

И. Л. Кароль, В. М. Катцов,
А. А. Киселев, Н. В. Кобышева

О КЛИМАТЕ *по существу и всерьез*



РОСГИДРОМЕТ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

И. Л. Кароль, В. М. Катцов,
А. А. Киселев, Н. В. Кобышева

О КЛИМАТЕ ПО СУЩЕСТВУ И ВСЕРЬЕЗ

Санкт-Петербург
2008

УДК 551.58

В доступной широкому кругу читателей форме рассказывается о климате Земли — особенностях его формирования и методах изучения, современном состоянии и вероятных изменениях в ближайшем будущем. Обсуждаются также последствия глобального потепления и возможность человека воздействовать на эти изменения.

ISBN 978-5-86983-036-4

© Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова, 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.	4
Введение. Что такое климат?	6
Факторы и процессы, формирующие климат.	10
Как наблюдают за климатом	17
Климат в расчетах моделистов	25
Климат в нашей жизни.	36
Что происходит с нашим климатом?	41
Климат и мы через 20—30 лет.	46
Климатическая система нуждается в помощи	51
Заключение.	54
Список литературы	55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Стимулом для написания этой книги послужили два обстоятельства. Прежде всего, это неоспоримый факт происходящего у нас на глазах изменения привычных климатических условий: теплые и нередко почти бесснежные зимы, увеличение повторяемости аномальных погодных явлений и т. п. Подобные проявления изменения климата приковывают к себе всеобщее пристальное внимание, поскольку именно они оказывают непосредственное влияние на многие стороны жизни каждого из нас и одновременно порождают серьезные опасения, так как эти изменения большей частью никак (или почти никак) не зависят от нашей воли, вынуждая нас лишь адаптироваться к существующему погодно-климатическому режиму. Естественный — и абсолютно обоснованный — интерес обычного человека (неспециалиста) к текущему состоянию климатической системы нашей планеты в целом и в отдельных географических регионах, к причинам, которые привели к столь значительным ее изменениям в последние десятилетия, и, главное, к прогнозам ее изменений в ближайшем будущем удовлетворяется в основном средствами массовой информации. Повышенный интерес к этой теме порождает, увы, появление наряду со

взвешенными, научно обоснованными мнениями специалистов, изрядного числа некомпетентных, зачастую недобросовестных публикаций, «объясняющих» эволюцию земного климата причинами, далекими от действительности, но непременно поражающими воображение читателя. Желание хотя бы в какой-то мере нейтрализовать вред, наносимый подобными публикациями, и явилось вторым стимулом для написания этой брошюры.

Авторы заранее благодарны читателям за интерес, проявленный к одной из важнейших проблем современного мира — проблеме формирования современного климата. Мы от всей души желаем, чтобы чтение этой брошюры способствовало не только расширению ваших знаний о климате, но и формированию активной позиции в вопросах его защиты.

Авторы признательны сотруднику Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Б. Е. Шнеерову, ознакомившемуся с рукописью и сделавшему ряд конструктивных замечаний, позволивших заметно улучшить ее качество. Мы выражаем благодарность Секретариату Межправительственной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК), любезно предоставившему право использовать

иллюстрации из отчетов МГЭИК (рис. 2, 6 и 8) в настоящем издании. Отдельная наша благодарность Г. В. Грузе и Э. Я. Раньковой — авторам карты (рис. 7) прироста среднего-

довой температуры приземного воздуха на территории России.

Брошюра написана по заказу Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ. ЧТО ТАКОЕ КЛИМАТ?

Вероятно, каждому из нас доводилось, вольно или невольно, нарушать свои планы из-за сиюминутных капризов погоды, и потому лишь немногие согласятся со строкой популярной песни, будто «у природы нет плохой погоды», а ответ на вопрос, какой будет погода сегодня и завтра, интересен всем.

Вплоть до последнего времени погода воспринималась людьми как данность свыше, не зависящая от их воли и вынуждающая к себе приспособляться. Лишь недавно, во многом благодаря настоящему прорыву в области компьютерных технологий, перед человечеством открылись возможности всесторонне изучать процессы формирования погоды и климата, причины их изменений, а также в какой-то степени влиять на эти процессы.

Накопленная в ходе исследований информация свидетельствует о том, что климат меняется; более того, темпы его изменения в XX веке были беспрецедентно высоки. Последнее обстоятельство стало предметом серьезной обеспокоенности, и сегодня о климате много пишут и говорят. Однако с сожалением приходится констатировать явное несоответствие между важностью проблемы (ведь речь идет о «здоровье» среды нашего обитания!) и той легковесностью суждений, а порой некомпетентностью, кото-

рыми при обсуждении ее грешат многие, в том числе и весьма солидные, издания и телеканалы.

Надеемся, это издание поможет заинтересованному читателю «из первых рук» (его авторы многие годы имеют непосредственное отношение к исследованиям в области климатологии, метеорологии, физики и химии атмосферы) получить ответы на традиционные вопросы о климате и ознакомиться с современными взглядами специалистов на климат и его эволюцию.

В обиходе понятия «погода» и «климат» зачастую отождествляют, а это не совсем верно. Чуть вольно перефразируя академика А. С. Мониina, можно определить *климат* как *совокупность всех погодных условий, наблюдавшихся на конкретной территории за некоторый продолжительный промежуток времени*. При этом такой «конкретной территорией» может быть как отдельная область (скажем, Курская), так и Западная Сибирь, Южная Америка или весь земной шар.

Даже школьник знает: холодно на севере и зимой, жарко на юге и летом, в тропиках — зной и ливни, а в полярных зонах круглый год — снег и льды. Поэтому, обсуждая климат относительно небольшого в глобальном масштабе региона, мы можем полу-

чить достаточно полное представление о его характерных чертах и особенностях. Однако описание материкового и тем более глобального климата неизбежно чревато утратой многих нюансов (например, среднегодовая средняя по земному шару температура воздуха у поверхности, рассчитанная с учетом, в частности, антарктической и тропической температуры, сродни средней температуре по больнице) и пригодно только для изучения самых общих закономерностей климата нашей планеты.

Вышеприведенное определение климата содержит довольно расплывчатое указание на длительность периода наблюдений. Действительно, какой промежуток времени следует считать «продолжительным» — месяцы, годы, десятилетия? Он не должен быть чересчур коротким, поскольку тогда изменения климата придется признать и смену времен года, и аномально жаркий (или холодный) год, даже если многие предшествующие ему и последующие годы были близки к норме. Однако климат характеризует некоторое среднее состояние природной среды в данной местности, а значит, это среднее состояние не должно заметно меняться от года к году. С другой стороны, использование достаточно длительного промежутка времени (например, столетия) тоже вряд ли возможно хотя бы из-за отсутствия разветвленной сети станций, производивших по всему миру каждодневные измерения в течение такого срока. Следовательно, оптимальный выбор — где-то посередине.

Согласно рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО), оптимальным полагается период продолжительностью 30 лет, а со-

временным состоянием климата считается его среднее состояние за 1961—1990 годы. Несомненно, выбор промежутка времени несет в себе элемент произвола, но почему именно 30 лет? Начиная с Международного геофизического года, проводившегося под эгидой ООН в 1957 году, мировое сообщество предпринимало успешные шаги по созданию и развитию всемирной системы контроля за окружающей средой, включавшей регулярный мониторинг метеорологических элементов — температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, количества осадков и т. д. Таким образом, к моменту принятия вышеуказанной рекомендации ВМО уже существовал достаточно полный банк метеорологических данных, охватывавший приблизительно тридцатилетний период измерений.

С наступлением компьютерной эры и налаживанием качественного мониторинга, в особенности с привлечением спутниковых систем, объем данных измерений стал увеличиваться почти лавинообразно. Специфика работы с большими объемами информации (а в климатологии ситуация именно такова) требует применения, как правило, статистических методов для их обработки. Поэтому нелишне упомянуть, что, говоря о средних величинах, здесь и далее мы имеем в виду значения величин, вычисленные в соответствии с правилами и требованиями математической статистики.

Климат каждой территории определяется, прежде всего, средней высотой Солнца днем над горизонтом: на севере оно ниже, на юге — выше (на это обратили внимание еще в Древней Греции, и само слово *климат* происходит от греческого *klima* — наклон

Солнца (БСЭ, 3-е изд., т. 12, с. 305))¹. Однако климат также зависит и от состояния нашей природной среды, обычно именуемой климатической системой Земли.

Климатическая система — не только атмосфера, где, как многие считают, весь климат и «содержится». Нет, она включает в себя и гидросферу (все океаны, моря, озера, реки), и криосферу (поверхность суши, снег, морской и горный лед, а также лед, содержащийся в материковых льдах Гренландии, Антарктиды и полярных островов), и, наконец, биосферу, объединяющую все виды живого. Все эти составляющие климатической системы находятся в тесной связи друг с другом² и обмениваются энергией и массой (классическим примером такого обмена служит круговорот воды в природе). Составляющие климатической системы существенно различаются по массе и теплоемкости. Так, массы атмосферы, слоя грунта толщиной 10 м и поверхностного слоя океана толщиной 240 м находятся в пропорции 1 : 5 : 15, а их суммарные теплоемкости (тепловая инерция) соотносятся как 1 : 11 : 70. Океаны, моря и материковые льды образуют медленно меняющиеся составляющие климатической системы, а атмосфера, поверхность суши и морские льды с относительно малой массой и низкой теплоемкостью находятся в ряду быстро меняющихся составляющих системы.

В климатической системе Земли существуют две основные периодич-

ности: суточная (вращение Земли вокруг своей оси) и сезонная (вращение Земли вокруг Солнца), и эти периодичности формируют распределения основных климатических характеристик в пространстве и во времени. Для упорядочения и систематизации этих характеристик их часто усредняют по однородным регионам и интервалам времени, обычно связанным либо с указанными периодичностями (средне-суточные, среднегодовые значения), либо с частями этих периодов (средние часовые, среднемесячные и среднесезонные значения). Среди перечисленных особо выделим месячное осреднение как в некотором смысле естественное: анализ периодичности флуктуаций температуры нижней атмосферы показал, что их довольно четко можно разделить на флуктуации с периодами меньше месяца (синоптические) и больше месяца (до полугода) (Монин, 1982). Этот факт «узаконивает» широко распространенное месячное осреднение почти всех метеорологических и климатических величин в публикациях и архивах данных измерений.

Физических величин, характеризующих текущее состояние климатической системы, насчитывается несколько десятков. Лишь немногие из них — температура воздуха (а в купальный сезон и воды в ближайшем водоеме), скорость ветра и интенсивность осадков — представляют повседневный интерес для обычного здорового человека. Но для специалистов, и си-

¹ Краткий список публикаций, либо процитированных ниже, либо позволяющих читателю ознакомиться с важными, с нашей точки зрения, аспектами формирования и изменений климата Земли, приведен в конце настоящего издания.

² Здесь уместно подчеркнуть, что предметом нашего рассказа является проблема формирования климата Земли и его изменений. Именно поэтому другая важная проблема — защита природной среды от антропогенного воздействия — ниже нигде подробно не обсуждается, хотя связь между загрязнением окружающей среды и климатом, конечно, существует.

ноптиков, и климатологов, не менее важны положение областей низкого и высокого атмосферного давления, наличие или отсутствие облачности, форма и толщина облаков, отражательная способность (альбедо) поверхности, температура и уровень солености морской воды и многие другие характеристики атмосферы. Все они количественно описывают отдельные элементы климатической системы и/или позволяют оценить степень взаимодействия между ними. Именно на таких оценках строятся современные сложные физико-математические модели, позволяющие проводить разнообразные исследования климата Земли, включая и предсказания его вероятных изменений.

Здесь под изменениями климата подразумевается устойчивая тенденция к изменению какой-либо из вышеприведенных характеристик за длительный промежуток времени. Например, повышение среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха на $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ с начала XX века до настоящего времени дало основание говорить о глобальном потеплении, повлекшем попутно измене-

ния и других климатических характеристик. О происходящих в то же время относительно кратковременных изменениях будем говорить как о колебаниях климата. К этой категории можно отнести и сезонные изменения климатических характеристик, и происходящую раз в два-три года (квазидвухлетнюю) смену направления переноса воздуха в экваториальной стратосфере (на высотах 15—50 км) с запада на восток и обратно, и периодическую перестройку температуры поверхности океана и циркуляции нижней тропосферы (на высотах до 15—17 км) в тропической зоне Тихого и Индийского океанов (явление Эль-Ниньо). Влияние на текущее состояние климата могут оказывать и некоторые неперiodические явления природы, в частности крупные извержения вулканов, сопровождающиеся забросом значительной массы газов и аэрозолей (пепла) в стратосферу. Как показывают результаты измерений, продолжительность их воздействия составляет от одного года до трех лет.

Напрашивается вопрос: что, как и в какой мере сказывается на климате Земли? Ответ на него содержится в следующем разделе.

ФАКТОРЫ И ПРОЦЕССЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ КЛИМАТ

Как уже знает читатель, климат местности прямо зависит от того, сколько солнечной энергии («солнечных лучей») достигает земной поверхности. В соответствии с законами физики Земля как «серое» тело поглощает энергию и излучает ее, и эти процессы определяют температуру подстилающей поверхности, а также земной атмосферы. Напомним, что поглощает Земля солнечное, часто именуемое коротковолновым, излучение с длиной волны λ , не превышающей 4 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), а излучает на больших длинах волн. В среднем на каждый квадратный метр приходится поток солнечной энергии, равный 1370 Вт — эту величину называют солнечной постоянной. Если же мысленно построить сферу, проходящую по верхней границе атмосферы, то на 1 м^2 ее поверхности будет попадать приблизительно 342 Вт солнечной энергии. Примерно 31 % этого потока отражается атмосферой и подстилающей поверхностью, и лишь около половины (в среднем примерно 170 Вт/м^2 , меньше у полюсов, больше в тропиках) достигает поверхности Земли и поглощается ею (остальные 19 % поглощаются в атмосфере, главным образом, облаками).

В свою очередь, земная поверхность испускает в атмосферу длинноволновое (тепловое) излучение. Если

бы все это тепловое излучение беспрепятственно покидало атмосферу, то среднегодовая среднеглобальная температура воздуха у поверхности Земли была бы равна -19°C , однако в действительности она составляет 14°C ! Комфортную добавку в 33°C обеспечивает нам способность атмосферы, точнее, некоторых ее газов и облаков задерживать и поглощать уходящую длинноволновую радиацию (парниковый эффект). В свете сказанного обратим особое внимание на двоякую роль облаков в радиационном режиме системы Земля—атмосфера: с одной стороны, они сокращают приток солнечной радиации, отражая ее, с другой, благодаря поглощению ими солнечного и, особенно, длинноволнового излучения, происходит столь существенный нагрев атмосферы. Преобладание одного из этих процессов определяется формой облаков, их плотностью и высотой расположения.

Несложно сообразить, что в среднем за год количество энергии, полученной и отданной системой Земля—атмосфера, примерно одинаково, ведь в противном случае среднегодовая среднеглобальная температура воздуха у подстилающей поверхности имела бы сохраняющуюся тысячелетиями тенденцию либо к повышению, либо к понижению. Однако с началом XX века

приборы стали фиксировать устойчивое повышение средней температуры от десятилетия к десятилетию...

Какие же причины способны вызывать нарушение сложившегося веками баланса? Во-первых, *изменение потока солнечного излучения*. Следить за таким изменением на верхней границе атмосферы очень трудно. Это стало возможным только в последние 20—30 лет с появлением искусственных спутников Земли, которые зафиксировали лишь незначительные колебания солнечной постоянной в ходе 11-летнего цикла солнечной активности с амплитудой 0,1 %. Косвенные данные указывают на значительно большие ее изменения (десятичные доли процента) в XVII веке.

Во-вторых, к нарушению баланса может привести *изменение альбедо* — соотношения между отраженной и приходящей солнечной радиацией. Как известно, чем светлее поверхность, тем лучше она отражает падающий на нее свет. Изменения альбедо подстилающей поверхности происходят постоянно и в основном в результате вмешательства человека: вырубки лесов, распашки земель, создания водохранилищ и т. п., но имеют они локальный или, в крайнем случае, региональный масштаб. Высокая изменчивость облачности в каждой конкретной местности серьезно осложняет вычисление альбедо облаков. Однако анализ спутниковых данных показывает, что в среднем по всему земному шару и количество облаков, и их радиационные свойства меняются мало. Следовательно, изменения альбедо могут немного исказить привычное распределение притока солнечной радиации в различных географических зонах, но не отразятся на общем количестве солнечной энергии, поглощаемой системой Земля—атмосфера.

Наконец, в-третьих, причиной нарушения баланса может стать *изменение потока уходящей длинноволновой радиации*. В условиях упомянутого относительного постоянства количества облаков в глобальном масштабе основной вклад в изменение потока теплового излучения вносят поглощающие и излучающие его парниковые газы. Их перечень хорошо известен, он включает водяной пар H_2O , двуокись углерода (углекислый газ) CO_2 , метан CH_4 , закись азота N_2O , озон O_3 и ряд других газов (рис. 1).

