

Рис. 1. Изменение средней глобальной температуры у поверхности земли за последние 140 лет (а) и ТВП в Северном полушарии за последнее тысячелетие (б):

ΔT – отклонения от средней ТВП за 1961–1990 гг. На рис. а столбиковая диаграмма – аномалии среднегодовых значений температуры, вертикальными отрезками показаны 95%-ные доверительные интервалы; жирная линия – 10-летнее сглаживание; на рис. б тонкая линия – аномалии среднегодовых значений температуры; жирная – 50-летнее среднее; 95%-ная доверительная область выделена серым цветом.

годы были самыми теплыми, а 1998 г. характеризовался самой высокой средней годовой ТВП Северного полушария (см. рис. 1б).

За период с 1950 по 1993 г. ночные минимальные значения температуры воздуха над сушей увеличивались примерно на $0,2^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, что почти вдвое больше, чем рост дневных максимальных температур ($0,1^{\circ}\text{C}$ за десятилетие). Это привело к удлинению безморозного периода во многих районах в средних и высоких широтах. Рост ТПО в этот период был примерно вдвое меньше, чем в среднем для ТВП над сушей.

По данным радиозондирования, температура нижнего 8-километрового слоя атмосферы с конца 1950-х гг. повышалась примерно на $0,1^{\circ}\text{C}$ за десятилетие. В стратосфере в то время отмечено похолодание.

Спутниковые данные показывают, что начиная с конца 1960-х гг. произошло уменьшение площади снежного покрова примерно на 10%. Согласно наземным данным, в течение XX столетия продолжительность существования ледяного покрова на реках и озерах в средних и высоких широтах Северного полушария уменьшилась примерно на 2 недели. В XX в.

наблюдалось повсеместное отступление горных ледников в неполярных районах.

В Северном полушарии с 1950-х гг. площадь морского льда в весенний и летний периоды сократилась почти на 10–15%. Также уменьшилась толщина морского льда на 40% с конца лета и до начала осени, но в зимний период толщина льда уменьшалась значительно медленнее.

В течение XX в. средний уровень моря повысился на 0,1–0,2 м. Весьма вероятно, что это объясняется как минимум тепловым расширением морской воды и повсеместным таянием материкового льда в результате потепления. Начиная с конца 1950-х гг., когда появились надежные наблюдения за температурой нижних слоев океана, теплосодержание океана возрастало.

Количество атмосферных осадков в XX столетии увеличивалось на 0,5–1% за десятилетие в большинстве районов высоких и средних широт Северного полушария, при этом во второй половине века несколько возрастала повторяемость сильных осадков. Вероятно, что в XX в. примерно на 0,2–0,3% за десятилетие количество осадков увеличивалось и в тропических зонах континентов (от 10° с. ш. до 10° ю. ш.), однако увеличение количества осадков в тропиках в течение нескольких последних десятилетий не очевидно. В субтропиках Северного полушария, между 10 – 30° с. ш., в течение XX в. количество осадков уменьшалось примерно на 3% за десятилетие. В большинстве широтных зон Южного полушария никаких достаточно систематических изменений количества осадков не было обнаружено. Нет достаточных данных, чтобы установить тренды для осадков над океанами.

С 1900 по 1995 г. на континентах не обнаружено монотонных трендов в повторяемости сильных засух или периодов переувлажнения, хотя их повторяемость существенно менялась в масштабах десятилетий. В некоторых районах Азии и Африки повторяемость и интенсивность засух увеличивалась в последнее десятилетие.

Во второй половине XX в. уменьшилась повторяемость экстремально низких температур и несколько увеличилась повторяемость экстремально высоких.

Начиная с 1950-х гг. теплые эпизоды Эль-Ниньо – южное колебание – стали более частыми, более устойчивыми и более интенсивными, чем в предшествующих 100 годах.

В то же время в некоторых областях земного шара, в частности в некоторых районах океанов Южного полушария и Антарктики, климат не стал теплее в последнее десятилетие. Об этом можно судить по отсутствию значимых трендов в протяженности антарктических морских льдов начиная с 1978 г. (с этого года появились надежные данные спутниковых измерений).

По ограниченным данным не было обнаружено трендов в интенсивности и частоте тропических и внетропических циклонов во второй половине XX столетия, хотя их значительные флуктуации наблюдались в масштабах десятилетий.

Изменение концентрации парниковых газов

Концентрация углекислого газа в атмосфере с 1750 по 2000 г. увеличилась на 31%. Столь высокого уровня, как в настоящее время, она не достигала ни разу за последние 420 тыс. лет, а возможно, и в последние 20 млн. лет. Скорость увеличения концентрации углекислого газа в XX столетии была беспрецедентной в течение, по крайней мере, последних 20 тыс. лет (рис. 2а).

