

И. Л. КАРОЛЬ, А. А. КИСЕЛЕВ

ПАРАДОКСЫ КЛИМАТА

ЛЕДНИКОВЫЙ
ПЕРИОД ИЛИ
ОБЖИГАЮЩИЙ
ЗНОЙ?



НАУКА
И МИР

OZON.RU

К ЧИТАТЕЛЮ

Наша книга посвящена современному климату Земли. На эту тему в последние годы написано немало. И потому закономерен вопрос о целесообразности нового к ней обращения. Приведем следующие аргументы в пользу необходимости написания книги нами, климатологами, именно сегодня. Во-первых, климат меняется, причем весьма интенсивно. Подтверждением тому служат не только наши субъективные ощущения, но и получаемые на бесперебойной основе данные наблюдений (мониторинга, в том числе спутникового). Растет число природных катастроф. Изменения эти происходят вокруг нас, в среде, в которой мы живем, а следовательно, касаются непосредственно каждого, лишая возможности занять удобную позицию стороннего наблюдателя. Выражаясь языком капитана Жеглова, здесь у нас «любовь с интересом»...

Во-вторых, как никогда, насущна задача отыскания причин изменений климата. Если надежно установить механизмы, определяющие поведение климатической системы Земли, можно успешно прогнозировать будущие изменения климата, а со временем, возможно, и направлять эти изменения

в желаемое русло. Заманчиво? Безусловно, однако... Есть немало тем, вызывающих живой общественный интерес, сведушими в которых себя мнит большинство людей. Говорят, в голове каждого из 190 миллионов бразильцев имеется свой вариант непобедимой национальной футбольной сборной, а любой итальянец уверен, что только ему известен «самый правильный» рецепт приготовления пиццы. О причинах изменений современного климата, конечно, высказываются не все, но «свежий взгляд» на проблему обнародуют астрономы и географы, математики и историки ... чиновники и экстрасенсы. Особой любовью тема пользуется у геологов. Несомненно, у климатологов нет эксклюзивного права на формирование гипотез о пружинах механизмов, изменяющих климат. Однако всякая гипотеза должна быть не просто сформулирована, но и подкреплена фактами и расчетами, она также не должна входить в противоречие с имеющимися основами климатологии. К сожалению, специалисты в смежных дисциплинах, что вполне объяснимо, «не держат руку на пульсе» последних изысканий в области климатологии и метеорологии, в результате чего их «астрономическая» или «геологическая» теории обязательно уходят корнями в поле деятельности автора, а для подкрепления теорий выбираются исключительно согласующиеся с ними данные мониторинга. Мы умышленно не персонифицируем и не излагаем подобные теории, памятуя об опыте древних, постановивших забыть Герострата...

В-третьих, наша книга — резонанс на «труды праведные» многих журналистов и деятелей искусства. Общественный интерес к проблеме изменений климата порождает соответствующее предложение. И вот уже на гребне этого интереса появляется несколько фильмов-катастроф, а телепередачам и статьям в печатных СМИ несть числа. При этом квалифици-

рованные оценки специалистов воспринимаются буднично, без особых эмоций, и остаются почти незамеченными. Зато чем нелепее высказываемая «теория», тем выше ажиотаж в прессе. Понятно, что здесь главенствует принцип «деньги не пахнут». Но людям в нашей стране, традиционно привыкшим доверять печатному слову, тем самым наносится серьезнейший вред. Кто-то принимает такие публикации за чистую монету, кто-то, напротив, теряет доверие и составляет нелicenseприятное мнение об «ученых», несущих несусветную чушь, кто-то, ознакомившись с двумя-тремя противоречащими друг другу нелепицами, и вовсе перестает интересоваться проблемой («пусть сначала они договорятся между собой, а потом дают интервью»). Очевидно также, что поток подобных спекулятивных опусов ведет к неизбежному падению и без того невысокого в России престижа науки и просто знаний.

И наконец, несмотря на обилие посвященных климату публикаций «малого формата» (заметок, интервью, статей и т. д.), существует ... дефицит книг на эту тему. Именно книг, так как *только в формате книги* можно предоставить читателю необходимый объем информации и охватить весь клубок взаимодействий процессов, оказывающих влияние на климат нашей планеты.

Руководствуясь вышеупомянутыми мотивами, в этой книге мы постарались рассказать «правду, только правду и ничего кроме правды» о современном климате Земли, явлениях, формирующих климат, тенденциях его изменения, влиянии состояния природной среды на различные сферы человеческой деятельности, о том, каким образом *скорее всего* изменится климат в недалеком будущем и как это отразится на нашей повседневной жизни. В ней вы не найдете дутых сенсаций и рассказа о новых фундаментальных законах, сравнимых

по значимости, к примеру, с законом всемирного тяготения. Зато узнаете о вехах в развитии климатологии, а также о многих любопытных фактах, случившихся на ее историческом пути.

Благодарности

Мы признательны сотрудникам Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова кандидатам физико-математических наук Юрию Эдвиновичу Озолину и Елене Ивановне Хлебниковой, ставшим первыми читателями и благожелательными критиками нашей рукописи.

В книге использованы иллюстрации из отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата 2001 и 2007 гг. (<http://www.ipcc.ch/>) и Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 г. (<http://www.meteorf.ru/>).



ГЛАВА ПЕРВАЯ

ГОВОРим «КЛИМАТ» — ПОДРАЗУМЕВАЕМ «ПОГОДА»

Не браните погоду — если бы она не изменялась, девять человек из десяти не смогли бы начать ни одного разговора.

Ф. Хаббард

Климат в Ирландии изумительный, но погода его гробит.

Тони Батлер

ПОГОДА И КЛИМАТ: В ЧЕМ РАЗНИЦА МЕЖДУ НИМИ

Давно замечено: если нужно поддержать разговор, а тему, как назло, не найти — говори о погоде. Вариант беспроегрышный: ведь все присутствующие — лица заинтересованные и до некоторой степени сведущие. В последние же годы интерес людей к данному фактору, в немалой степени определяющему наше бытие, многократно усилился, чему есть вполне объективные предпосылки.

Во-первых, еще совсем недавно погода воспринималась людьми как данность свыше, не зависящая от их воли и вынуждающая к себе приспособляться. Но сегодня, во многом благодаря настоящему прорыву в областях компьютерных технологий и спутниковых наблюдений, перед человечеством открылись возможности всестороннего изучения процессов формирования погоды и климата, причин их изменений, а также в какой-то степени, пусть ничтожно малой, влиять на эти процессы (в качестве примера — предотвращение осадков

во время празднования дней города в Москве и Санкт-Петербурге).

Во-вторых, резко возросло количество людей, совершающих дальние поездки — деловые, туристические и пр. К слову, только в 2010 и 2011 гг. зарубежные вояжи совершили около 12 и 14,5 миллионов, соответственно, т. е. каждый двенадцатый из наших соотечественников. Во избежание неприятных сюрпризов, путешествующий должен соотнести свои программу и экипировку с особенностями погодных условий в месте пребывания.

В-третьих, накопленная в ходе исследований информация свидетельствует о том, что климат меняется, более того, темпы его изменения в XX в. были беспрецедентно высоки. Последнее обстоятельство стало предметом серьезной обеспокоенности, и сегодня о климате не рассуждает только ленивый. 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, которыми при обсуждении ее грешат многие, в том числе и весьма солидные издания и телеканалы.

Весомый вклад в «подогрев» интереса к данной проблеме внесло и «жаркое лето 2010». Чуть ли не каждый день приносил на европейскую территорию России рекордные температуры: +38,9 °C — 28 июня в Воронеже; +35,5 °C — 21 июля в Туле; +38,1 °C — 27 июля в Орле; 28 июля пал державшийся с 1981 г. московский рекорд — теперь он равен +38,2 °C. А 12 июля на калмыцкой метеостанции Утта зарегистрирована максимальная за весь период наблюдений в стране температура +45,4 °C. В Санкт-Петербурге рекорд устоял, но от жары треснула стеклянная Башня Мира, подаренная Францией

к 300-летнему юбилею города. Неудивительно, что о «глобальном потеплении» в этот период говорилось повсюду.

Между тем считать тот почти двухмесячный изнуряющий зной очевидным свидетельством глобального потепления климата оснований не больше, чем, скажем, заранее объявить чемпионом команду, победившую в первых пяти играх из запланированных пятидесяти. Парадокс? Отнюдь! Дело в том, что в обиходе понятия «погода» и «климат» зачастую отождествляют, а это неверно. Чуть вольно перефразируя известнейшего российского специалиста в области геофизики академика А. С. Мони́на, 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 (к примеру, Вологодская), так и вся Западная Сибирь или Южная Америка, а также и весь земной шар. Но 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 получить 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 температур, сродни средней температуре по больнице) и пригодно только для изучения самых общих закономерностей климата нашей планеты.

Вышеприведенное определение климата содержит довольно расплывчатое указание на срок наблюдений. Действи-

тельно, какой промежуток времени следует считать «продолжительным» — месяцы, годы, десятилетия? Он не должен быть чересчур коротким, поскольку тогда изменениями 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. 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 находится где-то посередине.



Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО), оптимальным полагается период продолжительностью 30 лет, а современным состоянием климата считается его среднее состояние за 1961–1990 гг.

Почему отсчет по сей день ведется именно до уже далекого 1990 г., а, например, не до 2000 или 2010 гг., вправе поинтересоваться читатель. В достаточно консервативной ВМО традиционно считается, что негоже менять границы выбранного интервала ранее его завершения (как, скажем, недопустимо сообщить футболистам в перерыве матча, что второй тайм будет играть по баскетбольным или хоккейным правилам). В этом есть определенный резон: результаты различных исследований приводятся к некоторому *единому хорошо известному всем* «знаменателю», и их удобно сравнивать и анализировать. Так что появления новых границ тридцатилетнего периода, *официально рекомендованного ВМО*, придется подождать до 2020 г., хотя в научной периодике уже сейчас встречаются работы, в которых в качестве «стандартного» рассмотрен период 1980–2010 гг.

Несомненно, выбор промежутка времени несет в себе элемент произвола: почему именно 30 лет? Начиная с Международного геофизического года, проводившегося под эгидой ООН в 1957 г., мировое сообще-

ство предприняло успешные шаги по созданию и развитию всемирной системы контроля за окружающей средой, включающей регулярный мониторинг метеорологических элементов — температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, количества осадков и т. д. — не только у земли, но и на высотах. Таким образом, к моменту принятия вышеуказанной рекомендации уже существовал достаточно полный банк метеорологических данных, охватывавший приблизительно тридцатилетний период измерений. Дав волю фантазии, можно сравнить климат с толстенным отрывным календарем, рассчитанным на 30 лет, где каждый листок соответствует погоде в означенный на нем день.

Исходя из данного определения, скоропалительные выводы обычных людей, измаявшихся на солнцепеке («Вот оно глобальное потепление, а дальше будет еще хуже!») или продрогших в 30-градусный мороз на автобусной остановке («И они говорят о каком-то глобальном потеплении?!») спешем на всплеск эмоций и на ... вполне простительную некомпетентность. В этих репликах, заметьте, главным является слово «потепление» (здесь и сейчас!), а определение «глобальное» добавляют, не задумываясь, следуя укоренившемуся словесному штампу. Однако в устах специалиста оба этих слова одинаково важны. В 2010 г. *среднеиюльская* температура воздуха в Москве превзошла *среднеклиматическую* (т. е. среднюю в июле за 30 лет) на 7,8 °C — это очень много, но... Чтобы получить «июльскую добавку» к московской *среднегодовой* температуре, нужно разделить ее на число месяцев в году ($7,8\text{ °C} : 12 = 0,65\text{ °C}$). Если же мы захотим найти долю этой «июльской добавки» в *глобальной* среднегодовой температуре, нам придется снова делить — теперь на количество разбросанных по всему миру метеорологических станций, исчисляемых тысячами, и в результате доля эта окажется ничтожно мала.

В то же время измерения показали рост глобальной среднегодовой температуры — той самой, которая сродни «средней по больнице» — с начала XX в. по настоящее время приблизительно на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1), а это означает, что устойчивое увеличение температуры зафиксировано на большинстве действовавших в течение прошлого столетия метеостанций. Специально отметим: именно на большинстве, поскольку на земном шаре найдутся регионы, в которых не наблюдалось уверенного роста среднегодовой температуры, хотя в среднем по всему земному шару среднегодовая температура возрастала.

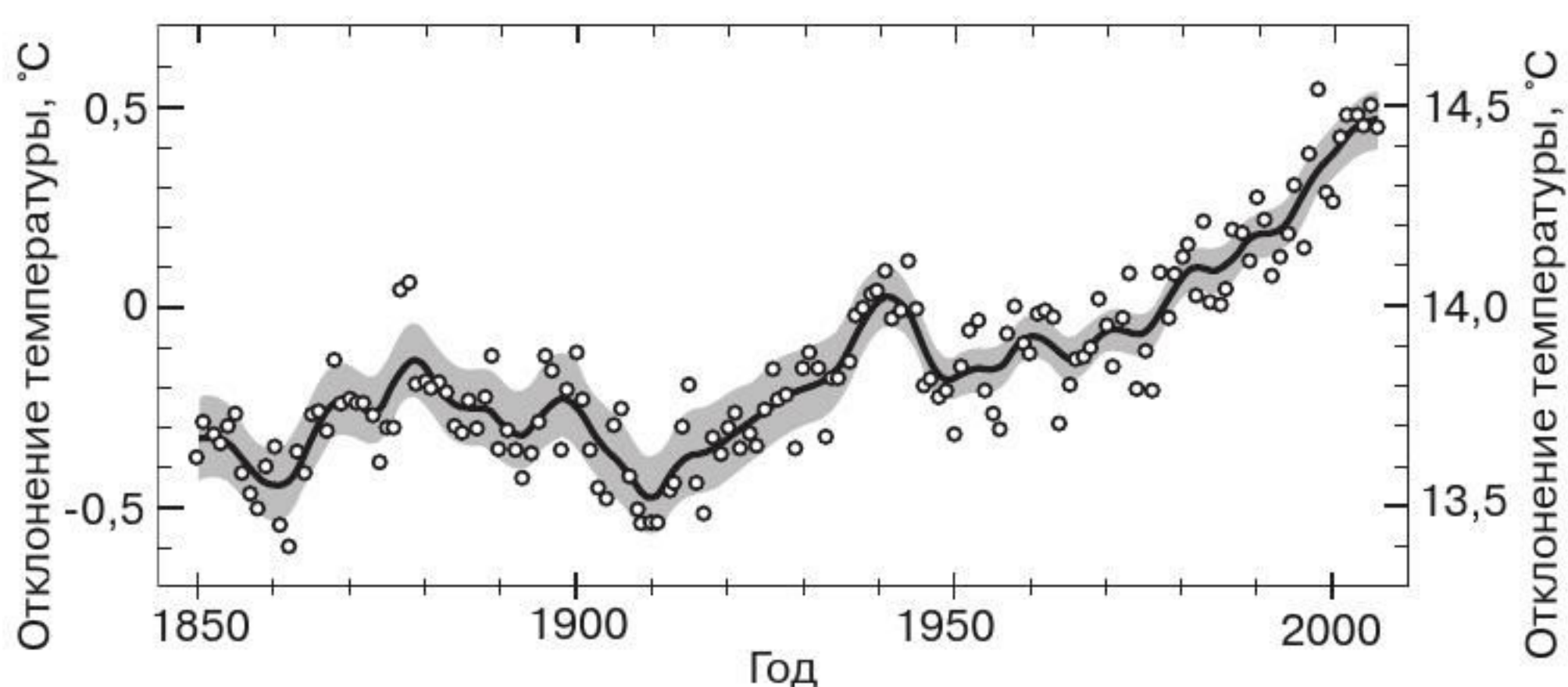


Рис. 1. Изменение среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха относительно средней за 1961–1990 гг. Усредненная кривая, кружки — значения отдельных лет



Резюмируем сказанное. В течение прошлого столетия среднегодовая температура у поверхности Земли в каких-то географических точках росла быстрее, в каких-то — медленнее, иногда и вовсе убывала. Рост этот не был монотонным: после нескольких лет увеличения температура могла снижаться, затем снова возрастать и т. д. (рис. 2). Но когда все данные о среднегодовых температурах «на местах» были

собраны воедино и по ним была найдена среднегодовая температура — средняя по всей поверхности земного шара, оказалось, что она заметно возросла. И вот это явление (и только его!) климатологи называют «глобальным потеплением климата».

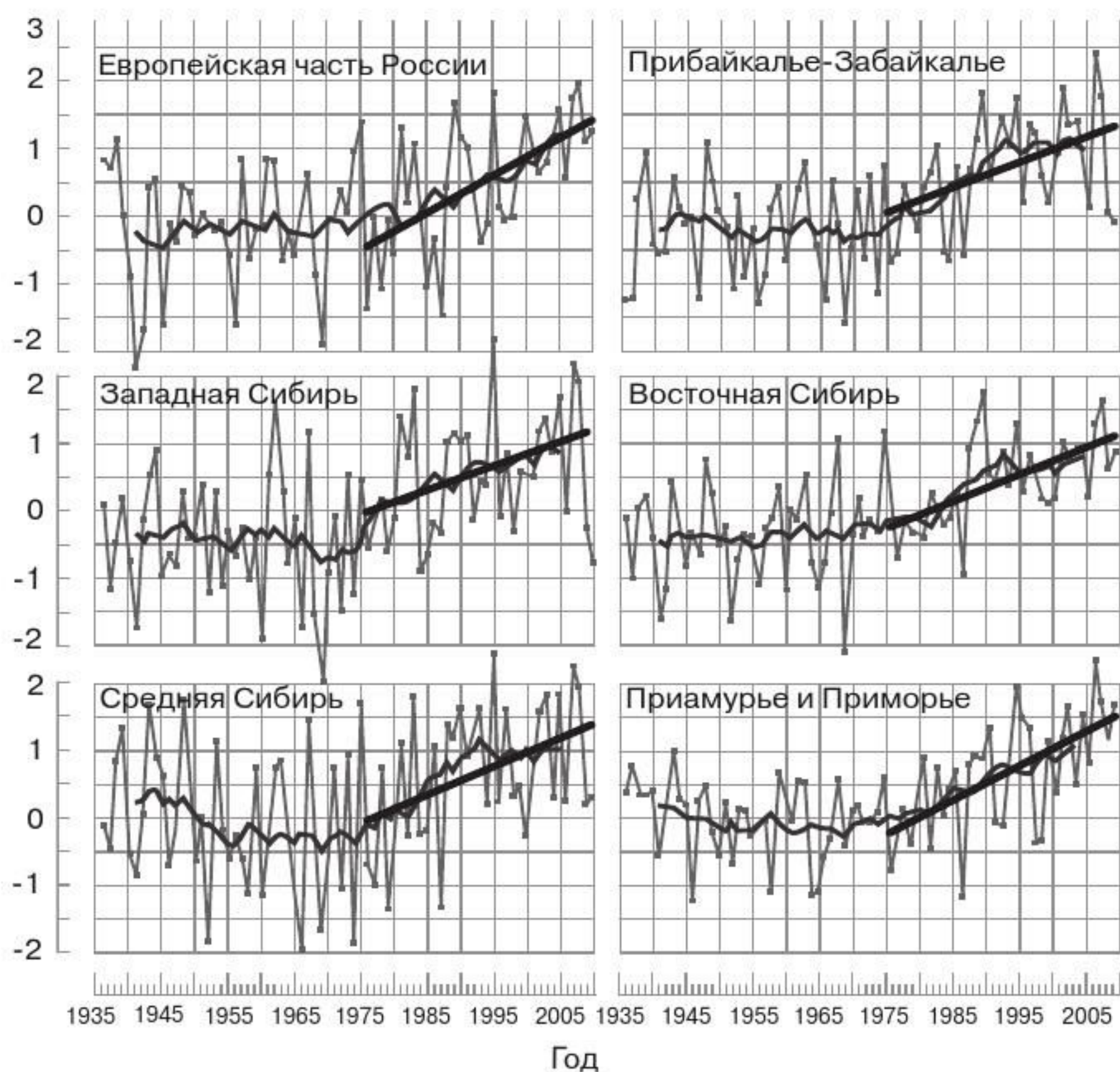


Рис. 2. Средние годовые аномалии температуры приземного воздуха (°C) для регионов России за 1936–2010 гг. Усредненные кривые; прямые линии иллюстрируют темпы роста температуры в период 1976–2010 гг.

Теперь еще раз обратимся к светской беседе о погоде. Почти наверняка она будет содержать «добрые» слова в адрес синоптиков. По мнению неизвестного остроуслова, «синоптик — человек, который ошибается только один раз, зато каждый день». Ему вторит вполне известный Ален Шеффилд:

«Метеорология — научное обоснование неверных прогнозов». Пожалуй, ограничимся этими двумя суждениями, хотя на эту же тему высказывались такие великие остроумцы, как Оскар Уайлд, Марк Твен, Джером Клапка Джером, Станислав Ежи Лец. Безусловно, жертвами неудачных прогнозов погоды становились все, не минула чаша сия и авторов данной книги. Однако это обстоятельство не помешает нам сказать несколько слов в защиту людей, ежедневно кропотливо собирающих, обрабатывающих и анализирующих оперативную метеорологическую информацию, чтобы в урочный час сообщить нам, каких сюрпризов можно ждать от погоды в самое ближайшее время.

Начнем с банального: точных прогнозов погоды несравненно больше, чем ошибочных. Косвенным признанием этого факта служит то, что даже после провальных прогнозов мы проявляем интерес к очередному и в соответствии с ним зачастую планируем свои действия. Признайтесь, стали бы вы так поступать, если бы удача сопутствовала синоптическим оракулам лишь в одном-двух случаях из десяти?

Следующая мысль, скорее всего, вызовет искреннее недоумение читателя: абсолютно верный прогноз довольно часто воспринимается потребителем как ошибочный. И вот почему. Обычно прогноз дается для достаточно больших площадей — городов, областей или крупных районов. Конечно, если имеет место сплошная облачность, ошибиться в ближайших перспективах данной местности проблематично. А если облака на небе — все наперечет и на каждую деревню их не хватает? Как в этом случае отреагируют на прогноз «дожди» жители окропленной дождем деревни «А» и не дождавшейся осадков соседней деревни «Б»? По-разному... Потребитель всегда прав? Вряд ли в обозримом будущем кому-либо из нас доведется услышать такой прогноз: «Завтра в Кривоколенном

переулке города N-ска сильный дождь будет идти с 15 час. 34 мин. до 17 час. 18 мин.». Увы, подобный точечный прогноз — несбыточная мечта.

Тем не менее время от времени синоптики ошибаются. Постараемся разобраться почему. Существуют три разных подхода к составлению прогноза. Первый из них основан на решении системы дифференциальных уравнений. Уравнений настолько сложных, что получить их точное решение фактически невозможно. Помогают компьютеры, позволяющие ценой некоторых упрощений найти решение, «близкое к правде». Во втором подходе прогноз зиждется на мастерстве и опыте конкретного синоптика, который, анализируя карты текущего (измеренного) состояния наиболее важных метеорологических величин («предикторов») и их изменчивость, выносит свой «вердикт». Третий подход — «примитивистский». В несколько упрощенном виде суть его такова. На метеорологических станциях по несколько раз в сутки измеряются многие характеристики: температура, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, балл облачности и др. Затем все полученные данные архивируются (с недавних пор они заносятся в мощный компьютер — не только текущие, но и датированные несколькими десятилетиями ранее). Для составления прогноза на следующий день компьютер перебирает все имеющиеся в архиве варианты в поисках совпадения метеорологических характеристик, имеющих место на текущий день. При достаточно обширном архиве подобное соответствие отыщется наверняка. Предположим, совпали метеорологические характеристики 4 июля 2012 г. и 18 июня 1982 г. Извлекаем из архива данные на 19 июня 1982 г., и прогноз на 5 июля 2012 г. готов! Идея третьего подхода не нова, однако его реализация стала возможной

только после внедрения быстродействующих вычислительных систем, ведь оперативно перебрать десятки тысяч наборов ежедневных данных человеку не под силу. Хотя в общем-то народные приметы можно рассматривать в качестве предтечи третьего подхода.

Меньше всего неприятностей доставляет синоптикам ситуация, когда над регионом господствует циклон или особенно антициклон (области низкого и высокого давления, соответственно). Куда менее определена ситуация, при которой равносильные циклон и антициклон соперничают между собой; она становится совсем скверной, если это соперничество затягивается надолго. В последнем случае погода может даже измениться несколько раз в течение одного дня. Ну, и куда, скажите, при этом скрыться бедному синоптику от праведного народного гнева? Отчасти спасти положение может наработанная годами интуиция профессионала.

Другой источник синоптических ошибок — большая заблаговременность прогноза. Практика показала, что прогноз на три дня чаще в целом соответствует действительности, прогноз на 5–7 дней — не исключено, что оправдается, но вот прогнозу на 10 дней и более может доверять лишь человек, непоколебимо убежденный в исключительном даре ясновидения у сотрудников Гидрометцентра.

Проиллюстрируем ситуацию с заблаговременным прогнозом примером стрельбы по мишени (рис. 3). При выстреле траектория пули неизбежно отклонится от прямой, соединяющей кончик оружия и центр мишени — точку «0». Пока мишень расположена достаточно близко, пуля все равно попадет в ее габариты. Однако по мере отдаления мишени от стрелка расстояние между местом попадания пули в мишень и точкой «0» будет увеличиваться, и в какой-то момент пуля пройдет мимо мишени. Теперь представим, что три изображенные мишени — это реальные погодные условия, которые будут иметь место через 1, 5 и 10 дней соответственно, а траектория пули — прогноз, сделанный сегодня на базе данных вче-

рашних измерений. При увеличении срока заблаговременности прогноза заложенные в самом прогнозе ошибки¹ к десятому дню накапливаются, и его качество стремительно падает.

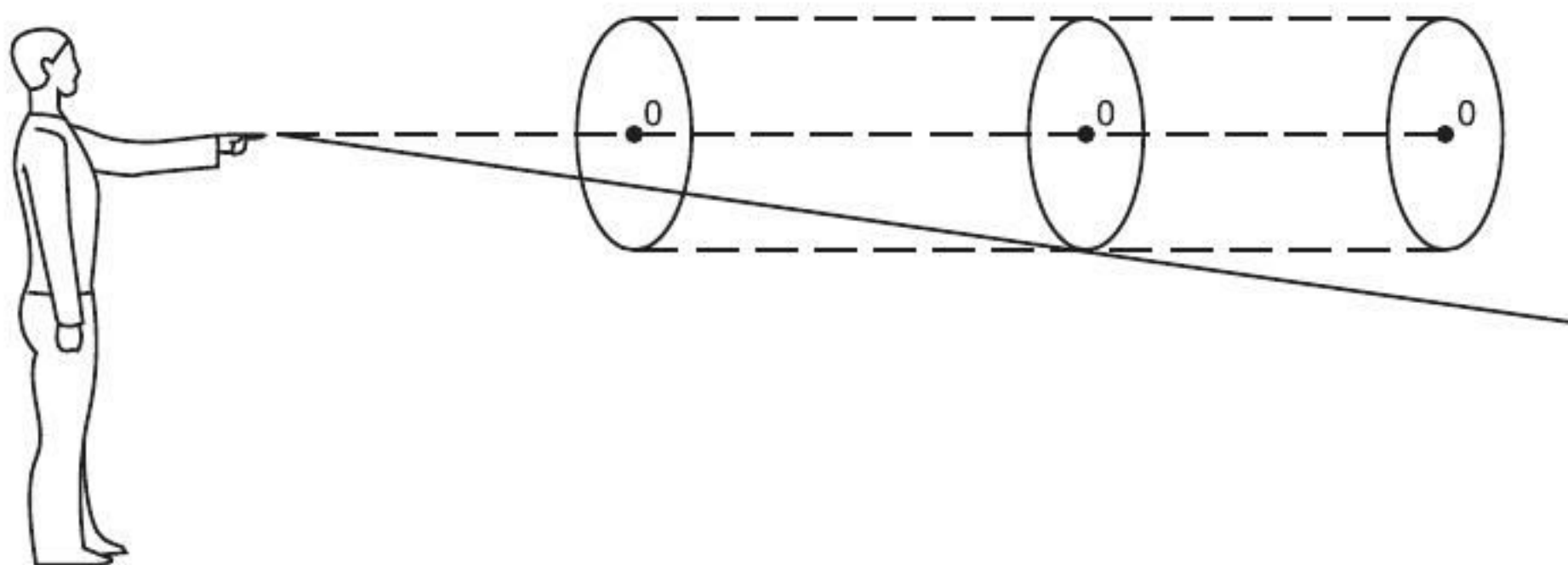


Рис. 3. Иллюстрация зависимости степени точности заблаговременного прогноза от его сроков



По мнению практикующих синоптиков, 15 дней — предельный срок, на который *теоретически* допустимо давать прогноз (в данном случае речь идет о европейской территории России. В других местах с более или менее устойчивой погодой эти сроки могут быть иными, а вот на Мальдивских островах практически круглый год сохраняется одна и та же температура — около $+28^{\circ}\text{C}$, и тамошним жителям прогноз погоды вообще ни к чему...).