Водяной пар по праву считается главным парниковым газом, поскольку поглощает длинноволновую радиацию почти на всех частотах инфракрасного излучения ($\lambda > 0,7$ мкм) и делает это много интенсивнее прочих парниковых газов. Лишь в «окне прозрачности» ($8 \text{ мкм} < \lambda < 13 \text{ мкм}$) поглощение водя-

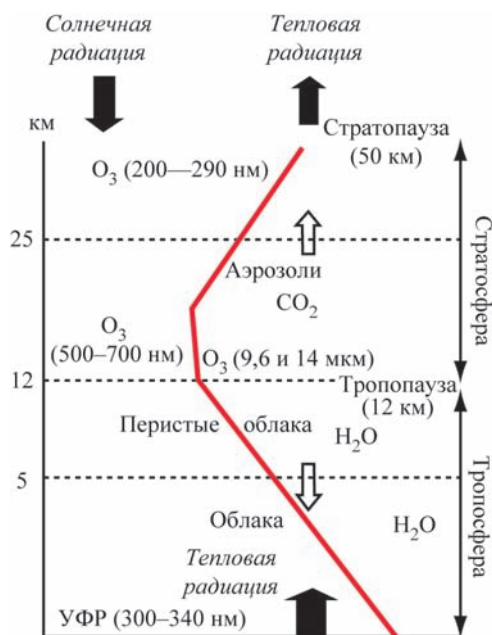


Рис. 1. Схема строения и состава атмосферы. Кривая — вертикальный профиль температуры стандартной атмосферы (средних широт).

ным паром минимально. В связи с этим главным критерием значимости всякого другого парникового газа является его способность эффективно поглощать инфракрасное излучение внутри «окна прозрачности» или вблизи его границ. В такой иерархии углекислый газ занимает безоговорочное второе место. Его главная полоса поглощения приходится на длину волны 15 мкм. Интересно, что на этой же длине волны находится и максимум интенсивности излучения поверхности Земли при вышеуказанной среднегодовой среднеглобальной температуре поверхности 14 °С. Это обстоятельство заметно повышает роль CO_2 в парниковом эффекте.

Меньший, но отнюдь не пренебрежимо малый вклад в парниковый эффект вносят метан CH_4 , закись азота N_2O , озон O_3 и большая группа галогенуглеводородов (фреонов, галонов и др.). Последние появились в атмосфере в середине XX века в результате их интенсивного производства и использования в холодильных установках, кондиционерах, аэрозольных распылителях, при производстве алюминия, пожаротушении и пр. Сегодня содержание галогенуглеводородов в воздухе сравнительно невелико, и, более того, их применение начиная с 1990-х годов регламентируется Монреальским протоколом. Однако в силу химической пассивности галогенуглеводородов заброшенные ранее в атмосферу они останутся там еще на годы и десятилетия. Суммарный вклад галогенуглеводородов в парниковый эффект относительно невелик — он соизмерим с вкладом N_2O и озона, но заметно уступает вкладу метана.

На рис. 2 приведены результаты измерений концентрации CO_2 , CH_4 и

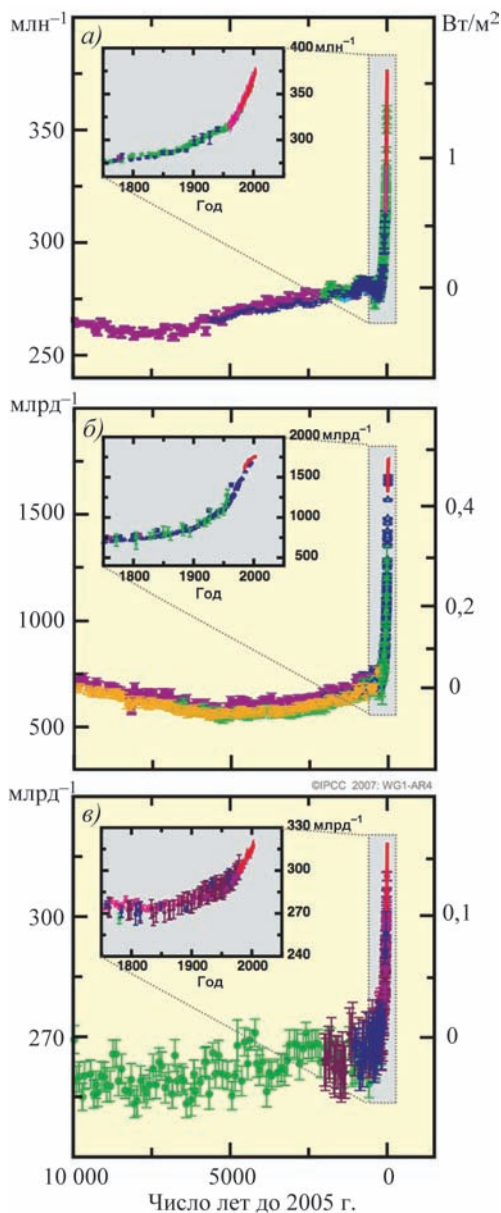


Рис. 2. Изменение концентрации (млн^{-1} , млрд^{-1}) углекислого газа CO_2 (а), метана CH_4 (б) и закиси азота N_2O (в) в нижней атмосфере за последние 10 тысяч лет (слева) и начиная с 1750 года (на врезках), а также обусловленное этими газами радиационное воздействие (Вт/м^2) (справа).

Результатам измерения в атмосфере соответствует красная кривая, другими цветами показаны результаты измерений в ледовых и донных отложениях.

N_2O в нижней атмосфере за несколько последних столетий. С середины XX века осуществляются их прямые измерения, а значения концентраций за предыдущие годы и их «возраст» измерены в пузырьках воздуха, находящихся в пробах льда, извлеченных с разных глубин ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии. Аналогичные сведения получают в результате анализа раковин, содержащихся в донных отложениях некоторых районов Мирового океана. Для всех парниковых газов характерно резкое ускорение роста их концентрации с началом промышленной эры, особенно во второй половине XX века.

В последние десятилетия одновременно с увеличением загрязнения воздуха вследствие выбросов автотранспорта и сжигания ископаемого топлива возрастает также и содержание озона в тропосфере (нижнем слое атмосферы до уровня 10—16 км) в промышленных регионах Северного полушария. Его доля в общем содержании озона в атмосфере не превосходит 10—15 %, но полоса поглощения озона приходится на середину «окна прозрачности» ($\lambda = 9,6$ мкм), и потому его вклад в общий радиационный эффект значителен.

Заметное влияние на радиационный режим атмосферы оказывают не только облака, состоящие из жидких капель и ледяных кристаллов, но и твердые, жидкие и обводненные частицы минеральной пыли, морских солей, сажи, органических соединений и пр. Эти частицы могут рассеивать и погло-

щать фотоны коротковолновой и длинноволновой радиации. При этом поток излучения ослабляется, и может образоваться слой воздуха, разогретый, например, большим количеством находящихся в нем сажевых частиц.

О парниковом эффекте пишут много, но часто его смысл искажается. Суть его — в поглощении атмосферой длинноволновой радиации, испускаемой нагретой подстилающей поверхностью. Поглощенная парниковым газом энергия длинноволнового излучения приводит к повышению температуры воздуха, содержащего парниковый газ. Увеличенное содержание парникового газа и это повышение температуры вызывают возрастание потока длинноволнового излучения вниз, к подстилающей поверхности, и вверх, к верхней границе атмосферы. При нагревании воздуха его влажность возрастает, а водяной пар — самый сильный парниковый газ. Поглощение им длинноволнового излучения приводит к резкому повышению температуры воздуха. Так несколько положительных обратных связей¹ многократно усиливают парниковый эффект и делают его самым значительным среди всех других антропогенных климатоформирующих факторов.

Упомянем также о другом таком факторе — влиянии атмосферных аэрозолей. Значительная их часть состоит из частиц, содержащих серу. Они образуются обычно во влажной атмосфере из газов, присутствующих в выбросах электростанций и металлургических заводов, сжигающих ископаемое топ-

¹ Здесь под положительной обратной связью понимается ситуация, когда проявление одного климатоформирующего фактора ведет к активизации других факторов и их совместное воздействие оказывается в результате более сильным, чем воздействие, обусловленное одним первоначальным фактором. Отрицательная обратная связь, напротив, выражается в том, что активизация других факторов ослабляет влияние первоначального фактора.

ливо — уголь, нефть, мазут. За несколько дней или недель эти аэрозоли проникают в облачные частицы и выпадают на Землю с осадками. За это время они не успевают далеко удалиться от своих источников, расположенных в промышленных и населенных регионах в основном в умеренных и высоких широтах Северного полушария. Другую часть аэрозолей составляют минеральные частицы и частицы морской соли, попадающие в атмосферу с поверхности суши и океана. Аэрозоли (кроме сажи) рассеивают и ослабляют потоки излучения Солнца и таким образом производят «антипарниковый» эффект — второй по значимости в списке климатоформирующих глобальных факторов.

Для количественных оценок значимости разных климатоформирующих факторов вводят специальную характеристику — *радиационное воздействие* (форсинг). Радиационным воздействием называют совокупное изменение потоков коротковолновой и длинноволновой радиации (их разность) за рассматриваемый период времени на некотором уровне атмосферы — обычно на верхней границе тропосферы (тропопаузе) или на условной верхней границе атмосферы. Подробнее о радиационном форсинге см. работу Кароля, Киселева (2003).

Радиационное воздействие (форсинг) оценивает относительную эффективность или реальный вклад¹ того или иного парникового газа, аэрозоля, любого природного феномена в изменение радиационного режима атмосферы

за заданный промежуток времени. Частота за такой промежуток принимают интервал от начала «индустриальной революции» (середины XVIII или XIX веков) до настоящего времени. Относительную радиационную эффективность парникового газа определяют величиной радиационного воздействия (форсинга) при условном увеличении содержания этого газа в атмосфере или ее части на единицу измерения (например, 1 кг). Наибольший реальный (абсолютный) вклад в современное антропогенное глобальное потепление вносят углекислый газ (примерно 55—65 %) и метан (15—20 %). В то же время углекислый газ имеет наименьшую относительную эффективность, а наибольшая приходится на галогенуглеводороды. Такое, на первый взгляд, парадоксальное положение связано с тем, что концентрация CO₂ в атмосферном воздухе превосходит концентрацию различных галогенуглеводородов в миллионы и миллиарды раз.

Таким образом, изменения климатической системы во времени и в пространстве происходят при совместном действии антропогенных (т. е. возникших в результате различных аспектов деятельности человека) и естественных климатоформирующих факторов.

На рис. 3 представлены графики изменений с широтой потоков солнечного излучения, поглощенного системой Земля—атмосфера, потоков длинноволновой, тепловой радиации, уходящей в космос с верхней границы атмосферы, и разности этих потоков излучения, называемой радиационным

¹ Относительная эффективность показывает, например, во сколько раз сильнее (или слабее) воздействует на радиационный режим атмосферы *одна молекула* (или 1 кг) метана по сравнению с *одной молекулой* (1 кг) углекислого газа. Реальный вклад оценивает, во сколько раз сильнее (или слабее) воздействует на радиационный режим *вся масса* атмосферного метана по сравнению со *всей массой* атмосферного углекислого газа.

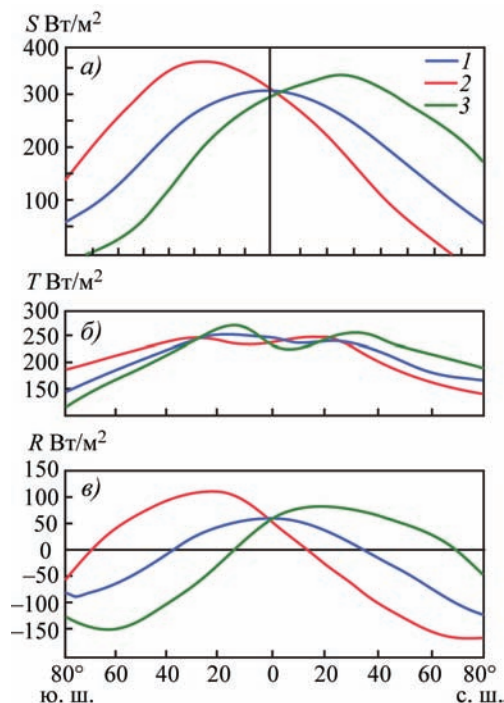


Рис. 3. Изменения с широтой среднезональной радиации Солнца, поглощенной системой Земля—атмосфера (а), инфракрасной радиации, испускаемой этой системой (б), и радиационного баланса (в).

1 — среднегодовые значения, 2 — декабрь—февраль, 3 — июнь—август.

балансом этой системы. Из рисунка видно, что в зоне примерно 40° с. ш. — 40° ю. ш. радиационный баланс в среднем положителен, т. е. там приход энергии от Солнца выше, чем ее уход за счет длинноволнового излучения, а вне этой зоны среднегодовой радиационный баланс отрицателен. В зонах 15—70° обоих полушарий радиационный баланс меняет знак с плюса летом на минус зимой, а в полярных зонах, выше 70°, баланс всегда отрицательный.

Такая неоднородность распределения радиационного баланса порождает перенос тепла (энергии) от тро-

пиков к полюсам (меридиональная циркуляция), способствующий его пространственному выравниванию. Перенос тепла производится движениями воздуха в атмосфере и воды в океанах, главным образом в Атлантическом и Тихом. При этом вклады атмосферы и океанов в перенос примерно одинаковы. Одновременно на движущиеся массы воздуха и воды действует сила Кориолиса, обусловленная вращением Земли, которая направляет эти массы вдоль кругов широты, образуя зональные потоки (зональную циркуляцию) воздуха с запада на восток в тропосфере вне тропиков.

Конечно же, перенос воздуха в атмосфере происходит не только вдоль параллелей и меридианов. В нижней части тропической тропосферы (до уровня 8—12 км) существует система пассатов — постоянных ветров (их название на английском (trade winds — «торговые» ветры) говорит само за себя), дующих с северо-востока на юго-запад в Северном полушарии и с юго-востока на северо-запад в Южном. Действующие также в тропической зоне муссоны особенно развиты над Южной Азией. Они представляют собой устойчивые сезонные ветры, меняющие направление на противоположное при переходе от зимы к лету или обратно. В зональных потоках вне тропиков существуют так называемые планетарные волны (волны Росби). Длина и амплитуда этих волн в атмосфере достигают нескольких тысяч километров, они образуются и разрушаются за несколько суток (иногда недель). Картину дополняют и усложняют ветры «местного значения», такие, например, как мистраль — северный или северо-западный холодный ветер, дующий с гор в Южной Франции, или байкальский баргузин.

Вообще «географические» факторы зачастую формируют региональный и местный климат. На распределение температуры в пространстве, ее сезонные изменения и, особенно, на осадки сильно влияет земной рельеф, в первую очередь расположение материков и океанов, крупные горные системы и т. д. Например, воздушная масса, несущая много влаги, испарившейся с поверхности океана, выносится зональным потоком на материк и поднимается вдоль склона горного хребта. Водяной пар в этой массе по мере ее подъема охлаждается, конденсируется и выпадает в виде осадков. По мере удаления от океана (и морей) осадков выпадает меньше, климат становится более континентальным, сухим с холодной зимой и жарким летом.

В итоге «работы» всех этих естественных факторов складывается наблюдаемая картина климата. Антропогенные факторы, вызывающие изменения климата, воздействуют в основном на описанный выше радиационный режим атмосферы или на режим испарения с подстилающей поверхности.

Эти многочисленные естественные и антропогенные факторы, формирующие глобальный и региональный климат, образуют разветвленную систему взаимодействий, петли положительных и отрицательных обратных связей. Одной из самых сильных таких связей является связь температура—альbedo: при повышении температуры нижней атмосферы тают снега и льды, в результате чего альbedo уменьшается, а значит, возрастает и доля солнечного излучения, поглощенного поверх-

ностью, которая нагревается, что приводит к повышению температуры нижней атмосферы, образуя, таким образом, положительную обратную связь. Эта связь играет очень важную роль в современном глобальном потеплении климата.

Некоторые обратные связи в климатических факторах при разных условиях ведут себя по-разному. Так, потепление нижней атмосферы и увеличение ее влагосодержания приводят к увеличению количества облаков (балла облачности). Если это плотная (слоистая) облачность, она отражает солнечную радиацию, подстилаящая поверхность получает меньше энергии и соответственно охлаждается — образуется отрицательная обратная связь. Однако если увеличивается количество облаков верхнего яруса, которые практически пропускают солнечную радиацию, но хорошо поглощают и переизлучают вниз и вверх тепловую, длинноволновую радиацию, поток суммарного излучения к подстилающей поверхности возрастает, она разогревается и получается положительная обратная связь.

Перечисленные климатические факторы, а также ряд других, оставшихся за рамками нашего изложения, вместе с их взаимосвязями учитываются в климатических моделях и прогнозах изменений климата. Это стало возможным благодаря организации комплекса наблюдений за климатом, проводимых с помощью разнообразных измерительных средств. Об этом наш дальнейший рассказ.

КАК НАБЛЮДАЮТ ЗА КЛИМАТОМ

Климатология, как и другие связанные с ней научные дисциплины, находится в полной зависимости от количества и качества наблюдений за климатом нашей планеты. Именно по результатам измерений мы судим о климате прошлого и настоящего в разных уголках земного шара, о его реальных изменениях, строим предположения, каким он станет в будущем — ближайшем и отдаленном. При этом с каждым годом нам требуется все больший объем информации. С одной стороны, это связано с тем, что чем продолжительнее ряд наблюдений, тем надежнее статистические оценки и выводы, полученные при обработке такого ряда. С другой стороны, для описания текущего состояния климата (и для большинства прочих, в том числе модельных, исследований в этой области) необходима точная оперативная информация о возможно большем числе климатических параметров. Математическое моделирование — едва ли не главное направление в современных исследованиях климата. Постоянное совершенствование моделей обычно сопряжено с увеличением их детализации, а следовательно, возрастает потребность в более подробных сведениях о значениях метеорологических и климатических элементов.