Примерно 3/4 антропогенной эмиссии CO_2 в атмосферу в течение последних 20 лет обусловлено сжиганием органического топлива. Остальная часть эмиссии связана с изменением в землепользовании и, особенно, с сокращением площади лесов. В настоящее время океан и континенты поглощают половину антропогенного углекислого газа. Скорость увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере была приблизительно 1,5 млн.⁻¹ (0,4%) в год в течение двух прошлых десятилетий. В 1990-х гг. концентрация CO_2 увеличивалась на 0,9–2,8 млн.⁻¹ (или 0,2–0,8%) за год.

Концентрация метана в атмосфере увеличилась на 1060 млрд.⁻¹, или на 151%, начиная с 1750 г. и продолжает возрастать в настоящее время (рис. 2б). Такой высокой концентрация метана не была ни разу в течение последних 420 тыс. лет.

Ежегодный рост концентрации метана замедлился и стал более изменчивым в 1990-х, чем в 1980-х гг. Более половины прироста концентрации метана имеет антропогенное происхождение (например в результате использования органического топлива, развития животноводства, выращивания риса и утилизации мусора).

Начиная с 1750 г. концентрация закиси азота в атмосфере увеличилась на 46 млрд.⁻¹ (17%)

и продолжает возрастать (рис. 2в). Концентрация N_2O сейчас наивысшая, по крайней мере, за последнее тысячелетие. Треть концентрации закиси азота имеет антропогенное происхождение (например сельскохозяйственная обработка почвы, химическая промышленность).

Радиационное воздействие этих газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) на климатическую систему положительно (см. шкалу справа на рис. 2а–в). С 1995 г. продолжался рост концентрации малых примесей газов, также имеющих парниковые свойства и содействующих уменьшению содержания озона (хлористые агенты, активные газы двуокиси серы и т.д.).

Антропогенный аэрозоль, оказывающий в основном негативное радиационное воздействие на климат, не является долгоживущим компонентом в составе атмосферы, однако в связи с непрерывными антропогенными выбросами его концентрация в приземном слое атмосферы практически постоянна. Временной ряд концентрации сульфатов, полученный по данным измерений отложений SO_4 в Гренландском ледовом щите, указывает (после исключения влияния эпизодических извержений вулканов) на рост антропогенной эмиссии SO_2 в средних широтах Северного полушария в индустриальную эпоху (рис. 2д). Он хорошо согласуется с региональной оценкой эмиссии SO_2 .

Начиная с 1750 г. приток солнечной радиации увеличился примерно на 0,3 Вт/м². Большая часть этих изменений произошла в первой половине XX столетия. Начиная с конца 1970-х гг. с помощью спутниковых наблюдений были обнаружены небольшие колебания потока солнечной радиации вследствие 11-летнего солнечного цикла. Предположение об увеличении влияния солнечной радиации на климат в настоящее время никаких заметных теоретических или наблюдательных подтверждений не получило.

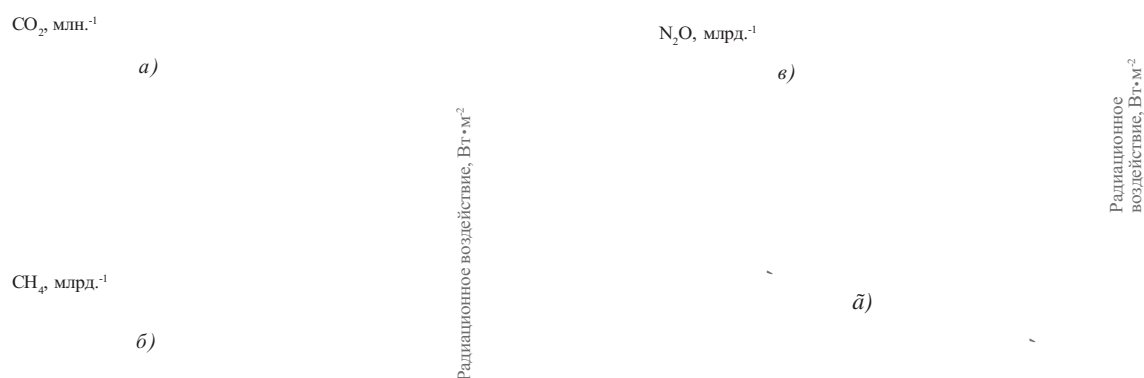


Рис. 2. Изменения средней глобальной концентрации парниковых газов: двуокиси углерода (а), метана (б), закиси азота (в) – в атмосфере в течение последнего тысячелетия, а также концентрации сульфатных аэрозолей SO_2 в атмосфере (д):

для расчетов привлекались данные исследований колонок льда в нескольких пунктах на Гренландском ледовом щите и Антарктиде (показаны символами). Они дополнены результатами прямых измерений концентраций парниковых газов в атмосфере в последние десятилетия (показаны линиями для CO_2 (рис. а) и использованы для построения кривой для глобальной средней концентрации CH_4 (рис. б). Крестики на рис. д – региональная оценка эмиссии SO_2 .