Почему именно 15 дней? Строгое обоснование этого утверждения требует знания основ гидромеханики. Не будем вдаваться в детали и опять прибегнем к аналогии. Каждый из нас, наблюдая за летящим самолетом,

¹ Прогноз на каждый следующий день строится исходя из того, что данные за предыдущий день безошибочны (что, разумеется, не так!). Примитивный пример: пусть за первые 4 дня накопилась ошибка в 1°C , но при прогнозе на пятый день температура за четвертый день считается истинной (т. е. ошибка равна нулю), сам прогноз пятого дня даст свою относительно небольшую ошибку, например $0,3^{\circ}\text{C}$, однако с учетом ошибки, накопленной за предыдущие дни, общая погрешность будет уже $1 + 0,3 = 1,3^{\circ}\text{C}$ и т. д.

видел тянувшийся за ним шлейф, состоящий из продуктов сгорания в авиадвигателях. Сначала такой шлейф представляет собой четкую линию, но вскоре линия начинает размываться, а через несколько минут и вовсе исчезает из поля зрения. В момент выхода из сопла самолета все частицы продуктов сгорания в основном продолжают двигаться с одинаковой скоростью и в одном направлении, совершая *упорядоченное* движение. Однако далее эти вновь прибывшие в атмосферу частицы, подвергшись воздействию совершенно неупорядоченных *турбулентных* потоков, перемешиваются с фоновыми воздушными частицами, и шлейф перестает существовать. Причин возникновения турбулентных движений великое множество, например неровности и неоднородность земного рельефа, лесные пожары и пр. В большинстве случаев в атмосфере упорядоченные потоки имеют большую мощность, нежели турбулентные, но это не означает, что последние не играют заметной роли в атмосферной циркуляции. При существующих в атмосфере упорядоченных скоростях движения воздушных потоков упорядоченное движение разрушается турбулентным приблизительно за те самые 15 дней. А прогнозировать поведение образовавшегося хаотического движения — занятие бесперспективное.

Возвращаясь к погоде на европейской территории России, отметим, что для этого региона характерно регулярное вторжение воздушных масс с запада, с Атлантического океана. В случае передвижения воздушной массы над сушей Западной Европы, она прогревается и «усыхает». Если же ее маршрут пролегает над Скандинавией (1) или Средиземноморьем (2), она становится более влажной и холодной (в первом случае) или влажной и теплой (во втором). Типичной для европейской территории России является ситуация, когда одна такая масса «сменить другую спешит, дав» конкурентке 2–4 дня.

Все вышесказанное относится к прогнозу погоды. А как обстоят дела с прогнозированием климата? Предвидим ответ внимательного читателя: «Если “они” с грехом пополам прогнозируют погоду на завтра, расписываются в полном бессилии прогнозировать ее даже на месяц, то что уж говорить о сроках, исчисляемых годами и десятилетиями!»



Так вот, предвосхищать изменения климата в некотором смысле проще, чем предсказывать изменения погоды. Все явления, происходящие в воздухе, в воде и на земной поверхности, строго подчиняются законам природы, многие из которых нам хорошо известны. А следовательно, если составленный прогноз не войдет в противоречие ни с одним из таких законов, у него очень хорошие шансы реализоваться. Обратите внимание, в отличие от прогноза погоды, в данном случае речь не идет о реализации прогноза к какой-то конкретной дате. Предсказываемое может произойти несколькими годами раньше или, наоборот, запоздать, но оно произойдет обязательно!

Поясним этот тезис на простом примере. Мальчики пустили по реке два кораблика (рис. 4). Первый из них, оказавшись на середине реки, беспрепятственно проследовал вниз по течению до условного пункта «А», второй же прибил к заводи, далее попал в водоворот и лишь затем, много позже первого, достиг того же пункта «А». Но достиг!

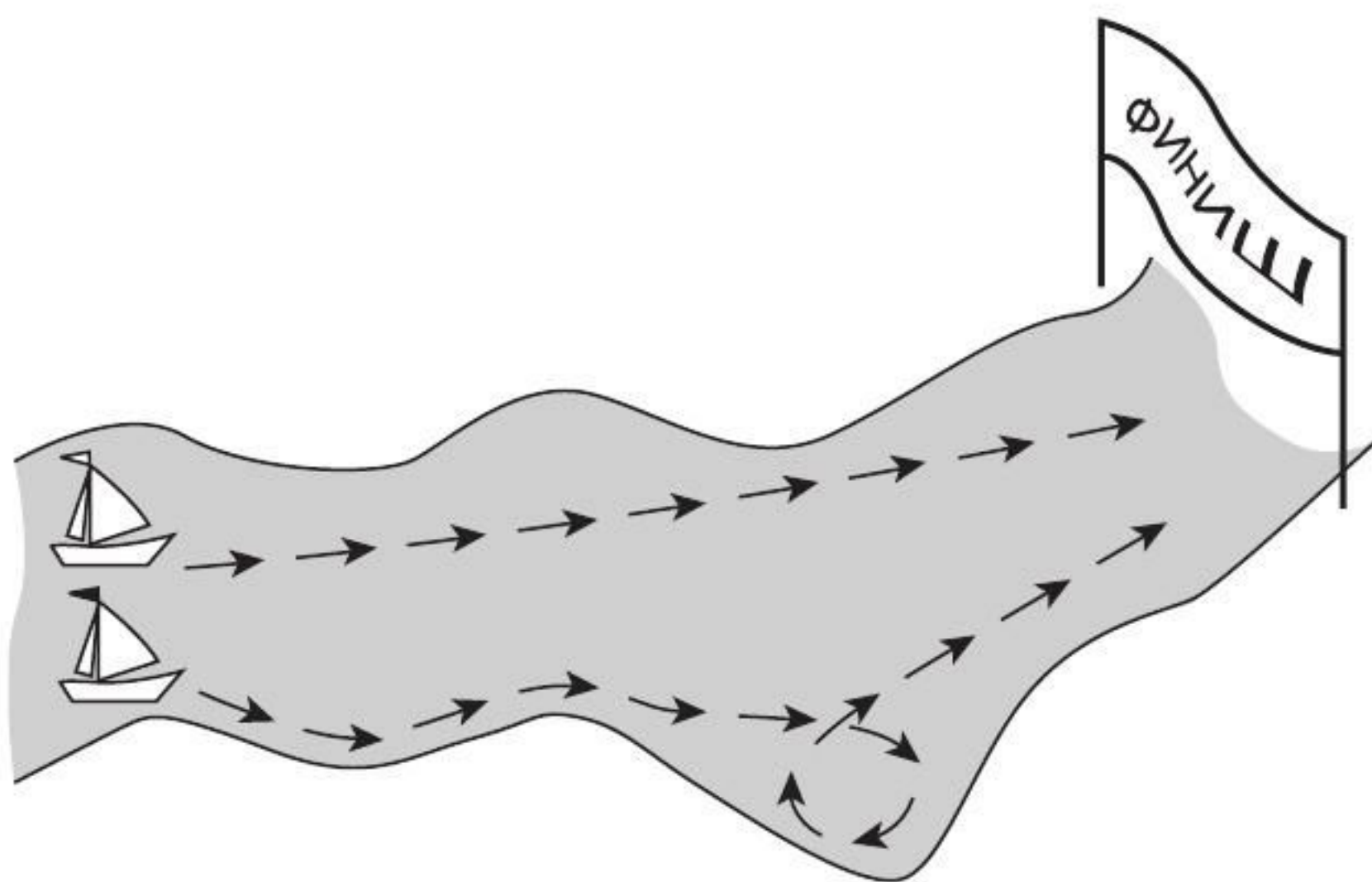


Рис. 4. Иллюстрация к вопросу об успешности климатического прогноза

Говоря о прогнозах изменения климата, необходимо упомянуть о двух важных аспектах. Во-первых, существуют предельные сроки, на которые в принципе возможно давать такие прогнозы, исходя из сведений о состоянии климата на сегодняшний день и в прошлом (климатологи в этом случае говорят о *предсказуемости* климата). Понятно, что несколько десятилетий вполне укладываются в такие временные пределы, а вот оценить, каким будет климат в IV тысячелетии, едва ли реально. Предсказуемость климата, совершенно очевидно, зависит от того, насколько точно нам известно его начальное состояние (*предсказуемость I рода*)¹, и от внешних воздействий на него в период, охватываемый прогнозом (*предсказуемость II рода*).

Для иллюстрации сказанного сравним предсказуемость климата с изменением состояния финансов некоего бизнесмена в течение ближайших трех месяцев. Размер его банковского счета через три месяца будет определяться суммой, находившейся на его счете сегодня, т. е. в начальный момент времени (аналог предсказуемости I рода), а также доходами и расходами в эти три месяца, как плановыми, так и, возможно, неожиданными. Произвести калькуляцию плановых операций, как правило, не трудно, хуже, когда возникают незапланированные («внешние») обстоятельства (аналог предсказуемости II рода). Последствия таких внешних обстоятельств могут быть как незначительными и кратковременными, так и существенными, приводящими к банкротству.

При реальном прогнозировании изменений климата мы всегда знаем лишь его *приближенное* начальное состояние,

¹ Для хорошего прогноза нужны точные величины температуры воздуха у земной поверхности, воды у поверхности и на глубине, влажности, распределения облаков по горизонтали и вертикали, давления воздуха, концентрации химических составляющих воздуха и воды и т. д. и т. п. в начальный — стартовый — момент времени. И все это в каждой из тысяч точек на земном шаре. Располагать достоверными данными обо всем этом абсолютно нереально! Но если мы заложим вместо них в модель «плохие» данные, то и прогноз будет плохим.

а о многих будущих внешних воздействиях нам ничего не известно. Например, невозможно предвидеть где, когда и какой силы будут извержения вулканов в 2020 г. Здесь мы подходим ко второму важному аспекту: прогноз представляет собой оценку изменений климата под действием «неслучайных» процессов («калькуляцию плановых операций» в вышеприведенном примере). Однако случайные процессы могут весьма заметно исказить эту оценку! И тут на помощь приходит математическая статистика. В частности, продолжая пример с вулканическими извержениями, отметим наличие баз данных, содержащих информацию об их ежегодном количестве, месте, размере и химическом составе вулканических выбросов, а также оценки воздействия этих выбросов на климат, в первую очередь на температуру воздуха. Тогда предположив, что вулканическая активность в 2020 г. будет близка к средней за последние десятилетия, мы можем внести коррективы в оценку будущего изменения климата. Однако в реалиях вулканической активности 2020 г., вероятно, окажется несколько отличной от такой средней величины.



А потому любой климатический прогноз представляет собой оценку *наиболее вероятного* изменения климата. Чтобы дать представление о менее вероятных, но вполне возможных отклонениях от такой оценки, одновременно указываются пределы погрешностей климатического прогноза.

Разумеется, рано бить в литавры — вероятность ошибочности климатического прогноза достаточно велика. Во-первых, человеку, как известно, свойственно ошибаться. Он может недооценить или переоценить масштабы какого-либо явления

или его интенсивность или банально «потерять» нолик в расчетах. Во-вторых, еще замечательный французский математик Пьер Лаплас однажды сказал: «То, что мы знаем, — ограничено, а то, чего не знаем, — бесконечно». Поэтому незнание каких-то законов природы на современном этапе развития науки может *временно* привести нас к неверным умозаключениям. При всем при этом необходимо понимать, что успешное прогнозирование изменений климата имеет исключительную важность, так как с оглядкой на предполагаемое его состояние уже сегодня принимаются многие хозяйственные и политические решения.

Итак, надеемся, вы почувствовали разницу между понятиями «погода» и «климат». Оставим заботы о состоянии погоды Гидрометцентру и продолжим наш рассказ о климате.



ГЛАВА ВТОРАЯ

СИСТЕМА, БЕЗ КОТОРОЙ НАМ НЕ ЖИТЬ

Природа во всем действует постепенно, и больше тайно, чем открыто. Отношения и влияния здесь глубже и проще, чем кажутся при своем разнообразии, простираются удивительно далеко и чреватые последствиями.

К. Руммер

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛИ

По состоянию какой части природной среды люди судят о климате? Попробуйте с таким вопросом обратиться к случайному (расположенному к диалогу) прохожему. Почти наверняка его ответ будет кратким и безапелляционным: «Конечно, атмосферы!» Аргументы? — «Они очевидны. Температура, влажность, давление какой субстанции характеризуют климат? *Атмосферного* воздуха. Ветер — результат движения *атмосферных* воздушных масс. Ареал носителей осадков — облаков — снова *атмосфера!*» А температура воды в ближайшем водоеме, например в озере? — «Что ж, в купальный сезон это тоже немаловажно: озеро — не бассейн с подогревом, вода в нем нагревается опять же через *атмосферу...*». Если подходить с позиций обывателя (в изначальном, не уничижительном смысле этого слова), так оно и есть. Он, обыватель, имеет полное право не вникать в «климатологическую кухню», а пользоваться

информацией, «приготовленной» специалистами. Но наш-то с вами путь лежит прямо на эту самую «кухню».

Достаточно очевидно, что климат тесно связан с особенностями границы атмосферы и поверхности Земли — *подстилающей поверхности* (суши с различными видами растительности и рельефа, океанами, морями и реками). Будет климат «сырым» или «сухим» зависит от близости водоемов или пустынь, свою специфику имеет горный климат и т. д. Климат — продукт целой системы. Природную среду, в которой мы живем и в которой формируется климат нашей планеты, обычно называют *климатической системой Земли*.



Климатическая система включает в себя не только *атмосферу*, но и *гидросферу* (все океаны, моря, озера, реки), и *литосферу* (сушу), и *криосферу* (снег, морской и горный лед, а также лед, содержащийся в материковых щитах Гренландии, Антарктиды и полярных островов, и, кроме того, «вечную мерзлоту», захватывающую, представьте, $\frac{2}{3}$ российской территории), и, наконец, *биосферу*, объединяющую все виды живого. Все эти составляющие климатической системы находятся в тесной связи друг с другом, обмениваясь энергией и массой.

Классическим примером такого обмена служит круговорот воды в природе. Благодаря способности к фазовым переходам, вода присутствует в климатической системе в разных ипостасях. Водяной пар и мельчайшие облачные частицы являются «полномочными представителями» воды в атмосфере, снег и лед выполняют ту же роль в криосфере, гидросфера по самой своей сути — царство воды, даже тела многих

живых организмов в значительной степени (человека — на 70–80%) состоят из воды. Каждый фазовый переход сопровождается потреблением или выделением тепла (энергии); при этом общая масса воды во всей системе сохраняется, но происходит перераспределение масс в ее составляющих (рис. 5 и рис. 1 цветной вклейки).

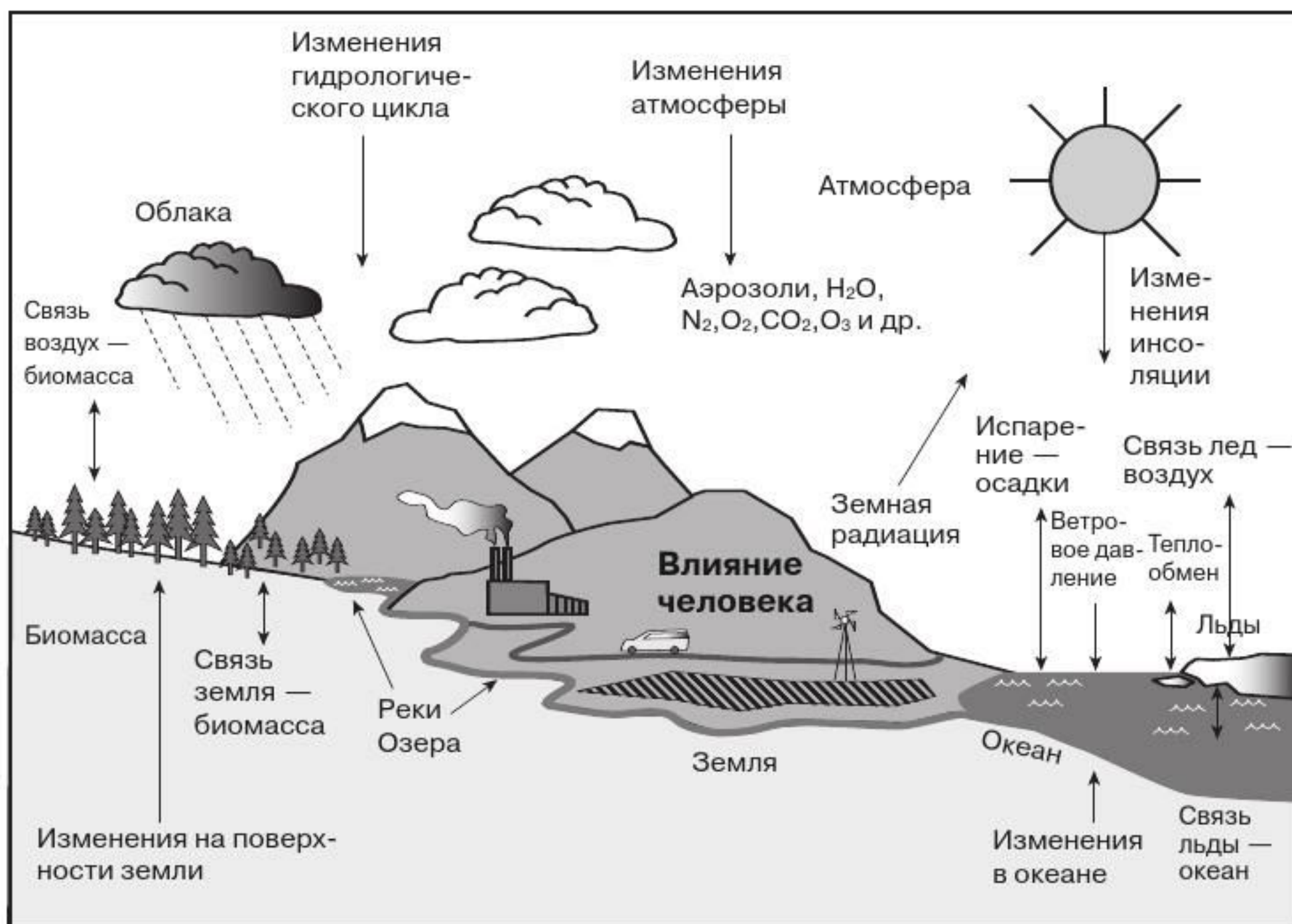


Рис. 5. Составляющие климатической системы Земли и их взаимосвязи

Составляющие климатической системы существенно различаются по массе: масса атмосферы, оцениваемая примерно в $5,3 \cdot 10^{15}$ т, меньше в 5 раз массы слоя грунта толщиной 10 м, в 15 раз уступает массе поверхностного слоя океана толщиной 240 м. Еще разительнее соотношение их суммарных теплоемкостей — 1(атмосфера) : 11(грунт) : 70(океан). Теплоемкость, как известно, есть мера тепловой инерции вещества. Каждому из нас случалось наблюдать, как летним вечером

после захода Солнца раскаленный воздух довольно быстро становится прохладным, в то время как вода в небольшом водоеме вплоть до следующего восхода остается почти такой же теплой. Сказывается то обстоятельство, что вода сохраняет тепло в 4–5 раз эффективнее, чем воздух, т. е. обладает большей, чем воздух, теплоемкостью. Поэтому нет оснований удивляться тому, что 240-метровый поверхностный слой океана, превосходя в 15 раз по массе атмосферу, приблизительно в 70 раз лучше сохраняет тепло. Грунт также обладает большей теплоемкостью, чем воздух, хотя здесь разница заметно меньше.



Выбор 10-метрового слоя грунта и 240-метрового слоя океана не случаен — именно такие слои участвуют в *сезонном энергообмене* (летний нагрев и зимнее их охлаждение) с атмосферой.

Самые «тяжелые» сегменты климатической системы — глубокий океан с массой в 240 масс атмосферы и теплоемкостью, превышающей атмосферную в тысячу раз, и материковые льды, которые в 5,4 раза тяжелее атмосферы и обладают теплоемкостью в 11 раз выше атмосферной.



Прямым следствием сказанного является то, что 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 сегментов системы. Характеристикой таких изменений служит так называемое *время релаксации*, т. е. время пере-

хода и установления нового климатического режима при изменении внешних условий. Меньше всего оно у атмосферы — недели и месяцы, а также у поверхностного слоя океана — годы и десятилетия. У материковых льдов из-за больших затрат тепла на таяние время релаксации составляет тысячелетия, но в настоящий период потепления климата наблюдается заметное ускорение этого процесса в ледниках Гренландии и отчасти Антарктиды, что чревато сокращением времени релаксации (исчезновения) до нескольких столетий.

Изменения климатических режимов с периодами в несколько десятилетий происходят в атмосфере, биосфере, на поверхности суши и океана, отчасти «тревожа» материковые льды, однако они не захватывают глубинный океан. Только ледниковые периоды прошлого отражались на *всех* составляющих климатической системы и даже на верхнем слое земной коры — *астеносфере*, которая «проседала» под тяжестью больших ледниковых щитов Евразии и Северной Америки.

Понятно, что для описания и количественных оценок взаимодействий между всеми этими сегментами климатической системы необходимо значительное число соответствующих характеристик. Поэтому физических величин, характеризующих текущее состояние климатической системы, насчитывается несколько десятков. Лишь немногие из них (температура воздуха и водоемов, скорость и направление ветра, давление воздуха и осадки) представляют повседневный интерес для обычного человека. Но для специалистов — и синоптиков, и климатологов — не менее важны: положение областей

низкого и высокого давления воздуха, наличие или отсутствие облачности, типы и толщина облаков, отражательная способность (альбе́до) поверхности, уровни солености и кислотности морской воды, ее температура и многие другие показатели.

С тех пор как получение значений таких показателей посредством спутникового мониторинга стало рутинной процедурой, на головы специалистов регулярно сваливаются мегабайты необходимой им информации. С одной стороны, еще пару десятилетий назад об этом можно было только мечтать, но, с другой, в таком потоке чисел трудно не «утонуть». К счастью, в климатических исследованиях каждое число — результат замера высокочувствительного датчика — не имеет большой самостоятельной ценности, но важно в ряду себе подобных.

Поясним эту несколько заумную фразу на простом примере. Допустим, на метеостанции в течение часа произведено 10 замеров скорости ветра, которые дали следующие результаты:

№ замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость ветра (м/с)	4,3	3,7	-2,2	8,1	7,3	1,0	1,4	2,5	3,3	-0,4

В какие-то моменты ветер усиливался, в какие-то даже менял направление на противоположное, а общий разброс значений достигал 10,3 м/с. Однако если в нашу задачу не входит анализ его флуктуаций, а интересна лишь общая характеристика за весь час, то резонно использовать в качестве таковой среднее арифметическое всех приведенных замеров. В нашем примере оно равно 2,9 м/с. Два отрицательных значения, несомненно, не отражают превалировавших в этот час тенденций, но дают свой вклад в среднее значение за час (без них среднее из восьми положительных скоростей составляло бы 3,16 м/с, т. е. возросло на 9%).

В отличие от рассмотренного примера, длина ряда спутниковых измерений выражается числом со многими нулями, так что возможность осреднять данные оказывается «спасатель-

ным кругом», который позволяет климатологам «держаться на плаву» в этом океане чисел. Разумеется, вычислением среднего арифметического обработка поступающей информации не ограничивается — используется весь арсенал методов математической статистики.

К сожалению, далеко не все климатические параметры можно непосредственно измерить, и для их получения приходится применять специальные методы (так называемое *решение обратных задач*), основанные на знании газовых законов, законов оптики атмосферы и др. При этом неизбежны погрешности в значениях таких параметров, устранить или хотя бы уменьшить которые также помогает математическая статистика.

В климатической системе Земли существуют две основные периодичности: *суточная* (вращение Земли вокруг своей оси) и *сезонная* (вращение Земли вокруг Солнца), и эти периодичности формируют распределение основных климатических характеристик в пространстве и времени (см. рис. 2 цв. вклейки). Для упорядочения и систематизации этих характеристик часто прибегают к уже знакомому нам усреднению по однородным регионам и интервалам времени, обычно связанным либо с указанными периодичностями (среднесуточные, среднегодовые значения), либо с частями этих периодов (средние часовые, среднемесячные и среднесезонные величины). Среди перечисленных особо выделим месячные осреднения как в некотором смысле естественные: в природе существуют колебания, период которых близок к 30 дням. (Отчасти такие колебания могут быть обусловлены лунными периодами — «лунными месяцами».)¹ Этот факт

¹ Монин А. С. Введение в теорию климата. Л., 1982.

«узаконивает» широко распространенные месячные осреднения почти всех климатических величин в публикациях и архивах данных измерений. 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) соответственно.

Не секрет, что всеобщий интерес вызывают в первую очередь события и явления, суть которых до конца неясна, а развитие проистекает у всех на глазах. Именно таковы климатические явления. Если бы климат не изменялся, едва ли он интересовал бы нас больше, чем упоминавшийся прогноз погоды жителей Мальдивов. Да и неразгаданных загадок у климатической системы осталось великое множество. (В данном случае под изменениями климата подразумевается устойчивая тенденция к изменению какой-либо из его характеристик за *длительный промежуток времени*.) Как мы уже знаем, увеличение среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха на 0,7 °C с начала XX века до настоящего времени дало основание говорить о глобальном потеплении, повлекшем попутно изменения и других климатических характеристик. Существующие же относительно кратковременные изменения будем рассматривать как *колебания* 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 или 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 *непериодические* явления природы, в частности крупные извержения вулканов, сопровождающиеся забросом значительной массы газов и аэрозолей (пепла) в стратосферу. Как показывают измерения, продолжительность их воздействия составляет от одного года до трех лет.



Итак, отдельные части климатической системы Земли постоянно эволюционируют и взаимодействуют друг с другом.

Давайте поговорим об этом подробнее.



ГЛАВА ТРЕТЬЯ

■ НА ЗЕМЛЕ, В НЕБЕСАХ И НА МОРЕ ■

Все течет. Все меняется.

Гераклит (предположительно)

ЧТО ПРОИСХОДИТ ВНУТРИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Земля, воздух, вода — три стихии, от состояния которых зависит и качество нашей жизни, и само ее существование. Они же (в большей степени — воздух, т. е. атмосфера, в меньшей — остальные) воплощают в нашем сознании климат и его изменения. Это ли не основание приглядеться к ним повнимательнее!

ОКЕАН

«Земля» в русском языке не только название планеты, но и синоним суши, почвы, грунта. Тем самым как бы подчеркивается точный адрес «места жительства» человеческой цивилизации. Однако если бы имя нашей «голубой планете» давал астроном-инопланетянин, скорее всего он назвал бы ее «Океан»: как-никак 70,8% поверхности Земли (60,6% в Северном полушарии и 81% в Южном) покрыто водой.

Как уже говорилось, океан лидирует в климатической системе по массе и теплоемкости, а значит, и по роли в долговременных изменениях всей системы. Океан является основным энергоаккумулятором климатической системы, забирающим

дополнительную энергию Солнца в теплое полугодие (в каждом полушарии свое!) и отдающим энергию в атмосферу в холодное полугодие. В этом океан подобен аккумулятору автомашины: как она не заводится без аккумулятора, так и климатическая система «не работает» без постоянного участия океана.



Подсчитано, что не будь на Земле океана, средняя температура ее поверхности была бы $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. на $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже существующей.

В отличие от атмосферы — единого слоя на земном шаре, Мировой океан состоит из четырех крупных сосудов — океанов: *Тихого, Индийского, Атлантического и Северного Ледовитого*. Иногда еще выделяют *Южный океан* — южные части Тихого, Индийского и Атлантического океанов, примыкающие к Антарктиде. Он соединяет все эти «сосуды» в одну систему — *Мировой океан*. Основные характеристики каждого из океанов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики океанов

Название	Площадь, млн км ² (%)	Средняя глубина, м *	Наибольшая глубина, м	Объем, млн км ³ (%)	Средняя температура у поверхности, $^{\circ}\text{C}$ **
Тихий	178,7 (49,4)	3976	11 022	710,4 (53,0)	19,4
Атлантический	91,7 (25,4)	3597	8742	329,7 (24,6)	16,5
Индийский	76,2 (21,1)	3711	7209	282,7 (21,1)	17,3
Сев. Ледовитый	14,8 (4,1)	1225	5527	18,1 (1,3)	-1

* Средняя глубина Мирового океана — $\sim 3700\text{ м}$.

** Средняя приповерхностная температура вод Мирового океана — $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ежегодно с поверхности океанов испаряется пласт воды толщиной около одного метра и примерно столько же воды возвращается в океан в виде осадков и стока с поверхности суши.