Измерения таких элементов на более или менее широкой сети наземных

станций начались около 150 лет назад. Уже почти столетие с этой целью используются аэростаты и радиозонды, а спутниковые данные поступают с 1970-х годов, причем согласие данных, полученных с разных спутников, до сих пор не вполне удовлетворительно. Архивы климатических элементов формируются путем сбора, систематизации, проверки (контроля) и обработки данных, полученных из вышеперечисленных источников. Эти данные часто представляются в виде так называемых ре-анализов, когда результаты измерений в отдельных географических точках включаются в трехмерную модель общей циркуляции атмосферы с целью получить проинтерполированные и «сглаженные» моделью во времени и в пространстве метеорологические величины в узлах географической сетки и осредненные по времени. Эти данные, разнесенные по времени и регионам, образуют временные ряды элементов климата — предмет изучения климатологов. Такие ряды используются во многих сферах — научных, хозяйственных, социальных, в природопользовании, и этим занимается специальная наука — прикладная климатология.

Приземные наблюдения проводятся на обширной сети стационарных метеорологических станций. Сеть постоянно действующих метеорологи-

ческих станций оснащена по возможности унифицированными приборами для измерения основных метеорологических величин (температуры воздуха и почвы, влажности воздуха, атмосферного давления, скорости ветра, количества осадков), а также наблюдения за явлениями погоды. Работает сеть по единой методике измерений.

Такие сети начали создаваться в XIX веке. В России к 1872 году усилиями тогдашнего директора Главной физической обсерватории Г. И. Вильда была организована сеть из 73 станций. До этого времени наблюдения за погодой велись лишь отдельными энтузиастами, чаще всего учителями гимназий и сельских школ, священниками. В настоящее время всемирная метеорологическая сеть включает многие тысячи станций.

В России в настоящее время насчитывается 1628 пунктов наблюдений. Они составляют Государственную наблюдательную сеть. Именно эта сеть поставляет основную часть первичной метеорологической информации — основы для изучения климата у поверхности Земли. Внутри Государственной наблюдательной сети выделяют сети с рядами выборочных станций: реперную сеть (458 станций), опорную климатическую сеть (235 станций) и глобальную сеть наблюдений за климатом (135 станций). Реперная сеть состоит из лучших станций, имеющих наиболее длинные и однородные ряды данных наблюдений и являющихся репрезентативными, т. е. такими, на которых отсутствуют сильно выраженные и своеобразные местные влияния. Данные наблюдений на таких станциях дают представление об общем положении в большом районе. Реперные станции не подлежат закрытию и переносу. На

большей части российских станций (253 станции) длина рядов данных наблюдений составляет более 50 лет, а на 44 станциях — превышает 100 лет. Опорная сеть — это набор минимального числа реперных станций, данные наблюдений на которых позволяют определить надежные климатические нормы и составить общее представление о климате страны и его изменениях.

Данные, полученные на глобальной сети наблюдений за климатом, подлежат международному обмену и помещаются в Интернете. Они используются при исследованиях глобального климата и его изменений. В глобальной сети наблюдений за климатом станции распределены по территории сравнительно равномерно, чего нельзя сказать о всемирной метеорологической сети станций. Большинство из них сосредоточено на густонаселенных территориях высокоразвитых стран. Небольшое число станций в полярных, горных и океанических районах не обеспечивает возрастающие потребности метеорологической науки и практики, поэтому существует необходимость в разработке других способов получения информации из этих районов.

Многие читатели наверняка видели метеорологические площадки. В центральной части площадки располагается так называемая психометрическая будка, в которой на высоте 2 м находятся термометры для измерения температуры воздуха и психрометр для измерения влажности (а также самописцы — термограф и гигрограф). Над площадкой, на высоте до 10 м, располагается флюгер и (или) анеморумбограф для измерения скорости и направления ветра. Осадки собираются в ведро с защитой от выдувания и измеряются осадкомером. На столбике устанавли-

вается самописец осадков — плувиограф в белом цилиндрическом корпусе. На небольшой площадке с взрыхленной поверхностью помещаются термометры для измерения температуры почвы.

До 1936 года основные наблюдения проводились три раза в сутки (в 7, 13, 21 ч по местному солнечному времени (времени данного часового пояса)), а в период с 1936 по 1966 год — четыре раза в сутки (в 0, 7, 13, 19 ч). Сегодня такие наблюдения осуществляются восемь раз в сутки в сроки, кратные трем (0, 3, 6, 9 ч и т. д. по московскому декретному времени). Наблюдатель выходит на площадку и снимает показания термометров, фиксирует скорость и направление ветра по флюгеру (используется также анеморумбограф — самописец, показания которого снимаются с экрана внутри помещения метеостанции) и определяет визуально форму и количество облаков, дальность видимости, а также отмечает характер погоды и атмосферные явления (туман, грозу, шквал, метель, пыльную бурю и др.), если они возникли. Количество осадков измеряют реже, всего два раза в сутки. Для этого, заменив дождемерное ведро, переливают собранные осадки в мерный стакан в помещении.

Состояние площадки и приборов на ней, правильность наблюдений и их записи выборочно, время от времени, проверяются инспекторами в методическом отделе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Здесь же проходят проверку метеорологические приборы и разрабатываются методические указания (Наставления гидрометеорологическим станциям и постам по производству наблюдений).

Дальнейшее совершенствование измерительной метеорологической тех-

ники идет по пути создания автоматических измерителей метеорологических элементов, объединенных в одном комплексном приборе. Такие станции уже работают во многих труднодоступных пунктах Российской Федерации без непосредственного участия человека. В развитых странах на метеостанциях и в крупных аэропортах используются автоматические приборы для измерения всех метеорологических элементов.

Результаты ежедневных метеорологических наблюдений на станциях кодируются и передаются во Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ — МЦД) в городе Обнинске под Москвой. Часть данных публикуется в метеорологических ежемесячниках. Аналогичные ежемесячники и ежегодники издаются и по зарубежной территории. В последнее время метеорологические данные мировой наблюдательной сети станций помещаются в Интернете. При использовании этих материалов следует учитывать различия в сроках и единицах измерения метеоэлементов в разных странах. Так, атмосферное давление измеряется в гектопаскалях, миллиметрах ртутного столба или дюймах, температура — в градусах Цельсия или Фаренгейта и т. д. Даже долгота станций не во всех странах определяется одинаково: встречаются отсчеты долготы не от гринвичского меридиана, а от Парижа и Мадрида.

В программу работ ряда метеорологических станций входят актинометрические наблюдения (наблюдения за лучистой энергией Солнца). В России такие наблюдения проводятся сейчас на 186 станциях. В Главную геофизи-

ческую обсерваторию как в Мировой центр сбора актинометрических данных поступает информация о солнечной радиации с мировой актинометрической сети станций.

Система аэрологических наблюдений, в задачу которой входит вертикальное зондирование атмосферы (измерения на разных высотах), включает ряд пунктов радиозондирования. Радиозонд был изобретен в 1920-х годах сотрудником Главной геофизической обсерватории П. А. Молчановым, и с этого времени началось создание сети аэрологических станций. По аэрологическим данным рассчитываются климатические характеристики для различных уровней атмосферы, которые затем используются при анализе климата приземного слоя воздуха и более высоких слоев.

Аэрологическая сеть России в доперестроечный период насчитывала более 150 станций, наблюдения на некоторых из них проводились четыре раза в сутки. Сейчас сеть сократилась (число станций немногим превышает 100), и измерения осуществляются один раз в сутки. Глобальная аэрологическая сеть наблюдений за климатом включает около 150 станций, сравнительно равномерно расположенных по территории Земли. В их число входят 10 аэрологических станций на территории РФ и два принадлежащих России пункта в Антарктике. К сожалению, эта сеть не в полной мере отвечает требованиям обнаружения климатических изменений в свободной атмосфере (т. е. выше пограничного слоя Земли), особенно на севере и северо-востоке России.

В некоторой степени этот пробел восполняют спутниковые наблюдения, которые позволяют ежедневно получать весьма обширную (миллиарды бит) качественно новую информацию. Главными достоинствами спутниковой информации являются ее глобальность и уникальность. Например, сведения о радиационных процессах на границе атмосферы могут быть получены только со спутников.

В оперативной спутниковой системе наблюдений за окружающей средой используются спутники двух видов: 1) спутники, движущиеся по низко расположенным (на высоте от 600 до 1500 км над Землей) орбитам, проходящим вблизи полюса; 2) геостационарные спутники¹.

Спутники первого вида над любым районом находятся примерно в одно и то же время. Аппаратура, установленная на этих спутниках, позволяет получать снимки достаточно большого разрешения: эти снимки охватывают на местности полосу около 1000 км, в некоторых случаях можно разглядеть даже движущуюся машину.

Геостационарные спутники позволяют обеспечивать почти непрерывные наблюдения за участками земного шара, находящимися в их зоне видимости. Однако снимки с этих спутников имеют гораздо меньшее разрешение (видны только крупные особенности земной поверхности).

Со спутников ведется телевизионная, инфракрасная, микроволновая, радарная и лазерная съемка. В результате может быть непосредственно получена информация об облачности, снежном и

¹ Геостационарные спутники выводятся на круговую стационарную орбиту в экваториальной плоскости с высотой около 36 тыс. км и вращаются с угловой скоростью Земли с запада на восток. С Земли такой спутник кажется неподвижно висящим над определенной точкой земной поверхности.

ледяном покрове, температуре, влажности, отражательной способности почвы, компонентах радиационного баланса Земли и атмосферы, эволюции туманов, дрейфе айсбергов. Новые косвенные методы позволяют по спутниковой информации определить многие производные характеристики, например осадки и ветер, вертикальное распределение температуры и влажности.

На рис. 4 изображена существовавшая в 2004 году система метеорологических спутников Земли, состоявшая из восьми геостационарных спутников (США, России, Индии, Японии, Китая и Европейского космического агентства и полярных спутников США и России).

В России к настоящему времени не осталось спутниковых систем, результаты измерений с которых можно было бы использовать для наблюдения за климатом. Решение этой задачи в основном осуществляется спутниками США и ЕС, но два российских геостационарных спутника готовятся к запуску.

Дополняет атмосферный мониторинг система радиолокационных наблюдений (наблюдения с помощью ме-

теорологических радиолокаторов), предоставляющая сведения о полях облачности и связанных с ними явлениях погоды (гроза, град, ливневые осадки и др.) в радиусе до 300 км. В нашей стране функционирует более 100 радиолокационных станций в окрестностях аэропортов и больших городов. По полной программе наблюдения проводятся восемь раз в сутки или чаще (при штормовых ситуациях). В результате обработки и анализа первичной радиолокационной информации получают карты облачности и явлений погоды, на которых отмечаются горизонтальные размеры облачных полей и вертикальная мощность облаков, направление и скорость перемещения облачных систем, грозные явления.

Важные сведения о состоянии нижнего слоя тропосферы позволяют получить также наблюдения, организуемые на различных высотных сооружениях (мачтах, вышках, башнях). Впервые такие наблюдения были организованы в 1908 году в Париже на Эйфелевой башне. В России одной из наиболее высоких является Останкинская телебашня в Москве (536 м), на которой метеорологические измерения производятся на восьми уровнях (от 15 до 503 м). Аналогичные наблюдения проводятся в Обнинске (высота башни 310 м), в Хабаровске, Иркутске и Новосибирске. На таких высотных сооружениях регистрируются температура, влажность воздуха, скорость и направление ветра.

В ряде стран получил распространение метод горизонтального зондирования атмосферы с помощью аэростатов (транзондов), переносимых ветром на одной заданной высоте. Научная аппаратура аэростатов состоит из приборов, позволяющих измерять

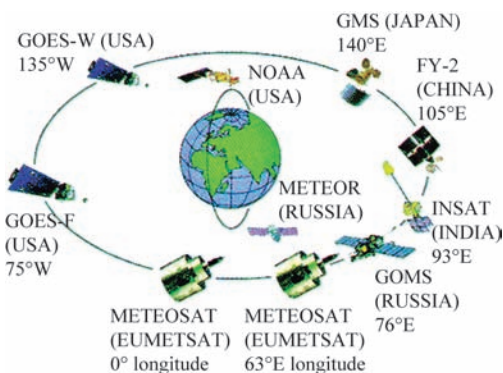


Рис. 4. Система метеорологических спутников Земли в 2004 году.

атмосферное давление, плотность и температуру воздуха, электрическое поле, содержание озона и других примесей. Важным достоинством транзондов является возможность с их помощью изучать направление и скорость воздушных течений. В США и Франции разработаны специальные программы массовых запусков аэростатов совместно с искусственными спутниками Земли.

Упомянем также о наблюдениях, ведущихся в океане с борта судов, а также с использованием дрейфующих буев-измерителей для мониторинга состояния Мирового океана и для долгосрочного прогноза погоды (международный проект ARGO, стартовавший в 2000 году).

Для изучения климата результаты всех видов метеорологических наблюдений обобщаются. Сначала вычисляются средние месячные и годовые значения метеорологических величин и подсчитывается число случаев различных атмосферных явлений. Данные наблюдений за многолетний период подвергаются климатологической (статистической) обработке. Рассчитываются средние многолетние значения метеорологических величин, характеристики их изменчивости и динамики (средние квадратические отклонения, корреляционные и спектральные функции и др.), составляются их одномерные и многомерные статистические распределения у поверхности Земли, в почве и на различных высотах в атмосфере. Эту информацию помещают в климатические и агроклиматические справочники. Такая обобщенная информация используется для исследования климата, его изменений и проверки моделей климата.

Систематические обобщения результатов радиолокационных и спут-

никовых наблюдений отсутствуют, несмотря на то что накоплен и хранится большой объем материалов наблюдений. Тем не менее выполнен ряд научных работ по данным этих наблюдений, например построены карты облачности по миру, ледовых полей в Арктике, полей осадков и др.

Обратимся теперь к мониторингу факторов, формирующих климат. Наблюдения за такими факторами и их анализ приобретают в настоящее время особое значение, так как их состояние и изменения определяют характер и время ожидаемых изменений климата атмосферы в целом, и в частности вблизи земной поверхности. Ранее мониторинг некоторых из наиболее важных факторов (содержания основных парниковых газов в атмосфере, температуры поверхности океана, радиационных свойств подстилающей поверхности) вообще не проводился. Наблюдения за солнечной радиацией и аэрозольной мутностью атмосферы проводились на ограниченном числе станций, их результаты мало использовались в климатических исследованиях. Время от времени предпринимались экспедиционные обследования материковых и горных ледников и лишь недавно начались измерения площади снежного покрова морских льдов в Арктике и Антарктике.

В последние десятилетия были созданы службы и системы измерений количественных характеристик основных климатоформирующих факторов, а также центры по сбору и анализу результатов. Международная сеть наземных станций по измерениям содержания парниковых газов в настоящее время включает в себя станции разного «класса» — от крупных обсерваторий до пунктов отбора проб приземного

воздуха в специальные сосуды с последующим измерением содержания в них парниковых газов (производимым централизованно в лабораториях и обсерваториях). На таких станциях, расположенных на разных широтах, но в основном на островах в океане и на побережьях материков, измерения производятся два-три раза в неделю или ежедневно. Их результаты часто осредняются по месячным и сезонным периодам, направляются в банки данных и публикуются в специальных отчетах (например, отчетах CMDL — Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory, США). На многих станциях измеряются также мутность атмосферы (количество аэрозолей), потоки радиации, общее содержание озона и других газов, влияющих на потоки радиации в атмосфере.

Измерения на наземной сети производятся с 1960—1970-х годов, и к настоящему времени образованы уже 40—50-летние ряды данных. С конца 1970-х и в 1980-е годы начаты измерения содержания озона в столбе атмосферы и концентраций ряда радиационно активных примесей почти во всей глобальной атмосфере с помощью различных дистанционных приборов, установленных на специальных спутниках. По сравнению с рядами данных наземных станций эти ряды данных короче, точность их обычно ниже, но зато получается почти глобальный охват всей поверхности Земли, и прежде всего океанов и полярных областей.

С помощью спутников измеряются также радиационные характеристики атмосферы и подстилающей поверхности Земли, и в частности альbedo, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации на разных уровнях атмосферы. Особое значение имеет спут-

никовая информация о состоянии и изменениях таких частей климатической системы, как поверхность морей и океанов, материковые и горные ледники. В настоящее время удается измерять со спутников изменение площади и, главное, высоты поверхности ледников. Это позволяет определять, например, баланс массы льда Гренландии, районы ее роста в середине острова и таяния на его берегах, объем талой воды, поступающей в Мировой океан.

Наземных и спутниковых данных часто не хватает для анализа и исследований влияния климатоформирующих факторов на метеорологические и климатические характеристики в отдельных регионах и частях атмосферы. Особенно невысоким является качество измерений в нижней атмосфере при наличии облачного покрова, препятствующего надежным дистанционным наблюдениям со спутников. Поэтому проводятся программы измерений в отдельных регионах высоких и низких широт в тропосфере и нижней стратосфере специальными приборами, установленными на исследовательских самолетах и аэростатах, а также на судах. В некоторых самолетных программах используются автоматические приборы, размещенные на коммерческих самолетах, выполняющих регулярные продолжительные рейсы между материками. Тогда собирается информация на отдельных трассах за периоды в несколько лет, что повышает ее ценность.