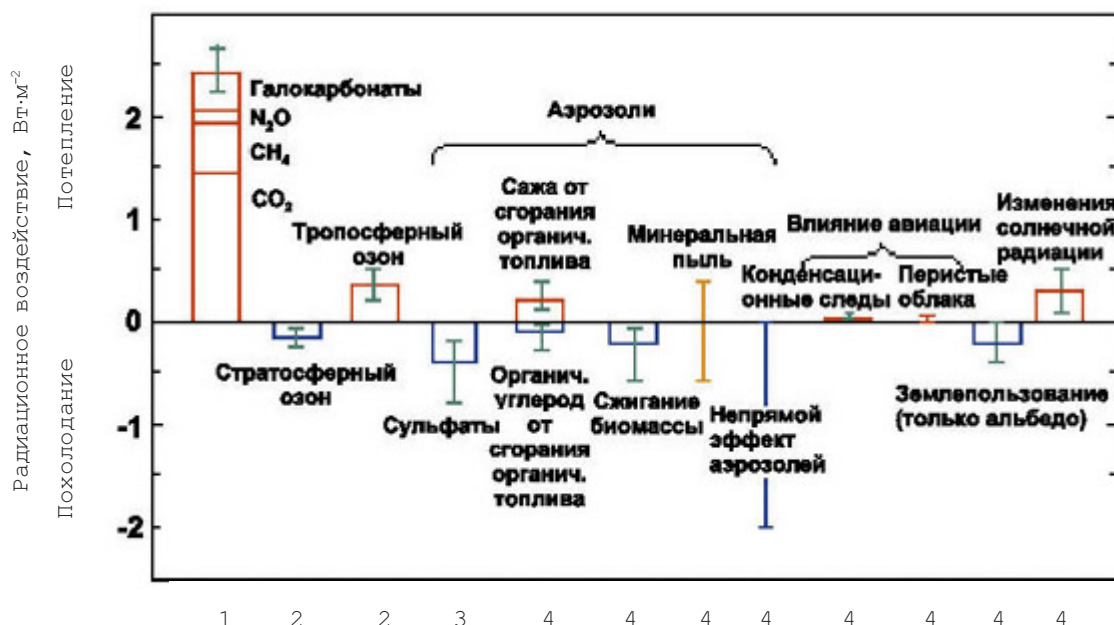


Рис. 3. Осредненное по земному шару радиационное воздействие на климатическую систему внешних факторов изменения климата в 2000 г. по отношению к 1750 г.:

прямоугольники – оценки вклада рассматриваемых факторов; вертикальная линия около прямоугольника указывает диапазон оценок с учетом разброса опубликованных значений воздействий и физического понимания; вертикальная черта без прямоугольника означает воздействие, для которого лучшая оценка не может быть получена из-за больших неопределённостей. Цифрами под рисунком указано качество оценки каждого фактора по следующей шкале: 1) высокое; 2) среднее; 3) низкое; 4) очень низкое.

На рис.3 обобщены оценки вклада внешних факторов радиационного воздействия на климат, приводящих к потеплению или похолоданию:

- изменения в составе атмосферы;
- изменения в землепользовании;
- изменения в солнечном воздействии (первые два из них – антропогенные).

Воздействие эпизодических извержений вулканов (приводит к похолоданию и длится в течение нескольких лет) здесь не показано. Показанный на рисунке косвенный эффект аэрозолей связан с размером и количеством облачных капель, другой косвенный эффект (также отрицательный) – влияние на время жизни облачности – также не показан.

Как видно, оценки вклада отдельных факторов колеблются в широком диапазоне. Различен и пространственный масштаб их воздействий (глобальный, как для сильно перемешанного CO₂, или в рамках региона распространения, как для аэрозолей). По этим и другим причинам простое суммирование положительных и отрицательных эффектов не имеет смысла.

Климатические модели

В основе моделей климата лежат физические законы, описываемые математическими уравнениями, вид и количество которых определяют уровень сложности модели и полноту учитываемых ею процессов и обратных связей в климатической системе. В настоящее время большинство специалистов считают основным и одновременно наиболее перспективным инструментом оцен-

ки возможных в будущем изменений климата сложные трехмерные модели, основанные на дифференциальных уравнениях в частных производных.

