумом, возникающим, как правило, под тропопаузой (скорее всего это связано с усилением здесь скорости нуклеации).

По данным SAGE-II за период с октября 1984 г. до настоящего времени, относящимся к четырем длинам волн (0,385; 0,453; 0,525; 1,02 мкм), К. Броньез и Ж. Ленобль (Франция) восстановили вертикальные профили эффективного радиуса частиц и вычислили ежемесячно осредненные значения для 10° поясов широт. Оказалось, что как непосредственно измеряемый аэрозольный коэффициент экстинкции, так и эффективный радиус претерпевают лишь слабую сезонную изменчивость в некоторых поясах широт и на некоторых высотах с налагающимся на нее трендом спада, порожденным извержением вулкана Эль Чичон. Наблюдаемые широтные вариации рассматриваемых параметров можно объяснить влиянием атмосферных движений.

С. Бекки (Англия) разработал новую двухмерную модель слоя стратосферного аэрозоля, которая предусматривает детальный учет микрофизических процессов (нуклеация, конденсация, испарение воды и серной кислоты, коагуляция, вымывание осадками, седиментация) и химических реакций. Сделаны расчеты изменчивости вертикальных профилей счетной концентрации и микроструктуры стратосферного аэрозоля под влиянием вулканических извержений и выбросов окислов азота сверхзвуковыми самолетами. Отмечено, что самолеты могут быть значительным источником серы в стратосфере.

В. Рамасвами (США) использовал данные лидарных и спутниковых наблюдений за 1978—1987 гг. для оценки стратосферного аэрозольного радиационного воздействия в тропиках, умеренных и полярных широтах в различное время года, сопоставив его с «парниковым» воздействием за тот же и более длительный (1958—1987 гг. и 1950—1987 гг.) периоды. Расчеты на основе радиационно-конвективной модели привели к выводу, что влияние аэрозоля на климат в отдельные годы и за весь период 1978—1987 гг. сравнимо с вкладом усиления парникового эффекта или даже превосходит его. При этом аэрозоль существенно влияет и на поле длинноволновой радиации.

Оценки воздействия аэрозоля на лучистый приток тепла в тропосфере и стратосфере, полученные С. Аккерманом (США) с использованием двухпоточкового приближения для расчета радиационных потоков, позволили проанализировать вклад аэрозоля в условиях пустынь и над океаном в лучистый приток тепла. М. Питтс и др. (США) изучили взаимосвязь между температурой стратосферы и ПСО по данным SAM-II за 10 лет и метеорологических наблюдений, а также проанализировали пути поступления и удаления газообразных предшественников ПСО. А. Маккензи (Англия) предпринял численное моделирование ПСО типа I, состоящих из кристаллов тригидрата азотной кислоты, которые образуются посредством бинарной молекулярной конденсации. Скорость последней обратно пропорциональна сумме трех противодействующих конденсации процессов: 1) диффузии молекул водяного пара к поверхности частиц; 2) выделения скрытого тепла на поверхности частиц; 3) процессов на поверхности, связанных с формированием кристаллической решетки. Оценки показали, что роль последнего процесса особенно значительна, а в некоторых случаях является доминирующей.

Л. Стефанутти и др. (Италия) проанализировали результаты лидарных зондирований стратосферы в Антарктике. Э. Чю и др. (США) изучили закономерности глобального распределения тонких слоев облачности в верхней тропосфере в летние и зимние месяцы по данным SAM-II за 1987—1989 гг. с целью выявить их связь с зонами интенсивной конвекции. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися данными о глобальном распределении перистых облаков.

3. Заключение

3.1. Несомненно, симпозиум, посвященный обсуждению проблематики аэрозоля и облачности как климатообразующих факторов и привлечший внимание многих известных специалистов, оказался, в целом, полезным. Нельзя не отметить, однако, что, как это ни парадоксально, в симпозиуме не приняли участие ведущие специалисты по численному моделированию климата, которые предпочли симпозиуму участие в других разделах программы Ассамблеи.

Обращает на себя внимание кричащее противоречие между числом докладов советских (два) и американских (около 70, не считая стендовых докладов) специалистов в области, которая всегда была (и в значительной степени остается) одним из тех разделов науки, где вклад научных работников СССР был (и остается) очень существенным. Разумеется, подобная ситуация является следствием неудовлетворительной работы по подготовке к Ассамблее (прежде всего приходится упомянуть в этом контексте секцию метеорологии и физики атмосферы Междугосударственного геофизического комитета и ее комиссии по климату, физике облаков и радиации, а также научный совет ГКНТ по глобальным изменениям и климату). Невозможно понять, почему в симпозиуме не приняли участие специалисты таких крупнейших НИИ, как Институт оптики атмосферы, НПО «Тайфун» и др. Следует привлечь внимание и к тому, что организаторы симпозиума не сочли возможным включить советских специа-

листов в число приглашенных докладчиков (из 7 подобных докладчиков 4 представляли США, два ФРГ и один — Швецию). К сожалению, это очень похоже на дискриминацию.

3.2. Опыт участия в обсуждаемом симпозиуме и наблюдения, относящиеся к Ассамблее в целом, побуждают утверждать, что подобные многотысячные научные собрания, расщепляющиеся на многие независимые части, следует считать отжившим стереотипом. Вызывает недоумение, что научное руководство МГГС не приложило достаточных усилий для концентрации внимания ее участников на ключевых проблемах. Это относится, например, к Международной геосферно-биосферной программе (МГБП) и Всемирной программе исследований климата (ВПИК).

Признаюсь, что впервые, приняв участие в Ассамблее МГГС после долгого перерыва, я испытал серьезное разочарование.