При анализе собранной из разных источников информации о характеристиках климата и климатоформирующих факторах возникают проблемы определения изменения этих характеристик в пространстве и, особенно, во времени, а также надежности этих определений на фоне погрешностей из-

мерений. Такие погрешности имеют два источника: погрешность измерительного прибора (или комплекса приборов) и погрешности определения самой характеристики как средней величины отдельных измерений климатического элемента по некоторому пространству и промежутку времени. Здесь важно установить, представляют ли полученные статистические характеристики стационарный процесс, и если нет, то какова скорость (величина тренда) их изменений и насколько надежно (не случайно) эта скорость определяется.

Большинство временных рядов данных измерений элементов климата и, особенно, климатоформирующих факторов коротки. Измерения начались относительно недавно. Недавно, с 1970—1980-х годов, начались и заметные изменения климата. В то же время хорошо известно, что надежность анализа временного ряда тем выше, чем он длиннее. Поэтому для получения достоверных характеристик имеющихся рядов наблюдений приходится использовать специальные приемы современной статистики.

Накопленная информация во всем ее многообразии позволяет более или менее полно судить о состоянии климата в настоящем и недалеком прошлом. Однако, разумеется, даже используя всю эту информацию, мы не можем ответить на вопрос о том, как будет меняться климат в будущем. Единственным инструментом, позволяющим оценить вероятные грядущие изменения климата, являются климатические модели. И от качества таких оценок, а главное, от выводов, сделанных на их базе, зависит, в каком направлении будут развиваться мировая политика и экономика (вспомните бурную полемику, развернутую вокруг подписания Киотского протокола, ограничивающего выбросы в атмосферу парниковых газов), а также здравоохранение, комплекс природоохранных мероприятий и т. д.

Итак, *модели*. Об их возможностях, достоинствах и недостатках и, конечно, о том, что, согласно модельным расчетам, может произойти с климатом Земли в ближайшие десятилетия, вы прочтете в следующем разделе.

КЛИМАТ В РАСЧЕТАХ МОДЕЛИСТОВ

Известный швейцарский физик В. Паули шутил, что когда он предстанет перед Богом, то спросит Всевышнего о двух вещах: об уравнении объединения всех физических полей и об описании атмосферных процессов — и будто бы услышит в ответ: «Уравнение — пожалуйста, а вот в атмосферных процессах я и сам ничего не могу понять».

Львиная доля этой шутки приходится на истину. Скажем прямо: абсолютно точно учесть протекающие в атмосфере и океане взаимовлияющие друг на друга процессы во всем их многообразии и даже просто их пересчитать вряд ли возможно. Однако впадать по этому поводу в пессимизм все же не стоит. Лишь сравнительно небольшое число таких процессов решающим образом сказывается на глобальном климате Земли. А остальные участвуют только в формировании климата регионального (например, понижение содержания озона каждой весной над Антарктидой, часто называемое «озонной дырой», разумеется, проявляется при формировании антарктического климата, но неощутимо для климата, скажем, Евразии).

Таким образом, если мы сможем корректно учесть вышеупомянутые основные процессы (а их список более или менее хорошо известен), то получим качественно правильную общую

картину формирования глобального климата. Однако для того чтобы эта картина оказалась более подробной и достоверной, придется заметно расширить набор учитываемых процессов, тем самым многократно усложнив себе задачу. Решать подобные задачи стало возможным только с появлением мощной вычислительной техники, позволяющей создавать сложные комплексные климатические модели и проводить огромный объем модельных вычислений.

Что же такое климатическая модель? Ее построение начинается с определения системы уравнений, являющихся математическим описанием законов физики, действующих в климатической системе. Основные физические законы хорошо известны многим еще со школьной скамьи — это второй закон Ньютона, первое начало термодинамики, закон сохранения массы и др. Сложность состоит в том, что применительно к жидкостям, движущимся на сфере (а таковыми в допустимом приближении являются и атмосферный воздух, и вода в океане), математическая запись этих законов существенно усложняется. Появляется необходимость использования так называемых *дифференциальных уравнений в частных производных*, решить которые привычным способом — аналитически, на-

писав ответ в виде формулы, — невозможно.

Здесь приходит на помощь специальный раздел математики — *вычислительная математика*. Ее методы позволяют с определенной точностью приблизить — *аппроксимировать* — дифференциальные уравнения с помощью *алгебраических уравнений*, аналитическое решение которых затрудняется уже лишь их количеством, которое и определяет точность аппроксимации.

Существуют разные способы аппроксимации дифференциальных уравнений, описывающих движение атмосферы и океана. Проще всего представить себе следующий. Вся атмосфера и весь океан разбиваются на слои (обычно толщина этих слоев значительно убывает по мере приближения к поверхности раздела атмосферы и океана). Затем параллели и меридианы рассекают эти слои на «кубики», которых тем больше, чем меньше угловое расстояние задается между параллелями и меридианами. Число «кубиков» или, как их называют, *ячеек* характеризует *пространственное разрешение* модели. Чем больше размеры ячейки и, следовательно, меньше их общее число, тем более грубо модель описывает реальные процессы, так как внутри ячейки никакие изменения не учитываются. К примеру, если в один «кубик» поместить всю Московскую область, то окажется, что во всех ее концах одна и та же температура воздуха и одинаковый по силе и направлению ветер.

Решив таким образом сформированную систему алгебраических уравнений, мы получим набор (для каждой ячейки свой!) взаимосогласованных значений искомым климатических величин. Совокупность этих наборов ха-

рактеризует состояние климатической системы *в конкретный момент времени*. Для того чтобы узнать, как изменятся значения величин в каждом из наборов через некоторый заданный промежуток времени, нужно снова решить ту же систему алгебраических уравнений, но на сей раз ее коэффициенты будут сформированы на основе уже вычисленных нами значений климатических величин и с учетом продолжительности заданного промежутка времени. Выбранный нами промежуток времени называется *шагом модели по времени* (к сожалению, в соответствии с методами вычислительной математики выбор величины шага по времени, как правило, жестко связан с размерами наших «кубиков», поэтому, уменьшая габариты модельной ячейки, т. е. увеличивая число алгебраических уравнений в системе, мы часто обрекаем себя на измельчение шага по времени, а значит, на рост объема вычислений, так как нашу систему придется решать большее число раз). Многократно повторяя эту процедуру, можно вычислить последовательность наборов климатических величин, описывающих эволюцию состояния климатической системы.

Системы таких алгебраических уравнений огромны, поэтому решать эти уравнения «вручную» невозможно, зато именно такие уравнения «умеют» решать компьютеры. Для этого необходимо лишь записать эти уравнения на «понятном» компьютеру языке — в виде компьютерной программы. Все остальное определяется лишь мощностью и быстродействием компьютера.

Задачу компьютеру можно облегчить разными способами — начиная с упрощения исходной системы уравнений (например, исключив описание процессов, которые в рамках постав-

ленной задачи не очень важны) и оптимизации вычислительных алгоритмов (допустим, уменьшая пространственное разрешение модели) и кончая совершенствованием компьютерной программы (учитывая особенности используемого компьютера — число работающих одновременно процессоров, объем оперативной памяти и т. д.).

Очевидно, определение исходной системы уравнений — задача физика, разработка вычислительного алгоритма — ответственность математика, а создание компьютерной программы — искусство программиста. По этой причине для создания климатической модели, проведения исследований с ее помощью и, главное, анализа полученных модельных результатов одного специалиста недостаточно. Моделирование климата на современном уровне — задача, с которой способна справиться лишь группа специалистов в указанных областях. По мере развития климатической модели возникает потребность в расширении круга специалистов — привлечении химиков, биологов и др.

Все вышесказанное относится к детерминистским (физико-биохимическим) моделям, наиболее часто используемым сегодня при изучении климата. Их можно разделить на три основных класса (в порядке возрастания сложности): 1) простые климатические модели, в частности двумерные (учитывающие только изменения климатических величин с высотой и от полюса до полюса), одномерные (определяющие лишь изменения климатических параметров с высотой) или даже нульмерные (для одной точки пространства); 2) так называемые модели промежуточной сложности и, наконец, 3) сложные трехмерные модели совместной циркуляции атмосферы и

океана (МОЦАО), занимающие высшую ступень в иерархии климатических моделей.

В настоящее время наиболее мощным и перспективным инструментом оценки возможных в будущем изменений климата большинство специалистов считают глобальные объединенные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Такие модели воспроизводят климатически значимые процессы и обратные связи между ними, благодаря чему позволяют оценивать будущие состояния климатической системы.

Простые модели могут быть использованы сами по себе (например, для оценки эффектов сокращения выбросов в атмосферу в соответствии с международными договоренностями), либо как часть так называемых моделей совокупной оценки (Integrated Assessment Models), например, для анализа стоимости таких сокращений. Необходимые для работы простых моделей параметры подбираются или из данных измерений, или из результатов расчетов по более сложным МОЦАО, ледниковым моделям и т. п.

Модели промежуточной сложности не столько уступают МОЦАО в числе описываемых процессов, сколько превосходят их в степени упрощенности этих описаний. Модели промежуточной сложности полезны при исследовании отдельных физических процессов, их взаимодействий и обратных связей между ними, а также применяются в исследованиях палеоклимата (климата далеких прошлых эпох).

Основным преимуществом моделей, находящихся на более низких ступенях иерархии, является их вычислительная эффективность. Она позволяет проводить с простыми моделями и моделями промежуточной сложности

многочисленные расчеты при различных дополнительных предположениях, а также осуществлять на их основе вычисления, охватывающие сравнительно длительные (от тысячи лет и более) периоды в истории климата Земли. Использование простых моделей и моделей промежуточной сложности в исследованиях возможных в будущем изменений климата носит вспомогательный характер¹.

Современные² МОЦАО, используемые в расчетах изменений климата, включают в качестве основных компонентов интерактивные (взаимодействующие друг с другом) модели атмосферы, океана, верхнего слоя суши, криосферы и биосферы. Пространственное разрешение атмосферных компонентов МОЦАО составляет в среднем до 200—300 км по горизонтали и около 1 км по вертикали (вне пределов пограничного слоя, в котором вертикальное разрешение всегда выше). Пространственное разрешение океанских компонентов МОЦАО составляет в среднем 200—400 м по вертикали и до 50—200 км по горизонтали (однако есть модели с гораздо более высоким разрешением). Поскольку для значительной части климатически значимых процессов указанного разрешения недостаточно, такие процессы представлены в моделях с помощью так называемых параметризаций (приблизительно верных и не требующих больших вычислительных затрат соотношений), основанных на физических связях между климатическими характеристиками разных масштабов. Современный уровень развития компьютерной техники позволяет проводить вычисления с использованием МОЦАО для интервалов времени в сотни лет.

Из-за *нелинейности* климатической системы (этим термином кратко обозначают весь комплекс сложных взаимодействий между отдельными ее компонентами) результаты модельных расчетов ее эволюции могут оказаться различными даже при малых возмущениях в начальных условиях (т. е. стартовых значениях модельных параметров). Поэтому в исследованиях реакции климатической системы на те или иные внешние воздействия (как в прошлом, так и в будущем) важно использовать так называемый ансамблевый подход, другими словами, повторять расчеты для одного и того же временного интервала при одном и том же внешнем воздействии, но при разных начальных условиях. Такой подход, чрезвычайно успешно используемый в численном прогнозе погоды, позволяет оценить изменения *функций распределения вероятности* для различных климатических характеристик, т. е. получить намного более полную и достоверную картину возможных климатических изменений по сравнению с одиночным расчетом. Другим примером ансамблевого подхода является собирание результатов расчетов, полученных с помощью нескольких моделей, в одну группу.

Оценка возможных изменений климата для пространственных масштабов меньше континентальных требует привлечения различных способов «детализации» результатов расчетов с помощью МОЦАО. В настоящее время с этой целью широко применяются настроенные на те или иные регионы *региональные климатические модели* с высоким пространственным разрешением (от нескольких десятков километров и выше). В таких моделях, в частности, более детально учитывается рельеф подстилающей поверхности, дается более точное описание границ водоемов и

¹ Детальное описание современных климатических моделей и особенностей их построения составляет обычно том объемом несколько сотен страниц. Поскольку, по-видимому, не всем нашим читателям будут интересны нюансы модельных исследований, далее мы выделили более мелким шрифтом раздел, чтение которого позволит ознакомиться с некоторыми проблемами, решением которых попутно вынуждены заниматься моделисты. Читатели, желающие получить лишь общее представление о модельных исследованиях климата, могут без ущерба для понимания далее изложенного продолжить чтение, опустив этот раздел.

² Под «современными» МОЦАО подразумевается поколение моделей начала XXI века. Благодаря стремительному развитию компьютерной техники приводимые в этом абзаце характеристики моделей устаревают достаточно быстро.

т. д. Региональные климатические модели почти всегда используются вместе с глобальными. Они, как правило, описывают те же физические процессы, а на границах моделируемого региона значения моделируемых величин совпадают или плавно переходят в соответствующие величины, полученные с помощью глобальной модели. Таким образом происходит «телескопизация» моделируемого климата в нужном регионе.

Наряду с детерминистскими моделями существуют статистические модели климата. Это «черные ящики», в которых устанавливаются статистические связи между «входящими» изменениями климатоформирующих факторов (обычно в большом регионе) и «выходящими» климатическими элементами в какой-то его части (или в отдельной точке — на метеостанции) в течение некоторого промежутка времени. В статистических моделях «автоматически» получаются статистические характеристики моделируемых величин, но обычно они верны лишь для исследуемого региона и рассматриваемого периода времени. Выносить их результаты за рамки этих региона и промежутка времени можно только будучи уверенными в том, что модельные связи в «ящике» будут «работать» и вне указанных рамок. По своей сути статистические модели являются диагностическими, т. е. численно отражают существующее и зафиксированное измерением положение дел. Они мало пригодны для прогнозирования, так как могут «не работать» в условиях меняющегося климата.

В отличие от них детерминистские физико-математические модели во многом являются прогностическими — они призваны дать ответ на вопрос, каков будет отклик климатической системы на грядущие изменения в существующих сегодня природных явлениях или на появление новых естественных или антропогенных феноменов. От того, каким будет этот ответ, зависит очень многое: принятие или непринятие тех или иных решений, в первую очередь экономических и политических, изменение качества жизни населения и пр. Как известно, реализация таких реше-

ний требует значительных материальных затрат и немалого времени. Поэтому цена ошибки модельного прогноза чрезвычайно высока. В связи с этим возникает естественный вопрос, можно ли доверять (и если да, то в какой степени) модельным результатам. Как удостовериться в том, что та или иная модель «правильно» реагирует на изменяющиеся внешние воздействия?

Конечно, можно, заложив в качестве стартовых параметров модели данные, соответствующие, допустим, 1920-м годам, и сведения о росте содержания углекислого газа в последующие десятилетия, рассчитать значения климатических величин в конце XX века и сравнить полученные результаты модельных расчетов с данными мониторинга за этот период. Однако даже если согласие модельных результатов и данных измерений окажется превосходным, нет никакой гарантии, что так будет и в случае с прогнозом, например, на 2020 год (напомним, что ввиду крайне сложной зависимости — «нелинейности» — между климатоформирующими природными явлениями полученные оценки могут сильно изменяться даже при небольших отклонениях в модельных параметрах). В настоящее время единственной возможностью получить ответ на поставленный вопрос остается всесторонняя *оценка* модели, включающая анализ воспроизведения моделью не только наблюдаемого среднего состояния климатической системы, но и межгодовой, внутри- и межвековой и, по-видимому, более долгопериодной изменчивости климатической системы¹.

Удобной иллюстрацией служит оценка моделей (или, точнее говоря, систем), используемых в численном прогнозе погоды, на основе верификации прогнозов. В численном прогнозе погоды используются модели общей циркуляции атмосферы с заданными распределениями температуры поверхности океана и характеристик морского льда. Основное отличие таких моделей от климатических состоит в более высоком пространственном разрешении. Это обусловлено тем, что в численном прогнозе погоды сроки расчетов с помощью моделей измеряются сутками, что

¹ Термин *оценка* (*evaluation*) в англоязычной литературе используется применительно собственно к моделям. Оценка модели основывается на сопоставлении результатов модельных расчетов с данными наблюдений, которое называется *верификацией* (*verification*).

позволяет использовать высокое пространственное разрешение и большое (несколько десятков) число членов ансамбля. Сравнение прогноза с данными наблюдений является рутинной процедурой во всех прогностических центрах. Обычно сравнение проводится по ряду критериев, или так называемых *мер мастерства*, для ограниченного числа ключевых прогнозируемых характеристик атмосферы (температуры и влажности воздуха, скорости ветра и др.).

Иначе обстоит дело с расчетами будущих изменений климата с помощью МОЦАО. Такие расчеты проводятся, как правило, на десятки и сотни лет, поэтому прямые сравнения полученных сегодня результатов с данными наблюдений станут возможными лишь в далеком будущем, когда это уже не будет иметь никакого практического смысла. Кроме того, результаты этих расчетов нельзя считать в полном смысле прогнозами, поскольку внешние воздействия на модельную климатическую систему (например, антропогенные выбросы парниковых газов и аэрозолей в атмосферу), как отмечалось выше, задаются в соответствии с различными сценариями развития человечества, вероятность реализации которых не определена. В англоязычной литературе это обстоятельство проявилось в том, что термин *prediction* (*прогноз*) был в последние годы вытеснен термином *projection*, который не имеет прямого перевода на русский язык и который мы переводим несколько громоздко: *оценка возможных в будущем изменений* (используемый иногда в этом случае нашими соотечественниками термин *проекция* представляется нам неудачным).