Морская вода представляет собой раствор 44 химических элементов; если всю морскую соль распределить в сухом виде по поверхности суши, образуется слой толщиной почти 150 м!

Средняя *соленость* воды Мирового океана составляет 35 г/кг (т. е. в 1 кг воды содержится около 35 г солей), в тропических морях она доходит до 42 г/кг, а наименьшие ее значения — в устьях крупных рек.

Океаны — сосуды сообщающиеся, и при их обмене водами происходит обмен теплом, который определяет региональный и глобальный климат.

Все океаны имеют свою специфику, поэтому кратко остановимся на их особенностях (см. рис. 3 цв. вклейки).

Начнем с **Северного Ледовитого океана** — по размерам самого маленького, но самого близкого и важного для нас, для России. Он имеет, по существу, один канал связи с Мировым (Атлантическим) океаном — через пролив Фрама и Гренландское море. Узкий и мелкий Берингов пролив не в счет: он не обеспечивает заметного водообмена между Северным Ледовитым и Тихим океанами. Части Северного Ледовитого океана, находящиеся в западном и восточном полушариях, различны: в восточном — более мелкая его часть от Норвежского моря до Берингова с цепочкой морей, разделяемых известными островами: от Шпицбергена до острова Врангеля. В моря между этими островами северные реки России выносят много относительно теплой пресной воды. На западное

полушарие приходится север Гренландии и значительные по площади острова Канадского архипелага, продвинутые на север дальше островов Восточного сектора Северного Ледовитого океана. Здесь глубины океана больше и нет значительных рек, «согревающих» данный сектор.

Основная особенность Северного Ледовитого океана — морские льды, постоянно образующиеся, переносимые ветрами и морскими течениями и постепенно тающие. Общая площадь льдов Северного Ледовитого океана сильно меняется по сезонам с максимумом в марте (в холодное время года льдами покрыто около $\frac{9}{10}$ его площади) и минимумом в сентябре. Амплитуда этого сезонного изменения значительно больше в Восточном секторе и имеет тенденцию к росту в последние десятилетия.



Морские льды — «одеяло», затрудняющее поступление тепла из океана в холодную полярную атмосферу. Основной поток этого тепла поступает через разрывы льдов — полыньи, быстро меняющиеся по форме и местоположению в зависимости от дрейфа (переноса) морских льдов ветрами. Уменьшение площади льдов в Восточном секторе Северного Ледовитого океана усиливает там прогрев атмосферы океаном и еще больше сокращает эту площадь, что и отмечается наблюдениями в последние годы.

Атлантический океан связан с Северным Ледовитым океаном, он главный «организатор» глобального океанического конвейера (см. рис. 4 цв. вклейки) и формирователь погоды и климата Европы и большей части России. В его северной части образуется *система дрейфовых течений*, начинающаяся

с экваториальных переносов поверхностных вод на Запад. Эта система производит переносящий 75 млн т воды в секунду *Гольфстрим* («поток из залива»). Гольфстрим — не единственный водный переносчик тепла из тропиков. Аналогичное течение *Курисио* (переносит 65 млн т воды в секунду) находится у берегов Японии, а холодные *Камчатское* и *Лабрадорское* течения охлаждают соседние регионы.



Системы дрейфовых течений поверхностных вод в Атлантике (и в других океанах) образуются под действием ветров постоянной силы и направления (*пассатов*, с ними мы еще встретимся). Такие течения служат главными переносчиками тепла и холода между тропиками и другими широтами и наблюдаются во всех океанах.

Однако в Атлантике основное значение для климатической системы имеют так называемые *термохалинные* (*теплосолевые*) течения — основа глобального океанического конвейера. В северной части океана поверхностные воды охлаждаются, опускаются в его придонный слой и движутся вдоль дна на юг, давая начало главной ветви глобального океанического конвейера. В южной Атлантике эти воды поступают в систему глубинных потоков Южного океана и заносятся с ними в Тихий и Индийский океаны. В ряде мест, в основном в субтропических и тропических широтах, данные глубинные холодные воды поднимаются к поверхностному слою и образуют так называемые *зоны апвеллинга* (*upwelling*, от англ. *well* — колодец). Здесь холодные глубинные воды, богатые химическими элементами, служат питательной средой для морской биоты (живых существ), а потому именно в этих

местах преимущественно ведутся морские промыслы. В меньшей степени опускание на дно холодных поверхностных вод происходит в Южном океане у берегов Антарктиды, и они также поступают в глобальный океанический конвейер.

Тихий (Великий) океан — самый большой по площади и объему вод и соответственно по вкладу в массу и теплоемкость климатической системы. Важная особенность этого океана — система непериодических колебаний температуры поверхностных вод и нижней тропосферы в его тропической зоне — **Эль-Ниньо** (*фаза Южного колебания*), которое было изучено (не до конца!) сравнительно недавно. Название этого явления (Эль-Ниньо) происходит от испанского El Nino — мальчик, малыш, так как оно начинается в заметном объеме в конце года во время католического Рождества. Случается это не каждый год, а через промежутки в 2–5 лет с разной интенсивностью и продолжается весь следующий год, а иногда и дольше.

Зарождается Южное колебание в восточной части Тихого океана у берегов Перу. В обычных условиях в этом регионе властвует холодное Перуанское течение, несущее воды с юга на север. Вблизи экватора течение становится зональным, прогреваемый поверхностный слой воды, благодаря постоянно действующим пассатам, смещается в западном направлении (рис. 6). Здесь же имеет место *апвеллинг* — подъем холодных, богатых питательными веществами вод, что создает предпосылки для мировых рекордов вылова рыбы (анчоуса).



С наступлением Эль-Ниньо возникает температурная аномалия поверхностного слоя приэкваториальной части Тихого океана — температура повы-

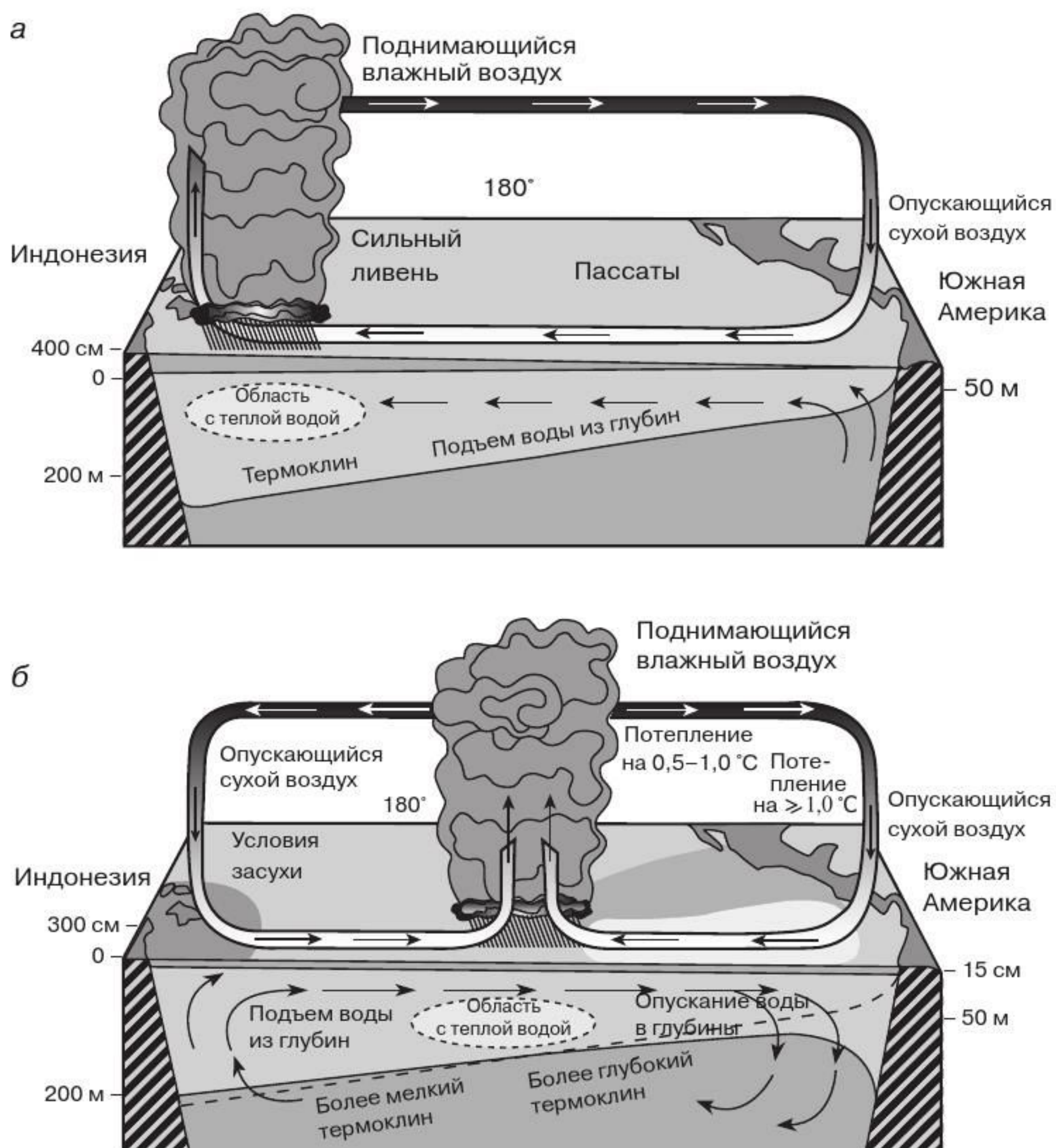


Рис. 6. Схема явления Эль-Ниньо. Тропическая часть Тихого океана при «нормальных» условиях (а) и при наступлении Эль-Ниньо (б).

шается примерно на 0,5–1 °С. Одновременно ослабевают пассаты, и не подверженный их воздействию теплый поверхностный слой «растекается» и охватывает все бóльшую площадь. В перуанскую акваторию с запада приходят теплые воды, отчасти подавляя апвеллинг. Как следствие, в этом регионе

нарушается бесперебойное поступление планктона, возникает дефицит пищи для рыб и соответственно падают уловы. Обычно засушливый климат на западном перуанском побережье на время действия Эль-Ниньо резко меняется: приход с запада влажных воздушных масс сопровождается интенсивными осадками, ливнями. В Индонезию, напротив, Эль-Ниньо приносит засушливую погоду (рис. 6).

Современные исследования показывают, что влияние Эль-Ниньо сказывается также в Африке и в Атлантике, но уже в меньшей степени. Вообще же в последние годы стало «модным» приписывать влиянию Эль-Ниньо изменения климатических величин в самых разных уголках земного шара, однако делать заключения о том, насколько справедливы такие выводы, в условиях недостаточной изученности данного явления, преждевременно.

В другой фазе Южного колебания — **Ла-Ниньо** (от испан. La Nina — малышка, девочка) — температура поверхностного слоя океана мало отличается от ее среднего значения в этом регионе. В отсутствие Эль-Ниньо над Индонезией расположена область пониженного давления, поэтому уровень Тихого океана здесь выше, чем над западным побережьем Перу. Это обстоятельство позволяет характеризовать явления Эль-Ниньо и Ла-Ниньо с помощью *индекса Южного колебания (ЮК)*. Этот индекс представляет собой разность средних величин приземного давления воздуха в Дарвине (Австралия) и на о. Таити (или Кальяо, Перу). Отрицательные его значения соответствуют фазе Эль-Ниньо, а положительные — фазе Ла-Ниньо.

Индийский океан находится в основном в Южном полушарии. В нем есть два крупных острова — Цейлон и Мадагаскар. Известен Индийский океан главным образом *муссонной циркуляцией* на полуострове Индостан.



Муссонная циркуляция — часть общей циркуляции атмосферы, характеризующаяся муссонами — достаточно устойчивым режимом ветра с определенным преобладающим направлением с материка на океан и обратно в зимний и летний сезоны соответственно.

Значение данного явления для большого населения Индостана хорошо известно, менее «на слуху» значительные межгодовые колебания интенсивности осадков, приносимых летним муссоном, а также крупные погодные катастрофы (наводнения, засухи), происходящие на берегах этого океана.

Южный океан имеет особую циркуляцию вод и выполняет роль канала водообмена между «главными» океанами. В Южном океане нет препятствий течению вод в зональном направлении, вдоль кругов широты. Это самое мощное во всем Мировом океане *Циркумполярное, или Антарктическое, круговое течение*, обусловленное сильными и устойчивыми западными ветрами. Оно охватывает зону в 2500 км по ширине и километровые толщи по глубине, пронося каждую секунду около 200 млн т воды (для сравнения: крупнейшая река мира Амазонка несет лишь около 220 тыс. т воды в секунду). Такой перенос и обеспечивает водообмен между океанами, он также занимает важное место в «конвейере».

Несколько слов о **вертикальной структуре океанических вод**. Принято разделять толщу океана на *два слоя*. *Верхний*

квазиоднородный слой имеет почти постоянные по глубине температуру и соленость, так как он перемешивается ветрами и дрейфовыми течениями. Его толщина сезонно изменяется от минимальной в конце зимы (до 100 м) до максимальной (в несколько сот метров) в конце лета в средних и высоких широтах вне зон льдообразования и переноса айсбергов. В тропической зоне толщина верхнего квазиоднородного слоя почти постоянна во времени. Соленость верхнего квазиоднородного слоя достаточно изменчива как во времени, так и в пространстве, она зависит от выпадения дождей и от испарения с поверхности океана, прежде всего в тропиках, а также от приноса больших масс пресной воды реками и стоками с населенных берегов.

Ниже верхнего квазиоднородного слоя располагается так называемый слой *термоклина* переменной толщины (до 1,0–1,5 км), где температура воды достаточно быстро падает от температуры верхнего квазиоднородного слоя до постоянной для глубинных вод величины в несколько градусов Цельсия. Столь низкая температура этих вод кажется непонятной: за многие миллионы лет существования Земли прогретые Солнцем воды верхнего слоя океана должны были бы при перемешивании с глубинными увеличить близкую к нулю температуру последних. Причина такой низкой температуры глубинного океана кроется в том же глобальном океаническом конвейере: его температуру регулярно поддерживают холодные поверхностные воды Северной Атлантики, опускающиеся в глубинные воды Мирового океана. Имеет место устойчивое расслоение этих вод (внизу холодные, соленые и тяжелые, выше — менее соленые, более теплые), мешающее вертикальному водообмену. Подъем глубинных вод в зонах апвеллинга происходит в основном по динамическим причинам, в том

числе в результате взаимодействия морских течений с донным рельефом.

В настоящее время особое внимание в мире вызывает рост уровня Мирового океана, что самым непосредственным образом «задевает» прибрежные регионы материков и острова, обычно густонаселенные, промышленно и экономически развитые. Для ряда малых островных государств на коралловых атоллах Тихого и Индийского океанов рост уровня воды ставит вопрос о возможности их существования в ближайшие десятилетия, поэтому представители этих малых стран — наиболее активные борцы с глобальным потеплением.



Во всех прогнозах изменений климата ожидаемый рост уровня Мирового океана занимает центральное место, но точность и надежность этих цифр пока невелика. В XX веке данная скорость оценивалась в $1,7 \pm 0,5$ мм/год, но для последнего периода с использованием спутниковых измерений она определяется величиной $3,1 \pm 0,7$ мм/год, и пока неясно, как согласуется эта оценка с предыдущей.

Вклад термического расширения воды в эти оценки измеряется 25% до 1990-х гг. и почти 40% для последних десятилетий. Остальную часть данного роста составляет приток воды от таяния ледников — как горных на материках и полярных островах, так и (в большей мере) ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды. В последние годы для оценки состояния этих щитов начали использоваться спутниковые замеры их высоты и площадей. Они показали значительное уменьшение массы ледникового щита Гренландии, а также Канадского архипелага.



Согласно данным спутников, только от происходящего в настоящее время таяния льдов Гренландии и Антарктиды уровень океана может вырасти на 15 см к 2050 г. Указанные выше оценки скорости подъема уровня океана являются глобально средними, в регионах эти скорости могут отличаться в разы.

Так, повышенные скорости роста отмечаются у восточного побережья Северной Америки и Австралии. Заметный вклад в этот рост вносят также стоки вод с поверхности суши, особенно в регионах с интенсивно развивающейся промышленностью и большим населением.

Измерения температуры верхнего слоя океана до глубины 700 м и ниже показали заметный рост теплосодержания за период с начала 1990-х гг. до 2009 г., причем темп этого роста близок к скорости увеличения содержания парниковых газов. Ввиду большей теплоемкости воды по сравнению с грунтом суши, температура воды в верхнем слое океана в среднем выросла на сотые доли градуса, а не на десятые, как на суше.

Каким образом эти пока незначительные изменения в океане могут отразиться на его динамике, на характере морских течений, определить трудно — наблюдений пока очень мало. Немногие модельные исследования указывают на возможные перестройки и самого глобального океанического конвейера, снижение его водооборота. По имеющимся палеоклиматическим данным, подобное уже происходило после окончания последнего ледникового периода. Тогда большое «озеро» талой воды с материка Северной Америки вылилось в Северную Атлантику, остановило опускание легких пресных поверхност-

ных вод в глубины соленого океана, привело к сбоям в работе глобального конвейера и поспособствовало наблюдавшемуся похолоданию в Северном полушарии.



Ряд недавних модельных исследований показал, что значительное опреснение поверхностных вод Северной Атлантики может достаточно быстро (в масштабах изменений глубинных течений в океане, за одну — три тысячи лет) «закрыть» опускание поверхностных вод в этом регионе, а с ним становится возможной остановка глобального океанического конвейера. В таком случае, согласно модельным исследованиям, вероятны уход Гольфстрима из северо-западной Европы к Средиземному морю, общее охлаждение Западной Европы и прочие катастрофы.

Восстановление обычного режима вышеупомянутого опускания поверхностных вод северной Атлантики, согласно указанным моделям, может произойти после их усиленного засоления до уровней несколько бóльших, чем современные. Некоторое «распреснение» поверхностных вод региона возможно в результате таяния ледников Гренландии и Канадского архипелага, а также из-за усиления осадков в регионе при общем потеплении.

Надо сказать, что труднодоступный глубинный океан и его динамика стали систематически изучаться сравнительно недавно, фактически с середины XX века, и потому сведения о них пока далеко не полные. В этом смысле атмосфере «повезло» значительно больше.

АТМОСФЕРА

В последнее время — с начала эры спутникового мониторинга — банк атмосферных данных пополняется регулярно и очень интенсивно. В первую очередь это касается нижних слоев атмосферы — тропосферы и стратосферы. Но если исторически сложившееся разделение Мирового океана на четыре (или пять) частей довольно естественно, то аналогичное разбиение вроде бы однородной атмосферы может вызвать недоуменные вопросы. Для того чтобы устранить эту неясность, посмотрим как изменяется температура воздуха с высотой: сначала она падает, на некотором уровне достигает своего минимума, а выше — уже растет.



Именно поведение температуры лежит в основе разделения атмосферы на высотные слои. Нижний слой, где температура с высотой убывает, — *тропосфера*, а тот, где ее убывание сменяется ростом, — *стратосфера*. Границу их раздела называют тропопаузой.

Высота тропопаузы неодинакова над различными областями земного шара: в тропиках и у полюсов она составляет примерно 15–17 и 8–10 км соответственно, а среднеглобальной величиной считается высота в 12 км. Характерные скорости перемещения воздушных масс выше, чем скорости в Мировом океане, и по динамичности атмосфера занимает первое место в климатической системе. Направления движения основных крупных воздушных потоков — движений планетарного масштаба — представлены на рис. 5 цв. вклейки.

Далее этот рисунок будет дополнен рассказом об основных атмосферных движениях меньшего масштаба (к таковым относятся, к примеру, местные движения воздуха, скажем, ветры, дующие с моря в прибрежных районах). Здесь лишь добавим, что перенос воздушных масс вдоль меридианов описывают обычно тремя *ячейками* — *Хэдли* (в тропиках), *Феррела* (в средних широтах) и *полярной*.

Что такое ячейки? Теплый воздух поднимается и одновременно движется от экватора к полюсам. На высоте он остывает, опускается в приземный слой, где снова нагревается, и опять устремляется вверх (продолжая переноситься к полюсам). Такой цикл повторяется трижды, это и есть три вышеуказанные ячейки. Таким образом, возникает вертикальный цикл движения воздушных масс, названный *ячейкой атмосферной циркуляции*.

Атмосфера находится под непрерывным контролем метеослужб и специальных научных экспедиций. По результатам измерений составляются специальные обзоры. Например, в обзоре Дж. Хансена с соавт.¹ использованы и проанализированы данные сетей измерений приземного воздуха, состоящих примерно из 7 тыс. станций, расположенных на материках, островах и на кораблях, полученных в период с 1880 по июнь 2010 г. Произведены тщательный отбор и анализ данных при разных способах сочетания наземных и океанических результатов измерений. При этом специальным образом учитывался вклад измерений на станциях, расположенных в крупных городах или их окрестностях, где влияние «островов тепла» может исказить репрезентативность фоновых данных,

¹ Hansen J., Ruedy R., Sato Mki. and K. Lo. 2010: Global surface temperature change. Rev. Geophys. 48. RG4004. doi:10.1029/2010RG000345.

ведь, как известно, температура в центральной части крупного города, как правило, на несколько градусов выше, чем вне его границ. Зимой это связано с обогревом зданий, работой заводов и фабрик и наличием подземных коммуникаций, которые до некоторой степени «обогревают» атмосферу, а также с тем, что энергия ветра, по мере приближения к центру города, все больше «гасится» зданиями. Таким образом, срабатывает локальный источник тепла, а распространение этого тепла от центра происходит относительно медленно (но все же происходит). Летом таким источником тепла может также служить, например, разогрев асфальта на солнцепеке. Отмечено, что при учете всех искажений и введении необходимых поправок получается достоверная картина *среднегодовых отклонений температуры воздуха у поверхности* (ΔT_s) в XX веке (от средней в период 1961–1990 гг.) с минимумом 0,3–0,4 К (в метеорологии принято использовать именно градусы Кельвина) в 1910 г., максимумом в 0,03 К в 1940–1945 гг., малыми изменениями — в 0,02 К в 1950–1975 гг. и последующим ростом до 0,6 К к 2010 г. Данные измерений на суше и в океане хорошо согласуются между собой, скорость роста усредненных значений ΔT_s остается примерно постоянной в последние 30 лет. В то же время в некоторых регионах отмечены кратковременные отклонения, часто связанные с явлениями Эль-Ниньо — Ла-Ниньо, наиболее сильные в 1998 и 2010 гг.

В разных регионах происходят заметные отклонения от общего роста ΔT_s , чаще в океаническом Южном полушарии, где наблюдается отставание роста температуры поверхности T_s по сравнению с Северным полушарием. Величина тренда (скорости изменения) T_s в целом выше на станциях, расположенных внутри больших участков суши (материков) по сравнению с прибрежными или островными станциями. Причина

этого понятна: бóльшая теплоемкость воды по сравнению с воздухом и почвой суши, тоже «пронизанной» воздухом. Более теплоемкие части акватории отбирают тепло из воздуха и подстилающей поверхности и медленнее повышают свою температуру и температуру прилежащего воздуха.



Потепление климата в регионе часто выражается в увеличении числа и интенсивности «волн тепла» в летний период, а также в снижении числа и интенсивности «волн холода» в зимний период. Такая тенденция достаточно часто наблюдается в период глобального потепления. При этом летние «волны тепла» приводят к появлению большего числа смертей и ущерба, чем зимние «волны холода», — ситуация, идентичная с энергозатратами на кондиционирование и обогрев воздуха в помещениях.



В период глобального потепления наблюдаются сдвиги по широте некоторых атмосферных характеристик. Так, отмечается смещение на север путей циклонов, перемещающихся на Западную Европу и Европейскую Россию с Северной Атлантики. Это способствует усилению циклонической погоды в Северной Европе и в России в зимнее время и, как следствие, учащению теплых зим с обильными осадками. Циклоны несут в регионы России тепло и влагу с северной части Атлантики. Отмечено также смещение к полюсам границ тропической зоны (ее расширение). С начала систематических спутниковых слежений в 1979 г. до середины первого десятилетия XXI века зона субтропиков Северного полушария

продвинулась на север на $5\text{--}8^\circ$ широты. При этом сухая зона субтропиков, прилежащая к тропику Рака ¹ с севера, сдвигается на южную часть сельскохозяйственной зоны средних широт, что наносит ей заметный ущерб.

Все эти тенденции еще более ярко проявляются в прогнозах климатических изменений к середине и к концу текущего века, сделанных с использованием глобальных климатических моделей. Одновременно отмечается увеличение высоты тропической тропопаузы, происходят изменения в динамике (переносе) атмосферного озона, регистрируемые *мировой озонометрической сетью*.

СУША И ЛЕДОВЫЙ ПОКРОВ

Наиболее быстрые и заметные изменения на суше и в ледовом покрове океана происходили и происходят в высоких северных широтах. С начала XXI века ускорился процесс сокращения площади ледового покрова в Северном Ледовитом океане.



Недавно, 16 сентября 2012 г., было зафиксировано рекордно низкое значение площади арктического

¹ *Северный тропик, или тропик Рака*, — одна из пяти основных параллелей, отмечаемых на картах Земли. В настоящее время расположена на $23^\circ 26'16''$ к северу от экватора и определяет наиболее северную широту, на которой Солнце в полдень может подняться в зенит. Это происходит в момент летнего солнцестояния, когда угол падения солнечных лучей на поверхность Северного полушария, меняющийся в течение года из-за обращения наклоненной оси Земли вокруг Солнца, является максимальным. Южный эквивалент тропика Рака — тропик Козерога.

морского льда — 3,41 млн км² (пал предыдущий рекорд 2007 г., когда этот минимум составлял 4,17 млн км²). Для сравнения: среднее значение минимальной площади арктических льдов за период с 1979 по 2000 г. составляет 6,71 млн км².

Данное сокращение сопровождается еще более существенным уменьшением (на 10–20%) доли многолетних льдов в их общей площади и является следствием как общего глобального потепления, так и отдельных факторов, воздействующих на арктический регион. В частности, увеличения выноса теплых пресных вод реками Евразии в океан и роста сажевого загрязнения снега и льда от сжигания топлива зимой, сильно снижающего их отражательную способность и усиливающего приток солнечной радиации в регион в полярный день. Это загрязнение способствует увеличению теплообмена между холодным полярным воздухом и поверхностными водами, имеющими небольшую положительную температуру, и тем самым еще более ускоряет таяние морских льдов. В более мелком и согреваемом выносом вод рек Евразии восточном секторе Северного Ледовитого океана такое таяние происходит значительно быстрее, чем в западном.



Очень заметно потепление Арктики на арктических островах и берегах, сложенных в основном из мягких грунтов, пронизанных ледяными «линзами» и «островками» мерзлой почвы.

Таяние в таких грунтах приводит к обвалу в воду береговых участков на значительных площадях, нарушению устойчивости элементов хозяйственной инфраструктуры в арктических

регионах. Этого нельзя не учитывать в преддверии ожидаемого хозяйственного освоения богатых месторождений ископаемых в регионе.

Изменение климата отмечается и в средних широтах, на территориях с интенсивным антропогенным освоением.



Мегаполисы, промышленные и сельскохозяйственные регионы, орошаемые территории, водохранилища — все они создают вокруг себя отдельный, отличный от регионального климат, в котором ныне живет большинство населения развитых стран.

Например, в сельскохозяйственном производстве орошаемых регионов используют пониженную температуру и повышенную влажность воздуха для улучшения урожайности и комфортности проживания. «Острова тепла» в больших городах особенно хорошо заметны в холодный период: в центре города термометры показывают температуру города на 2–3, а иногда и 5 градусов выше, чем на окраинах, ветер в центре города также слабее; летом, например, при температуре +20 °C, более высокая температура (т. е. +22–23 °C) в центре почти не ощущается, но зимой разница очень заметна, например, -23 °C с сильными порывами ветра на окраине — совсем не то, что -20 °C при небольшом ветерке или его отсутствии в центре. Однако закономерности формирования таких «островов» и их взаимодействия с климатом окружающего региона в близком и отдаленном будущем пока плохо обеспечены данными наблюдений, и это обстоятельство затрудняет прогнозирование и анализ этого феномена в модельных исследованиях. Можно лишь предположить, что по мере развития городских и промышленных агломераций погодно-

климатические условия в них будут больше зависеть от структуры выбросов энергии самими агломерациями и меньше — от их климатических условий регионов их размещения.

Итак, наблюдения за природной средой дают представления о том, каким изменениям (далеко не всегда желательным) подвергались отдельные элементы климатической системы в недавнем прошлом. Очевидно, что подобные изменения будут происходить и в дальнейшем. Едва ли их можно предотвратить, но противостоять им в меру современного научно-технического обеспечения людям вполне по силам. А значит, напрашивается вопрос: что, как и в какой мере сказывается на климате Земли? Начнем с главного...



ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СОЛНЦЕ — «НАШЕ ВСЕ»

Единственный Бог, на которого с научной точки зрения следует молиться землянам, — это Солнце.

Неизвестный автор

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ЗЕМЛИ ИЗВНЕ

«Из всех искусств для нас важнейшим является кино» — такова расхожая, правда не совсем точная, цитата из наследия вождя мирового пролетариата. В переложении для темы нашего разговора она могла бы гласить: из всех факторов, определяющих климат Земли, важнейшим является Солнце. Причем, в отличие от кино, Солнце не имеет в этом качестве достойных конкурентов.

О ключевой роли светила в жизни нашей планеты люди догадывались еще на заре человечества. Догадки сменились обожествлением Солнца и природных стихий (см. рис. 7 цв. вклейки). Вряд ли в истории отыщется народ, не возведший Бога Солнца в Пантеон. А в ряде случаев ему был придан статус Верховного Бога (самый известный пример тому — египетский Ра). Исключительность Солнца зиждилась на понимании того, что именно оно обеспечивает людям тепло, свет и пропитание, одним словом, — жизнь. «Дарующим жизнь» и называли древние греки проживающего в окружении времен года Гелиоса. И кому же, как не всемогущественнейшему Богу, выступать судьей над грешными людьми. Древние римляне почитали бога Соля как блюстителя справедливости, а древние египтяне связывали летний зной с гневом Ра на людей. Велик был соблазн погреться в лучах такого могущества (и погреть на нем руки) у сильных Древнего мира. И вот уже, как на дрожжах, растут и множатся «сыновья» (с «дочерьми» в ту эпоху было напря-

женно) Богов Солнца, правящие за себя и за «того бога». Ну чем не «сыновья лейтенанта Шмидта»?! В последующие века накапливаемые знания (слава Богам!) мало-помалу вытесняют слепые верования.

Еще в Древней Греции обратили внимание на то, что климат каждой территории прежде всего определяется средней высотой Солнца днем над горизонтом: на севере оно располагается ниже, на юге — выше. Интересно, что само слово «климат» происходит от греческого *klima* — наклон Солнца.

Греки делили Землю на широтные полосы — *климаты*. Сначала климатов было пять: северный холодный, северный умеренный, жаркий (где «кипит океан»), южный умеренный и южный холодный. Затем их число возросло: Гиппарх (ок. 180 или 190–125 гг. до н. э., к слову, тот самый, который ввел географические координаты) предложил рассматривать 12, а чуть позже Посидоний (ок. 135–51 гг. до н. э.) — 13 климатов. Однако все это «дела давно минувших дней, преданья старины глубокой».

Сегодня всестороннее теоретическое изучение процессов, происходящих на Солнце, и их влияния на климатическую систему Земли, подкрепляемое регулярными комплексными наблюдениями, идет полным ходом. Но, несмотря на безусловный и значительный прогресс в исследованиях солнечно-земных связей, неясностей, в том числе даже в основополагающих их принципах и механизмах, еще достаточно много. Показательно, что в вышедшем в 1997 г. в Великобритании учебнике климатологии¹ авторы называют «до сих пор не понятным чудом» способ транспортировки энергии Солнца через космическое пространство к атмосфере Земли. Нельзя не сказать об объективных сложностях, возникающих у специалистов при изучении как Солнца, так и климата нашей планеты. Дело в том, что эти специалисты (в отличие, скажем, от хими-

¹ Linacre E. and Geerts B. Climate and Weather Explained, Routledge. London, 1997.

ков) лишены возможности проводить исследования с помощью лабораторных экспериментов и вынуждены ограничиваться лишь натурными наблюдениями. Следовательно, крупные прорывы в этих областях знаний могут произойти или при накоплении большой базы данных и последующем ее анализе (диалектический закон перехода количества в качество), или в результате гениального озарения (помните известный конфликт между яблоком и головой Исаака Ньютона?). Базы данных сейчас пополняются постоянно и интенсивно, осталось дожидаться, когда их «масса» превзойдет «критическую». Что же касается второго пути, то тут, понятно, что-либо предсказать невозможно, остается только надеяться... Может, таким открывателем окажется кто-то из наших читателей, увлеченный романтикой научного поиска.

И все же давайте вернемся к объекту повествования — Солнцу. Дабы показать масштабы зависимости от Солнца всего происходящего на Земле, приведем два факта. Дадим слово Г. Кинсу, представляющему фонд Desertec¹: «За 6 часов пустыня Сахара получает больше энергии от Солнца, чем человечество тратит за год». Площадь Сахары составляет примерно 7 млн км². Для сравнения: площадь поверхности Земли около 509,5 млн км², т. е. Сахара занимает всего лишь примерно 1,4% земной поверхности.



Вдумайтесь: для обеспечения годовой потребности в электроэнергии человечество прилагает титанические усилия, сопровождаемые колоссальными

¹ Desertec — план превращения солнечного тепла пустынь Северной Африки и Ближнего Востока в электричество для нужд арабского мира, а в будущем, возможно, и Европы.

материальными затратами, ухудшением состояния природной среды и даже людскими потерями. А результат этих усилий соизмерим с энергией, получаемой относительно небольшим кусочком Земли за четверть суток!

Оговоримся, приведенное здесь сопоставление площадей не совсем корректно, так как не ко всем областям Земли Солнце одинаково щедро: на экваториальную зону приходится максимум энергии светила, а в качестве «бедных родственников» выступают полярные регионы (см. рис. 2 цв. вклейки). И все равно факт, согласитесь, впечатляет.

Второй факт можно условно назвать «украденное Солнце» (помните такое стихотворение К. И. Чуковского?). Лет 10–15 назад американские исследователи задались вопросом, как долго будет продолжаться циркуляция воздуха и океана на Земле, если Солнце вдруг «потухнет». Разница в потоках солнечной энергии к экватору и полюсам порождает различную степень нагрева там обеих субстанций — воздуха и воды. В соответствии с физическими законами для газов и жидкостей, давление в них на экваторе и полюсах оказывается неодинаковым, что вызывает перенос обеих субстанций, стремящийся это давление выровнять. Образуется система ветров и течений, другими словами, возникает *циркуляция*. Если же Солнце «выключить», приток энергии, естественно, станет всюду равным нулю, но энергозапас — инерция, в первую очередь океана — не позволит циркуляции немедленно прекратиться. Такую гипотетическую ситуацию и исследовали американцы, заложив соответствующие установки в климатическую модель. Согласно их расчетам, циркуляция климатической системы «продержалась на внутренних резервах» около

трех месяцев, после чего остановилась. Вот такой запас прочности имеет наша климатическая система. К разговору об альтернативных источниках энергии (главным образом, электрической), равно как и о модельных исследованиях климата, мы еще вернемся. А пока...

Как мы уже знаем, климат местности напрямую зависит от того, сколько солнечной энергии достигает земной поверхности. В соответствии с законами физики, Земля, являясь серым телом¹, как поглощает энергию, так и излучает ее, и эти процессы определяют температуру подстилающей поверхности, а также земной атмосферы. Напомним, что Земля поглощает солнечное (часто именуемое *коротковолновым*) излучение с длиной волны (λ), не превышающей 4 мкм², а излучает радиацию с длинами волн, большими 4 мкм. В среднем на каждый квадратный метр приходится поток солнечной энергии, равный 1370 Вт³, эту величину называют *солнечной постоянной*. Если же мысленно построить сферу, проходящую по верхней границе атмосферы, то на 1 м² ее поверхности попадает приблизительно 343 Вт солнечной энергии. Примерно 31% этого потока *отражается* атмосферой и подстилающей поверхностью и лишь около половины достигает поверхности Земли и *поглощается* ею (остальные 19% поглощаются в атмосфере, главным образом, облаками). В свою

¹ Серое тело — тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы и не зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры. Такое определение справедливо практически для всех объектов, так как абсолютно черного тела с коэффициентом поглощения, равным единице, в природе не существует.

² 1 мкм — микрометр = $1 \cdot 10^{-6}$ м.

³ Вт — ватты. 1 Вт = 1 Дж / 1с. 1 Вт равен мощности силы, совершающей работу в 1 Дж за 1 секунду, или когда груз массой 100 г поднимают на высоту 1м за 1 секунду.

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 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако в действительности она составляет $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$! Комфортную добавку в $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивает нам сопровождаемая выделением тепла способность атмосферы, точнее — ее некоторых газов и облаков, задерживать и поглощать уходящую длинноволновую радиацию (с длиной волны $\lambda > 4\text{ мкм}$). В свете сказанного обратим особое внимание на двойную 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, столь существенен нагрев атмосферы. Преобладание одного из этих процессов над другим зависит от типа облаков, их плотности и высоты 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 тысячамилетиями тенденцию либо к регулярному увеличению, либо к регулярному уменьшению. Но с началом XX в. приборы стали фиксировать устойчивое возрастание средней температуры от десятилетия к десятилетию...

Какие же причины способны вызвать нарушение сложившегося веками баланса? Первое подозрение, очевидно, падает на нашего героя — Солнце или, говоря строго, на изменение потока солнечного излучения.



Солнце — гигантский (даром, что по астрономической градации — карлик), раскаленный, плазменный шар с эффективной температурой поверхности, равной 5770 К (напомним, что градус Кельвина — К равен более привычному нам градусу Цельсия, но шкала Кельвина сдвинута на 273,15 К, т. е. 273,15 К соответствуют 0 °С). Лишь ничтожная доля (около $5 \cdot 10^{-8} \%$) излучаемой им энергии достается Земле. Вещество Солнца находится в постоянном движении, на его теле регулярно возникают *неоднородности* — пятна, факелы, протуберанцы, случаются вспышки и т. д. Именно с неоднородностями, в первую очередь с *пятнами*, связана солнечная активность — изменение потока его излучения.

Наличие на Солнце пятен было замечено людьми очень давно: авторы, освещающие эту проблему, обожают приводить выдержку из древнерусских хроник о том, как «сквозь дым лесных пожаров люди видели “темные пятна, аки гвозди”», считавшиеся дурным предзнаменованием. В начале XVII в. Г. Галилей впервые направил на Солнце свое изобретение — телескоп, положив начало наблюдениям за Солнцем, а с середины XIX в. такие наблюдения ведутся на ежедневной основе. Еще раньше (с 1749 г.) приступили к регулярным наблюдениям солнечных пятен в Цюрихской обсерватории, благодаря чему сегодня имеется ряд измерений солнечных пятен длиной в 260 лет.

С целью охарактеризовать текущее состояние светила, швейцарский астроном Р. Вольф (1816–1896) предложил использовать *относительное число солнечных пятен*, получившее впоследствии его имя. *Число Вольфа* определяется как

сумма удесятеренного числа групп пятен и общего количества пятен во всех группах на одном полушарии Солнца (второе остается невидимым). Число Вольфа — не единственный, но, пожалуй, наиболее популярный индекс солнечной активности у специалистов. И это при том, что едва ли кто-то из них в состоянии объяснить физический смысл этого индекса.



Тем не менее связь между числом Вольфа и интенсивностью ультрафиолетовой солнечной радиации считается установленным научным фактом. Замечено, что с увеличением числа Вольфа (т. е. количества пятен на Солнце), — а происходит это периодически, — возрастает интенсивность излучения в ультрафиолетовой области спектра.

Периодичность эта — особая: согласно данным Цюрихской обсерватории, интервалы колебались от 7 до 17 лет между годами максимумов чисел Вольфа и от 9 до 14 лет — между их минимумами. В среднем же такой солнечный цикл длится около 11 лет, вследствие чего он и получил свое широко распространенное название — *11-летний* (рис. 7).

Как видно на рис. 8, 11-летние циклы различаются еще и по количеству пятен, т. е. по интенсивности. Рекорд здесь принадлежит максимуму 1957 г., когда среднегодовое число Вольфа достигало 190. Наименьшие значения в максимумах приходятся на первую четверть XIX в. — в этот период они едва «переваливали» через отметку 40. Однако в анналах цюрихских наблюдений присутствует еще один временной интервал — с 1645 по 1715 г., характеризующийся малым числом солнечных пятен и ослаблением солнечной активности, получивший название «маундеровского минимума» (по имени дав-

шего его описание английского исследователя Е. Маундера). Нумерация 11-летних циклов берет отсчет с 1775 г., таким образом, сейчас идет 24-й цикл.

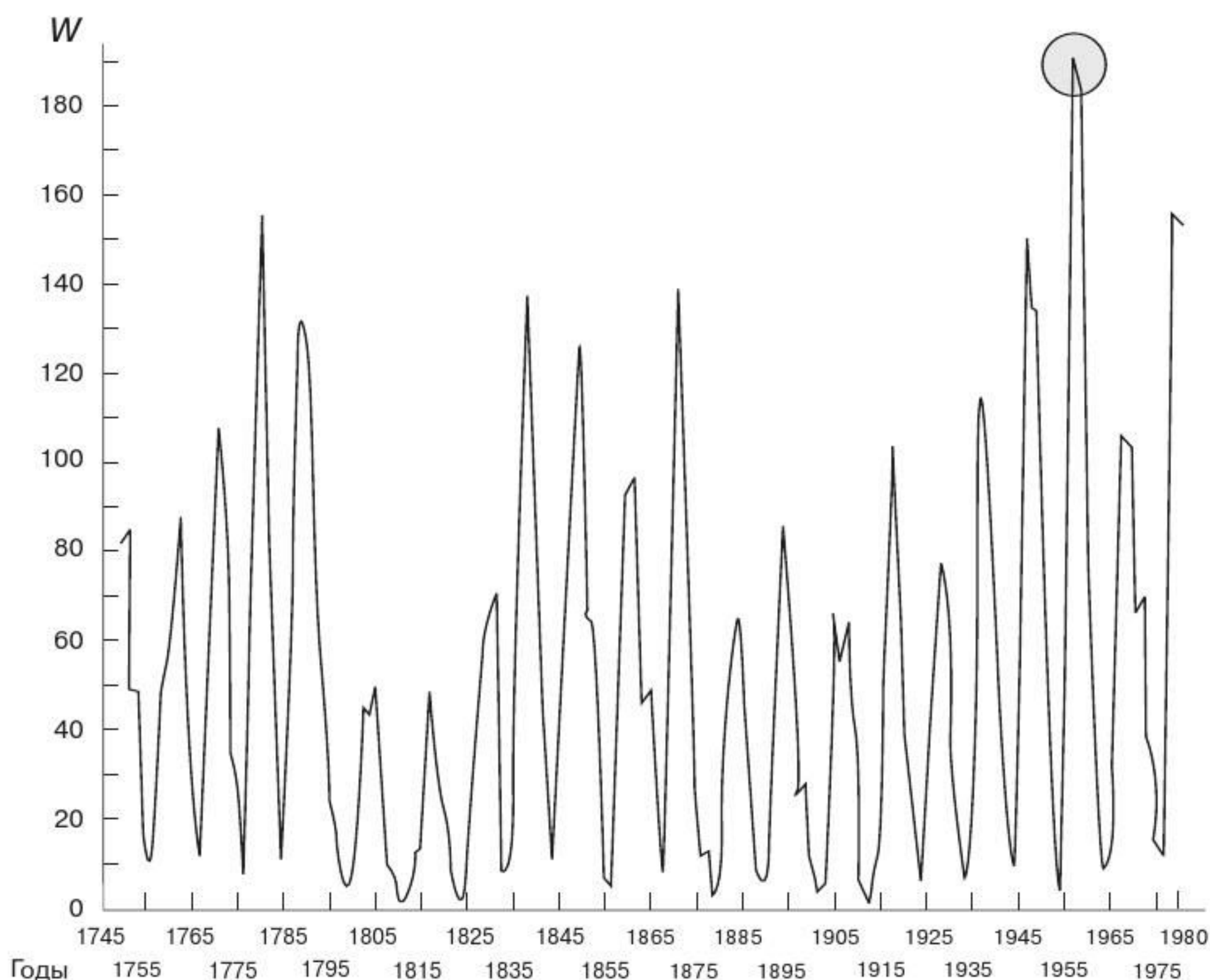


Рис. 7. Кривая среднегодовых цюрихских относительных чисел солнечных пятен (W , чисел Вольфа) за 1755–1980 гг. В кружке — максимальное значение за весь период наблюдений

В несколько «облагороженном» виде схема 11-летнего цикла представлена на рис. 8.

Процессы на Солнце также подвержены изменениям в пределах 22-летнего и 80–90-летнего циклов. Первый из них вовсе не «сумма» двух последовательных 11-летних циклов, хотя его природа тоже связана с солнечными пятнами. Гелиофизики говорят, что под действием мощного магнитного поля в среднем каждые 22 года меняется полярность пятен. И если



Рис. 8. Схема кривой 11-летнего цикла солнечной активности

с наличием 22-летнего цикла сегодня согласны большинство специалистов, то к существованию 80–90-летнего цикла многие относятся скептически. Понятно, что делать далеко идущие выводы, имея под рукой один-единственный ряд наблюдений длиной всего в три таких цикла, весьма опрометчиво. Не будучи специалистами в области гелиофизики, воздержимся от комментариев по данному вопросу, ограничась только нижеприведенной иллюстрацией (рис. 9).

Важно отметить, что основной «удар» солнечной активности принимают на себя верхние слои атмосферы, но его «отголоски» чувствуются и в ее нижних слоях, и у земной поверхности. Наиболее существенным последствием пертурбаций в верхней атмосфере является изменение циркуляции воздушных масс в ее нижних слоях. Есть основания полагать, что во время максимумов 11-летнего цикла имеет место усиление циклонов и антициклонов.



Данные ряда исследований свидетельствуют о наличии зависимости засух от фаз 11- и 22-летних циклов

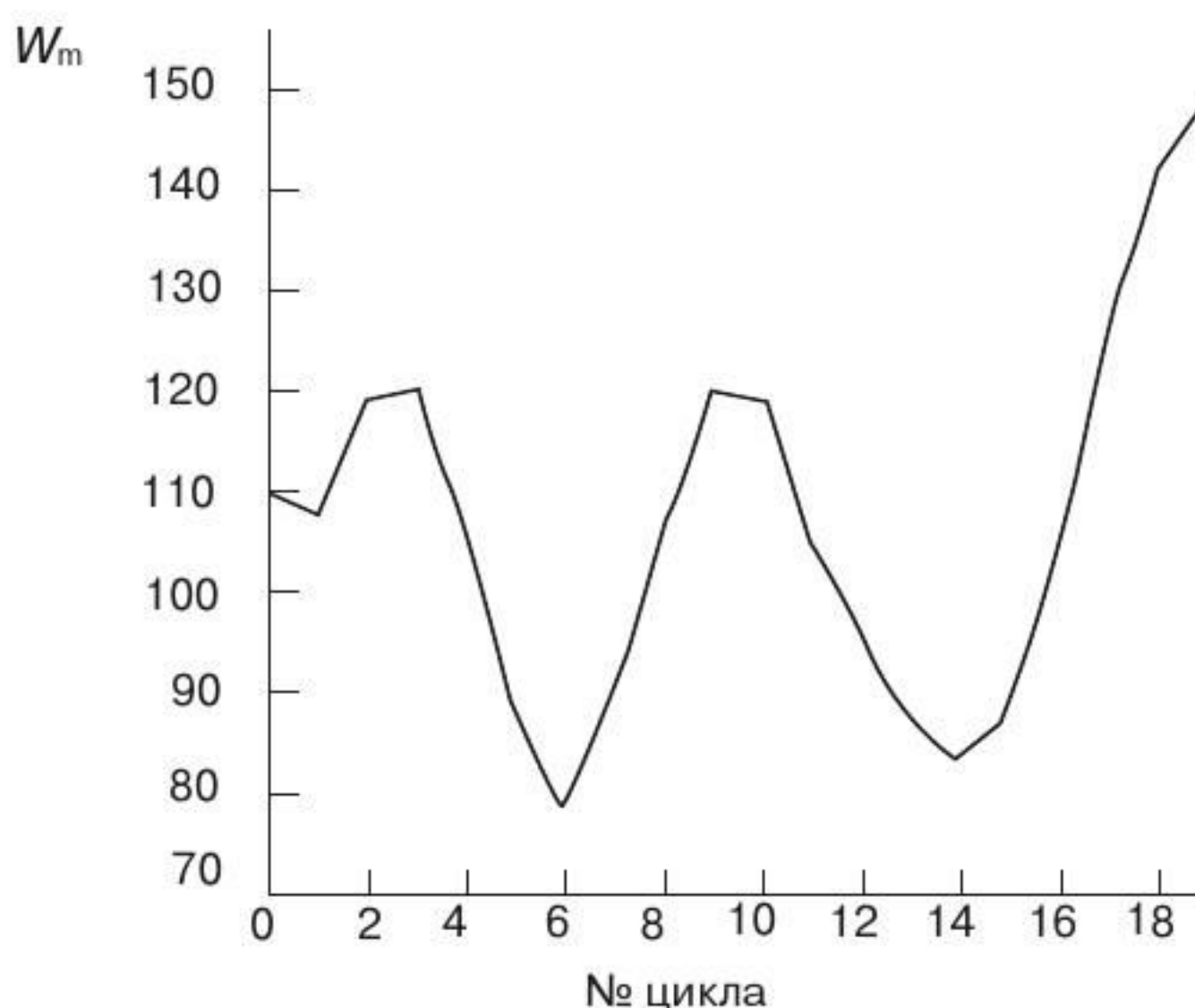


Рис. 9. Усредненная кривая изменения максимальных среднегодовых чисел Вольфа W_m за весь период измерений. По оси абсцисс — номера 11-летних циклов согласно цюрихским данным

солнечной активности, причем среднеазиатские засухи *коррелируют* (т. е. имеют большой коэффициент корреляции) с 11-летним циклом, в то время как североамериканские — с 22-летним. Горячих защитников 80–90-летний цикл солнечной активности нашел в лице дендрологов, утверждающих, что он отчетливо прослеживается при изучении годовых колец деревьев-долгожителей.

Здесь необходимо маленькое отступление. Когда нужно подтвердить или опровергнуть связь между какими-либо явлениями, нередко прибегают к поиску *коэффициента корреляции*. Коэффициент этот, широко используемый в математической статистике, может изменяться по абсолютной величине от нуля до единицы. Он характеризует степень зависимости между явлениями: чем ближе его значение к единице, тем теснее эта связь. Такой вот универсальный критерий. Но в его определении есть важный нюанс: коэффициент корреляции выполняет возложенную на него миссию лишь в том случае, *если достоверно известно, что такая зависимость существует*. Иными словами, если вам вздумалось

оценить с помощью коэффициента корреляции связь, к примеру, между ежемесячным ростом успеваемости группы школьников после прихода в их класс талантливого учителя и увеличением в тот же период поголовья бегемотов в Африке (вследствие создавшейся особо благоприятной для этого обстановки), то вышеозначенный коэффициент, вероятно, окажется очень высоким, но... Как часто исследователь, умилившись полученным большим значением коэффициента корреляции, не удосуживается привести хоть какие-нибудь резоны в обоснование наличия исследуемой связи. Сказанное, отнюдь, не отрицает применимость коэффициента корреляции, а только служит напоминанием об осторожности в выводах, которая нужна при его использовании.

Выше говорилось о том, что в ходе 11-летнего цикла изменения затрагивают в основном ультрафиолетовую часть спектра. Сколь значительны эти изменения, показано на рис. 10. Ультрафиолетовый участок спектра приблизительно соответствует длинам волн $170 < \lambda < 320 \text{ нм}^1$. Однако только для длин волн $\lambda < 205 \text{ нм}$ интенсивность излучения в максимуме солнечной активности превосходит на 5–17% ее в минимуме 11-летнего цикла, на бóльших же длинах волн они почти равны. Следить за такими незначительными изменениями на верхней границе атмосферы очень трудно, это стало возможным только в последние 20–30 лет с появлением искусственных спутников Земли.

Изменения такого масштаба практически никак не сказываются на солнечной постоянной: спутниковая аппаратура зафиксировала лишь незначительные ее колебания — с амплитудой 0,1% — в ходе 11-летнего цикла солнечной активности. Косвенные данные указывают на значительно бóльшие ее изменения (десятые доли процента) в XVII в. Многие исследователи тем не менее полагают, что небольшой рост солнечной

¹ 1 нм (нанометр) = $1 \cdot 10^{-9}$ м.

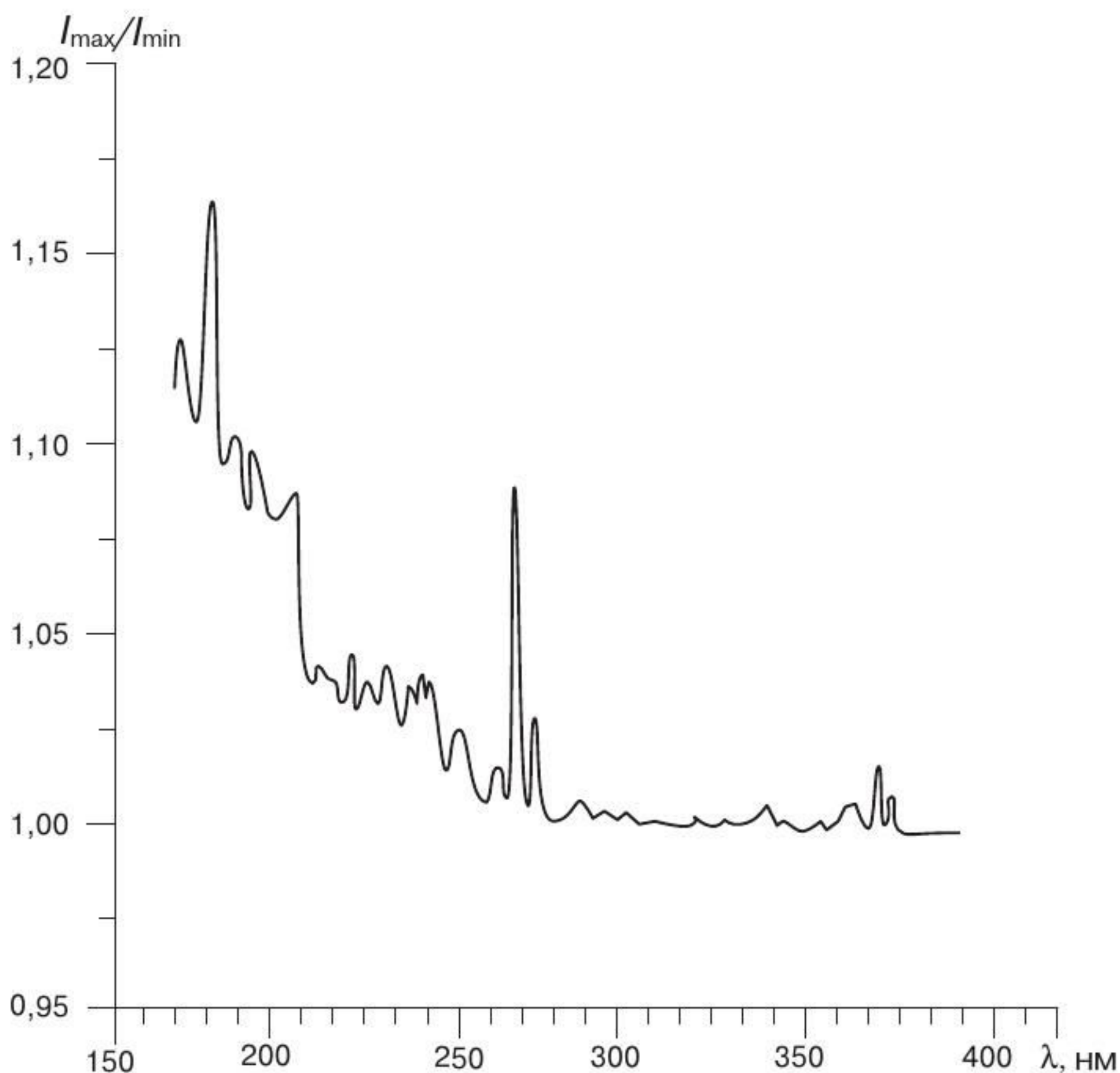


Рис. 10. Соотношение интенсивности солнечного излучения на верхней границе атмосферы в максимальной ($I_{\max}$) и минимальной ($I_{\min}$) фазах 11-летнего цикла на разных длинах волн по данным измерений

постоянной имел место с середины XVIII в. по настоящее время. Однако его трудно выделить и оценить, так как спутниковых измерений тогда не было, а точность наземных измерений, которым мешали и облачность, и недостаточная прозрачность атмосферы, не позволяет достаточно определенно судить о ее росте за последние 250 лет. Но даже изменения на десятую долю процента очень существенно отражаются на эффективности химических превращений в атмосфере, порождая эволюцию содержания газов в составе атмосферного

воздуха, в том числе — парниковых газов, подробный разговор о которых еще впереди.