В течение последних двух десятилетий отмечен значительный прогресс в развитии глобальных климатических моделей (ГКМ), обусловленный как достижениями в исследованиях собственно климатической системы, так и впечатляющим ростом возможностей вычислительной техники, обеспечивающей все большую детализацию и полноту модельных описаний климатически значимых процессов. Современные ГКМ, используемые в расчетах изменений климата, включают в качестве основных компонентов интерактивные (взаимодействующие друг с другом) модели атмосферы, океана, верхних слоев суши, криосферы и биосферы. Пространственное разрешение атмосферных компонентов современных ГКМ до 250 км по горизонтали и около 1 км по вертикали (вне пределов пограничного слоя, где вертикальное разрешение всегда выше). Пространственное разрешение океанских компонентов ГКМ в среднем от 125 до 250 км по горизонтали и от 200 до 400 м по вертикали. Поскольку для явного описания части климатически значимых процессов указанного разрешения недостаточно, такие процессы представлены в моделях с помощью так называемых параметризаций, отражающих процессы меньшего, чем шаг сетки, масштаба через процессы более крупного масштаба для определения осредненного действия первых процессов на вто-

рые. Современный уровень развития компьютерной техники позволяет проводить интегрирование ГKM на сотни лет в рамках исследования неравновесной реакции глобального климата на изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей.

Физически полные трехмерные ГKM занимают высшую ступень в иерархии современных моделей климата. Существуют еще два класса климатических моделей, которые используются в исследованиях возможных изменений климата: упрощенные (двухмерные или энергетические) и так называемые модели промежуточной сложности, которые занимают место между упрощенными и физическими полными ГKM, не столько уступая последним в количестве описываемых процессов, сколько превосходя их в степени «параметризованности». Основным преимуществом моделей, находящихся на нижних ступенях иерархии, является их эффективность в вычислительном отношении. С их помощью можно проводить ансамблевые расчеты, а также интегрировать на сравнительно долгие (тысячи лет) сроки. Эти модели в исследованиях возможных в будущем изменений климата используются как вспомогательные.

Оценка современных ГKM, с точки зрения их использования в расчетах будущих изменений климата, является довольно сложной задачей. Важным, хотя отнюдь не достаточным, качеством ГKM должна быть их способность воспроизводить среднее состояние (средние годовой и суточный циклы) современного климата. До недавнего времени практически все известные совместные модели циркуляции атмосферы и океана нуждались в процедуре так называемой коррекции потоков для устранения «дрейфа» модельного равновесного климата от его наблюдаемого современного состояния. Эта процедура состоит в задании постоянных во времени (с учетом сезонного хода) поправок к потокам тепла и влаги (иногда к потоку импульса) от атмосферы к океану. Поправки, призванные компенсировать недостатки модельного описания процессов в атмосфере и океане, а также взаимодействия этих сред, по сути своей нефизичны, а значит – нежелательны. В последнее время в ряде ГKM удается избежать значительного «дрейфа» климата без использования коррекции потоков, однако систематических различий во внутренней изменчивости рассчитываемых параметров между ГKM, использующими и не использующими эту процедуру, не выявлено.

Для пространственных масштабов, от глобального до субконтинентального, современные ГKM позволяют удовлетворительно воспроизводить наблюдаемые средние годовые значения и сезонный ход большого числа гидрометеорологических величин (прежде всего для атмосферы), представляющих интерес с точки зрения изменения климата. Однако оценки облачности имеют наиболь-

шую неопределенность. В результате улучшения качества воспроизведения океанскими компонентами ГKM меридионального переноса тепла, ТПО и структуры термоклина уменьшилась необходимость использования коррекции потоков. С другой стороны, остаются значительные проблемы, связанные с воспроизведением западных пограничных течений, конвекции, вихрей, формирования антарктической придонной воды и т.п. Несмотря на значительный прогресс в моделировании морского льда (в рамках океанских моделей при заданном атмосферном воздействии), соответствующие компоненты ГKM относятся к числу наиболее уязвимых: большая часть моделей использует чрезмерно упрощенные термодинамические параметризации морского льда, зачастую без учета его динамики. Между тем включение в ледовые компоненты ГKM более совершенных динамических схем не приводит к улучшению воспроизведения основных характеристик ледяного покрова, что объясняется, в первую очередь, систематическими ошибками в расчетах приземного ветра. Оставляя пока желать лучшего и расчеты климатических полей других метеовеличин, таких, как высота снежного покрова суши, содержание почвенной влаги и др.

В последние годы с помощью ряда моделей удалось в целом реалистично воспроизвести некоторые состояния климатической системы в течение последних 20 тыс. лет. Эти состояния были обусловлены значительно отличающимися от современных внешними воздействиями, что является дополнительным подтверждением пригодности ГKM для оценки будущих изменений климата.