Итак, в отличие от численного прогноза погоды, при расчетах будущих состояний климатической системы невозможно установить, насколько пригодны используемые модели, анализируя собственно результаты этих расчетов. В то же время вполне резонным является предположение о том, что достоверность результатов расчетов будущего климата определяется способностью модели как минимум воспроизводить современное состояние климатической системы (включая годовой цикл), а также различные ее состояния в прошлом в соответствии с имеющимися данными наблюдений. Тогда возникает вопрос: как именно проверять эту способность?

Здесь следует отметить, что еще одним отличием моделирования климата от численного прогноза погоды является отсутствие общепризнанных *мер мастерства* для климатических моделей.

Можно выделить три обширные категории критериев оценки климатических моделей: 1) описание ими морфологии климата, представленной пространственным распределением и структурой средних значений, средних квадратических отклонений и корреляций (и, возможно, других статистических характеристик) основных климатических параметров; 2) описание моделями бюджетов (балансов) и циклов в климатической системе (например, гидрологического цикла); 3) модельное представление климатических процессов (например, муссонов, конвекции).

Поскольку речь идет о климате, то сравнение результатов расчета состояния климатической системы с помощью МОЦАО в фиксированный момент «модельного» времени (например, на определенном временном шаге модели) с данными наблюдений, относящихся к этому же моменту «реального» времени (как это делается в численном прогнозе погоды), бессмысленно. Столь же бессмысленно сравнивать результаты модельных расчетов и данные наблюдений для того или иного отдельного года. Как мы помним, климат — это «осредненная» погода, поэтому сравнения результатов расчетов с помощью МОЦАО и данных наблюдений можно проводить для характеристик, осредненных за достаточно большие промежутки времени, измеряемые десятками лет. Примерами таких интервалов могут служить так называемые *базовые климатические периоды*. Так, «классический» базовый период ВМО (1961—1990 годы) представлял современный климат в трех первых «оценочных» докладах Межправительственной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК, Intergovernmental Panel

on Climate Change, IPCC). В последнем — четвертом — докладе МГЭИК, выпущенном в 2007 году, был использован новый базовый период — 1980—1999 годы. Выбор того или иного базового периода, включая его продолжительность, определяется различными обстоятельствами, например характером изменчивости климата в том или ином регионе, наличием и качеством данных наблюдений за тот или иной период и др.

Еще одним примером некорректной верификации модельных расчетов является прямое сравнение результатов моделирования в ячейке модели с данными наблюдений в ближайшей географической точке. Некорректность таких сравнений обусловлена, в частности, тем, что модельное решение соответствует среднему значению по всей модельной ячейке. Например, отношение массы сажи, выброшенной из заводской трубы, к объему воздуха в окрестности этой трубы (т. е. концентрация сажи в окрестности трубы) значительно выше отношения той же массы к объему модельной ячейки, охватывающей, скажем, уже упоминавшуюся Московскую область (средней концентрации по модельной ячейке).

При этом огромное количество информации, генерируемое моделями, неизмеримо превосходит объем данных наблюдений *в точке* и сравнимо лишь с объемом данных быстро развивающихся наблюдений Земли из космоса. Поэтому для оценки моделей обычно используются преобразованные данные наблюдений, например интерполированные в узлы регулярной сетки с использованием методов объективного анализа; представленные в виде интегральных оценок по тем или иным регионам и т. п.

Наиболее мощным и хорошо себя зарекомендовавшим источником данных для оценки моделей являются результаты так называемого *ре-анализа*. Они представляют собой результаты модельных расчетов атмосферных полей, произведенных с учетом всего комплекса имеющихся данных наблюдений таких ключевых характеристик, как температура и влажность воздуха, атмосферное давление и др. Там, где такие данные отсутствуют, они дополняются соответствующими модельными результатами. После этого весь комплекс значений каждой из характеристик подвергается процедуре ассимиляции — созданию такого результирующего гладкого взаимосогласованного поля в заданных точках поверхности земного шара и атмосферы (в узлах модельной сетки), которое максимально приближено к значениям исходного комплекса. Достоверность результатов ре-анализа для разных атмосферных характеристик неодинакова, а для некоторых характеристик (например, для осадков или облачности) данные наблюдений не ассимилируются, несмотря на их наличие. Вместо этого указанные характеристики рассчитываются — с погрешностями, присущими их модельным описаниям.

Обнаружение расхождений между модельным и наблюдаемым климатом чаще всего не позволяет сразу же внести в модель исправления. Высокая сложность взаимодействий в модельной климатической системе маскирует связь между причиной и следствием. Это вынуждает разработчиков проводить многочисленные, подчас дорогостоящие и не всегда успешные эксперименты по определению чувствительности модели к изменению ее параметров. Улучшение воспроизведе-

ния моделью некоего среднего состояния, отвечающего, например, современному климату, может быть достигнуто, в частности, путем так называемой *настройки*, состоящей в подборе свободных (недостаточно хорошо известных или изменяющихся в широких пределах) параметров модели с целью наилучшего соответствия как можно большего числа характеристик модельного климата наблюдаемым значениям¹.

Настройка моделей традиционно является объектом критики со стороны исследователей, скептически относящихся к физико-математическому моделированию как методу исследования и предсказания климата. Однако, как отмечалось выше, в контексте исследований будущих изменений климата удовлетворительное воспроизведение его современного среднего состояния не является самоцелью. Дело в том, что даже при использовании одного и того же сценария внешнего воздействия современные модели демонстрируют значительный разброс в оценках возможных в будущем изменений климата. А контролировать чувствительность модели к внешним воздействиям — задача куда более сложная, нежели воспроизведение современного состояния климатической системы.

Если же, помимо современного климата, модель позволяет воспроизводить различные состояния климатической системы, наблюдавшиеся в далеком прошлом (когда внешние воздействия сильно отличались от современных), а также известную эволюцию климатической системы (например, в течение XX века и ранее), можно наде-

яться, что полученные с помощью этой модели оценки изменений климата при тех или иных ожидаемых в будущем сценариях внешнего воздействия заслуживают доверия.

Всесторонняя оценка модели требует очень больших усилий от коллектива ее разработчиков, которые, как правило, оказываются в состоянии контролировать ее поведение лишь в ограниченном числе наиболее важных аспектов. В этом смысле чрезвычайно облегчает дело международная кооперация в виде проектов сравнения моделей или их отдельных блоков. Активное участие в этих проектах не только разработчиков моделей, но и специалистов из других областей науки о климате открывает замечательные перспективы перед всем научным сообществом.

Сегодня не существует модели, лучше прочих описывающей, например, современный климат. Обычно каждая модель хорошо воспроизводит лишь часть искомым климатических величин, в то время как остальная часть воспроизводится значительно хуже. Сравнительный анализ показывает, что наиболее высокую успешность, как правило, показывает «средняя» (по ансамблю) модель (рис. 5). Это связано с тем, что систематические ошибки разных моделей (а они присущи каждой модели) не зависят друг от друга и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются. Однако если погрешности расчета той или иной переменной в «средней» модели оказываются больше, чем соответствующие погрешности некоторых отдельно взятых моделей, это означает, что большинство

¹ Нелишне заметить, что улучшение воспроизведения моделью одной характеристики может сопровождаться ухудшением воспроизведения другой.

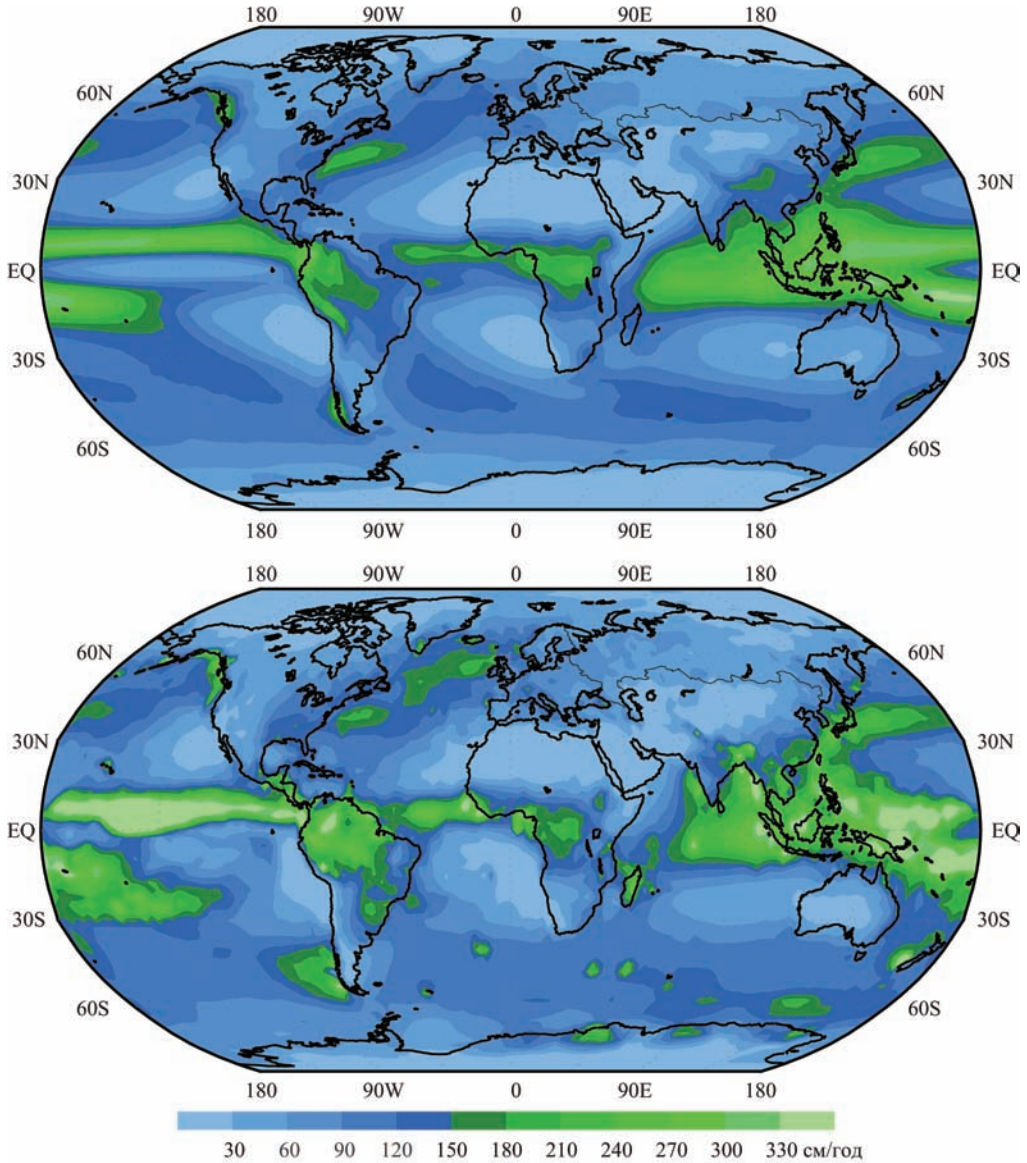


Рис. 5а. Поля средних сумм осадков (см/год).

Вверху — поля, полученные с использованием «средней» модели (результаты расчета по 19 глобальным моделям), внизу — фактически наблюдаемые (результаты ре-анализа за период 1980—1999 гг.).

рассматриваемых моделей содержат систематические ошибки одного знака. Последнее можно использовать как тест на наличие систематических ошибок, присущих данной группе моделей.

Некоторые исследователи подвергают сомнению пригодность моделей для оценки изменений климата в будущем. Конечно, современным моделям присущи недостатки, исправле-

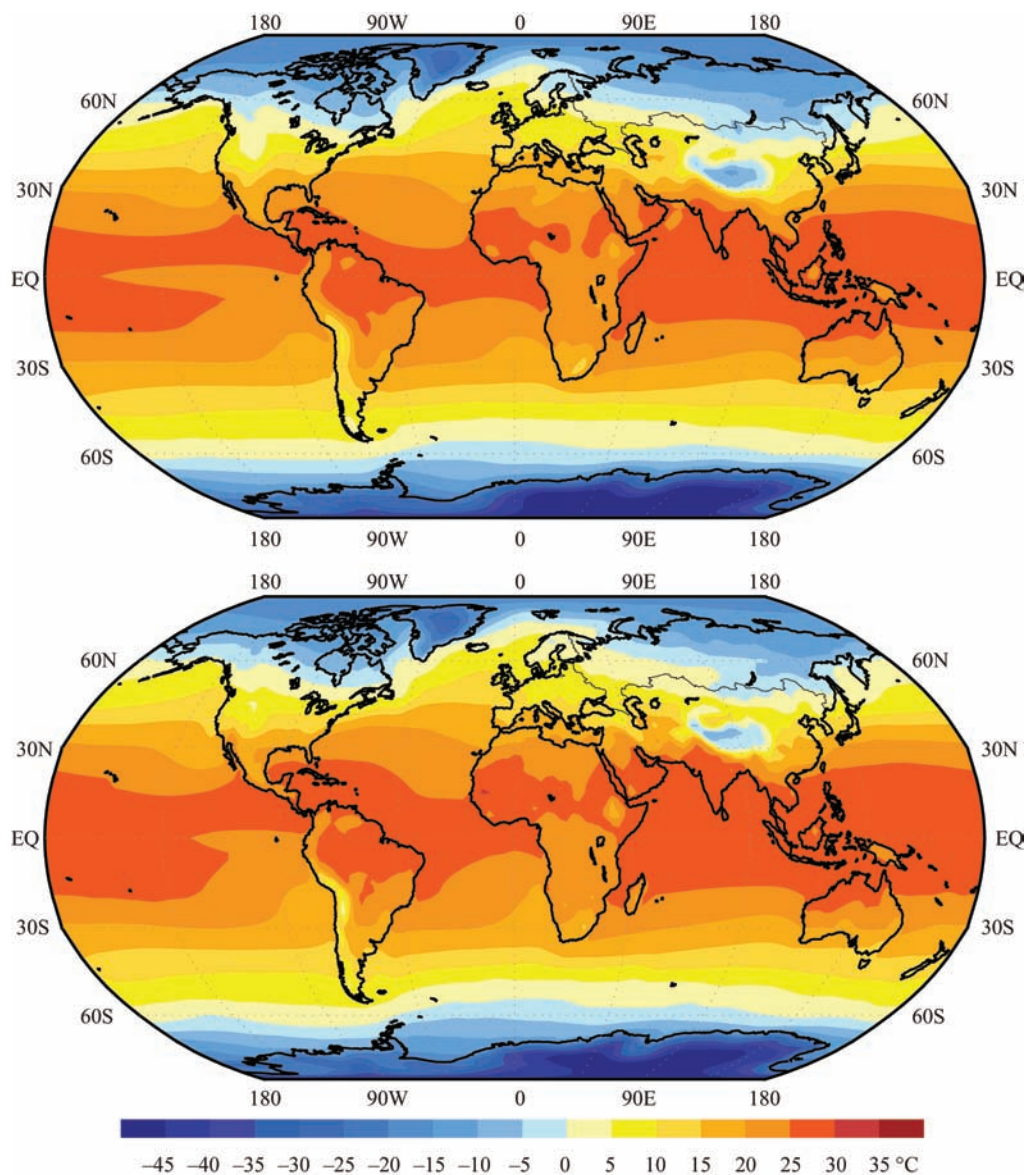


Рис. 56. Поля температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

Вверху — поля, полученные с использованием «средней» модели (результаты расчета по 19 глобальным моделям), *внизу* — фактически наблюдаемые (результаты ре-анализа за период 1980—1999 гг.).

ние которых потребует больших усилий, однако уже сегодня модели дают полезную информацию о возможных изменениях климата. Так, например, сегодня мы можем констатировать со-

впадение предсказанного моделями увеличения среднеглобальной температуры воздуха в период с 1990 по 2007 год примерно на $0,2^{\circ}\text{C}$ с соответствующими данными измерений (об

этом говорится в последнем отчете МГЭИК).

В основе моделей лежат физические законы, благодаря чему они позволяют получить физически согласованную картину будущих изменений климата — в отличие от любых других известных на сегодняшний день методов его предсказания. Замечательное качество моделей заключается в том, что численные эксперименты с ними позволяют исследователям приблизиться к пониманию физических механизмов, определяющих эволюцию климатической системы, а значит, продолжать совершенствование моделей на основе численных экспериментов и тем самым уменьшать неопределенность модельных оценок будущих изменений климата.

Разумеется, при всем огромном и пока не реализованном потенциале моделей их возможности не безграничны. На многие вопросы, связанные с предсказуемостью климатической системы, еще предстоит получить ответы. Кроме того, мы вряд ли когда-нибудь будем уверены в том, что модели включают

надлежащее описание всех климатически значимых процессов. Не исключено, что сегодня мы недооцениваем роль каких-либо факторов в будущих изменениях климата, и, возможно, на этом пути нас еще ждут сюрпризы. Тем не менее, несомненно, современные модели отвечают наивысшему уровню знаний, накопленных человечеством за время исследований климатической системы. Когда-то Уинстон Черчилль утверждал, что демократия несовершенна, но ничего лучше человечество пока не придумало. Аналогичное утверждение справедливо и в отношении к климатическим моделям: они несовершенны, но им нет альтернативы в оценках возможных в будущем изменений климата.