Итак, вышеупомянутый рост температуры в течение XX века едва ли обусловлен увеличением потока солнечного излучения. Похоже, здесь у Солнца — надежное алиби. Более того, считается, что и прежде, в том числе и в далеком прошлом, потоки солнечной энергии не подвергались заметным колебаниям. Однако колебания климата в истории Земли случались...



ГЛАВА ПЯТАЯ

ЗАДАЧА СО МНОГИМИ НЕИЗВЕСТНЫМИ

Прошедшее нужно знать не потому,
что оно прошло, а потому, что уходя,
не умело убрать своих последствий.

В. О. Ключевский

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О КЛИМАТЕ ДАЛЕКОГО ПРОШЛОГО

Возраст Земли по современным представлениям составляет приблизительно 4,6 миллиардов лет. За это время наша планета прошла много стадий в своем развитии. Конечно же, эволюция коснулась и ее климата. Каков был климат в столь давние времена, мы вряд ли когда-нибудь узнаем достоверно (да это и не имеет большого практического значения). Однако проследить изменения климата на достаточно большом временном промежутке очень заманчиво: ведь если удастся понять их причины, это может стать ключом к пониманию оснований для его изменения сегодня. Занимается подобным специальная наука — *палеоклиматология*.

Основой для всякой теории, как известно, являются факты. В нашем случае необходимые факты чаще сокрыты под толщей Земли и лишь иногда в прямом и переносном смысле лежат на поверхности. Их сбором занимаются геологи, археологи, палеоклиматологи, палеонтологи. Получаемые ими сведения очень разнородны: это и количественный и качественный состав воздуха и грунта, и перечень обнаруженных

древних представителей флоры и фауны, и особенности быта наших далеких предков. На основе анализа всей информации воссоздается картина соответствующей эпохи: какие компоненты содержались в воздухе, какая часть земной поверхности была покрыта водой, теплым или холодным был климат и т. д. При этом если, например, концентрацию компонентов воздуха можно непосредственно измерить в воздушных пузырьках, вмерзших в лед на глубине нескольких десятков или сотен метров, то судить о характерной температуре эпохи можно лишь косвенно: по преобладанию теплолюбивых или, наоборот, морозостойких растений, по одежде людей. Согласитесь, картина получается, мягко говоря, неполная, а потому недостаточная для сколь-нибудь обоснованных выводов. Эту картину исследователи стремятся дополнить, исходя из универсальных законов природы, модельных оценок, наконец, здравого смысла. Однако представьте ситуацию, когда каждому из десяти выдающихся мастеров предложили восстановить античный сосуд по его небольшому фрагменту, найденному в ходе археологической экспедиции. В результате появится десять прекрасных, но различных версий сосуда, и нет никакой гарантии, что хотя бы одна из них в точности соответствует оригиналу! Так же и к реконструкциям климата прошлых эпох, произведенным в условиях недостатка объективной информации, следует относиться с долей здорового скепсиса, но в то же время стараться «отделить зерна от плевел», т. е. принять выводы, соответствующие современному уровню развития науки.



О чем же можно говорить с изрядной долей уверенности? Разочаруем сочинителей различных климатических страшилок: палеонтологические данные

демонстрируют *непрерывность* развития жизни на Земле, а значит, за весь охваченный наблюдениями период *никаких климатических катастроф не происходило!*

В монографии А. С. Мони́на и Ю. А. Шишкова¹ говорится, что за все время существования жизни на планете «температура на Земле всегда оставалась в пределах жидкой воды». Палеоданные также свидетельствуют о том, что в истории Земли ее поверхность — материки и океаны — и климат подвергались существенным изменениям. Популярная ныне «эпоха динозавров», составляющая небольшую часть этой истории, характеризовалась более теплым климатом (среднеглобальная температура была выше современной на 5–10 °С) и отсутствием полярных снежно-ледовых областей. Ледниковый щит Антарктиды, по современным оценкам, образовался примерно 15–20 миллионов лет назад, его объем постепенно увеличивался и достигает сегодня около 24 миллионов кубических километров (приблизительно 90% всего объема ледников на планете; из оставшихся десяти процентов девять приходится на Гренландский ледовый щит и 1% — на все остальные).



Такое количество льда, если он полностью растает, обеспечит подъем воды в Мировом океане примерно на 55 метров. Однако в так называемой *четвертичной эпохе* (геологическом периоде, начавшемся примерно 2,6 миллиона лет назад и продолжающемся по настоящее время) наступления и отступления ледников происходили почти регулярно.

¹ История климата. Л., 1979.

Изменялись площадь и положение материков на земной поверхности вследствие *дрейфа континентов* — они сдвигаются ежегодно в среднем на 1–2 см. Совсем немного. Однако, скажем за 100 миллионов лет, это перемещение составляет величину порядка тысячи километров! Такое смещение континентов напрямую не сказывается на весьма грубых оценках климата соответствующих палеопериодов, но помогает интерпретировать некоторые находки палеонтологов: следы коралловых рифов в Арктике, каменного угля — на Шпицбергене и в Антарктиде, останки динозавров — в Южной Патагонии (Аргентина). В результате пополнение базы палеоданных всегда сопряжено с трудностями их интерпретации и обобщения.

Много определеннее наша осведомленность о состоянии атмосферного воздуха в те далекие времена. Концентрация основных парниковых газов (подробный разговор о них еще впереди) значительно отличалась от современной: так, согласно измерениям в ледниковых щитах Антарктиды и Гренландии, содержание углекислого газа, метана и оксида азота(I) было меньше примерно на 25, 60 и 25% соответственно в последний *межледниковый период* (около 120 тыс. лет назад) и на 50, 80 и 40% в последний *ледниковый период* (около 18 тыс. лет назад).

При этом изменения содержания вышеперечисленных парниковых газов и температуры происходили синхронно, т. е. когда росла концентрация, возрастала и температура, падение же концентрации сопровождалось снижением температуры. Климатологи спорят лишь об одном: что здесь причина, а что — следствие? То ли увеличение содержания парниковых газов влекло за собой разогрев атмосферы, то ли начавшееся по каким-то иным причинам потепление способствовало обогащению атмосферы парниковыми газами (климатический

аналог дискуссии, что было прежде: курица или яйцо?). Есть косвенные данные о том, что изменения содержания парниковых газов предшествовали изменениям температуры воздуха, но они еще нуждаются в подтверждении.

Как ни удивительно, но нет полной определенности с арктической ледовой шапкой: здесь даже в относительно теплую и недавнюю «эпоху викингов» (IX–XII вв.), по мнению А. С. Мони́на, «возможно, не было или было лишь немного многолетних льдов». Затем наступило похолодание, и последующие четыре века (1430–1850 гг.) часто называют *малым ледниковым периодом*.

Вот так обстоят дела с изучением климата прошлых веков. Как мог заметить внимательный читатель, в этом небольшом разделе неоднократно встречалось словосочетание «ледниковый период». Дальнейший рассказ как раз о ледниковых периодах.



ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЗЕМЛЯ В ЛЕДЯНОМ ПЛЕНУ

Тот, кто глядит в прошлое, так же
видит будущее, как видно в зеркале
глубоких вод высокое небо.

Ш. Петефи

ЦИКЛЫ МИЛАНКОВИЧА

Найдется немало людей в нашей стране, у которых слова «ледниковый период» ассоциируются исключительно с некогда популярной передачей на одном из центральных телеканалов или одноименным мультфильмом. Мы же, естественно, будем вести речь о ледниковых периодах, случавшихся в истории Земли. Чтобы «добратся» до них, придется совершить виртуальное путешествие в глубь даже не веков, но десятков тысячелетий. А вот доказательства того, что такие периоды действительно существовали, в буквальном смысле лежат на поверхности: становление «большого льда» и, главным образом, его сход оставляли отметины на «теле» планеты в виде цепей холмов (*ледниковых морен*), гигантских валунов, возникших на ранее сухих местах болот и мохового покрова и пр. (геологи легко «расширяют и углубят» этот перечень). «Ну, существовали... — и ладно! Что нам сегодня до этого?» — пробурчит прагматичный читатель. Но кое-какой интерес у нас имеется. Уже само название «ледниковый период» справедливо подразумевает наличие в ту пору очень холодного климатического режима. А с чего бы вдруг, спрашивается, ему установиться? Какие такие могущественные силы, отличные от современных, довели при его

формировании? И что сводило на нет их действие ближе к окончанию каждого из ледниковых периодов? Очевидно, другие не менее могущественные природные силы (человек, конечно же, тут непричастен). Какие? Хотелось бы знать, желательно — поименно. Проявляются ли они сейчас или «затаились на время», чтобы в самый неподходящий момент восстать, как птица Феникс из пепла? Не угрожают ли они нам очередным витком всемирного обледенения и не окажутся ли на его фоне наши тревобления о глобальном потеплении ничемной суетой?

Ледниковые периоды стали возникать в четвертичный период истории Земли, около двух миллионов лет назад. За это время масштабное оледенение наступало, по крайней мере, четырежды, а последний ледниковый период случился около 18 тыс. лет назад. На рис. 6 цв. вклейки показаны зоны обледенения поверхности Земли в течение последнего ледникового периода. Обращает на себя внимание тот факт, что в Северном полушарии область, покрытая льдом, много больше своего южного антипода. Различно и распределение льдов в Западном и Восточном полушариях: главный ледниковый щит Западного полушария — Лаврентийский — охватывал пространство Аляски, Канады и Гренландии, а в Восточном подо льдом оказывались Скандинавия, Таймыр, небольшие площади севера европейской России. В то же время Северная Азия и Чукотский «хвост» были почти безледными с замерзшей почвой — той, что сегодня именуется вечной мерзлотой. В Северном полушарии медленное наступление ледников каждый раз начиналось на суше с севера на юг, с вершин гор к их подножиям, также с севера на юг смещались морские границы льда. В Антарктиде первый ледниковый щит появился примерно 20 миллионов лет назад. Тогда же между Антарктидой

и Южной Америкой образовался пролив, много позже названный именем Дрейка, и круговое течение, блокировавшее приток теплых вод из тропиков к самому южному континенту.

Чем объясняется такая неравномерность ледяного покрова? Недавние исследования с применением климатических моделей помогли установить две основные причины. Первая — лед может расширять свои «владения» только на суше. В море от «языка» ледника откалываются айсберги, которые дрейфуют в более теплые воды (больше некуда!), где и прекращают свое существование, и, как следствие, общая площадь морского льда почти не увеличивается. Таким образом, в богатом морями Южном полушарии (площадь суши — 49 млн км²) рост материкового льда ограничивается Антарктидой, и его площадь не увеличивается при понижении температуры. В Северном полушарии (площадь суши — 100 млн км²) таких сдерживающих факторов нет, и материковый лед может беспрепятственно распространяться на юг.

Вторая причина обусловлена обратной связью между отражательной способностью поверхности и температурой. Как, вероятно, знает читатель, белый снег наиболее эффективно отражает солнечную радиацию, достигшую земной поверхности. При снижении температуры усиливаются как выпадение снега, так и образование ледяного покрова, и отражательная способность поверхности возрастает. Далее ослабляется поглощение ею солнечной энергии, а следовательно, ее температура падает еще больше, что благоприятствует появлению все новых масс снега и льда. Но, как было сказано выше, площадь ледника может заметно возрасть лишь в Северном полушарии, поэтому именно здесь взаимосвязь отражательной способности поверхности и температуры действует наиболее продуктивно.

А различие между Западным и Восточным полушариями? Здесь опять «виноваты» размеры площади суши, а также ее сезонный нагрев летом и охлаждение зимой. В климатологии хорошо известен так называемый *континентальный эффект* сезонного хода температуры и осадков. В середине материка, вдали от морских берегов, зима холоднее, лето теплее, осадков (дождя, снега) выпадает меньше, чем в прибрежных зонах или на островах в океане. В Сибири и вообще в Северной Азии лето, хотя и короткое, но обычно сухое и жаркое. Ледники в большой Евразии тают быстрее, чем в меньшей по площади Северной Америке, а прирастают медленнее из-за меньшего количества осадков, которых в Восточной Сибири выпадает немного. Таким образом, в Восточном полушарии — в Азии — затруднено образование ледниковых щитов и «облегчено» их относительно быстрое таяние по сравнению с Северной Америкой и Гренландией.

Однако пора уже рассказать о причинах таких ледовых «напастей». В разгар Второй мировой войны в Европе, в 1941 г., была опубликована книга сербского астрофизика М. Миланковича (1879–1958), содержащая объяснение интересующего нас феномена. Впрочем, неудивительно, что в то «горячее» время она осталась практически незамеченной. И только позже, в 1960-х, в свете произведенных тогда измерений содержания изотопов кислорода в ледовых кернах и в донных отложениях древних озер и океанов, гипотеза Миланковича нашла свое подтверждение. «Корень зла» заключается в колебаниях количества достигающей Земли солнечной радиации (в пределах от 5 до 10%) на протяжении больших промежутков времени. Но чтобы понять причины таких колебаний, нам придется мысленно совершить визит в планетарий (см. рис. 8 цв. вклейки).

Траектории планет Солнечной системы, согласно первому закону Кеплера, представляют собой эллипсы (овалы). Орбита обращения Земли вокруг Солнца (происходящего, кстати, со скоростью 29,8 км/сек.) — эллипс, мало отличающийся от круга, а степень этого отличия — эксцентриситет — изменяется в пределах от 1 до 5% (в настоящее время — 1,67%) с главным периодом около 100 тыс. лет, который совпадает с периодом наступления и отступления ледников. Одновременно Земля вращается вокруг своей оси, причем направление этой оси в пространстве, в соответствии с законом сохранения момента импульса, должно быть всегда одним и тем же. Однако присутствие других планет, а также спутника Земли Луны приводит к тому, что возникают некоторые периодические отклонения, сказывающиеся и на орбите Земли, и на ее вращении.



Всего насчитывается 14 различных движений *орбитальных процессов*, совершаемых нашей планетой в космосе. Миланкович рассмотрел три из них. Помимо упомянутого *вращения Земли вокруг Солнца*, это *прецессия* и *нута́ция*.

Земная ось, которая «должна» была бы иметь всегда неизменную ориентацию, в реальности движется по круговому конусу с вершиной в центре Земли (период полного оборота равен 25 750 лет), это движение называется *прецессией*. Следствием прецессии является то, что в январе, когда расстояние между Землей и Солнцем минимально (и, значит, наша планета получает наибольшее количество солнечной энергии), Северное полушарие отвернуто от Солнца, а Южное, напротив, к нему повернуто. Такие отдаленность и приближенность полушарий к светилу обуславливают времена года: в январе

в Северном полушарии — середина зимы, в Южном — разгар лета. По истечении половины периода (т. е. примерно через 13 тыс. лет) ситуация переменится на противоположную — тогда в Северном полушарии январь и июль поменяются ролями, и январь окажется летним месяцем. «По совместительству» и угол наклона земной оси к плоскости орбиты также подвержен небольшим колебаниям (рамки их изменений от $21,5^\circ$ до $24,5^\circ$ с периодом 41 тыс. лет, современное значение — $23,5^\circ$) вследствие влияния Луны и Юпитера. Такие колебания и есть *нутация*.



Согласно Миланковичу, ледниковые периоды возникают только тогда, когда все три орбитальных процесса действуют в одном направлении и их эффекты накладываются один на другой, усиливая друг друга. Поскольку эти астрономические факторы имеют разные периоды, то время от времени такие «оптимальные» условия возникают (рис. 9 цв. вклейки).

Современные исследования в основном подтверждают выводы Миланковича, но накоплено и немало данных, не вписывающихся в его теорию (справедливости ради отметим, что то же самое можно сказать о любой из бытующих сегодня теорий). Поэтому, вероятно, есть основания говорить о статистической справедливости теории Миланковича (т. е. признать существование колебаний климата с периодами 41 тыс. и 100 тыс. лет). Однако комплексное совместное воздействие на нашу планету иных планет и особо приближенной к ней Луны значительно усложняет картину и вносит в нее заметные коррективы, не учтенные ни автором теории, ни даже его последователями. И что же дальше?



Согласно расчетам Миланковича, следующий ледниковый период на Земле должен начаться приблизительно через 50 тыс. лет. Однако можно с большой долей вероятности предположить что современное беспрецедентно быстрое потепление глобального климата ставит под сомнение его наступление. В свете ускоренного роста концентрации углекислого газа и достижения ею не имевших в прошлом аналогов значений (см. далее раздел «Первый парень на деревне») парниковый эффект в состоянии нейтрализовать попытки орбитальных факторов в очередной раз установить на Земле «господство Снежной королевы». Такой спурт концентрации CO_2 не позволит океану достигнуть нового равновесного состояния, что влечет за собой неустойчивость климата и резкое увеличение числа природных катастроф (землетрясений, цунами, наводнений и пр.).

Поэтому, наверное, не стоит загадывать, что произойдет через столь долгий промежуток времени (тем более что проверить качество такого прогноза нам не удастся...). Резоннее сосредоточиться на решении текущих проблем изменений климата в ближайшем будущем.

И тут снова возникает вопрос о причинах его современных изменений. Как было сказано выше, поток солнечной энергии (солнечная постоянная) оставался практически неизменным. Астрономические факторы (движение планет) не могли так существенно сказаться на столь коротком (всего лишь — столетие) временном отрезке. Продолжим наши поиски.



ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЕСЛИ НЕ СОЛНЦЕ, ТО ЧТО?

Небо и Земля разделены, но они
делают одно дело.

Конфуций

ПРИЧИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Наше «путешествие в эмпирей» подошло к концу, пора возвращаться на грешную Землю. Аналогично тому, как повышенная температура у человека — не причина, а следствие недомогания, обсуждаемое увеличение температуры в XX веке является результатом нарушения радиационного баланса между приходящей — коротковолновой и уходящей — длинноволновой радиацией (рис. 11).

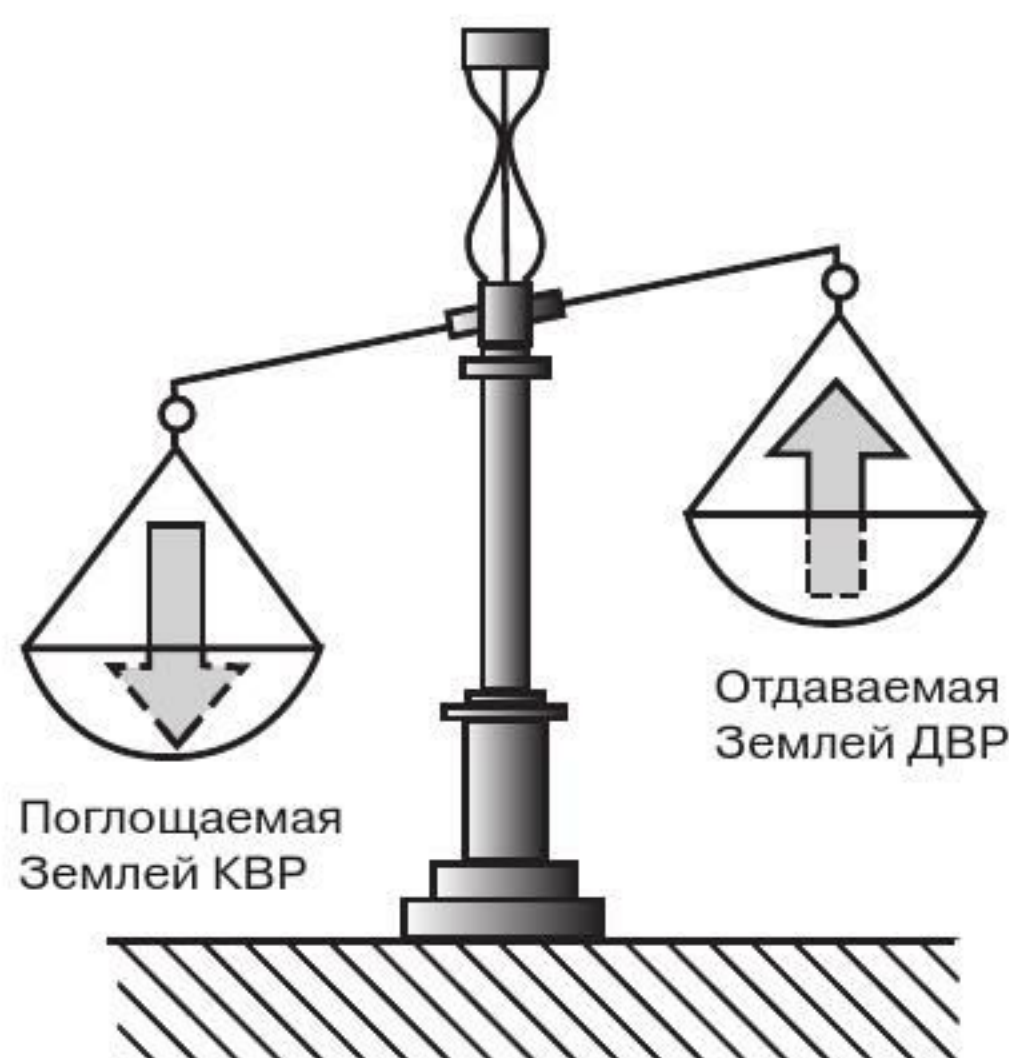


Рис. 11. Иллюстрация к оценке радиационного баланса на поверхности Земли. КВР — коротковолновая радиация; ДВР — длинноволновая радиация

В связи с увеличением температуры чаша с коротковолновой радиацией стала «весить» несколько больше чаши с радиацией длинноволновой. По каким причинам это произошло и где эти причины искать? Помнится, герой старой рязановской комедии утверждал, что кого-кого, а Бабу Ягу следует воспитывать в *своем* коллективе. Так и нам искать эти причины придется в *своей* климатической системе, больше негде! Собственно, основных направлений поиска два: либо уменьшились «транспортные издержки» доставки коротковолновой радиации от верхней границы атмосферы к земной поверхности, либо сократился отток длинноволновой радиации в открытый космос. Вариант с одновременным изменением как притока, так и оттока радиации («кто кого переборет») отложим пока в долгий ящик. Но если с первым направлением как будто все ясно, то второе нуждается в дополнительном пояснении. Задержка части уходящего излучения обусловлена наличием в атмосфере группы газов и аэрозолей, способных поглощать такое излучение. Естественно, газы эти «работают» не только сейчас, «работали» они, по О. Бендеру, и «до исторического материализма». Весь вопрос в том, изменилась ли, и если изменилась, то насколько, продуктивность этой «работы» в течение прошлого столетия. Постараемся в этом разобраться.

ПОД ОДНИМ «ОДЕЯЛОМ»: ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ И ВЫЗЫВАЮЩИЕ ЕГО ГАЗЫ

Расчищая авгиевы конюшни, нельзя забывать о проблеме экологии.

Б. Шапиро (Интернет)

Идею по поводу механизма парникового эффекта в 1827 г. изложил французский ученый Ж. Фурье (1768–1830). Чуть позже, в 1860 г., ирландский

физик Д. Тиндаль (1820–1893) экспериментально установил, что углекислый газ CO_2 «не пропускает» исходящее от Земли тепловое излучение. Детальное же исследование парникового эффекта было проведено в 1896 г. шведским химиком С. Аррениусом (1859–1927).

О парниковом эффекте пишут много, но часто его смысл искажается.



Суть парникового эффекта — в поглощении атмосферой, точнее — парниковыми газами атмосферы и некоторыми аэрозолями, длинноволновой радиации, испускаемой нагретой подстилающей поверхностью. Поглощенная всяким парниковым газом энергия длинноволнового излучения вызывает повышение температуры воздуха. Увеличенное содержание парникового газа и подобное повышение температуры вызывают рост потока длинноволнового излучения вниз, к подстилающей поверхности, и вверх, к верхней границе атмосферы. В теплом воздухе повышается влажность, 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

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 от влияния одного первоначального фактора. Отрицательная обратная связь, напротив, выражается в том, что активизация других факторов ослабляет влияние первоначального.

значительным среди всех других антропогенных климатоформирующих факторов (рис. 12 и рис. 10 цв. вклейки).

В иерархии эффективности парниковых газов на первом «королевском» месте безоговорочно располагается *водяной пар*. Его господство среди парниковых газов столь же незыблемо, как превосходство Солнца над прочими влияющими на климат Земли факторами. Водяной пар поглощает длинноволновую радиацию почти на всех частотах (иначе — полосах поглощения) инфракрасного излучения ($\lambda > 0,7$ мкм) и делает это много интенсивнее прочих парниковых газов. Лишь в диапазоне длин волн $8 \text{ мкм} < \lambda < 13 \text{ мкм}$ поглощение водяным паром минимально, и, как следствие, излучение с такими длинами волн может покидать атмосферу почти беспрепятственно. Поэтому специалисты обычно говорят об этом явлении как о «прозрачности» атмосферы в указанном интервале длин волн, а сам интервал именуют *окном прозрачности*. В этой связи главным критерием значимости всякого другого парникового газа является его способность эффективно поглощать инфракрасное излучение внутри такого *окна прозрачности* или вблизи его границ. Рис. 13 иллюстрирует, на каких длинах волн (отложенных на оси абсцисс) излучение поглощается газами (заштрихованная область), а на каких такое поглощение отсутствует. Снизу стрелками показаны основные полосы поглощения, а также газы, «ответственные» за каждую из этих полос.