Помимо среднего состояния климатической системы, ГKM должны воспроизводить межгодовую, внутри- и межвековую и, по-видимому, более долгопериодную изменчивость климатической системы. В этом контексте заслуживают упоминания достижения в воспроизведении ГKM Эль-Ниньо – южное колебание. Другие явления, такие, как муссоны и североатлантическое колебание, также стали рассчитываться ГKM намного более реалистично. В расчетах климата XX в. при задании наблюдаемых изменений концентрации парниковых газов и сульфатных аэрозолей некоторые ГKM успешно воспроизвели положительные вековые тренды ТВП. Некоторые модельные исследования позволяют надеяться на улучшение воспроизведения ряда особенностей изменчивости климата XX в. в результате включения в расчеты дополнительных внешних воздействий, таких, как изменчивость солнечной активности и вулканическая деятельность.

Несмотря на отмеченные достижения, существует ряд нерешенных проблем, связанных с описанием обратных связей в ГKM. Обратные связи либо усиливают, либо подавляют начальное возмущение в климатической сис-

теме и поэтому играют исключительно важную роль в эволюции климата. Среди большого числа обратных связей, действующих в климатической системе, важную роль играет изменение содержания в атмосфере водяного пара при потеплении климата. Расчеты показывают, что при удвоении концентрации CO_2 увеличение содержания водяного пара в атмосфере дополнительно усиливает глобальное потепление в 2–3 раза (положительная обратная связь).

Еще одна (облачно-радиационная) обратная связь определяется изменениями высоты, количества и радиационных свойств облаков и может быть как положительной, так и отрицательной. В результате действия этих и других обратных связей сохраняется значительная неопределенность в оценках изменений равновесного климата, получаемых с помощью разных ГКМ при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере: разброс оценок глобального потепления составляет 1,5–4,5°C. Принято считать, что основной вклад в эту неопределенность вносит обратная связь между облачностью и радиацией.

В целом качество расчетов климата с помощью современных ГКМ можно признать если еще не вполне удовлетворительным, то весьма обнадеживающим – по крайней мере, для пространственных масштабов более субконтинентального и для временных масштабов от сезонного до внутривекового. Важно отметить при этом, что в настоящее время ни одна из известных ГКМ не может быть признана наилучшей. С учетом многочисленных оговорок современные ГКМ пригодны для оценок возможных в будущем изменений климата в результате реализации тех или иных сценариев выбросов в атмосферу парниковых газов и аэрозолей.

Оценка возможных изменений климата для пространственных масштабов менее субконтинентальных требует привлечения различных способов «регионализации» результатов расчетов с помощью ГКМ. В настоящее время для этого используются: ГКМ высокого или переменного разрешения; региональные климатические модели (РКМ), встроенные («телескопированные») в ГКМ сравнительно грубого разрешения, и статистические методы (так называемый статистический даунскейлинг). Каждая из перечисленных категорий характеризуется набором достоинств и недостатков. Выбор того или иного способа может определяться наличием вычислительных ресурсов (в первом и втором случаях весьма значительных), а также наличием данных наблюдений (третий случай – необходимо наличие продолжительных однородных рядов достаточно высокого временного разрешения).

Предсказуемость климата

Хотя динамическая система атмосфера-океан чувствительна к малым возмущениям и потому неустойчива, медленно меняющиеся компонен-

ты этой системы могут быть предсказуемы для значительных временных масштабов. Чтобы исключить влияние начальных условий и неопределенность, обусловленную использованием конкретной ГКМ, практикуются расчеты от разных начальных условий и с разными ГКМ. Модельные оценки антропогенных изменений климата в пределах временных масштабов, превышающих предсказуемость его естественных колебаний, не зависят от начальных условий и сводятся к расчету изменений вероятности климатических состояний на основе ансамблевых расчетов.

При радиационном воздействии на климатическую систему, каким является рост концентрации парниковых газов в атмосфере, важную роль в эволюции системы играют термодинамические процессы, среди которых особая роль принадлежит положительной обратной связи водяного пара. Так, радиационное потепление климата приводит к увеличению содержания водяного пара в атмосфере, которое, в свою очередь, ведет к дальнейшему потеплению. Это обстоятельство позволяет считать, что климат предсказуем на временных интервалах порядка десятилетий. Подтверждением тому служат выполненные с помощью нескольких ГКМ расчеты трендов в XX столетии, обусловленных воздействиями естественного и антропогенного характера.

Сценарии выбросов парниковых газов и аэрозолей до 2100 г.