Итак, ознакомившись с организацией сети измерений, основными природными явлениями, формирующими климат, региональный и планетарный, а также методами, применяемыми при его изучении, давайте поговорим о тех сторонах нашей жизни, на которые климат оказывает непосредственное влияние.

КЛИМАТ В НАШЕЙ ЖИЗНИ

Окружающая среда — неважно, нравится нам это или нет — определяет стиль и качество нашей повседневной жизни. Трудно назвать какую-либо сферу деятельности человека, не подверженную ее влиянию. Да и самому человеку не избежать такого влияния: вспомним, например, различия в температурах южан и северян.

Издревле само существование человека зависело от того, насколько хорошо он был приспособлен к среде своего обитания. Сегодня благодаря накопленному тысячелетиями опыту и достижениям науки и техники речь идет, скорее, о комфортности жизни. Однако, говоря о комфортности, мы имеем в виду только привычный уклад жизни, поскольку, увы, и сегодня люди попадают в экстремальные ситуации в результате техногенных аварий или природных катаклизмов. Безусловно, привычный уклад жизни сильно различается у людей разных национальностей, религиозных конфессий и просто разного материального достатка. Однако, несмотря на различия, для всех укладов характерны общие атрибуты.

Во-первых, современный человек нуждается в крове над головой. «Мой дом — моя крепость», — говорят англичане. Эта крепость оберегает хозяина не только от вторжения непрошенных гостей, но и от капризов погоды.

Для защиты от ветра и зимнего холода подбирают специальные строительные материалы, применяют двойное и тройное остекление окон, отапливают дома. Летом же, спасаясь от жары, используют кондиционеры.

При проектировании зданий в расчетах учитываются климатические данные о температуре воздуха, скорости ветра и уровне солнечной радиации. Основной климатической характеристикой при этом служит температура воздуха наиболее холодной пятидневки, которая может наблюдаться в данной местности (именно за пять дней температура в неотапливаемом кирпичном доме становится равной температуре наружного воздуха). Первостепенное внимание уделяется повышению теплозащитных свойств наружных стен, чердачных перекрытий и заполнения световых проемов: благодаря таким мерам в ряде стран (Дания, Германия, США и др.) затраты на отопление удалось снизить на 30—40 %. Энергетическая проверка зданий Санкт-Петербурга показала, что возможная экономия энергии на нужды отопления и горячего водоснабжения составляет 15 600 ГВт в год ($1 \text{ ГВт} = 10^9 \text{ Вт}$). При строительстве зданий их ориентируют так, чтобы помещения освещались естественным светом зимой не менее трех часов.

В последнее время стало возможным строить так называемые «энергоэффективные» дома, в которых не используется стандартная система отопления. Ограждающие конструкции (стены и окна), оборудованные специальными панелями, нагреваются за счет солнечного излучения. При этом окна «следят» за солнцем, поворачиваясь вслед за его движением по небосводу. Глубокие подвалы такого дома аккумулируют летнее тепло для обогрева зимой, а зимний холод — для охлаждения здания летом. В таком здании расположен, например, Секретариат Всемирной метеорологической организации в Женеве. В Москве подобный комплекс построен в экспериментальном порядке в Филевском парке. Он обогревается и освещается за счет энергии солнца и ветра. Во дворе этого комплекса есть даже солнечная установка для жарки шашлыка. В южных районах строительство подобных домов могло бы привести к значительному энергосбережению. В районах с большой повторяемостью смерчей и в сейсмоопасных районах применяются специальные строительные технологии для возведения и оборудования зданий повышенной прочности, особенно высокой в случае наиболее опасных и технически сложных объектов, которыми являются атомные электростанции, гидротехнические сооружения, аэропорты, линейно-кабельные сооружения, автомобильные дороги, объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта, метрополитены и т. д.

Во-вторых, хоть «и не хлебом единым жив человек», но производство продовольствия, несомненно, было, есть и будет первейшей задачей мировой экономики. Продуктивность сельского хозяйства больше, чем другие

секторы экономики, зависит от климата. Солнечная радиация активно участвует во всех процессах развития животного и растительного мира. Дожди необходимы для полива как естественной растительности, так и посевов сельскохозяйственных культур. В то же время ранние заморозки могут уничтожить эти посевы. Сильный ветер приводит к полеганию зерновых. При переувлажнении почвы возможно вымокание растений. Таким образом, влияние неблагоприятных погодных условий на сельскохозяйственные культуры очень велико. Даже если получен своевременный удачный прогноз погоды, редко удастся предпринять сколько-нибудь серьезные меры для защиты посевов. Однако приспособиться к изменчивым климатическим условиям вполне возможно, выбрав устойчивые культуры или применив более прогрессивную агротехнику.

Основным показателем значимости климата для сельского хозяйства является «биоклиматический потенциал». Это комплексная характеристика температурного режима, влагообеспеченности, биологической продуктивности типов почвы и климата в целом. Максимальные значения этого показателя отмечаются в России в зоне влажных субтропиков (Краснодарский край, Адыгея), а самый низкий потенциал, естественно, — на побережье Северного Ледовитого океана.

В-третьих, современный человек, «перешагнув» стадию ведения натурального хозяйства, живет в условиях разделения труда не только в национальном, но и в международном масштабе и потому сильно зависит от развития различных секторов производства и организации перевозок. Технические изделия, функционирую-

щие под открытым небом, например транспортные средства, многие виды строительной техники, ряд энергетических устройств и т. д., создаются в разном «климатическом исполнении» в соответствии с макроклиматическим районированием для технических целей. Особенно важны температурные условия в холодных районах и температурно-влажностные — в теплых. На севере при низкой температуре воздуха металл становится хрупким и ломким, а мелкий колючий снег забивает все отверстия и проникает даже в кабину водителя. Во влажном жарком климате технические изделия подвергаются интенсивной коррозии и быстро выходят из строя.

Все службы железнодорожного и автомобильного транспорта в той или иной степени зависят от погодных и климатических условий. Когда сильный снегопад заносит железнодорожные пути, на узловых станциях начинается аврал. Срочно вызываются бригады рабочих, которые вручную очищают стрелки перевода поездов с одного пути на другой. Автоматика с этой задачей не справляется. При очень низкой температуре воздуха выходит из строя система сигнализации, и красный свет может самопроизвольно смениться на зеленый, что, естественно, создает серьезную аварийную ситуацию.

Направление и скорость ветра определяют возможную длину железнодорожных составов. Преобладание попутного ветра на железнодорожной магистрали позволяет удлинить состав, а встречный ветер вынуждает его укоротить.

Автомобильному движению мешают, прежде всего, наличие наледи на дорогах и плохая видимость. Для лик-

видации гололедицы приходится мять шины или посыпать дороги различными смесями.

В-четвертых, обеспечить нормальное развитие сельскохозяйственных, промышленных и транспортных предприятий, бесперебойную работу жилищно-коммунальных служб и т. д. возможно только за счет постоянного увеличения энергетических ресурсов. Добыча ископаемого топлива, которое составляет основу сегодняшнего относительного благополучия России, дает возможность обеспечивать наши (и не только наши) повседневные нужды, однако не секрет, что расплатой за это благополучие является существенное ухудшение экологической обстановки в местах добычи ископаемого топлива. Более того, его сжигание является одним из основных источников эмиссии парниковых газов в атмосферу. А это, как было сказано выше, ведет к глобальному потеплению климата. Поэтому в мире уже довольно давно предпринимаются попытки разработки новых, экологически чистых энергоресурсов. В частности, сегодня в качестве альтернативы сжиганию нефтепродуктов и природного газа выступают солнечные и ветряные энергоустановки.

Солнечные энергетические установки могут использоваться не только для обогрева зданий, но и стать важным источником энергии в южных районах России. Гелиоэнергетические установки целесообразно использовать в районах, где солнечное сияние составляет не меньше 2000 часов в году, а интенсивность суммарной радиации — не менее 600—800 Вт/ч.

Однако самым главным источником альтернативной энергии является ветер. Ветроэнергетика развивается наиболее быстрыми темпами. Суммарная

мощность крупных ветроэнергетических установок во всем мире превышает 25 тыс. МВт (1 МВт = 10^6 Вт), но 90 % ее приходится на Европу и США. Сегодня наибольшая общая мощность ветродвигателей в Германии и США достигла примерно 875 и 915 МВт соответственно. Значительная доля всей мировой ветроэнергии (примерно 20 %) ветровых ресурсов приходится на Испанию и Данию. Все, кто путешествовал по Европе, наверняка видели вдоль дорог ряды ветродвигателей, которые используются для энергообеспечения небольших населенных пунктов. В одной из популярных брошюр, изданных в США, помещен рисунок, на котором изображены ветродвигатель и под ним — корова. В подписи к рисунку говорится, что стоимость энергии, произведенной ветроэнергетической установкой, равна стоимости молока от этой коровы.

Развивать большую ветроэнергетику (мощностью более 1 МВт) целесообразно в районах, где средняя годовая скорость ветра превышает 8 м/с и годовое число часов, когда установка может работать, составляет более 2000. Такие условия наблюдаются, например, на островах и на северном побережье Финского залива. Однако ветроэнергетические установки небольшой мощности (в киловаттах) могут устанавливаться практически на всей территории России.

В нашей стране гелио- и ветроэнергетика пока развиты чрезвычайно слабо. Их интенсивное развитие планируется только на 2030 год. Причиной этого служат большие запасы нефти, газа и угля в России. Поэтому за рубежом Россию называют «спящим гигантом» и полагают, что, несмотря на большие запасы углеводородного и

углеродного топлива, в нашей стране целесообразно развивать альтернативную энергетику по причине ее довольно быстрой окупаемости, возможности снабжения энергией районов, удаленных от основных источников энергии, экономии на транспортировке энергии, отсутствия выбросов загрязняющих веществ, возобновляемости и т. д.

Грядущие предполагаемые изменения климата неодинаково скажутся в различных регионах Земли. Важная особенность нашей страны заключается в том, что две трети ее территории находится в зоне вечной мерзлоты. Нетрудно догадаться, что глобальное потепление климата станет причиной ее таяния. При этом произойдет (и уже происходит!) деформация так называемых линейных сооружений, т. е. автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов. Иногда случаются даже разрывы трубопроводов и разливы нефти. Например, на нефтепроводе Мессояха—Норильск за один год произошло 16 разрывов трубопровода. Многие здания в районах вечной мерзлоты начинают разрушаться. В Якутске 60 % зданий имеют трещины, а в Амдерме около 90 %. Правда, трещины образуются не только в результате таяния вечной мерзлоты, но и вследствие техногенных факторов: старения оборудования, несоблюдения технических норм и т. п.

Изменения климата отражаются и на здоровье населения. Очень негативно сказываются на здоровье людей волны тепла и волны холода, особенно первые, которые уносят больше жизней, чем все опасные метеорологические явления вместе взятые. Дело в том, что от жары очень трудно спастись. Энергетическое кондиционирование не всегда полезно. В жарких странах в

кондиционерах иногда разводятся бактерии, а переход из кондиционированного помещения на воздух и обратно вредит здоровью. При наступлении жары число инфарктов и инсультов резко возрастает, все заболевания сердечно-сосудистой и дыхательной систем усугубляются. К волнам холода человечество в значительной степени адаптировалось, а по отношению к жаре этого сделать пока не удастся. Следует ожидать, что глобальное потепление вызовет возрастание повторяемости и интенсивности волн тепла.

Изменения климата, вероятно, найдут свое проявление и в увеличении числа стихийных бедствий и катастроф. Для того чтобы нейтрализовать их воздействие на климат или хотя бы уменьшить ущерб, причиняемый ими экономике, и вред, наносимый здоровью людей, метеорологи разработали методы так называемого раннего предупреждения об опасных и стихийных метеорологических явлениях, т. е. прогнозирования с большой заблаговременностью, а также методы мониторинга (слежения) за нарастанием интенсивности опасных метеорологических явлений. Все это помогает людям спастись от погодных бедствий по принципу «предупрежден — значит вооружен». Зная хотя бы в общих чертах, как развивается тот или иной опасный метеорологический процесс и как себя вести при этом, люди своевременно принимают меры для спасения. В США, где очень часто возникают стихийные бедствия (тропические циклоны, торнадо и др.), осведомленность о них населения и поведенческие реко-

мендации позволяют значительно уменьшить число жертв. Во всяком случае в США не могло случиться того, что произошло в Индонезии при возникновении цунами: после отступления первой волны люди бросились на берег спасать свои вещи и собирать выброшенные на берег дары океана, и их накрыло второй, более мощной волной.

Ожидаемое потепление в нашей стране, как и в других северных странах, приведет в то же время и к некоторым положительным последствиям, как-то: 1) сократятся большие в настоящее время расходы топлива; 2) возрастут обычно невысокие и неустойчивые в России урожаи сельскохозяйственных культур; 3) улучшатся условия для работы водного транспорта на реках, которые сейчас по полгода и более не судоходны; 4) уменьшатся энергозатраты промышленного производства и, следовательно, повысится конкурентоспособность продукции. Однако отрицательные стороны ожидаемых изменений климата, особенно в условиях, их вызывающих, будут более значимыми, и к ним следует готовиться заранее. Времени для благодушия больше нет.

Выше мы рассказали о том, что и какими средствами изучают метеорологи, климатологи и другие специалисты, работающие в смежных областях. Теперь самое время поговорить о результатах их совместных усилий. Давайте кратко познакомимся с основными тенденциями в изменениях некоторых климатических характеристик и попытаемся представить, какие сюрпризы готовит нам климат в ближайшем будущем.

ЧТО ПРОИСХОДИТ С НАШИМ КЛИМАТОМ?

Современные изменения климата неспециалисты часто отождествляют с повышением температуры приземного воздуха («глобальным потеплением»), не принимая во внимание происходящую одновременно эволюцию других климатических элементов (апокалипсические картины, написанные любителями пожить на дутых сенсациях, естественно, не в счет). Действительно, анализ данных регулярных метеорологических измерений беспристрастно подтверждает повышение средней глобальной температуры воз-

духа в течение прошедшего века (с 1907 по 2006 год) на $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем линейный тренд температуры в последние 50 лет ($0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие) почти вдвое превышает соответствующее значение для столетия. В частности, 11 из 12 последних лет (включая 2006 год) стали самыми теплыми за весь период инструментальных наблюдений за глобальной температурой, ведущихся с 1850 года.

На рис. 6 представлена эволюция среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха (в откло-

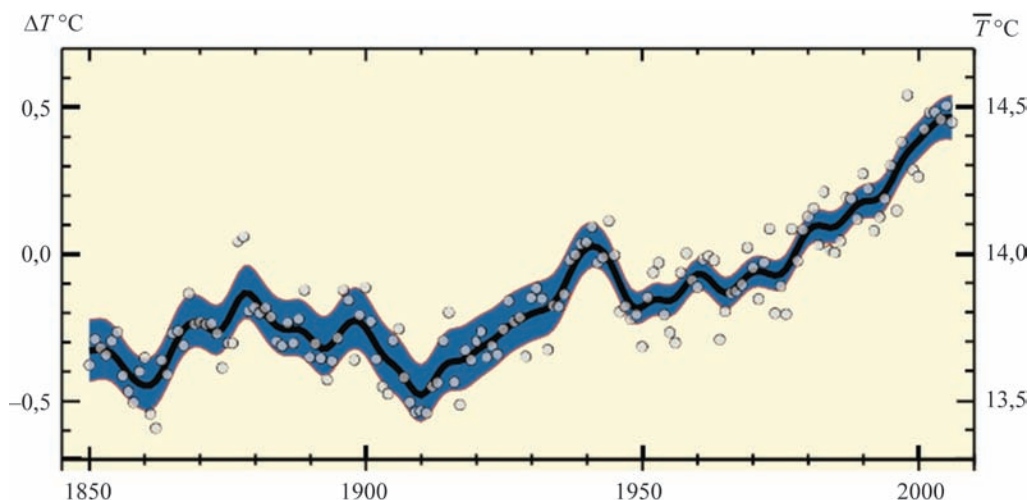


Рис. 6. Изменение (ΔT) среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха относительно средней за 1961—1990 годы. Сглаженные кривые — ход десятилетних средних значений температуры ($\bar{T}$), кружки — значения за отдельные годы. Область, окрашенная в синий цвет, — интервалы неопределенности оценок.

нениях от среднего значения за 1961—1990 годы) за весь период инструментальных наблюдений. При разности 1 °C между крайними значениями в 1862 и 1998 годах заметны минимумы потепления в 1860-е и 1910-е годы, максимумы в 1940—1944 годах и ускорение потепления начиная с 1960-х годов. Отметим, что скорость потепления в разных уголках земного шара неодинакова. Максимум ее отмечается в средних широтах Северного полушария на материках. В частности, в Восточной Сибири, западнее озера Байкал, средняя температура зимой повысилась почти на 2 °C (рис. 7). Меньшее потепление отмечается на океанах, в средних широтах и в целом в Южном полушарии, где в субполярных широтах и в Антарктике в отдельных океанических секторах наблюдается даже похолодание.