На почтительном отдалении от «короля» — его «свита», в которой по ранжиру значимости выстраиваются *углекислый газ* (CO_2), *метан* (CH_4), *озон* (O_3) и *оксид азота (I)* (N_2O). Но, как известно, «короля делает свита»: если стабильность

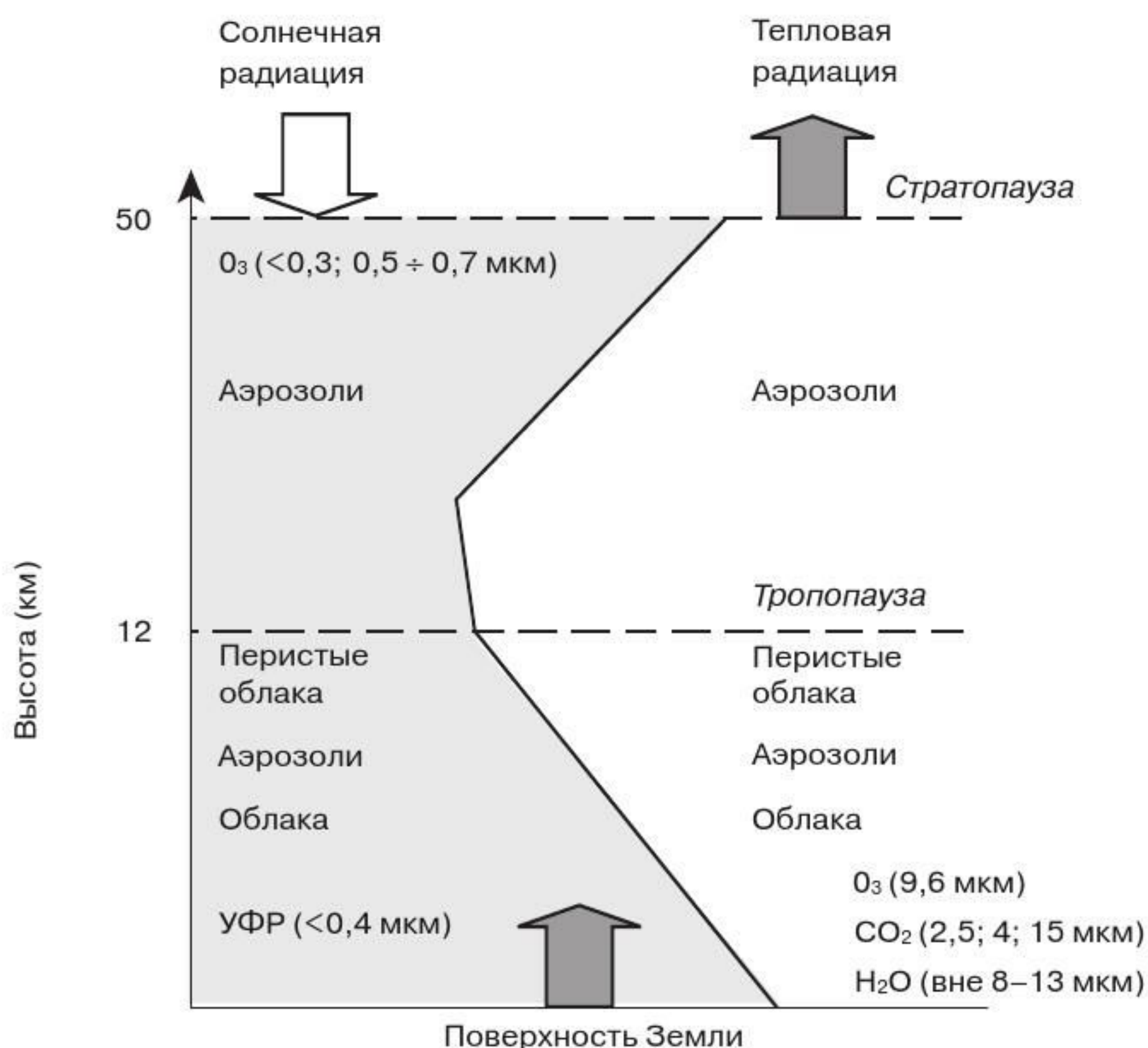


Рис. 12. Схема строения и состава атмосферы. Кривая — вертикальный профиль температуры стандартной атмосферы (средних широт); в скобках — длины волн интервалов поглощения радиации ($1 \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$)

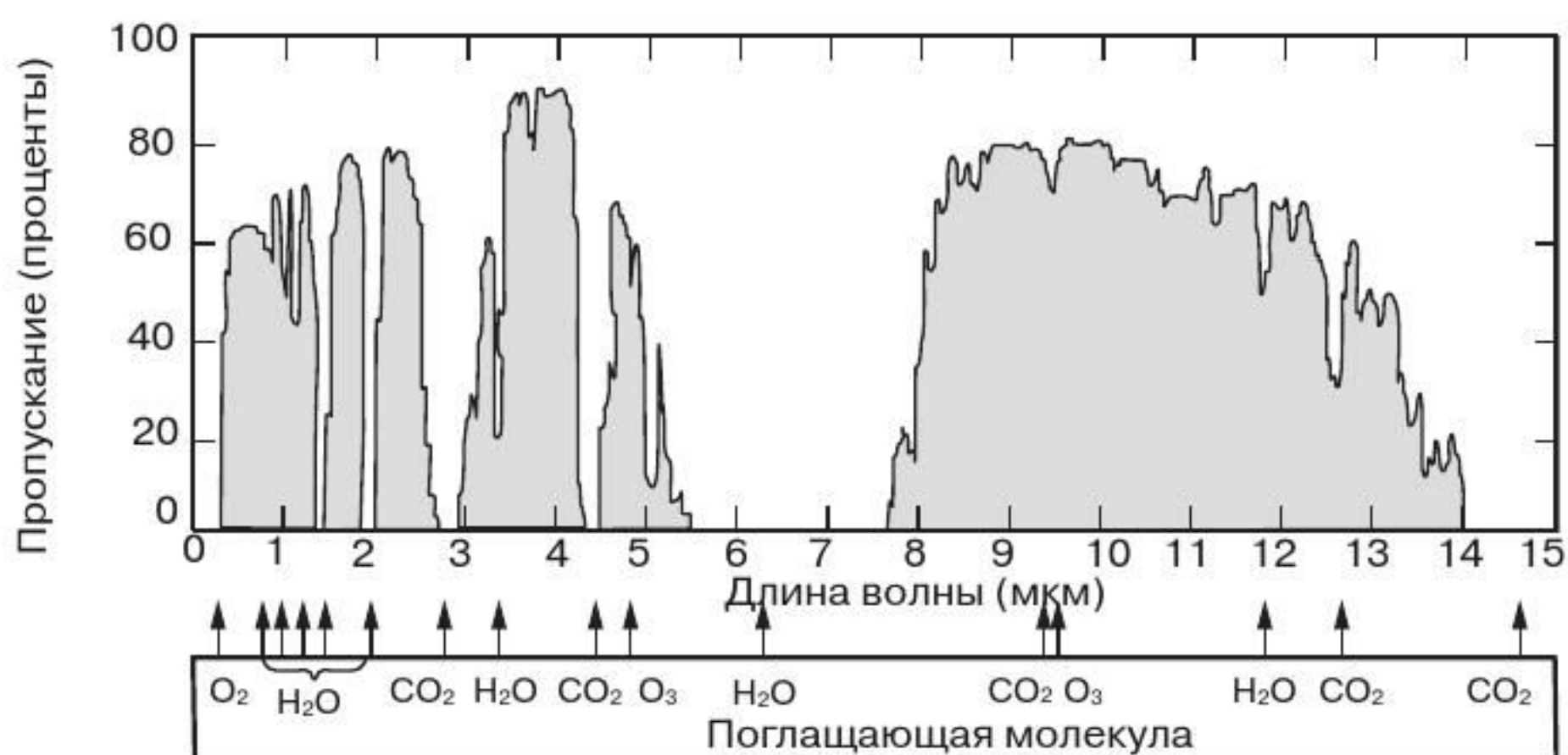


Рис. 13. Спектр пропускания атмосферы Земли в оптической и инфракрасной областях. Отмечены полосы поглощения кислорода (O_2) (ультрафиолет), водяного пара (H_2O), углекислого газа (CO_2) и озона (O_3) (инфракрасная область)

климата поддерживается водяным паром, то ответственность за последовавшие в XX веке его (климата) изменения ложится на «малые газы». «Малые» потому, что 78% воздуха составляет азот, еще 21% — кислород, а следовательно, на все остальные компоненты, в том числе и вышеперечисленные, остается всего около 1%. Однако недаром говорят: «Мал золотник, да дорог». Самое время познакомиться с некоторыми из наших героев.

«Первый парень на деревне»: углекислый газ

Наука дышит лишь одним воздухом — кислородом фактов. Новые исследовательские методы — это те деревья, что очищают ее атмосферу от углекислоты неточных выводов и насыщают ее кислородом впервые открытых, увиденных и понятых явлений.

*В. В. Парин, советский физиолог,
академик АН СССР и АМН СССР*

Каждый вдыхает кислород, а выдохнуть норовит всякую гадость!

Из миниатюры А. И. Райкина

В конце 1970-х гг. в адрес ЦК КПСС пришло письмо от учительницы физики одной из станиц Краснодарского края. Оно начиналось словами: «Недавно довелось прочитать...». Как вы думаете, какая информация настолько поразила педагога, что она поспешила обратиться, по сути, в высшую инстанцию на шестой части суши? А информация эта была по поводу... массы кислорода, содержащегося в атмосфере. Увидев соответствующее массе число — около 10^{15} т, автор письма вооружилась медицинским справочником, из которого извлекла величину еще одной массы кислоро-

да — на сей раз вдыхаемого взрослым человеком в течение одних суток. Умножив последнюю на количество жителей планеты, она получила суточную потребность в кислороде населения Земли. Заключительным аккордом вычислений стало деление общей массы атмосферного кислорода на только что найденную суточную потребность. И тут (о, ужас!) выяснилось, что кислорода «осталось» всего-навсего на 50 лет! Именно об этой надвигающейся катастрофе бдительная учительница и поставила в известность высший партийный орган, сопроводив информацию настоятельной просьбой принять незамедлительные меры. В соответствии с заведенной тогда процедурой, письмо было переадресовано в научную организацию, занимающуюся изучением атмосферы, с требованием дать оперативный исчерпывающий ответ на тревожный сигнал «из глубинки». Так письмо оказалось в наших руках.

Успокоить встревоженную женщину не составило большого труда: достаточно было лишь напомнить, что с расходом кислорода и образованием углекислого газа при дыхании людей и животных конкурирует не менее эффективный процесс *фотосинтеза* в растениях, в результате которого молекулы углекислого газа оказываются связанными водой и образуются кислород и ряд сложных органических молекул. В упрощенном виде сказанное можно записать следующим образом:



Таким образом, в настоящее время доминирующую роль в поддержании определенной концентрации кислорода в ат-

мосфере играют доступность и высокая скорость реакций с органическим материалом углекислого газа (CO_2), а значит, самым фактом существования люди обязаны наличию именно его в атмосфере. Однако подаривший нам жизнь «благодетель» в последнее время ее и серьезно осложняет.



Как уже говорилось, CO_2 — важнейший парниковый газ. На нем, по современным оценкам, лежит примерно 60% ответственности за *усиление* парникового эффекта (рис. 14).

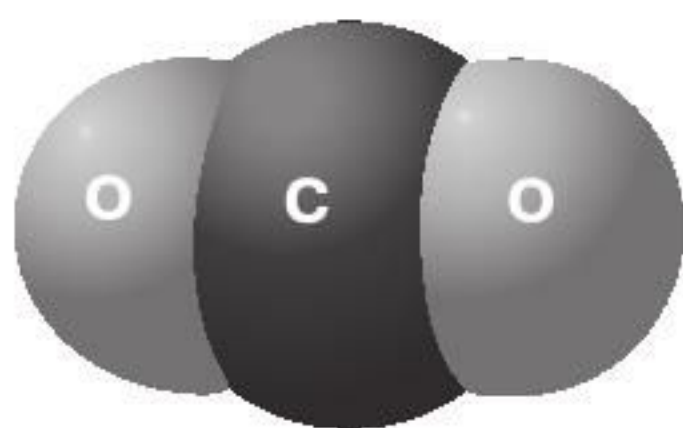


Рис. 14. Модель молекулы углекислого газа (слева); сухой лед — углекислый газ в твердом виде (справа)

Его главная полоса поглощения приходится на длину волны $\lambda = 15$ мкм. Интересно, что именно на этой же длине волны находится и максимум интенсивности излучения поверхности Земли при вышеупомянутой среднегодовой среднеглобальной температуре поверхности 14°C . Это обстоятельство еще более повышает значимость CO_2 в парниковом эффекте. Это ли не повод поговорить о нем.

Углеродный цикл — один из основных природных циклов как на Земле, так и во Вселенной, в частности, углекислый газ обнаружен в составе атмосферы Марса и Венеры. Основной запас углерода сосредоточен в недрах Земли, и лишь небольшая его доля («обменный резервуар») участвует в обмене

с другими геосферами. Схема цикла углерода на Земле представлена на рис. 11 цв. вклейки.

На ранних стадиях формирования нашей планеты CO_2 образовывался в результате процессов окисления как естественный компонент атмосферного воздуха. Позже бóльшая часть изначального количества CO_2 в форме известняка CaCO_3 и других карбонатов (солей угольной кислоты) была захвачена литосферой.



И в современную эпоху львиная доля поступающего в атмосферу углекислого газа имеет естественное происхождение, а вклад человека (при сжигании им углеродосодержащих веществ — топлива) во второй половине 1970-х гг. оценивался всего лишь в 4%.

Атмосферный резервуар углекислого газа во многом определяется биосферой суши с короткоживущей (трава и листва деревьев) и долгоживущей (гумус почвы) составляющими. В целом, по весьма приблизительным оценкам, перегнивание органического материала обуславливает ежегодный выброс 220 миллиардов тонн углекислого газа, еще 330 миллиардов тонн дает океан, вклад вулканов составляет 130–230 миллионов тонн CO_2 .



Главный атмосферный источник CO_2 — дыхание растений (в основном *ночью*). Снижение же его концентрации происходит в результате фотосинтеза в зеленых частях растений (*днем*). Поэтому в областях с богатой растительностью (в лесах) максимальная концентрация CO_2 бывает рано утром и в конце

зимы, а минимальная — в конце дня летом и осенью. При этом отклонение от среднего ее значения (амплитуда колебаний) составляет 10–15%. Значительный источник CO_2 в атмосфере — гниение растительности (в частности, опавших листьев) и других органических остатков составляющих углеродного цикла. Таким образом, в лесах, неспроста называемых «легкими планеты», углекислый газ не только разрушается, но и образуется.

Вклад в продукцию CO_2 , наряду с сезонным листопадом, вносят процессы старения и деградации лесных массивов, болезни растений, а также выгорание лесов в результате пожаров. Следовательно, бесперебойность «дыхания» планеты напрямую зависит от состояния ее «зеленого моря» (неслучайно 2011 г. был объявлен ООН Международным годом защиты лесов). В первую очередь это относится к вечнозеленым тропическим и субтропическим лесам, однако и вклад растительности России также достаточно весом (приблизительно 20–30%).

Важную роль в углеродном цикле играют болота и зоны вечной мерзлоты, которые аккумулируют углерод в торфе и мерзлом грунте, но высвобождают CO_2 при осушении болот и таянии мерзлоты. Нельзя не упомянуть о других «носителях» углерода. Среди несметного их числа выделим метан (о нем наш рассказ впереди) и монооксид углерода CO (угарный газ). Антропогенные выбросы CO примерно в 1,5 раза превосходят его естественную эмиссию, при этом около 60–80% такого угарного газа обусловлены автомобильным транспортом. Как метан, так и монооксид углерода, вступая в химические реакции с OH -радикалами, окисляются в атмосфере до CO_2 .



Сам же углекислый газ химически малоактивен, лишь в стратосфере его молекулы разрушаются под действием ультрафиолетового излучения, но процесс этот протекает настолько вяло, что им обычно пренебрегают. Последнее обстоятельство решающим образом определяет характерное время пребывания молекулы CO_2 в атмосфере («время жизни»): по современным оценкам, оно близко к ста годам.

Океанический резервуар CO_2 пополняется при растворении углекислого газа в воде с образованием угольной кислоты и продуктов ее диссоциации (распада). Растворимость CO_2 в воде увеличивается с уменьшением ее температуры и, наоборот, падает с ее увеличением (наглядный тому пример — появление пузырьков газа на стенках стакана с газированной водой при ее согревании — знаком, несомненно, каждому). Поэтому на зиму углекислый газ «отправляется погостить» из атмосферы в океан через холодные моря и реки Севера и возвращается в атмосферу летом из теплых вод и южных рек. Много углекислого газа выбрасывает Тихий океан при явлениях Эль-Ниньо. Растворимость CO_2 зависит также от состава воды и от уровня ее кислотности (pH). Часть оказавшегося в морской воде углерода связывается, образуя соли угольной и серной кислот, и в последующем участвует в гидрохимических преобразованиях. В морской воде мелкие и мельчайшие водоросли (фитопланктон) поглощают растворенный CO_2 в процессе фотосинтеза, затем по пищевым цепочкам углерод переходит в зоопланктон и в организмы морских животных, а в дальнейшем выпадает на дно океана с их отмершими частями и продуктами жизнедеятельности. Моле-

кулы карбоната кальция (CaCO_3) из донных отложений при некоторых условиях могут снова переходить в воду и участвовать в гидрохимических процессах. Кроме того, карбонатные породы литосферы при выветривании горных пород способны растворяться в воде, создавая значительный по величине потенциальный источник CO_2 , замыкая круговорот углерода в природе.

Обратите внимание, что наш рассказ об углекислом газе почти не содержит количественных оценок, характеризующих обсуждаемые процессы, и тем более — их взаимосвязь. Это, безусловно, не случайность, а отражение уровня современных знаний об углеродном цикле. Проблемы, возникающие при его изучении, те же, что и при исследовании климатической системы в целом. О них мы говорили выше, и повторяться нет особого смысла. Однако к тому, чтобы численно охарактеризовать изменения концентрации CO_2 в воздухе, нет никаких препятствий.

На рис. 15 и 16 видно, как изменялась концентрация CO_2 в различные эпохи истории Земли (на врезке — за последнее тысячелетие) и за последние 50 лет. Важно отметить, что за четыре последних ледниковых и межледниковых периода она не превосходила 300 ppm (англ. parts per million, или «частей на миллион», т. е. молекул CO_2 на миллион молекул воздуха), а именно: 270–290 ppm в межледниковые и 190–200 ppm в ледниковые периоды.



В настоящее время средняя по земному шару концентрация CO_2 достигает 392 ppm, а в доиндустриальный период она находилась на уровне межледниковой (около 280 ppm) и была почти на треть ниже современной.

Концентрация эта, вследствие химической пассивности CO_2 , почти не зависит ни от географических координат точки на земном шаре, ни от высотного уровня. Поэтому в большинстве исследований она принимается одинаковой во всей атмосфере Земли.

Даже беглого взгляда на рис. 15 достаточно, чтобы отметить ускоренный рост концентрации CO_2 , за последние 50 лет: ежегодно в среднем на 1 ppm или приблизительно на 0,3% в год в 1960–1980-х гг., а с конца 2000-х — до 2,2 ppm

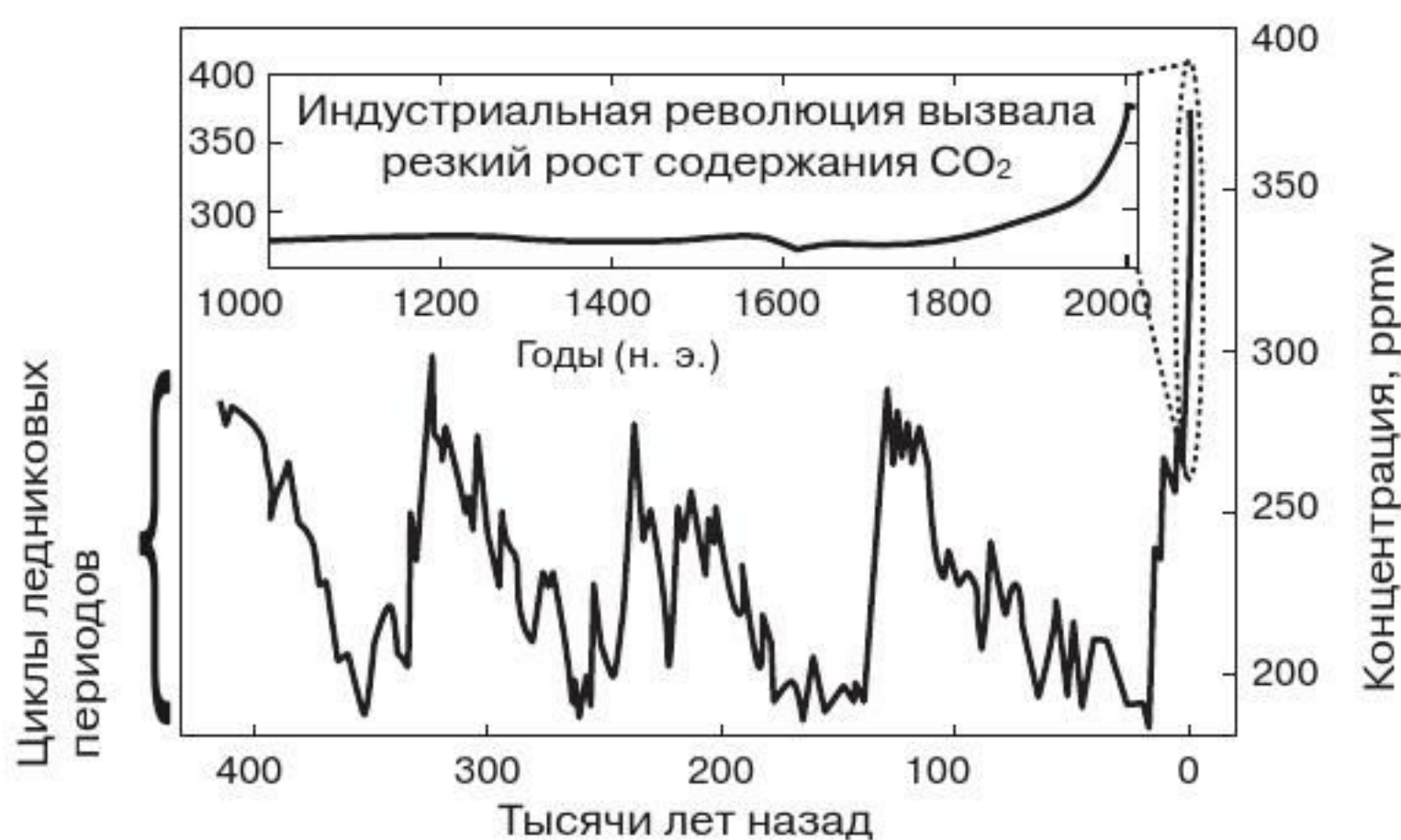


Рис. 15. Изменения концентрации углекислого газа в палеоэпохи

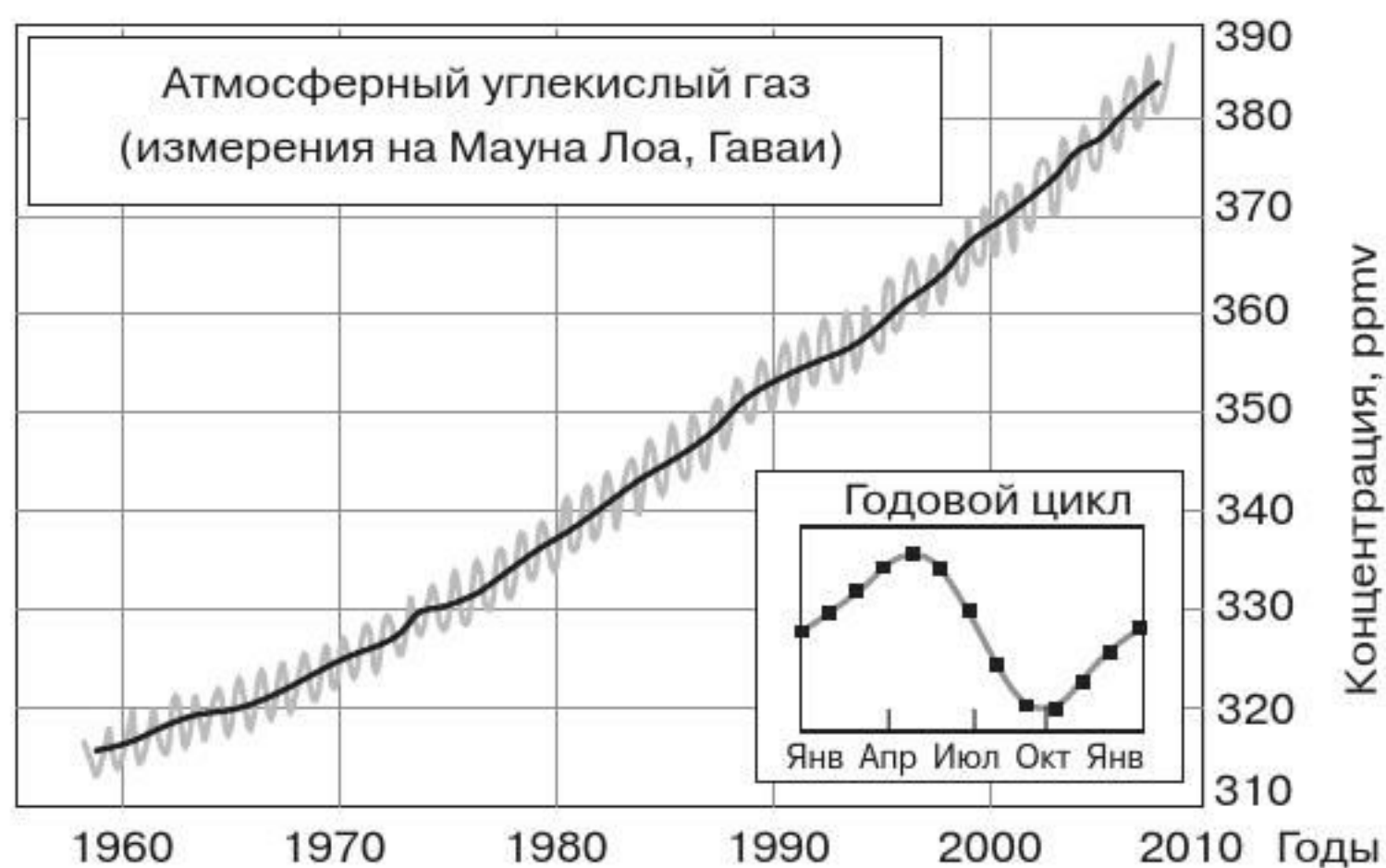


Рис. 16. Изменения концентрации углекислого газа за последние 50 лет

или 0,6%. Считается, что небывалый рост связан с интенсификацией антропогенной деятельности, хотя существуют и другие версии. Согласно имеющимся версиям, подобное можно объяснить:

а) уменьшением содержания углекислого газа в поверхностных водах или уменьшением поглощения CO_2 поверхностью океана (например, из-за увеличения температуры);

б) вызванным чем-то ускорением окисления отмершей растительности;

в) вызванным чем-то сокращением скорости фотосинтеза или усилением дыхания растений;

г) увеличением масштабов окисления углерода из-за сжигания человеком углеродсодержащего топлива.

Выше отмечалось, что доля антропогенного фактора в углеродном цикле исчисляется лишь немногими процентами, но, согласитесь, и ежегодное увеличение концентрации CO_2 на 0,3–0,6% по темпам вполне соизмеримо с размером антропогенного фактора (вышеупомянутыми 4%). В пользу последней версии говорят следующие соображения. Во-первых, в биосфере Земли последний век не отмечен какими-либо глобальными изменениями, способными заметно повлиять на интенсивность процессов, упомянутых в версиях б и в. Во-вторых, наблюдаемого в течение XX века увеличения температуры воды в океане недостаточно для объяснения (в соответствии с физическими законами для жидкостей и газов) столь значительного роста атмосферной концентрации CO_2 . В-третьих, методы современного анализа позволяют оценить вклад сжигаемого топлива в общее изменение содержания углекислого газа в атмосфере с помощью соотношения изотопов ^{12}C и ^{14}C , благодаря тому, что изотоп ^{14}C практически не входит в состав ископаемого топлива.



Проведенная оценка показывает сопоставимость темпов роста потребления топлива и увеличения содержания CO_2 в атмосфере.

Упомянем еще об одной проблеме, связанной с увеличением содержания CO_2 , — биологической. Растворение дополнительной массы углекислого газа в морской воде влечет за собой увеличение уровня ее кислотности, а это, в свою очередь, представляет большую опасность для существования многих живых организмов. Так, лабораторные исследования показали, что увеличение кислотности морской воды губительно сказывается на раковинах моллюсков, известковых скелетах коралловых полипов, которые буквально разъедаются угольной кислотой.



Итак, увеличение атмосферной концентрации CO_2 в XX столетии — непреложный, доказанный измерениями факт. И где-то на $2/3$ глобальное потепление обусловлено именно этим фактом.

Как ни печально, но приходится признать, что сколь-нибудь существенно воздействовать на природный углеродный цикл мы не в состоянии, а, значит, контролировать содержание CO_2 в атмосфере нам не по силам.

По большому счету, что-либо сделать можно лишь с теми самыми 4% из «зоны нашей ответственности», но и эта задача, ой, как непроста: нужно повсеместно отказаться или хотя бы значительно сократить промышленное использование ископаемого топлива в ближайшие десятилетия. Такая цель поставлена, но вряд ли может быть осуществлена, поскольку требует глобальной и затратной модернизации мировой экономики,

а также энергичных *согласованных* действий. Это путь, который еще только предстоит пройти. А пока зададимся вопросом: нет ли других путей, если не альтернативных, то дополняющих данный? Для этого рассмотрим другие парниковые газы.

**Многоликий метан:
второй по значимости
парниковый газ**

Природный газ — это кислород экономики, перекрывающий кислород экологии.

*Л. С. Сухоруков — писатель,
мастер афоризма*

Упоминание о метане (CH_4) у большинства людей обычно ассоциируется со взрывами и человеческими жертвами на угольных шахтах. «Явление метана народу», т. е. атмосфере, происходит по многим каналам. В их чередѐ «шумный» выход метана на поверхность по стволам угольных шахт — канал, пожалуй, самый эпатажный, но совершенно не типичный. Как вскоре убедится читатель, метан предпочитает просачиваться в атмосферу без лишнего шума, тихой сапой. Между тем данные измерений свидетельствуют о том, что с начала индустриальной эпохи (около 1750 г.) содержание в атмосфере метана увеличилось в 2,5 раза (для сравнения: концентрация CO_2 за тот же период возросла примерно на 30%).



Повышенного внимания к себе метан заслужил благодаря его сегодняшнему вкладу в усиление парникового эффекта, оцениваемому в 20%. Конечно, это не 60%, вносимые углекислым газом, но, согласитесь, тоже немало — «твердое» второе место.

Замахнуться на гегемонию CO_2 в обозримом будущем ему едва ли по силам, но тем не менее...



Молекула CH_4 (рис. 17) в десятки раз эффективнее поглощает инфракрасное излучение, чем молекула CO_2 . Главенствующая же роль последнего достигается лишь тем, что количество молекул углекислого газа в атмосфере примерно в 200 раз превышает число молекул метана. Но поскольку концентрация CH_4 в индустриальную эпоху росла гораздо быстрее концентрации CO_2 , очевидно, что при сохранении существующей тенденции уже в недалеком будущем вклад метана в усиление парникового эффекта будет еще более весомым.

Чтобы сократить темпы глобального потепления, резонно попытаться замедлить рост концентрации этого газа (как, впрочем, и других парниковых газов) в атмосфере. В этой связи насущно необходимо познакомиться с ним поближе.