МГЭИК разработан набор сценариев будущих выбросов парниковых газов в атмосферу. Этот набор сценариев, представленный в Специальном докладе о сценариях выбросов (СДСВ) [5], имеет четыре основные «сюжетные линии», в рамках которых предложено шесть демонстрационных сценариев. Общее же число сценариев 40. «Сюжетная линия» и связанные с ней сценарии основаны на разных гипотезах о будущем мировом развитии. Мировое развитие определяется демографическими, экономическими и технологическими факторами, от которых, в свою очередь, зависят интенсивность использования ископаемого топлива и выбросы в атмосферу парниковых газов и аэрозолей.

На основании результатов анализа демонстрационных сценариев развития общества в XXI столетии и соответствующих выбросов парниковых газов в атмосферу выполнены расчеты карбонатного цикла в климатической системе, которые позволяют сделать некоторые выводы о накоплении этих газов в атмосфере в будущем.

Выбросы CO_2 , обусловленные сжиганием ископаемых источников энергии (нефти, газа, угля), с высокой степенью вероятности будут определять рост концентрации CO_2 в атмосфере в течение всего XXI столетия.

По мере роста концентрации CO_2 в атмосфере Мировой океан и поверхность континентов будут поглощать меньшую долю антропогенного CO_2 . Как показывают результаты модельных расчетов, суммарный эффект с учетом карбонатного обмена между атмосферой, океаном и поверхностью континентов будет способствовать еще большему росту концентрации CO_2 в атмосфере.

К 2100 г., согласно демонстрационным сценариям, концентрация CO_2 в атмосфере может достичь 540–970 млн.⁻¹, то есть будет на 90–250% больше, чем в доиндустриальном периоде. С учетом неопределенности оценок карбонатного обмена между тремя средами, которые могут составлять от -10 до 30% для каждого сценария, разброс оценок концентрации CO_2 к 2100 г. может быть 490–1260 млн.⁻¹.

Хотя сокращение лесов в результате хозяйственной деятельности способствует росту концентрации CO_2 в атмосфере, вклад этого фактора не представляется значительным. Так, если бы удалось восстановить нарушенную биосферу на континентах за весь индустриальный период, то концентрация CO_2 в атмосфере уменьшилась бы на 40–70 млн.⁻¹.

Рост концентрации других парниковых газов существенно зависит от конкретного сценария. К 2100 г. концентрация CH_4 может измениться от -190 до 1970 млрд.⁻¹, N_2O – от 38 до 144 млрд.⁻¹ и тропосферного озона – от -12 до 62% по отношению к их концентрациям в 2000 г. В некоторых сценариях тропосферный озон может обладать таким же значительным радиационным воздействием, как и CH_4 , и, более того, в Северном полушарии его концентрации могут достичь предельно допустимого уровня.

Доля CO_2 в суммарном радиационном воздействии в течение всего XXI столетия будет возрастать от половины до двух третей.

Демонстрационные сценарии допускают как увеличение, так и уменьшение антропогенного аэрозоля в зависимости от того, насколько интенсивно будет использоваться ископаемое топливо и какие меры будут предприниматься по уменьшению выбросов аэрозолей в атмосферу.

Обнаружение изменений климата и установление их причин

При анализе результатов наблюдений важно не только показать, что изменения некоторой климатической характеристики существенно отличаются (в статистическом смысле) от изменений, которые можно объяснить исключительно естественной изменчивостью. Необходимо также установить причину этих изменений путем анализа альтернативных гипотез. Реакция климатической системы на антропогенные воздействия происходит на фоне естественных колебаний климата, временные масштабы которых от нескольких недель до нескольких столетий. При этом океан, взаимодействуя с высокочастотными колебаниями атмосферы, интегрирует их и обуславливает долгопериодные колебания в климатической системе. Это означает, что большие по амплитуде колебания параметров климата могут происходить на временных масштабах несколько столетий даже без внешних воздействий. Долгопериодные колебания климата могут также происходить под влиянием внешних воздействий естественного происхождения (вариации солнечной радиации и влияние вулканического аэрозоля).

$\Delta T, ^\circ\text{C}$

a)

б)

в)

Рис. 4. Ансамблевые расчеты средней глобальной ТВП с помощью ГKM, разработанной в Центре климатических исследований Хэдли (Великобритания):

с учетом только естественных внешних воздействий в виде изменчивости солнечной и вулканической активности (a); с учетом только антропогенного воздействия в виде парниковых газов и сульфатных аэрозолей (б); с учетом как естественных, так и антропогенных воздействий (в). Черная линия – данные наблюдений; серым тоном показана оценка по модели.