Повышение температуры в тропосфере, над приземным слоем воздуха, было несколько меньше, но соответствовало в основном его распределе-

нию над подстилающей поверхностью. Вблизи уровня тропопаузы прирост температуры сводится к нулю, а выше, в стратосфере, температура начинает понижаться и происходит это тем быстрее, чем выше расположен рассматриваемый слой.

Изменение суточного хода температуры нижней атмосферы заключается в том, что ночная температура повышается быстрее дневной, поэтому амплитуда суточного колебания несколько уменьшается. Пока еще не вполне ясно, с чем это связано. Заметный вклад здесь может вносить увеличение ночной облачности, однако оно зарегистрировано не везде и полученные результаты, особенно данные наземных наблюдений, не вполне надежны.

А что же происходит с другими климатическими характеристиками? Труднее надежно зарегистрировать тенденцию изменения осадков из-за известной большой изменчивости их интенсивности во времени и в простран-

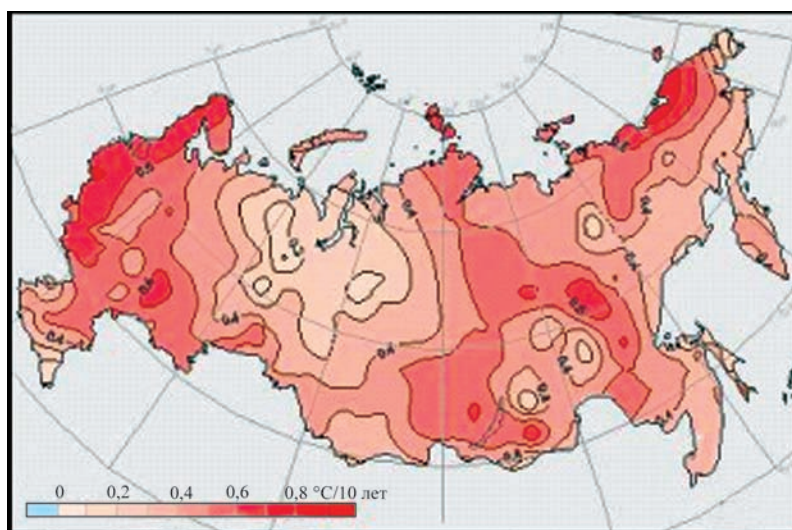


Рис. 7. Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха на территории России за 1975—2004 годы (Груза, Ранькова, 2004).

стве. В целом отмечается увеличение интенсивности осадков в высоких широтах, а также зимой в Северной Америке и Евразии и ее уменьшение в субтропиках и в летний период в Средиземноморье и Южной Азии. На всех широтах снижается доля твердых осадков и возрастает доля жидких, в низких широтах летом больше доля ливней, а также засушливых условий. Повышение температуры нижней атмосферы и подстилающей поверхности приводит к существенному увеличению испарения и влагосодержания в приземном воздухе (примерно на 7 % в средних широтах при повышении температуры на 1 °C) и одновременному понижению температуры испаряющей поверхности, особенно покрытой густой растительностью.

Изменения интенсивности осадков и испарения влекут за собой и изменения в поведении поверхностных вод суши. Реки и озера в высоких широтах становятся более полноводными, а значит, увеличивается сток в реках, особенно в зимний и летний периоды и меньше в весеннее половодье. Лед на реках и озерах раньше вскрывается, и они позже замерзают. В низких широтах сток рек, напротив, может заметно уменьшиться даже в половодье. Площадь снежного покрова зимой в Северном полушарии уменьшилась с 1980 года на 8,3 % из-за того, что за зиму накапливается меньше снега. Снижается влажность почвы и увеличивается повторяемость засух.

Существенно изменяется и повторяемость экстремальных погодных явлений: зимой меньше сильных волн холода и больше оттепелей, летом больше волн тепла и засух, интенсивные ливни, приводящие к наводнениям, как это происходило в последние годы в За-

падной Европе и Северной Америке. Увеличивается повторяемость ураганов в северо-западной части Атлантики и тайфунов в западной части Тихого океана.

Наблюдаются устойчивые тенденции (тренды) в других составляющих климатической системы. Помимо отмеченного выше сокращения площади и продолжительности залегания снежного покрова, происходит заметное уменьшение площади горных ледников, а также площади морского льда в Северном полушарии — на 3 % за год и на 7 % летом за десятилетие начиная с 1978 года (по спутниковым данным). Изменения массы материковых льдов Гренландии и Антарктиды уже вызывают ускоренное повышение среднего глобального уровня Мирового океана начиная с 1990-х годов. Более быстрое потепление в Северном полушарии приводит к ускоренному таянию гренландских льдов в средней и южной прибрежных частях острова и учащению откола айсбергов.

Повышение уровня Мирового океана, которое в XX веке составило 17 см, представляет собой одно из важнейших (если не важнейшее) проявлений глобального изменения климата. Оно затрагивает почти все стороны жизнедеятельности людей на побережьях, где сосредоточена значительная часть населения земного шара. Людям, живущим на небольших островах, особенно в Тихом океане, повышение уровня океана грозит полным затоплением в ближайшие столетия и, возможно, даже десятилетия, поскольку именно там его скорость возрастает. Последние, более точные, измерения, в том числе спутниковые, свидетельствуют о том, что скорость повышения уровня Мирового океана возросла за послед-

ние 15—20 лет до 3,3 мм/год (предыдущая оценка, полученная по данным наземных измерений, правда, со значительными погрешностями, составила 2,0 мм/год). Такое повышение уровня океана связано в основном с тепловым расширением воды при нагреве его верхних слоев.

Измерения температуры воды в верхнем 700-метровом слое Тихого и Атлантического океанов зафиксировали ее повышение, несколько более медленное, чем на материках, из-за большей теплоемкости океана. Изучение баланса энергии показало, что в океаны и моря поступает около 80 % энергии, приходящей из атмосферы к поверхности Земли, при том, что площадь океанов составляет 71% площади поверхности Земли. Потепление приповерхностных вод может заметно отразиться на характере и географии течений в Мировом океане.

Наиболее важную роль играет северная часть Атлантического океана, где формируется так называемый океанический конвейер — система глубинных течений Мирового океана. Здесь происходит опускание в глубину холодных вод с поверхности, которые перетекают потом в другие океаны. Эти воды поднимаются к поверхности в ряде районов тропиков и субтропиков, нагреваются и ветровыми «дрейфовыми» течениями переносят тепло в высокие широты. Повышение температуры поверхности океана, обусловленное парниковым эффектом, со временем может привести к изменению скорости водооборота в этом конвейере, что серьезно отразится на глобальном и региональном климате.

Известно, что течение Гольфстрим «обогревает» Западную Европу. Указанные здесь изменения в составля-

ющих климатической системы обладают значительно большей инерцией, чем изменения в атмосферных климатоформирующих факторах. Однако, как показали расчеты, отклонение Гольфстрима от Европы не приведет, тем не менее, к климатической катастрофе. Через 100—200 лет, когда оно могло бы произойти, уровень глобального потепления за счет парникового эффекта перекроет ожидаемое похолодание в Западной Европе, обусловленное изменением траектории Гольфстрима. Вместе с тем возможная перестройка океанического конвейера заслуживает внимательного модельного исследования.

Нет сомнений в том, что наш климат меняется: результаты комплекса измерений, проведенных в последние 100—150 лет, наглядно это доказывают. Более того, изменения климата названы выше беспрецедентными. Однако что такое столетие в многотысячелетней истории нашей планеты? Так ли уж уникальны сегодняшние изменения климата? В какой-то степени ответы на эти вопросы помогают нам дать анализ результатов измерений в ледовых ядрах Гренландии и Антарктиды, осуществленных в недавнем прошлом.

Хорошо известно, что глобальный климат менялся в прошлом без видимого участия человека. Достаточно вспомнить сравнительно недавние (имеется в виду геологический отсчет времени) ледниковые периоды, следы которых хорошо видны и изучены во многих регионах мира (даже в тропиках). Есть достойные внимания доказательства того, что после окончания последнего ледникового периода (около 15—20 тыс. лет до н. э.) был период (около 6 тыс. лет до н. э.) с более теплым, чем нынешний, климатом в Се-

верном полушарии со среднеглобальной температурой почти на 1°C выше современной (так называемый климатический оптимум голоцена). За последнюю тысячу лет были периоды потеплений и похолоданий продолжительностью до 200—300 лет естественного происхождения (последнее потепление с максимумом зимой в западной части Евразийской Арктики отмечалось в 1930—1940-х годах). Не является ли наблюдающееся потепление также естественным? Такое предположение высказывают и некоторые климатологи. Два существенных факта противоречат ему. Во-первых, все потепления и похолодания климата в прошлом происходили много медленнее — скорость современного потепления в сотни раз выше и не имеет аналогов в истории климата. Во-вторых (и это наиболее важно), многочисленные и весьма точные измерения концентрации CO_2 и метана в пузырьках воздуха, вмёрзших в слои льда ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, которые образовались десятки и сотни тысяч лет назад, показывают, что эти концентрации не выше, чем в доиндустриальный период, т. е. меньше 270—280 млн⁻¹ по объёму для CO_2 (другими словами, на один миллион молекул воздуха приходилось меньше 270—280 молекул углекислого газа) и 0,6—0,8 млн⁻¹ для CH_4 при их совре-

менных уровнях 380 и 1,8 млн⁻¹ соответственно. Указанные значения концентрации относятся к межледниковым периодам, в максимумы оледенения они были значительно ниже (например, концентрация CO_2 — почти на 100 млн⁻¹). К сожалению, точность определения дат образования ледниковых слоев пока не позволяет установить последовательность наступления потепления и роста содержания парниковых газов в атмосфере, но наличие связи между ними тем не менее несомненно.

Палеоклиматические данные подтверждают необычность происходящих климатических изменений, по крайней мере, для последних 1300 лет. Однако в наш прагматичный век «дела давно минувших дней, преданья старины глубокой» вряд ли хоть сколько-нибудь заинтересуют подавляющее большинство наших современников. Иное дело — ближайшая перспектива. Какие изменения окружающей среды ожидают нас в два-три ближайших десятилетия? Конечно, точного ответа на этот актуальный вопрос не может дать никто, но существующие модельные оценки позволяют нам *предположить с высокой долей вероятности*, как будет меняться климат нашей планеты в указанные сроки. Надеемся, наш рассказ об этом будет интересен читателю.

КЛИМАТ И МЫ ЧЕРЕЗ 20–30 ЛЕТ

Уже сегодня изменения климата в значительной степени обусловлены стилем, культурой и размахом хозяйственной деятельности человека. Поэтому, говоря о его грядущих изменениях, нужно, прежде всего, получить ответ на вопрос, каким видится сегодня развитие мировой экономики в ближайшем будущем, и, в частности, каковы будут размеры выбросов в атмосферу парниковых газов и аэрозолей, а также непарниковых газов, участвующих в химических атмосферных реакциях, образующих и разрушающих газы парниковые.

С начала 1990-х годов Межправительственная группа экспертов по изменению климата разрабатывает и совершенствует сценарии ожидаемых в будущем выбросов (эмиссий) основных парниковых газов.¹ Сценарии составлялись при разных предположениях о характере и интенсивности экономического и социального развития человечества, а также с учетом особенностей географического положения и национальных особенностей промышленно развитых стран. Было создано несколько десятков таких сценариев. После их группирования и некоторых упрощений осталось шесть основных,

так называемых демонстрационных сценариев (A1B, A1F, A1T, A2, B1 и B2) ожидаемых эмиссий парниковых газов и SO₂ как прямого предшественника сернистого аэрозоля. При этом в сценариях A2 и A1F предусмотрена наибольшая интенсивность ожидаемых эмиссий, а в сценарии B1 — наименьшая, которая еще уменьшается после 2050 года. В сценарии A1F предполагается интенсивное использование ископаемого топлива (угля и нефти), что приводит к максимальным выбросам в атмосферу углекислого газа и закиси азота N₂O.

На рис. 8 представлены рассчитанные ожидаемые средние по земному шару концентрации CO₂, CH₄ и N₂O в приземном воздухе в среднем за год в период с 1990 по 2100 год. Из рисунка видно, что согласно «жесткому» сценарию A1F концентрация CO₂ в конце текущего столетия может достичь 950 млн⁻¹, что в 2,5 раза выше современной. Концентрация же метана по «мягкому» сценарию B1 в 2100 году может оказаться даже меньше текущей. Возможно также сильное уменьшение выбросов SO₂ начиная с 2020 года, что вызовет существенное понижение содержания сульфатных аэрозолей в ат-

¹ В 2007 году деятельность МГЭИК по оценке современного состояния и вероятных будущих изменений климата получила высокое международное признание — Нобелевскую премию мира.

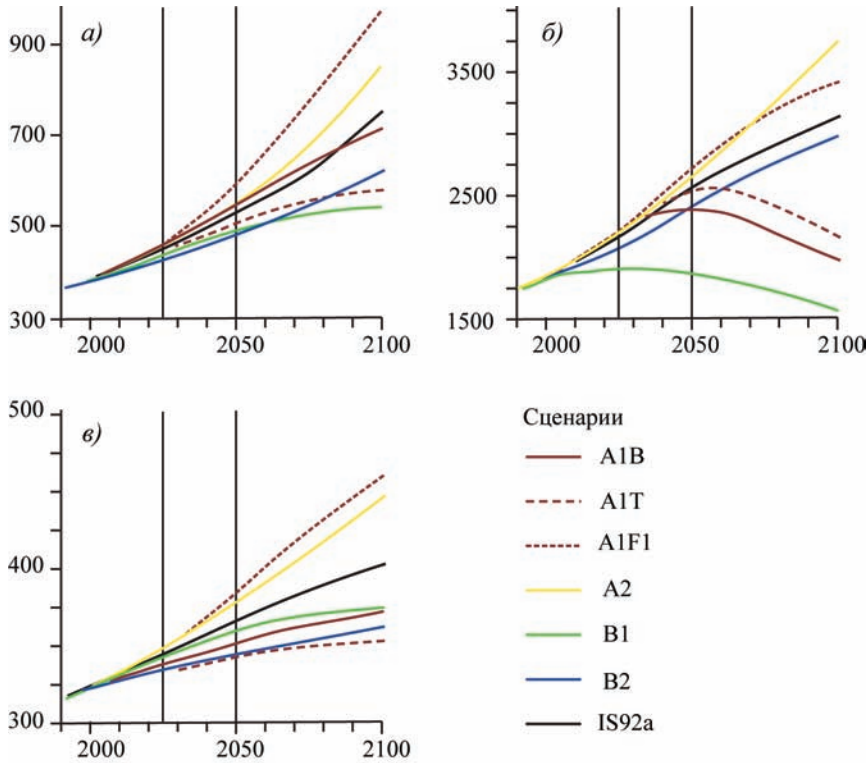


Рис. 8. Изменение среднегодовых среднелобальных концентраций парниковых газов в приземном воздухе в XXI веке по указанным сценариям их антропогенных эмиссий.

a — углекислый газ (CO_2), *б* — метан (CH_4), *в* — закись азота (N_2O).

мосфере. Разброс от сценария к сценарию ожидаемых к концу XXI века концентраций парниковых газов весьма велик, однако примерно до 2020—2030 годов эти различия незначительны. Поэтому вполне оправдано утверждение, что изменения концентраций парниковых газов до этого времени хорошо согласуются по всем сценариям, и модельные расчеты эволюции газового состава атмосферы можно проводить в соответствии с этими изменениями.

Группа МГЭИК выпустила ряд обзоров — отчетов по современному состоянию и модельным оценкам ожидаемых изменений характеристик клима-

та по основным регионам мира. В обзоре за 2007 год показано, что за 20 лет (с 2005 по 2025 год) среднегодовая и среднелобальная температура приземного воздуха повысится примерно на $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительно средней температуры периода с 1980 по 1999 год среднегодовая температура в период 2020—2029 гг. повысится над океанами и в Северном, и в Южном полушарии на $0,5\text{—}1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а над материками средних широт Северного полушария на $1,5\text{—}2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это повышение может быть еще большим над полярными широтами Северного полушария ввиду

сокращения площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана.

Значительно менее надежно можно оценивать изменение количества осадков. Здесь модели определенно предсказывают знак (т. е. увеличение или уменьшение), а не величину изменений. Так, для Европы и Северной Евразии (территория России) наиболее вероятно продолжение и развитие тенденции последних 20—30 лет: увеличение количества зимних осадков, более четкое в северной части территории, и уменьшение количества летних осадков в южной, особенно юго-западной, ее части. Существенно более сухим станет климат Южной Европы (в первую очередь, Средиземноморья).

Будет продолжаться и развиваться и наметившаяся в последние десятилетия тенденция: увеличение числа экстремальных погодных явлений, сильных ливней и засух, ураганов в Атлантике и тайфунов в Тихом океане; волны жары летом наблюдаются все чаще, а волны холода зимой — все реже. В целом изменчивость климата возрастает, изменение климатических характеристик увеличивается, и об этом однозначно свидетельствуют текущая статистика этих характеристик, как и статистика данных наблюдений за климатоформирующими факторами.