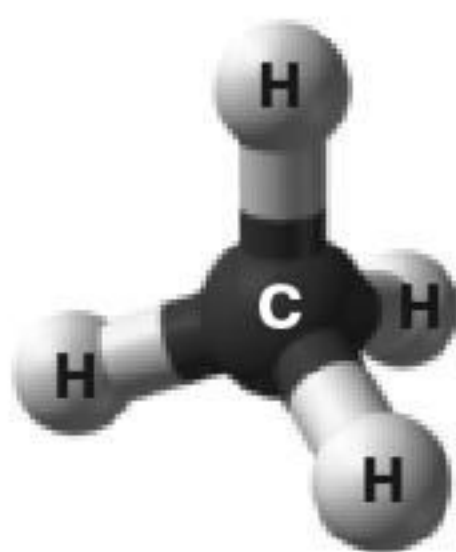


Рис. 17. Шаростержневая модель молекулы метана

Содержание всякого газа в атмосфере определяется соотношением мощности его источников и *стоков* (т. е. разрушения в атмосферных химических реакциях и — для некоторых

газов — вымывания осадками), а *срок пребывания* в атмосфере (время жизни) — совокупной скоростью его химического разрушения и механического удаления из атмосферы.

Атмосферная химия метана очень проста и не составляет какой-либо загадки. Молекулы метана не обладают высокой реактивной способностью и взаимодействуют лишь с очень активными радикалами гидроксила OH^* и атомами хлора Cl , а также возбужденного кислорода $\text{O}(^1\text{D})$. В тропосфере разрушение CH_4 происходит главным образом в реакции с OH^* (на ~90%), однако в верхней стратосфере (выше 35 км) с ней успешно конкурирует реакция метана с атомарным хлором. Доля реакции CH_4 с $\text{O}(^1\text{D})$ в фотохимическом стоке метана относительно невелика. Разрушение молекул CH_4 солнечными лучами (фотолиз), происходящее в верхней стратосфере, столь незначительно, что в расчетах им часто пренебрегают. Кроме того, метан поглощается почвами в сухих субтропических лесах со скоростью большей, чем во влажных умеренных и тропических.



В результате молекула CH_4 , по разным оценкам, живет в атмосфере 8–12 лет.

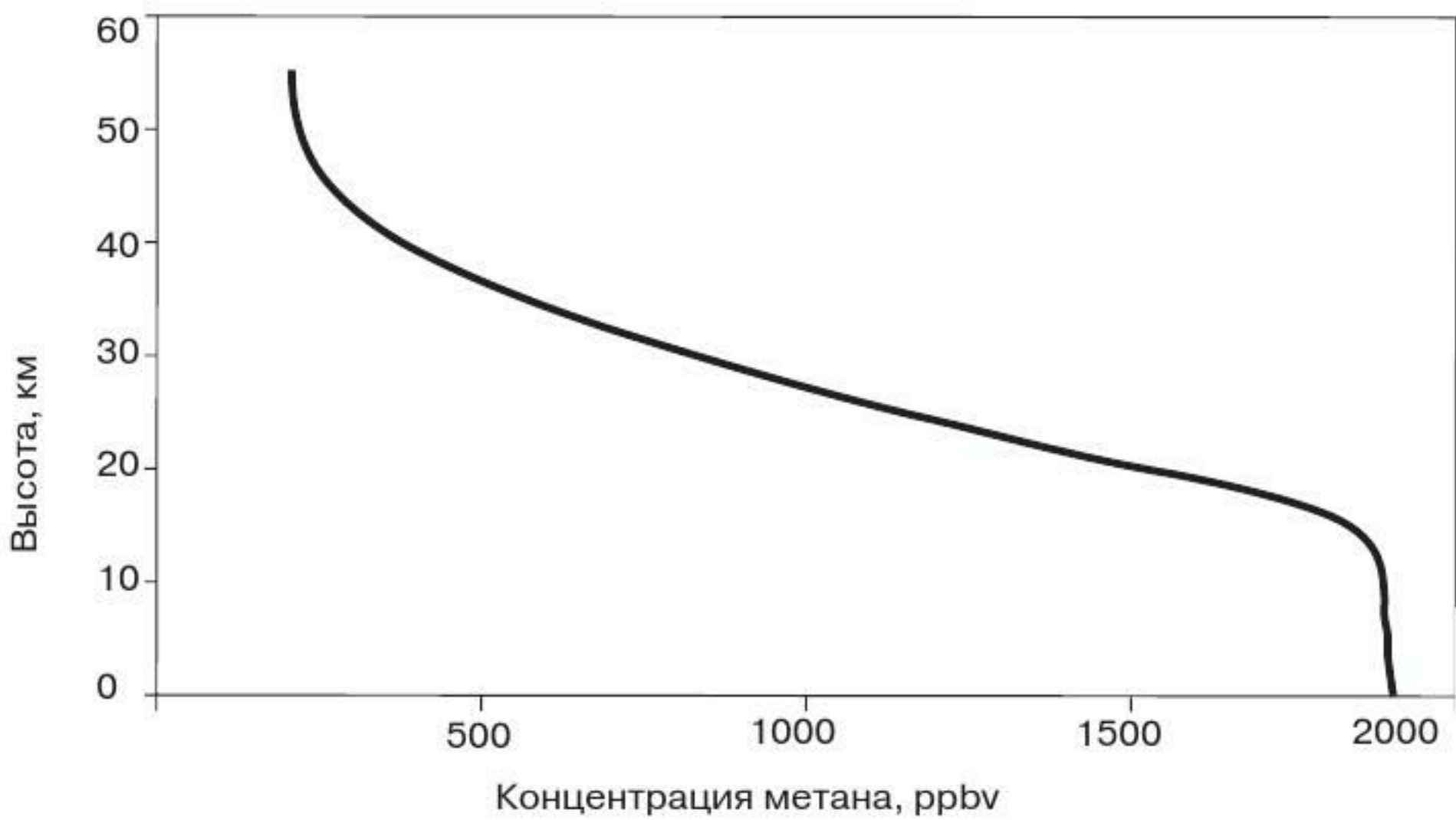


Рис. 18. Характерное содержание метана, ppbv (parts per billion by volume, 10^{-9} молекул на молекулу воздуха). В стратосфере разрушение метана гидроксидом приводит к образованию другого важного парникового газа — водяного пара

Химическим путем метан не образуется, поскольку для синтеза его молекул необходимо большое количество энергии. Поэтому атмосферные источники CH_4 отсутствуют, и поступление метана в атмосферу полностью определяется его потоками с поверхности Земли (рис. 18). Метан возникает и накапливается в недрах Земли в среде, где гниение отмершей растительности происходит при дефиците свободного кислорода. Таким образом, среди источников метана преобладают микробиологические процессы с участием анаэробных метанобразующих бактерий:



Молекулярный водород (H_2) для осуществления этой реакции выделяется бактериями, не синтезирующими метан, но развивающимися в той же самой среде, что и метаногены. Метан продуцируют также жвачные млекопитающие (в первую очередь, крупный рогатый скот), в кишечнике которых создаются оптимальные условия для существования выделяющих метан микроорганизмов. По оценке Н. М. Бажина¹, «продуктивность» одной коровы составляет 250 л CH_4 (целая бочка!) в сутки.

Все источники метана обычно делят на две большие группы: *естественные* и *антропогенные*. К первым относят потоки CH_4 с поверхности заболоченных территорий, пресноводных водоемов, океанической поверхности, а также метан, образующийся в колониях термитов и выделяемый при сжигании огромных объемов биомассы в результате пожаров.

¹ Бажин Н. М. Метан в атмосфере, <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/958.html>.

Здесь необходимо небольшое отступление. Определение суммарного количества метана, поступающего в атмосферу от каждого из источников, — несомненно, важная, но вряд ли решаемая инструментальными средствами задача. Поток CH_4 , например, с поверхности заболоченных территорий, существенно зависит от температуры поверхности, типа болота (торфяного, сфагнового и др.), характера растительности и ее плотности, наличия или отсутствия воды на поверхности и других факторов. Поскольку заболоченные территории встречаются довольно часто (исключая полярные области), и каждой местности присущи свой климатический режим и своя растительность, величины потока CH_4 с разных увлажненных территорий будут заметно различаться, а организация регулярных измерений потока CH_4 в столь большом количестве мест практически неосуществима. Да и смешно представить каждую корову (лошадь, козу и пр.) с индивидуальным датчиком, замеры которого регулярно собирались бы и аккуратно архивировались. А поэтому мощность каждого источника метана определяется с помощью решения обратной задачи: подбирается значение, которое, будучи подставленным в модель, обеспечивало бы максимальное соответствие расчетных концентраций CH_4 измеренным. Естественно, получаемые оценки зависят от класса и особенностей используемой модели и заметно различаются у разных авторов. Обзор таких экспертных оценок и комментарии к ним приведены в Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1994¹. Далее мы воспользуемся именно этим источником. Давность указанной публикации не должна смущать читателя. Несомненно, за почти 20 лет, прошедших с момента ее выхода в свет, приведенные оценки как-то изменились, однако с абсолютной уверенностью можно утверждать, что они не вышли за рамки разброса приведенных в этом обзоре значений. В такой ситуации мы не ставим перед собой задачу сообщить читателю «последние известия с метаноносных полей» и призываем рассматривать приведенные ниже числа лишь для получения представления о порядке величины отдельных источников и соотношении между ними. Однако вернемся к обсуждению существующих источников метана.

Среди *естественных источников* метана наиболее интенсивен поток CH_4 с поверхности заболоченных территорий. Его

¹ WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 37. Geneva, 1994.

величина оценивается экспертами в 110 Мт/год ($1 \text{ Мт} = 10^6 \text{ т}$) с разбросом значений от 55 до 150 Мт/год, причем более половины (около 60 Мт/год) приходится на тропики, а на северные широты почти все оставшееся — 40 Мт/год. На порядок меньше поток с поверхности океана — 10 Мт/год и с пресноводных поверхностей — 5 Мт/год. Ежегодная производительность термитников оценивается в 20 Мт метана. Еще 40 Мт/год поступает в атмосферу в результате сгорания биомассы при пожарах, в большинстве своем происходящих в тропической зоне. Таким образом, ежегодно благодаря естественным источникам в атмосферу попадает около 200 Мт CH_4 (с разбросом оценок от 101 до 355 Мт/год) (рис. 19).



Рис. 19. Мировая эмиссия метана (Мт/год) от естественных (а) и антропогенных (б) источников

В число *антропогенных источников* входят потоки, попадающие в атмосферу при добыче ископаемого топлива, с мусорных свалок и при последующем сжигании бытовых отходов, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (в том числе рисовых плантаций), при разведении крупного рогатого скота.

Совместные усилия угле-, газо- и нефтедобывающих предприятий во всем мире увеличивают эмиссию метана в атмо-

сферу на 100 Мт/год (в природном газе на его долю приходится 77–99%, в попутных нефтяных — 31–90%, в рудничном — 34–40%). Из этих 100 Мт/год промышленной эмиссии примерно 47 дает добыча и сжигание угля, а 37 и 17 Мт/год соответственно — утечка из скважин и при транспортировке газа и нефти.

Подсчитано, что крупный рогатый скот продуцирует 80 Мт CH_4 в год. (В 2000 г. насчитывалось чуть больше 1 млрд голов, из них 314 млн — в Индии, 150 — в Бразилии, 130 — в Китае и около 100 млн — в США.)

Ежегодный поток CH_4 в атмосферу с рисовых плантаций оценивается в 60 Мт, еще около 30 Мт CH_4 в год попадает в атмосферу при других способах землепользования; при накоплении и переработке мусора — 57 Мт в год. Географическое распределение этих потоков напрямую зависит от экономического развития страны, численности и плотности населения, отчасти от национальных традиций. Примерно вдвое меньше, 25 Мт CH_4 в год, обеспечивает очистка сточных вод.

В итоге из антропогенных источников в атмосферу попадает около 360 Мт/год (от 259 до 537) CH_4 при общем его объеме в 560 Мт/год (от 360 до 892).



Следовательно, примерно $\frac{2}{3}$ глобальной эмиссии метана обусловлено деятельностью человека, хотя деление источников на антропогенные и естественные несколько условно — осушаются естественные болота, метан присутствует в продуктах жизнедеятельности не только домашних, но и диких травоядных животных.

Понятно, что основные источники метана размещаются в Северном полушарии, где находится подавляющее большин-

ство экономически развитых государств. К тому же площадь суши, на которой в основном располагаются источники CH_4 , здесь значительно больше, чем в Южном полушарии. А что же Россия? Сколь велик наш вклад в глобальную эмиссию метана?



В силу своего географического положения наша страна не является родиной термитов и рис — далеко не главный среди производимых в России зерновых. Поэтому российский вклад в эмиссию CH_4 складывается в основном из потоков метана с поверхности переувлажненных территорий (включая болота, открытые водоемы, тундру и т. д.), его утечек, сопутствующих добыче ископаемого топлива, а также метана, выделяемого в результате жизнедеятельности крупного рогатого скота и при утилизации мусора.



По оценкам, гниение и сжигание российского мусора увеличивает ежегодный поток метана примерно на 2,5 Мт.

В 1990-х годах в России и странах СНГ резко сократилось количество крупного рогатого скота, и к 2000 г. в России насчитывалось лишь 27 млн голов (в 1991 г. в СССР — 57 млн). Как следствие, в данный период уменьшился и выброс CH_4 , обусловленный этим источником: в 2000 г. он оценивался в 1,8 Мт/год. Из-за экономического спада 1990-х закрылись шахты в России, на Украине, в Казахстане, значительно сократилась добыча угля. Существующая на этот счет статистика весьма противоречива, что, конечно, осложнило расчеты, поэтому экспертные оценки имеют большой разброс — от 2,5 до 5 Мт CH_4 в год.

Как известно, Россия обладает огромными запасами природного газа, добыча которого — приоритетная отрасль ее экономики. Вопрос о необходимости оценки объема утечки

газа неоднократно поднимался российскими и международными природоохранными организациями (по расчетам 1990-х годов, в результате утечки в атмосферу может попадать от 1,42 до 17 ± 13 Мт CH_4 в год).

По нашей оценке, эмиссия CH_4 от российских переувлажненных территорий, расположенных в поясе $30\text{--}60^\circ$ с. ш., составляет около 21 Мт/год. Общие же выбросы CH_4 с территории России можно оценить в 40–45 Мт/год (рис. 20).

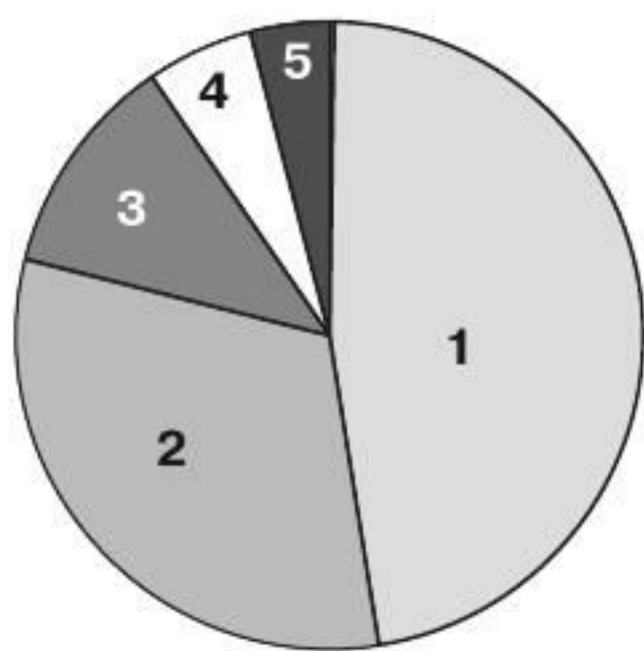


Рис. 20. Российские источники выбросов метана (Мт/год) в атмосферу:

1 — болота, тундра, открытые водоемы; 2 — газо- и нефтедобыча; 3 — угледобыча; 4 — мусор; 5 — крупный рогатый скот



Ввиду того, что молекула CH_4 живет в атмосфере 8–12 лет, а на перемещение воздушных масс из одного полушария в другое достаточно нескольких месяцев, содержание метана в воздухе почти одинаково в разных уголках земного шара.

В частности, средняя концентрация CH_4 в Южном полушарии всего на 6% ниже, чем в Северном, где, как уже отмечалось, расположены его основные источники. В связи с относительной химической пассивностью метана его содержание в атмосфере не подвержено заметным сезонным изменениям, которые не превышают нескольких процентов, причем самые низкие концентрации CH_4 приходятся на конец лета, а наибольшие — на зиму и весну. Исключение составляют север-

ные высокие широты, там наблюдается резкое увеличение концентрации метана к осени, связанное с освобождением ото льда болотистых почв.

Анализ образцов из ледовых кернов, отобранных в Антарктиде и Гренландии, позволил проследить ход изменения концентрации CH_4 в атмосфере. Во время последнего ледникового максимума (18–20 тыс. лет назад) она составляла в нижней тропосфере 350 ppb (молекул метана на миллиард молекул воздуха), к 1850 г. возросла до 820 ppb, в 1950 г. — уже до 1180 ppb, в 1990 г. — 1694 ppb, в 2000 г. — 1752 ppb и в 2010 г. — около 1850 ppb (рис. 21).



Налицо беспрецедентно быстрый рост концентрации атмосферного метана за последние 60 лет — на 56,8%.

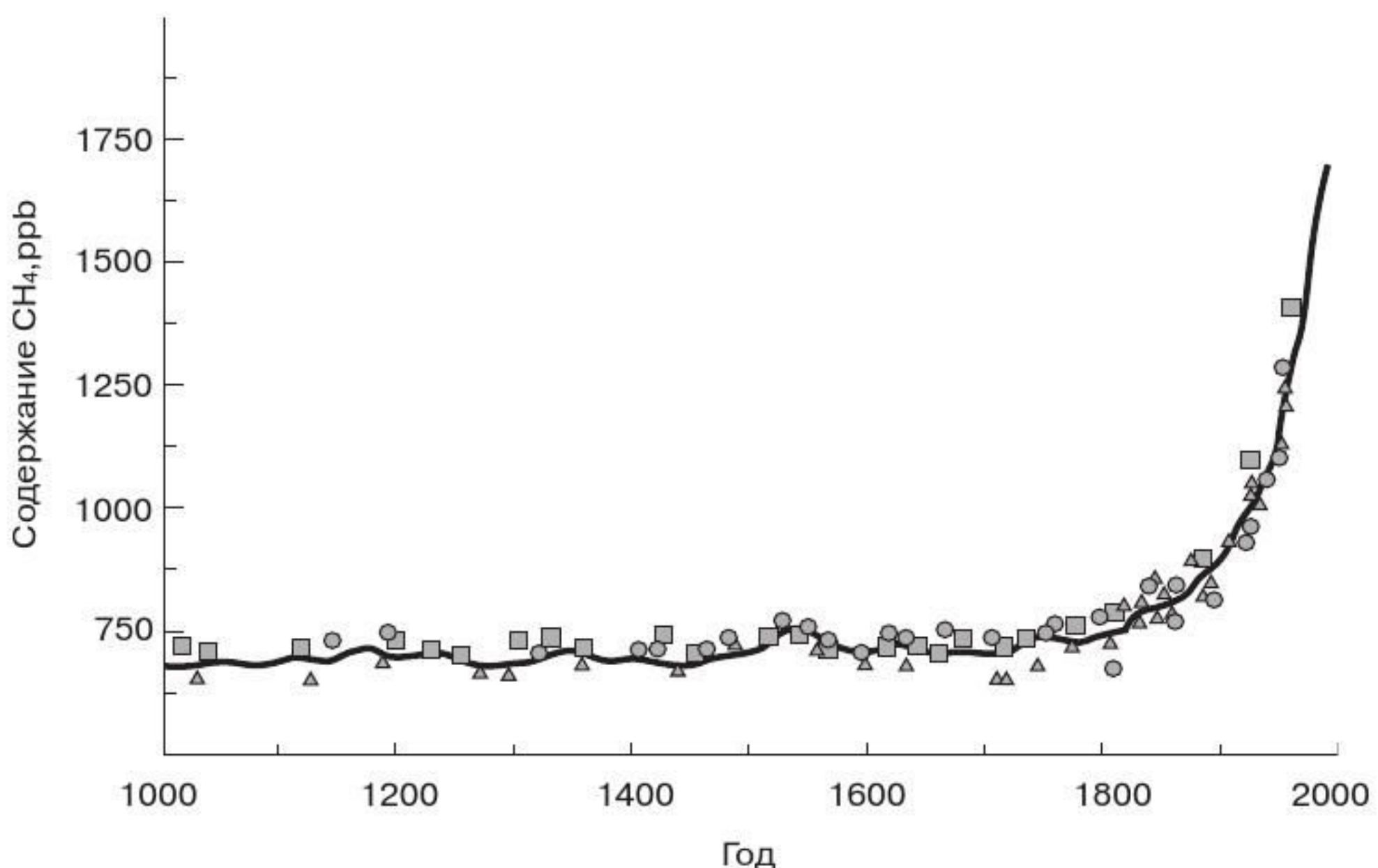


Рис. 21. Среднегодовое по земному шару содержание метана в приземном воздухе

Как изменится содержание метана в атмосфере в будущем, ближайшем и отдаленном? Вопрос достаточно трудный, ответ на него зависит от множества объективных и субъективных факторов, главный из которых — наши недостаточные знания, в частности о механизме обмена метана между геосферами (недрами Земли, океаном, атмосферой). Например, до сих пор не объяснено наблюдавшееся в начале XX в. резкое, но непродолжительное замедление скорости роста его содержания в атмосфере. Другой важный фактор неопределенности будущего метана — стратегия национальных и мировой экономик, технических и технологических новаций. Так, англичане разработали и успешно внедряют методику консервирования закрытых шахт, надежно препятствующую проникновению метана в атмосферу. Голландцы начинают использовать технологии очистки коровников, предотвращающие утечку метана.

Рост населения ведет к увеличению потребности в продовольствии, а значит, грядет увеличение сельскохозяйственных площадей и поголовья скота. Но площади сельскохозяйственных угодий будут распределяться по-разному, в зависимости от пищевых пристрастий и сбалансированности рациона тех или иных народов: где-то будут увлажняться новые территории под овощеводство, где-то — осушаться под зерновые. Но наряду с этим из-за неумелой ирригации появятся новые болота.

Конечно, отказ от традиционных источников энергии — угля, газа, нефти — в пользу альтернативных, экологически более чистых, вряд ли реален в ближайшем будущем.



Наиболее вероятным представляется умеренный рост содержания метана в ближайшие десятилетия,

что подтверждает Межправительственная группа экспертов по изменению климата, разработавшая 35 сценариев возможного изменения концентрации важнейших компонентов атмосферного воздуха. В этих сценариях рассмотрены последствия различных путей развития мировой экономики в XXI в., при этом в большинстве из них рост концентрации метана к 2050 г. оценивается в 40–50%.

Остается открытым вопрос о глобальных запасах метана в *газогидратах* — кристаллических образованиях, скрытых под океанической толщей и ледяным покровом в зоне вечной мерзлоты. По немногочисленным измерениям, общее содержание CH_4 в поддонных отложениях в районе Мексиканского залива, в Северном Ледовитом и Тихом океанах оценивается в $1,3 \cdot 10^7$ Мт, масса метана в арктических газовых гидратах — 10^4 – 10^7 Мт, а залежи CH_4 под ледяным покровом — в $2,7 \cdot 10^6$ Мт (правда, с возможной десятикратной (!) ошибкой).



Для сравнения: общее содержание метана в современной атмосфере оценивается примерно в 4600–5000 Мт, т. е. составляет всего несколько сотых процента от его глобальных запасов!

Иногда высказывается опасение (в основном в геологической периодике), что наблюдаемый и прогнозируемый рост температуры окружающей среды может стать причиной полного или частичного высвобождения метана из его резервуаров при изменении интенсивности обмена между донными и вышележащими слоями океана, а также таяния в зонах

вечной мерзлоты. При повышении температуры на 1–1,5 °C в таких районах, занимающих $\frac{2}{3}$ территории России, приток метана может увеличиться на 100 млрд м³, или примерно на 70 Мт ¹.



В недавней статье в журнале «Science» утверждается, что высвобождение метана из гидратов уже случилось 200 миллионов лет назад. Тогда, по мнению авторов статьи, в атмосферу было выброшено около 12 триллионов тонн CH₄, в результате последовал резкий рост температуры, вызвавший триасово-юрское вымирание, унесшее примерно половину видов живых существ и «расчистившее» дорогу динозаврам.

Интерес к проблеме метана в ближайшие годы наверняка сохранится. Считается, что с помощью именно этого газа можно наиболее эффективно регулировать избыточный парниковый эффект. Действительно, на две трети антропогенная эмиссия CH₄ несравнимо более доступна для контроля, чем источники «гуляющего сам по себе» CO₂. К тому же полный цикл пребывания молекулы метана в атмосфере (8–12 лет) во много раз короче аналогичного для молекулы углекислого газа, а значит, результатов регулирования не придется ждать десятилетиями. Наконец, вклад CH₄ в усиление парникового эффекта — второй по значимости, и если нет возможности регулировать поведение лидера — CO₂, логично остановить свой выбор на метане.

¹ Yakushev V. S., Chuvilin E. M. Cold Regions Science and Technology. V. 31. 2000. P. 189–197.

Обеспокоенность продолжающимся глобальным потеплением и его вероятными последствиями — достаточный стимул для дальнейшей дискуссии вокруг парниковых газов среди ученых, журналистов, политиков. В этой связи Россия, как обладательница колоссальных запасов природного газа, одна из ведущих стран по добыче и экспорту нефти, изрядная часть площади которой занята переувлажненными территориями, неизбежно будет оставаться в центре всеобщего внимания.

Когда речь идет о метане, объектом для проведения любых исследований, как теоретических, так и с сугубо практическими целями, могут служить лишь данные натурных измерений, причем обязательно представленные в достаточном объеме. К сожалению, на территории России есть лишь несколько постоянно действующих станций, ориентированных на мониторинг парниковых газов, но отсутствует их разветвленная сеть. Безусловно, объективные трудности для создания такой сети существуют, например труднодоступность тех же болот на российском Крайнем Севере. Однако перспектива участия России в ближайшем будущем в новых международных природоохранных проектах вызывает необходимость в систематическом мониторинге парниковых газов на достаточно густой сети станций и анализе всей поступающей информации в режиме онлайн.

Подводя черту в разговоре о метане, отметим, что главная неопределенность в наших знаниях о нем кроется в невозможности удовлетворительно оценить запасы этого газа в недрах Земли и океана, а также в недостаточной осведомленности о механизмах обмена метаном между атмосферой и другими составляющими климатической системы нашей планеты.



В то же время именно метан видится специалистам «слабым звеном», через которое можно регулировать избыточный парниковый эффект. А значит, этот газ еще не раз напомнит о себе.

О пользе одной сенсации, или Страсти по озону

Народу не нужны нездоровые сенсации. Народу нужны здоровые сенсации.

Братья Стругацкие. «Сказка о тройке»

«Звездой» мирового масштаба озон стал лет 30 назад. Открытый в 1840 г. немецким химиком К. Ф. Шенбейном (1799–1868), он долгие годы был известен лишь узкому кругу специалистов.



Озон — не просто один из многих, это газ уникальный. Несмотря на то что его масса не дотягивает даже до 0,0001% массы атмосферы, он имеет особое значение для поддержания жизни на Земле и формирования ее климата: полностью поглощает поток коротковолновых ультрафиолетовых (УФ) лучей с длиной волны 200–280 нм и около 90% ультрафиолетового излучения с длиной волны 280–320 нм (так называемая полоса УФ-Б излучения Солнца). Наблюдения показали, что если общее содержание озона сократится не более чем на 10–20%, то на каждый процент такого сокращения придется приблизительно двухпроцентное увеличение потока в полосе УФ-Б.

Первый шаг к славе был сделан в первой половине 1970-х, когда в связи с появлением трех статей в научной периодике на него обратили свое внимание СМИ. В первых двух, одна из которых была написана будущим нобелевским лауреатом, а тогда сотрудником Стокгольмского университета П. Крутценом, а вторая химиком из Калифорнийского университета

в Беркли Г. Джонстоном, высказывалась гипотеза о возможности разрушения стратосферного озона оксидами азота. Вскоре список гипотетических врагов озона пополнился атомарным хлором, и до 1974 г. сдержанный оптимизм вызывало лишь то, что количество хлора естественного происхождения в атмосфере сравнительно невелико. Однако ситуация кардинально изменилась с выходом в свет третьей статьи, в которой также будущие нобелевские лауреаты М. Молина и Ш. Роуленд из Калифорнийского университета в Ирвине утверждали, что дополнительными источниками хлора в стратосфере являются *хлорфторуглеродные соединения (ХФУ)*, массово используемые в холодильных установках, аэрозольных упаковках и т. д. Будучи негорючими, нетоксичными и химически пассивными, эти вещества медленно переносятся восходящими воздушными потоками от земной поверхности в стратосферу, где их молекулы разрушаются под действием УФ-излучения, в результате чего выделяются свободные атомы хлора. Вся эта информация, эмоционально «усиленная» журналистами, была донесена широкой общественности.