Анализ данных наблюдений показывает, что глобальные изменения температуры воздуха у поверхности Земли за последние десятилетия вряд ли можно объяснить только внутренней изменчивостью климатической системы. С другой стороны, расчеты с помощью ГKM подтверждают, что невозможно воспроизвести наблюдаемый рост ТВП и изменения вертикального распределения температуры атмосферы, ограничиваясь имитацией лишь естественных воздействий. Другими словами,

все расчеты с физически полными ГKM, в которых учитывается наблюдаемый рост концентрации парниковых газов и аэрозоля (рис. 4), указывают на большой вклад антропогенных факторов в тренды температуры у поверхности Земли и в тропосфере в течение, по крайней мере, четырех последних десятилетий. На рис. 4 приведены результаты расчетов ГKM, разработанной в Центре климатических исследований Хэдли (Великобритания). Аналогичные результаты были получены с помощью других ГKM.

Вместе с тем, несмотря на определенные успехи, достигнутые в обнаружении климатически значимого сигнала и его антропогенной интерпретации, продолжает оставаться ряд нерешенных проблем в этой области:

- существуют необъяснимые различия между изменениями профилей температуры в тропосфере, построенных по данным наблюдений и рассчитанных с помощью ГKM. Хотя эти различия удалось несколько уменьшить в результате более реалистичного описания воздействий, связанных со стратосферным аэрозолем и изменениями озона, внести окончательную ясность в этот вопрос пока не удалось;

- существует неопределенность в восстановлении влияния на климатическую систему солнечной радиации и извержений вулканов. Оценки этих воздействий из-за отсутствия прямых измерений в прошлом осуществляются по косвенным данным;

- наибольшая неопределенность связана с оценками воздействия аэрозоля, концентрация которого очень изменчива в пространстве и времени;

- большие различия наблюдаются в реакции разных ГKM на одно и то же воздействие. Эти различия больше, чем различия в расчетах с учетом и без учета аэрозольного воздействия в одной и той же ГKM.

Оценки возможных изменений климата в будущем

Согласно расчетам с использованием ГKM и набора сценариев СДСВ, в течение 1990–2100 гг. средняя глобальная ТВП может повыситься на 1,5–5,8°C. Такое потепление не имело прецедентов в течение последних десяти тысяч лет. Различие с диапазоном оценок, приведенным во втором докладе МГЭИК (от 1,0 до 3,5°C) [4], объясняется уменьшением ожидаемых выбросов сульфатного аэрозоля в сценариях СДСВ по сравнению с более ранними сценариями МГЭИК [3] и использованием значительно более широкого набора сценариев, в том числе и «экстремальных». Как уже отмечалось, различия между оценками глобального потепления к 2100 г., полученными с помощью разных ГKM, больше различий между оценками, полученными одной и той же ГKM с использованием различных сценариев СДСВ.

Применение различных способов «регионализации», например использование РКМ, ре-

зультатов расчетов с помощью ГKM в настоящее время не позволяет восстановить достаточно детальную картину будущих изменений климатической системы. Однако уверенно можно говорить о более интенсивном потеплении над сушей, чем над поверхностью Земли в целом, в частности в высоких широтах в холодное время года. Потепление в северных регионах Северной Америки и в северной и центральной частях Азии превышает средние глобальные оценки на 40%, в то время как в Южной и Юго-Восточной Азии летом и в Южной Америке зимой потепление оказывается меньше среднеглобального.

Количество осадков, вероятно, увеличится во внетропических широтах Северного полушария и в Антарктиде зимой. В низких широтах возможно как усиление, так и ослабление осадков (в зависимости от сценариев выбросов).

Большинство ГKM указывает на увеличение максимальных и минимальных значений температуры; на увеличение числа жарких дней практически над всей сушей; на рост числа случаев интенсивных осадков во многих регионах суши во внетропических широтах Северного полушария; на уменьшение числа холодных дней практически над всей сушей; на уменьшение амплитуды суточного хода температуры в большинстве регионов суши. Относительно возможных изменений ряда других стихийных гидрометеорологических явлений (например штормов в средних широтах) современные ГKM не позволяют делать уверенных предположений. А некоторые из явлений сравнительно мелкого масштаба (например грозы, торнадо, град, молнии) попросту не воспроизводятся современными ГKM. Оценки будущих изменений Эль-Ниньо (в ряде ГKM тенденции к усилению этого явления сохраняются) в настоящее время следует считать лишь предварительными.

Многие ГKM указывают на ослабление в будущем термохалинной циркуляции океана (ТХЦ) в Северном полушарии. Однако пока трудно судить, может ли это привести к исчезновению ТХЦ. Во всяком случае, ни в одной из ГKM этого не происходит в последующие 60 лет. Ожидается дальнейшее сокращение снежного и ледяного покрова в Северном полушарии. Ледники, за исключением ледяных щитов Гренландии и Антарктиды, в XXI в. также будут отступать.