Для оценки будущих изменений климата был реализован небывалый по своим масштабам и числу участников международный проект. В ходе подготовки Оценочного доклада были проведены эксперименты с 23 сложными физико-математическими моделями атмосферы и океана, представленными 16 ведущими исследовательскими группами из 11 стран. Основу этого проекта составили расчеты климата XX

века при заданных в соответствии с данными наблюдений концентрациях парниковых газов и аэрозолей, а также три сценарных расчета климата XXI века (для сравнительно «жесткого», «умеренного» и «мягкого» сценариев антропогенных выбросов парниковых газов и аэрозолей). В анализе данных, полученных в ходе этих экспериментов, приняло участие более тысячи исследователей со всего мира.

Согласно полученным результатам, в ближайшие два десятилетия, независимо от сценария, глобальное потепление продолжится со скоростью около 0,2 °C за десятилетие. Даже при фиксировании концентраций парниковых газов и аэрозолей на уровне 2000 года оно продолжалось бы за счет уже накопленных в атмосфере парниковых газов со скоростью 0,1 °C за десятилетие. Сохранение эмиссий парниковых газов на современном уровне, не говоря уже об их увеличении, вызовет дальнейшее потепление, а сопутствующие ему многочисленные изменения глобальной климатической системы будут больше изменений, наблюдавшихся в XX веке.

По отношению к последнему двадцатилетию прошлого века глобальное потепление будет возрастать. В зависимости от сценария к середине и концу XXI века оно составит в среднем от 1,2 и 1,8 °C («очень мягкий» сценарий антропогенного воздействия) до 1,5 и 4,6 °C («очень жесткий» сценарий) соответственно. При этом повышение уровня моря достигнет в среднем от 19 до 58 см соответственно. В отдельной группе расчетов было учтено уменьшение поглощения двуокси углерода (CO₂) океаном и сушей при потеплении климата, что для сценария A2 привело к дополнительному увели-

чению глобального потепления, достигшему к 2100 году 1 °С.

Вероятность усиления экстремальности климата, включая волны тепла, сильные ливни и другие явления, оценивается как очень высокая (>90 %). Повышение температуры воздуха в североатлантическом регионе продолжится. В результате дальнейшего повышения температуры поверхности океана в низких широтах вероятно увеличение интенсивности тропических циклонов (тайфунов). Произойдет смещение к полюсам траекторий вне тропических циклонов. Ожидается сокращение площади ледяного покрова Мирового океана, причем некоторые сценарии к концу XXI века предполагают полное освобождение Северного Ледовитого океана от льда в конце лета. Будущие изменения количества осадков имеют противоположные тенденции в разных регионах: оно увеличится в высоких широтах и уменьшится над большей частью суши в субтропиках, что приведет к возрастанию угрозы наводнений в одних регионах и засух в других.

На фоне глобального потепления региональные изменения климата России будут далеко не одинаковыми, а их влияние на отдельные виды хозяйственной деятельности могут быть как благоприятными, так и пагубными.

Смягчение климатических условий может отодвинуть к северу границу зоны комфортного проживания, сократить расход электроэнергии в отопительный сезон. С другой стороны, потепление чревато вытеснением одних биологических видов другими, увеличением повторяемости засух в одних регионах и наводнений в других и т. п. При этом неопределенность оценок влияния возможного изменения

климата на сельское хозяйство России, ее водные ресурсы, растительный и животный мир, демографическую ситуацию довольно велика.

Результаты модельных расчетов показывают, что в XXI веке потепление на территории России (особенно, в арктических и субарктических регионах) будет заметно больше среднего глобального. Среднее за год повышение температуры к середине XXI века по сравнению с концом XX века может составить $2,6 \pm 0,7$ °С. Наиболее значительное потепление ожидается зимой, особенно в Сибири и в Арктике. К середине XXI века среднегодовое количество осадков в среднем по территории России возрастет на $8,2 \pm 2,5$ %.

Наиболее значительное увеличение количества осадков ожидается зимой (особенно, в восточных и северных регионах), а в летний период оно оказывается существенно меньшим. Изменения фазового состояния осадков (дождь или снег) могут оказывать влияние на сток зимой и в период интенсивного таяния снега весной. На европейской части России увеличение суммарного количества осадков связано преимущественно с увеличением дождевых осадков, в то время как в Западной и Восточной Сибири — с увеличением выпадения снега. Это означает, что в Сибири начинает происходить дополнительное накопление снега зимой, таяние которого весной создает угрозу учащения наводнений на водосборах сибирских рек.

На юго-западе России количество осадков уменьшится. В тех регионах, где особенно развито сельское хозяйство (Северный Кавказ, Поволжье и др.), могут произойти заметное уменьшение влагосодержания деятельного слоя почвы и сокращение стока. Мо-

дельные расчеты показывают, что в регионах с ранним сходом снежного покрова тенденция к уменьшению влажности почвы обнаруживается уже весной и усиливается к лету. Это означает, что повторяемость засух в южных регионах возрастает.

Выше уже упоминалось, что сельское хозяйство наиболее чувствительно к изменениям климата. Большая протяженность российской территории, в частности с юга на север, обуславливает необходимость перестройки существующих сельскохозяйственных структур, приспособления к новым условиям хозяйствования: культивированию новых культур, изменению системы орошения и пр. Возможно, в связи с потеплением появится нужда в организации системы защиты сельскохозяйственных угодий от нетрадиционных бедствий, например нашествия саранчи или каких-либо других насекомых, бактерий или вирусов, обитающих сегодня в странах с более теплым климатом.

Еще одна опасность будущего изменения климата связана с оттаиванием вечной мерзлоты. Площадь многолетнемерзлых грунтов составляет около 70 % территории России. При потеплении климата будут происходить их деградация и увеличение глубины сезонного протаивания. Деградация многолетнемерзлых грунтов может усилить уже имеющую место деформацию и даже привести к разрушению транспортных путей, трубопроводов, строений и других объектов инфраструктуры.

Наиболее значительные последствия глобального потепления связаны с вероятными изменениями ледяного

покрова Северного Ледовитого океана. Они столь же многочисленны, сколь и важны, как для экосистем, так и для экономики, социальной сферы и даже безопасности России. Увеличение продолжительности летней навигации по Северному морскому пути открывает небывалые перспективы для развития морских перевозок грузов и туризма. При этом возросшая скорость дрейфа ледяных полей и высокая степень изменчивости ледовой обстановки могут затруднять многие виды морских операций.

Новые возможности для экономики, равно как и новые проблемы для окружающей среды, возникают в связи с облегчением доступа по морю к природным ресурсам Арктики, включая месторождения нефти, газа и других полезных ископаемых на шельфе Северного Ледовитого океана. Многие сообщества и объекты хозяйственной деятельности, расположенные в прибрежной зоне, столкнутся с воздействием штормов в сочетании с уменьшением ледяного покрова арктических морей, ожидаемое сокращение которого, по-видимому, окажется губительным для некоторых видов животных, например белого медведя.

Теперь, когда, надеемся, читатель получил представление о современном состоянии климата и его вероятных будущих изменениях, самое время задать одним из двух извечных русских вопросов: что делать? (на второй вопрос: кто виноват? — ответ дан в последнем отчете МГЭИК, в котором говорится, что ответственность за наблюдавшееся во второй половине XX века потепление с 90 %-ной вероятностью несет сам человек).

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НУЖДАЕТСЯ В ПОМОЩИ

Во второй половине XX века человечество как-то незаметно преодолело рубеж, когда объемы производства и отходов мировой хозяйственной деятельности достигли такого уровня, что их воздействие на окружающую среду оказалось соизмеримо с влиянием естественных природных явлений, а методы хозяйствования отдельных крупных экономически развитых держав перестали быть их внутренним делом. Например, разрушение стратосферного озона в результате эмиссии фреонов в атмосферу или последствия чернойбыльской аварии заметно отразились на состоянии *глобальной* биосферы, презрев суверенные границы. Уже тогда стало ясно, что относительное благополучие состояния нашей окружающей среды может быть достигнуто не только взвешенной хозяйственной политикой ведущих промышленно развитых стран, но и их согласованными совместными усилиями, несмотря на очевидный конфликт национальных экономических интересов.

Осознание реального положения вещей, формирование общественного мнения вынудили политиков поднять вопрос о выработке, а затем и принятии мер, направленных на сокращение ущерба, причиняемого климатической системе парниковыми газами (Киотский протокол). Сегодня специаль-

ными модельными исследованиями установлено, что даже 100 %-ное исполнение всех ограничений, предписанных Киотским протоколом, не в состоянии сколько-нибудь существенно затормозить глобальное потепление климата.

Означает ли это, что подписание этого документа было ошибкой? Уверены, нет! Киотский протокол стал вторым (после Монреальского протокола, регламентирующего производство и использование разрушающих озон химикатов) документом, в котором большинство ведущих индустриальных держав не просто признали жизненную необходимость международной кооперации для защиты окружающей среды, но и согласились с этой целью в какой-то степени поступиться своими национальными интересами. Именно готовность сторон пойти на компромиссы и опыт, накопленный в ходе их поиска, суть главные достижения Киотского протокола. Эти достижения тем более важны, что постоянное ухудшение экологической обстановки и продолжающееся глобальное потепление неизбежно подтолкнут сильных мира сего (а также страны, набирающие силу, в частности Китай и Индию) к отысканию, согласованию и внедрению новых, более эффективных, решений, призванных максимально со-

кратить (нейтрализовать, очевидно, нереально) такие проявления антропогенного воздействия на климатическую систему, которые причиняют ущерб человеку и живой природе.

Все вышесказанное означает, что в длинной череде переговоров понадобится последовательно и аргументированно отстаивать свою позицию. Готова ли к этому Россия? Разве что, отчасти. Да, существует и работает сеть станций, регулярно поставляющая информацию о состоянии атмосферы — метеорологических характеристиках (температуре и влажности воздуха, давлении, скорости ветра, количестве осадков) и некоторых других элементах (солнечной радиации, содержании озона). Да, есть группы климатологов и специалистов по окружающей среде, обрабатывающих эту текущую информацию, в результате чего создаются и пополняются соответствующие базы данных. Наконец, одна-две российские климатические модели вместе с зарубежными участвуют в разнообразных теоретических исследованиях климата, настоящего и будущего. Но в то же время... Известные политико-экономические трудности последних десятилетий обусловили сокращение сети наземных метеостанций, свертывание программы спутникового мониторинга, урезание объема теоретических исследований и как следствие нарушение ранее четко отлаженного взаимодействия между различными подразделениями Гидрометслужбы и других российских ведомств. Для восстановления таких связей и их дальнейшего развития нужны не только значительные материальные вложения и административные мероприятия, но и немало времени. Много сложнее создать систему оперативно-

го мониторинга парниковых газов по всей территории страны.

В Европе, Северной Америке, Японии существует контроль за выбросами основных парниковых и озонорактивных газов (метана, окислов азота и углерода и др.) в атмосферу. В России подобный контроль совершенно недостаточен и по существу отсутствует на большей части территории. Лишь отдельными исследовательскими группами производятся разрозненные локализованные непродолжительные измерения содержания парниковых газов в атмосфере. Этих измерений, безусловно, мало для сколько-нибудь достоверной инвентаризации эмиссии парниковых газов с территории России. Проведение такой инвентаризации чрезвычайно важно для нашей страны уже хотя бы потому, что неизмеренная утечка газов, сопутствующая газо- и нефтедобыче, дает богатую пищу как для законной обеспокоенности нашей и зарубежной общественности, так и для откровенных спекуляций. В ходе этой инвентаризации нужно отметить и обязательно учесть тот факт, что наша страна занимает ведущее место в мире по площади лесных угодий («легких» планеты) и, следовательно, как ни одна другая страна способствует *сокращению* содержания углекислого газа в атмосферном воздухе.

Однако, пожалуй, самая большая проблема заключается, говоря словами булгаковского профессора Преображенского, в той «разрухе, что царит в головах» наших соотечественников, от руководителей до простых обывателей. Вот чиновник, закрывающий глаза на то, с какими нарушениями ведутся работы в подведомственной ему отрасли. Вот директор промышленного предприятия, пускающий во все тяжкие,

лишь бы скрыть масштабы загрязнения окружающей среды производственными отходами. Вот наш брат ученый, публично доказывающий, будто интенсификация антропогенной деятельности ничуть не сказывается на состоянии климатической системы, а потому можно беспрепятственно продолжать испытывать ее на прочность. Знакомая картина, не правда ли?

Климатическая система очень устойчива и до определенного предела способна сама справиться с вносимыми в нее возмущениями. Однако когда антропогенная нагрузка возрастает столь интенсивно, как сегодня, климатическая система нуждается в нашей помощи. При этом начать следует с воспитания культуры производства и потребления. Здесь не нужно ничего изобретать, а достаточно обратить свой взор на опыт наших соседей-европейцев: внедрению новых технологий пред-

шествует их неформальная экологическая экспертиза, особое внимание уделяется сокращению энергоемкости производства, неукоснительно соблюдается производственная и технологическая дисциплина, осуществляется жесткий контроль за утилизацией отходов производства и т. д. В быту также выезд на лоно природы не сопровождается стремлением оставить о себе память россыпью разбитых бутылок и полиэтиленовых пакетов или незатушенным пепелищем, а передвижению на автомобиле предшествуют установка соответствующих фильтров и покупка качественного горючего. В маленькой Европе люди перестали жить по принципу временщиков всех времен и народов «после нас хоть потоп», жителям большой России этому научиться еще предстоит. Скорей бы, иначе природа может нас не выдержать!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ну вот и закончился наш краткий экскурс по проблемам современного климата. Хочется верить, что Вы, дорогой читатель, стали знать о нем немного больше. Надеемся, что Вы обязательно разделите наше беспокойство о его (и нашем с Вами!) будущем, как ближайшем, так и отдаленном. Конечно, мы лишь относительно недавно получили возможность всерьез изучать климат в различных его аспектах. И потому, по мнению некоторых специалистов, имеющих у нас знаний еще недостаточно для статистически обоснованных выводов. На этом основании они призывают всех дожидаться того момента, когда полученные ряды климатических данных станут достаточно длинными (репрезентативными) для того, чтобы *обоснованно* судить о тенденциях в изменениях климата и, главное, о причинах, эти изменения вызвавших. Замечательный французский ученый математик Пьер Лаплас сказал однажды: «То, что мы знаем — ограничено, а то, чего не знаем — бесконечно». Поэтому нам никогда не удастся избавиться от скепсиса по поводу достаточности наших знаний. Однако, к сожалению, сегодня изменения в климатической системе происходят столь стремительно и неотвратно и настолько затрагивают инте-

ресы каждого человека, что мы вынуждены адекватно реагировать на быстро меняющуюся ситуацию (главным образом, приспосабливаться к ней), используя весь — далеко не маленький! — арсенал *сейчас* доступных нам средств. Когда люди будут знать о климате больше, их решения наверняка будут совершеннее, однако наши сегодняшние действия должны дать шанс потомкам такие решения принимать! Климат работает как на нас, так и против нас. Девизом нашего времени является устойчивое развитие, которое Всемирная комиссия по окружающей среде и развитию определила как «развитие, которое удовлетворяет потребности нынешнего поколения, не подрывая возможности будущих поколений удовлетворять их соответственные потребности». Наши оптимальные — с позиции современных знаний — действия в условиях меняющегося климата можно считать одним из основных факторов, определяющих устойчивое развитие. Хроника событий последних десятилетий наглядно демонстрирует нам, что сидеть сложа руки недопустимо. Что ж, давайте двигаться вперед, и, как гласит с детства знакомая фраза: дорогу осилит идущий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будыко М. И. Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 472 с.

Будыко М. И. Изменения климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.

Бялко А. В. Климат. Кризисы. Киотская конференция. — Природа, 1998, № 2, с. 3—5.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Климат на рубеже эпох. — Земля и Вселенная, 2001, № 6, с. 12—21.

Груза Г. В. Тенденция изменения климата. — Земля и Вселенная, 1997, № 4, с. 15—22.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Потепление неотвратимо? — Земля и Вселенная, 2003, № 3, с. 21—30.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Климат ближайшего будущего. — Земля и Вселенная, 2004, № 6, с. 3—9.

Кароль И. Л. Введение в динамику климата Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 216 с.

Кароль И. Л., Киселев А. А. Оценка ущерба «здоровью» атмосферы. — Природа, 2003, № 6, с. 25—30.

Кароль И. Л., Киселев А. А. Атмосферный метан и глобальный климат. — Природа, 2004, № 7, с. 47—52.

Коллинз У., Колмен Р., Моут Ф., Мэннинг М., Хэйвуд Д. Изменение климата: опасность растет. — В мире науки, 2007, № 11, с. 68—77.

Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 407 с.

Монин А. С. Введение в теорию климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 296 с.

Павлов А. В., Гравис Г. Ф. Вечная мерзлота и современный климат. — Природа, 2000, № 4, с. 10—18.

Щепинов С. А. Углекислый газ и климатические изменения. — Земля и Вселенная, 1993, № 2, с. 11—17.

МОНОГРАФИЯ

Игорь Леонидович Кароль,
Владимир Михайлович Катцов,
Андрей Александрович Киселев,
Нина Владимировна Кобышева

О КЛИМАТЕ ПО СУЩЕСТВУ И ВСЕРЬЕЗ

Редактор *О. В. Латина*. Корректор *Г. Н. Римант*.
Компьютерная верстка *М. В. Дукальская*.

Подписано в печать 18.04.2008. Формат 70 × 100/16. Печать офсетная. Печ. л. 3,5.
Тираж 500 экз.

Российский государственный музей Арктики и Антарктики. 191040, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 24а.
Типография «Моби Дик». 191119, Санкт-Петербург, ул. Достоевского, 44.