В рамках сценариев СДСВ в течение 1990–2100 гг. ожидается повышение среднего уровня Мирового океана на 14–80 см (в среднем на 47 см), что в 2–4 раза превосходит прирост уровня в XX столетии.

Вопросы для дальнейшего изучения

В ТДО МГЭИК обсуждаются наблюдаемые изменения климата и причины, вызывающие эти изменения, на основе современного уровня знаний о естественных и антропогенных воздействиях и процессах, протекающих в климатической системе. Большое внимание в

ТДО уделяется также вопросу, насколько установленные изменения климата обусловлены антропогенным воздействием. С использованием физически полных ГKM даются оценки вероятных изменений климата для различных сценариев выброса в атмосферу парниковых газов и аэрозолей. Несмотря на достигнутые успехи, остается недостаточно изученным целый ряд вопросов, связанных как с интерпретацией современных изменений климата, так и с оценками будущих его изменений. Среди наиболее важных задач, стоящих перед научным сообществом, заслуживают упоминания следующие:

- необходимо остановить сокращение существующей наблюдательной метеорологической и аэрологической сетей во многих районах мира. Исследования показывают, что требуется несколько десятилетий качественных наблюдений, чтобы выделить изменения климата (сигнала), вызванные антропогенным воздействием, от естественной внутренней изменчивости (шума);
- требуются дополнительные непрерывные наблюдения более высокого качества и пространственного разрешения для совершенствования и тестирования моделей климата;
- необходимы дальнейшие исследования и учет в ГKM (и РКМ) в более полном виде основных физических процессов и обратных связей. При этом особое внимание должно уделяться взаимодействию облачности и радиации и более широко – взаимодействию между атмосферой, подстилающей поверхностью континентов и океанами, включая криосферу;
- следует провести дальнейшие исследования естественной долгопериодной климатической изменчивости, обратив особое внимание на формирование и повторяемость экстремальных явлений и внезапных климатических изменений;
- требуется выполнить работы, направленные на более полную вероятностную интерпретацию будущих климатических состояний, основанную на использовании ансамбля климатов, полученных с помощью разных ГKM.

Заключение

В настоящей работе отражена в основном современная (на 2000 г.) точка зрения ученых, работающих в рамках МГЭИК.

Конечно, не все точки зрения полностью освещены в отчете. Не нашло места в отчете (по вопросам не только изменений климата, но и их последствий) отношение ученых к Рамочной Конвенции ООН по изменению климата (1992 г.) и к Киотскому протоколу к ней (1997 г.). Так, МГЭИК не определила понятие «опасное воздействие на климатическую систему» (ключевой критерий основной цели Конвенции, которая не должна допустить такого воздей-

ствия), возложив ответственность за интерпретацию на людей, принимающих решения, то есть на политиков, а не на ученых. Против этого с 1995 г. категорически возражал представитель Российской делегации (Ю.А. Израэль). Далее, МГЭИК не рассмотрела возможную эффективность Киотского протокола для будущих изменений климата, которая на самом деле крайне невелика [6], что привело многих ученых и администраторов, включая президента США Дж. Буша, к отказу от Киотского протокола.

В мировой литературе имеется много критических замечаний по результатам работы МГЭИК (например, о различии в оценках температуры по спутниковым и наземным наблюдениям, неточности прогнозов о существенном потеплении Арктики и Антарктики и др.). С другой стороны, очевидно, что МГЭИК провела огромную работу по анализу и обобщению данных по проблеме антропогенных изменений климата и их возможных последствий. Для решения этих и других смежных проблем требуется дальнейшее расширение сотрудничества между научными коллективами разных стран, содействие повышению научного потенциала во многих регионах земного шара и представление результатов исследований в виде достаточно аргументированных предложений, адресованных правительственным и общественным организациям.

Литература

1. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Summary for Policymakers and Technical Summary. – WMO/UNEP, 2001.
2. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment / J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 1990. – 365 p.
3. Climate Change 1992. The Supplement Report to the IPCC Scientific Assessment. / J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Vamey (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 200 p.
4. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, et al. (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 56 p.
5. Сценарии выбросов: Резюме для лиц, определяющих политику / Межправительственная группа экспертов по изменению климата ВМО/ЮНЕП // Специальный доклад рабочей группы III МГЭИК, 2000. – 20 с.
6. Израэль Ю.А. Изменения климата и их последствия: реакция мирового сообщества, 2000 // В сб.: Труды международной теоретической конференции «Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века», С.-Петербург, 24–25 июля 1999 г. – СПб.: Гидрометеиздат, 1999.