Развитие (и какое!) эта тема получила через 10 лет. Сообщение об обнаружении английскими учеными в конце 1985 года большого дефицита озона над Антарктидой — «озоновой дыры» (термин был предложен еще в 1930-е гг. С. Чепменом) стало сенсацией года, а реакцию мировой общественности на это сообщение легче всего охарактеризовать одним коротким словом — шок. Одно дело, когда угроза разрушения озонового слоя существует лишь в отдаленной перспективе, другое — когда мы поставлены перед свершившимся фактом. К этому никто не был готов.

«Подумаешь, одним газом больше, одним — меньше. Вон сколько видов флоры и фауны исчезло, и ничего, мир продол-

жает существовать», — мог бы возразить наивный читатель, но такой едва ли сегодня найдется.

Солнечное излучение в умеренных дозах вызывает загар и тонизирует работу человеческого организма, но при их повышении наблюдается повреждение клеток кожи (их нуклеиновых кислот), которое впоследствии может привести к заболеванию открытых участков кожи.



Установлена зависимость между заболеваемостью раком кожи и степенью ультрафиолетового излучения Солнца, с наибольшим риском заболеть у представителей белой расы. Другим следствием усиления ультрафиолетовой радиации стал рост случаев поражения хрусталика глаза катарактой. Лабораторные опыты показали, что повышенный поток ультрафиолетового излучения также влечет за собой — через подавление процесса фотосинтеза и сокращение фитопланктона в Мировом океане — уменьшение популяции некоторых видов рыб.

Кроме того, от поглощения озоном ультрафиолетовой радиации во многом зависит и температура атмосферы: стратосферный воздух нагревается под действием УФ-излучения на несколько десятков градусов. Происходит это благодаря наличию в атмосфере ряда газов, включая озон, поглощающих это излучение и выделяющих при этом тепло. Весной и летом УФ-излучение интенсивнее, чем осенью и особенно зимой, поэтому и нагрев в весенне-летний период больше. Более того, этот нагрев в полярной области во время полярного дня (когда Солнце светит круглосуточно) больше нагрева в тропиках (где ночь ежесуточно сменяет день) в тот же период.

Одновременно, озон, как парниковый газ, интенсивно поглощает инфракрасную (тепловую) радиацию. Его полоса поглощения приходится на середину «окна прозрачности» ($\lambda = 9,6$ мкм, см. рис. 13 на с. 83), и потому вклад данного газа в общий радиационный эффект, а следовательно, в вертикальное распределение температуры и циркуляцию атмосферы, весьма значителен. Безусловно, столь пристальным вниманием к себе озон обязан, главным образом, своей способности защищать биосферу Земли от жесткого ультрафиолетового излучения и в меньшей степени тем, что является парниковым газом. И все же «по совокупности достоинств», он заслуживает подробного рассказа на этих страницах.

Была и еще одна, пожалуй, самая важная причина для беспокойства за сохранность озонового слоя. Подобно тому, как, например, избыточное потребление кальция приводит к постепенному накоплению его в организме человека, повышенные дозы ультрафиолетовой радиации могут иметь отдаленные по времени последствия для организма человека. Таким образом, истощение озонового слоя может сказаться спустя годы и десятилетия. Чем не бомба замедленного действия?

Но если ущерб, причиненный обычной бомбой, очевиден сразу же, то в нашем случае закрадывается сомнение, действительно ли случившееся уходит корнями в далекое (или не очень) прошлое или такая связь — плод чьего-то корыстного расчета и масштабной рекламы. Вспоминается любопытный эпизод, произошедший в середине 1990-х. Одному из авторов этой книги довелось дать интервью, посвященное озоновой проблеме, весьма толковому журналисту. После того как все вопросы были заданы и ответы на них получены, он, повинувшись извечной журналистской тяге к сенсациям, с надеждой

в глазах спросил: «А не известен ли какой-нибудь случай, когда компания отправилась на пикник полакомиться шашлычками, но в тот день дефицит озона привел к резкому росту ультрафиолетовой радиации, и от полученной дозы кто-то через день-два скончался?» Надежда угасла вместе с моим отрицательным ответом.

Воздадим должное «акулам пера»: ведь именно их публикации сподвигли политиков, вряд ли читающих «в свободное от работы время» научные труды, на активные действия. Была поставлена задача: как можно быстрее выявить причины возникновения озонной дыры и оценить вероятность распространения этого феномена на другие, особенно густонаселенные, регионы земного шара. На ее решение были выделены значительные средства, и сегодня уже можно с уверенностью констатировать, что вложения эти оправдались.

Наступление велось по всем фронтам. Перво-наперво был налажен бесперебойный мониторинг в самой Антарктиде, охватывавший не только озон, но и другие газы и аэрозоли, участвующие в его химических превращениях, а также метеорологические величины (температуру, скорость ветра, давление и др.). Одновременно были разработаны и осуществлены международные программы, направленные на проведение аналогичных комплексных измерений в течение определенных периодов (обычно от нескольких дней до месяца) в различных уголках Земли. Далее были созданы лаборатории, определявшие и уточнявшие скорости протекания атмосферных химических реакций (до той поры погрешности значений таких скоростей составляли 30–300%).

Как грибы после дождя, множились группы теоретиков, анализировавших поступающую информацию и, как правило, с помощью ими же разработанных моделей пытавшихся вы-

делить главные механизмы образования и разрушения озона и предсказать его эволюцию в будущем. Было организовано большое число рабочих совещаний и крупных международных конференций для оперативного обмена информацией, результатами исследований и, что важнее всего, возникающими идеями. Такая широкомасштабная «мозговая атака» вскоре принесла успех. Загадка «озоновых дыр» была решена (подробнее об этом чуть позже): главными виновниками оказались вышеупомянутые ХФУ. На этом основании вскоре (в 1987 г.) был принят *Монреальский протокол* (позже несколько раз уточнявшийся), регламентирующий производство, применение и использование озonoопасных химикатов. Он предписывал поэтапное сокращение их применения с последующей заменой таких химикатов более «дружественными» к озону.

Для включения в список «врагов» озона, подпадающих под действие Монреальского протокола, или исключения из него, требовалось соразмерить степень «агрессивности» того или иного вещества по отношению к озону. С этой целью Д. Уэбблс из Ливерморской национальной лаборатории (США) предложил ввести два вычисляемых по некоторым предписанным правилам индекса. Первый из них, *озоноразрушающий потенциал*, показывал, во сколько раз молекула такого вещества сильнее (или слабее), чем молекула CFCl_3 (фреона-11), воздействует на атмосферный озон. Фреон-11 — один из самых широкоиспользуемых в то время ХФУ — подлежал первоочередному запрещению и замене менее озonoопасными веществами, а потому его озоноразрушающий потенциал был принят равным 1. Подавляющее большинство ХФУ первого поколения, как и многие пришедшие им на смену, являются одновременно парниковыми газами. Поэтому каждый из них

характеризовался также вторым индексом — *потенциалом глобального потепления*, который позволял сравнить вклады в разогрев атмосферы одной молекулы такого химиката и молекулы CO_2 . Как и в случае с фреоном-11, потенциал углекислого газа считается равным 1.

Теперь пора уведомить читателя, каков он, атмосферный озон.



Озон — газ, состоящий из трех атомов кислорода. Его концентрация в атмосферном воздухе сильно меняется с высотой. Но даже в слое 20–30 км над уровнем моря, где концентрация озона максимальна, на миллион молекул воздуха приходится лишь *несколько* молекул озона. В разных широтных зонах Земли слой озонового максимума располагается на разных уровнях: в полярных районах — на высоте около 20 км, в тропиках — 25–26 км, а в умеренных широтах — между этими уровнями.

Здесь нелишне уточнить, какой смысл вкладывается в понятие «озоновый слой». Употребляя термин «слой», мы обычно подразумеваем часть пространства, заполненную однородным или кажущимся однородным веществом (например, слой снега в поле или на крыше). Однако нигде в атмосфере нет области, содержимое которой составляли бы только молекулы озона! Поэтому озоновый слой правильнее сравнить с золотиносным песком в реке, где среди мириад простых песчинок изредка попадаются золотые крупцы.

Ниже слоя озонового максимума концентрация озона растёт с высотой, но при этом она в 10–100 раз меньше своего максимального значения в стратосфере. Вблизи поверх-

ности Земли характерная концентрация озона составляет всего лишь несколько десятков молекул на *миллиард* молекул воздуха. Таким образом, на тропосферу приходится лишь 10–15% общего количества молекул озона, а основная их часть сосредоточена в стратосфере. На рис. 22 показаны типичные вертикальные профили концентрации озона для разных широт.

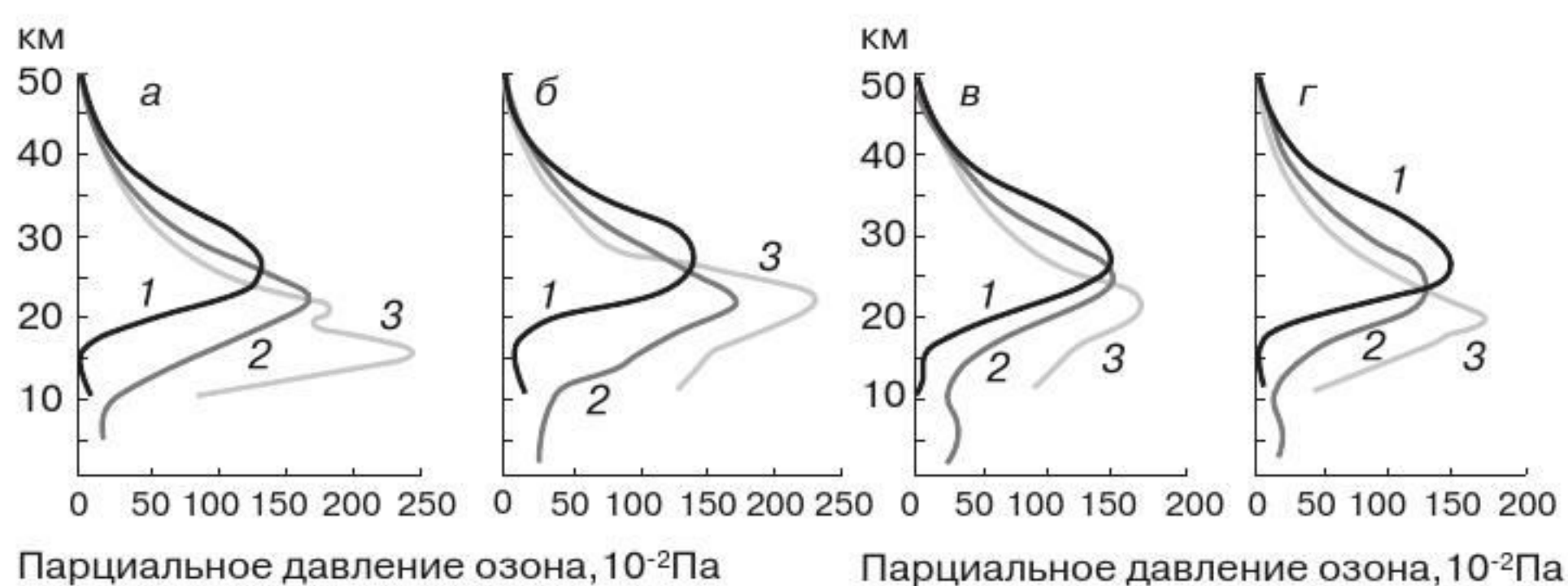


Рис. 22. Среднее вертикальное распределение парциального давления озона в различных районах земного шара:

а — январь, б — апрель, в — июль, г — октябрь: 1 — тропики (Бальбоа, Панама, 9° с. ш.); 2 — умеренные широты (Хозенейссенберг, Германия, 48° с. ш.); 3 — Арктика (Туле, Гренландия, 76,5° с. ш.)

Распределение озона по географическим зонам земного шара также очень неравномерно (рис. 12 цв. вклейки). Для того чтобы сопоставить количество озона в воздухе над разными регионами, обычно используют понятие *общее содержание озона (ОСО)* — суммарное количество молекул озона в атмосферном столбе с площадью основания 1 см², а в качестве единицы измерения ОСО — единицу Добсона (1 е.Д. = $2,7 \cdot 10^{16}$ молекул озона/см²). Наибольшее ОСО приходится на северную полярную и южную субполярную зоны, а в экваториальной зоне оно наименьшее. Характерные до 1980-х (т. е. до открытия «озоновых дыр») значения ОСО составляли 300–450 е.Д. для северной полярной области, 280–400 е.Д. для южной

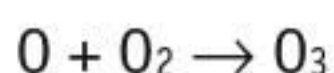
субполярной области и умеренных северных широт и 260–280 е.Д. в экваториальной зоне.



Повсюду вне тропиков ОСО сильно изменяется от сезона к сезону: наибольшие его значения приходятся на конец весны — начало лета, а наименьшие — на осенне-зимний период, причем амплитуда сезонных колебаний составляет 30–40%. Неравномерность распределения озона наблюдается и внутри пояса умеренных широт: область повышенного ОСО располагается над Восточной Сибирью и Дальним Востоком, а пониженного — над Северо-Западом.

Чем же вызваны столь значительные перепады величин ОСО?

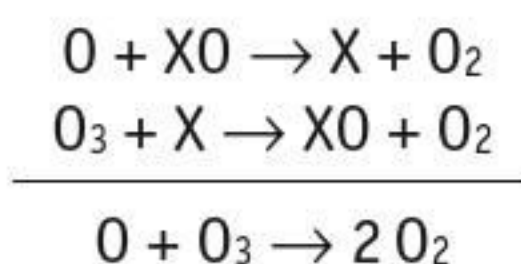
Для ответа обратимся к особенностям формирования озонового слоя. Механизм образования озона довольно прост (рис. 13 цв. вклейки). Молекула кислорода O_2 разрушается под действием солнечного света (ультрафиолетовой радиации), в результате чего появляется пара атомов кислорода. Эти атомы вступают в реакцию с молекулами кислорода, в результате чего и образуется озон:



Продуктивность механизма образования озона определяется двумя факторами — наличием солнечного света (т. е. формирование озона всегда происходит в светлую часть суток) и количеством свободных *атомов* кислорода, благо *молекул* O_2 в атмосфере предостаточно. Локальный источник атомарного кислорода в атмосфере возникает также во время гроз, когда молекулы O_2 разрушаются при электрических раз-

рядах. Эффективность обоих этих источников максимальна в тропиках и минимальна у полюсов. Поэтому и основная масса озона образуется в экваториальной зоне, распространяясь затем атмосферными движениями к полюсам.

Озон разрушается в результате его фотолиза (разложения под действием фотонов света) ультрафиолетовым и видимым излучением, а также в реакции с атомарным кислородом. Однако основной вклад вносят катализаторы — гидроксил $\text{OH}^\cdot$, монооксид азота NO , атомы хлора (Cl) и брома (Br), металлы и др. Схема гибели озона в каталитических циклах тоже проста (вместо X можно подставить любой из перечисленных катализаторов):



Нетрудно видеть (см. строку под чертой), что в результате действия пары каталитических реакций разрушаются только молекулы озона, в то время как катализатор изменениям не подвержен и может продолжать свое «черное дело» до тех пор, пока не будет разрушен или связан в какой-либо другой реакции.



Так, один атом хлора может поспособствовать гибели до ста тысяч молекул озона.

Во второй половине XX века концентрации газов-катализаторов росли вследствие усиления их антропогенных источников, а концентрация O_2 , а с ней и атомов кислорода, оставалась неизменной. Следовательно, в *стратосфере* складывалась ситуация, когда скорость *образования* озона оставалась почти неизменной, в то время как интенсивность *разрушения* озона увеличивалась год от года, приводя к его истощению.

Фотохимия *тропосферы* более сложна, она критически зависит от количества находящихся в ней оксидов азота. Оценки свидетельствуют, а измерения подтверждают, что в загрязненной тропосфере хорошо освещаемых Солнцем географических областей процессы образования озона превалируют над процессами его разрушения, и концентрация озона постоянно увеличивается. На первый взгляд рост содержания озона заслуживает положительной оценки, так как при этом увеличивается ОСО, а значит, потенциальный риск пострадать от опасной ультрафиолетовой радиации сокращается. Но это лишь на первый взгляд...



Озон — чрезвычайно ядовитый газ. Для иллюстрации следующий факт: в Германии предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе принята равной ПДК хлора, успешно использовавшегося в годы Первой мировой войны в качестве боевого отравляющего вещества.

В нашей стране также введены ПДК озона в воздухе (Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. СПб., 1998), согласно которым максимальная разовая ПДК не должна превышать $0,16 \text{ мг/м}^3$, а среднесуточная — $0,03 \text{ мг/м}^3$.



Кроме того, озон является сильным окислителем. Его молекула, распадаясь при контакте с объектами живой и неживой природы, выделяет атом кислорода, окисляющий гораздо активнее, чем молекула кислорода, вещества клеток живых организмов и неорганические материалы.

В условиях крупных промышленных центров и регионов, атмосфера над которыми буквально насыщена тысячами органических и неорганических газов-загрязнителей, создаются благоприятные условия для образования озона (классический пример: смог в присутствии высокой влажности — лондонский и при ее отсутствии — лос-анджелесский). Именно там, по сравнению с сельской или неосвоенной человеком местностью, химическое воздействие озона на материалы — самое интенсивное, особенно в сочетании с другими окислителями. Так, коррозия металлов и строительных материалов происходит сильнее при совместном действии озона и сернистого газа во влажном воздухе. Отмечено прямое воздействие озона на органические материалы: ткани, пластмассы, резину, краски, особенно масляные (список можно продолжать).

Увеличение концентрации озона в тропосфере отражается и на региональном климате, неслучайно в Четвертом Докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата эффекты стратосферного и тропосферного озона обсуждаются отдельно (см. таблицу 4 на с. 148).

Отметим еще одну важную особенность: так как озон не поступает в атмосферу извне, его общая масса полностью зависит от химических процессов в атмосфере. Масса, но не распределение озона в пространстве, определяемое главным образом циркуляцией атмосферы. Убедиться в справедливости последнего утверждения легко: вблизи полюсов озон не производится в течение продолжительного времени — длящейся почти полгода полярной ночи. Этого времени с лихвой достаточно, чтобы весь произведенный ранее, при свете полярного дня, озон был разрушен в химических реакциях, и, следовательно, к моменту окончания ночи в полярных областях концентрация озона должна равняться нулю. Однако

регулярно проводимые наблюдения не подтверждают этого. Причина такого расхождения теории с реальностью кроется в существовании постоянного атмосферного воздухообмена от экватора к полюсам и обратно, называемого *меридиональной циркуляцией*. Поэтому богатые озоном тропические стратосферные воздушные массы перемещаются к полюсам и в значительной степени компенсируют там «ночной» дефицит озона. Динамическими процессами, на сей раз меньшего — регионального — масштаба, объясняется и разница в ОСО над российскими Дальним Востоком и Северо-Западом.

Таковы основные механизмы формирования озонового слоя Земли. «А как же «озоновые дыры»?» — напомним нам внимательный читатель. Действительно, пора к ним вернуться.

Антарктическая «озоновая дыра» возникает ежегодно в момент окончания полярной ночи и остается на весь весенний период. Долгое время весеннее падение ОСО усиливалось от года к году, «озоновая дыра» охватывала все большую площадь. В настоящее время антарктическая «озоновая дыра» появляется примерно в одно и то же весеннее время и занимает приблизительно одинаковую площадь, не проявляя пока тенденций к ее сокращению, хотя, согласно модельным оценкам, оно должно произойти во второй половине XXI в. (рис. 23 и рис. 14 цв. вклейки).

На сегодняшний день механизм формирования и эволюции «озоновой дыры» в основных деталях установлен. Он достаточно сложен, и потому не может быть подробно изложен в данной книге. Базируется этот механизм на следующих физико-химических процессах, происходящих в антарктической атмосфере.

1. В конце зимы — начале весны над Антарктикой возникает ситуация, когда воздушные массы перемещаются по кругу

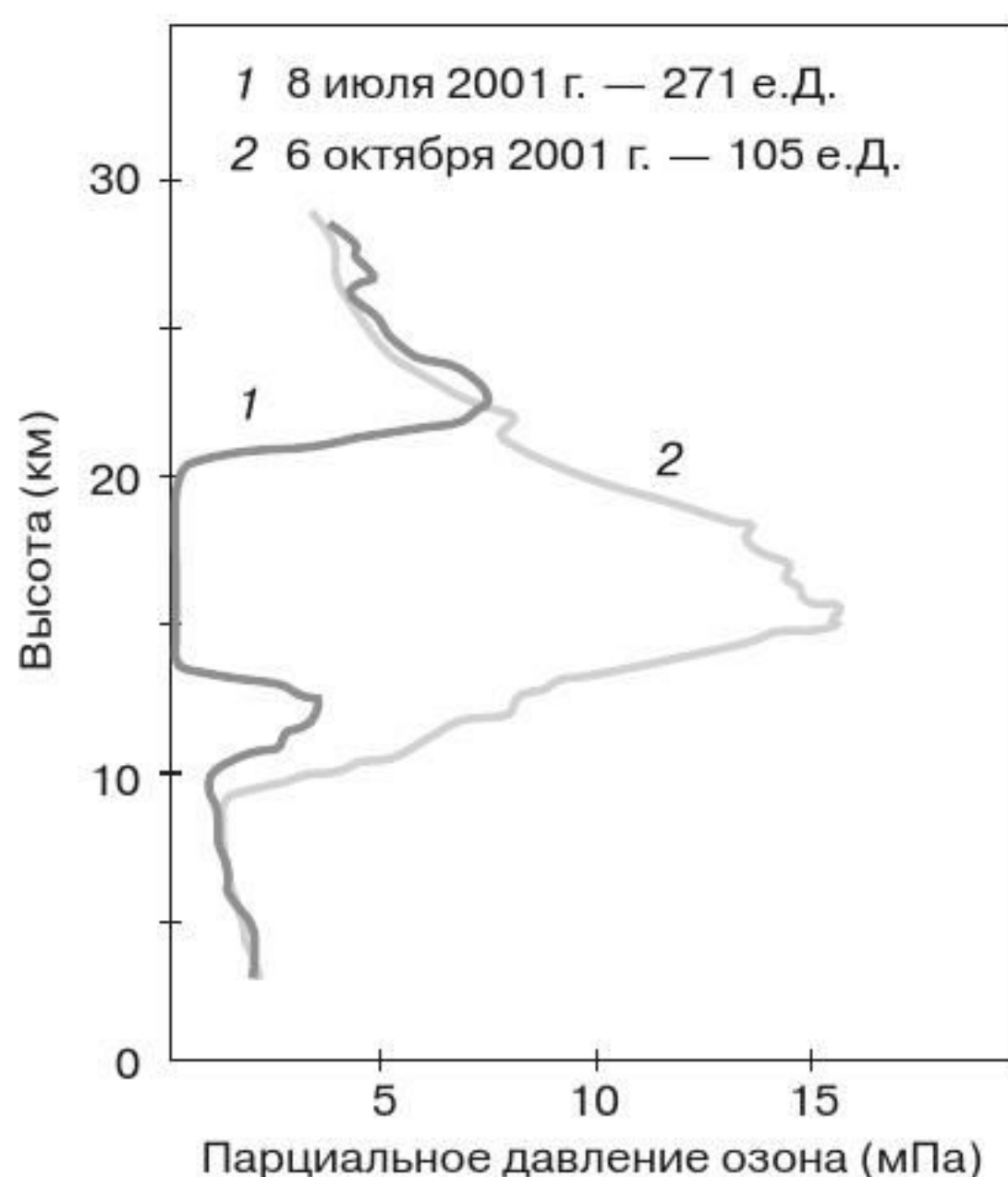


Рис. 23. В октябре 2001 г. общая толщина озонового слоя над Антарктидой сократилась до 105 е.Д. (при нормальных значениях на уровне 450–500), при этом именно в слое озонового максимума его практически не было обнаружено

60–70° ю. ш. столь интенсивно, что блокируется воздухообмен вдоль меридиана (явление *циркумполярного вихря*). А так как основная масса озона поступает в полярные области из тропиков в результате меридионального переноса, то в течение августа — ноября в антарктическую атмосферу озон извне практически не поступает. Кроме того, в течение полярной ночи отсутствует местный фотохимический источник озона, в начале же весны он еще очень мал. Таким образом, запас озона над Антарктикой в течение нескольких месяцев не пополняется. Однако эта особенность атмосферной циркуляции существовала и до обнаружения «озоновых дыр», и значит только ею нельзя объяснить весеннего дефицита ОСО.

2. Озон разрушается в химических реакциях с участием хлора. Интенсивность этого процесса росла из года в год по мере того, как в стратосфере увеличивалось содержание хлора

и его соединений, образующихся из ХФУ (с начала 1970-х до конца 1980-х гг. оно выросло в 6–8 раз). Но модельные расчеты показали, что и это явление не может полностью объяснить наблюдаемого быстрого и сильного падения концентрации озона.

3. Антарктида является уникальным естественным холодильником на Земле. В отсутствие солнечного нагрева в конце зимы низкие температуры (порядка $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$) приводят к образованию в сильно охлажденной нижней стратосфере особого вида полярных облаков. На поверхности кристаллов, из которых состоят эти облака, протекают так называемые гетерогенные реакции, усиливающие в конечном итоге разрушение озона.

Совокупностью перечисленных причин и обусловлено почти полное исчезновение озона над Антарктикой.

На другом конце Земли — в Арктике — «озоновая дыра» была отмечена несколько позже, в начале 1990-х, ее размеры и глубина значительно меньше, чем в Антарктиде. И это не удивительно, если учесть, что температура стратосферы здесь, как правило, существенно выше антарктической, а потому полярные стратосферные облака появляются лишь на короткие промежутки времени, а циркумполярный вихрь не настолько силен, чтобы полностью прервать перенос озона к полюсу из южных широт. Когда же в Арктике устанавливается очень холодная погода, дефицит озона над ней и севером Атлантики и Европы увеличивается, так было, например, в марте 1997 г., когда он достигал в отдельные дни 46% (для сравнения: дефицит ОСО в предыдущие годы составлял около 10%). Аналогичная ситуация имела место и в марте 2011 г.

Однако необходимо констатировать, что превентивные ограничения по использованию ХФУ (согласно Монреальскому протоколу) начинают сказываться. Как показали измерения,

с начала ХХІ века содержание соединений хлора в атмосфере стабилизировалось и наметилась тенденция к их пока небольшому снижению. Процесс этот не быстрый, поскольку некоторые из ХФУ являются «долгожителями» (например, фреоны -11 и -12 «живут» в атмосфере около 60 и 120 лет соответственно), и эффект пребывания ХФУ в атмосфере будет проявляться еще в течение нескольких десятилетий. Говорить о каком-либо заметном увеличении содержания озона пока преждевременно, хотя измерения уже показывают незначительный (около 1,5%) рост ОСО в глобальном масштабе.



Восстановление озонового слоя до его «додырочного» уровня произойдет, согласно модельным оценкам, где-то в середине столетия.

Итак, подведем итоги. Открытие «озоновой дыры» породило сенсацию — не дутую, но вполне реальную. К чести деятельной части мирового сообщества, общая опасность в данном конкретном случае послужила международной консолидации. Благодаря совместным усилиям, за короткое время был осуществлен настоящий прорыв в изучении самых разных аспектов проблемы озонового слоя. Своевременное принятие озоноохранных соглашений, похоже, начинает давать желаемый эффект. Обратите ли вы внимание, что в последние годы публикации об озоне в обычных, неспециализированных СМИ встречаются все реже. Это верный признак того, что *озоносфера*¹ «выздоровливает». А раз так: сенсация сделала свое дело — сенсация может уходить.

¹ *Озоносфера* — часть атмосферы на высоте 10–50 км, в которой в значительном количестве присутствует озон.

Рядовые парникового фронта: оксид азота(I), фреоны и другие

Для каждой малости есть свое место
и время.

С. Мурасаки

Малые птички вьют малые гнезда.

Пословица

Итак, мы познакомились с «тре-
мя китами», на которых более чем на 85% зиждется феномен
усиления парникового эффекта в XX столетии, — углекислым
газом, метаном и озоном. Среди остальных отметим вклады
в это усиление, вносимые оксидом азота(I) и солидной груп-
пой ХФУ, — меньшие, но соизмеримые и примерно равные
вкладу озона.

Главными источниками оксида азота(I), как и метана, яв-
ляются разнообразные бактерии, способные в анаэробных
условиях (без кислорода) вырабатывать N_2O , используя ионы
 NH_4^+ и NO_3^- . Другим важным источником оксида азота(I)
является Мировой океан, он содержит примерно столько же
 N_2O , сколько и атмосфера. Поток N_2O в атмосферу из почвы
и океана оценивается (с большой погрешностью) как 70 и 30%
соответственно и составляет 4,2–12,9 Мт/год. Человек также
не является сторонним наблюдателем в этом процессе: его
лепта составляет 2,1–6,3 Мт/год оксида азота(I) (т. е. около
трети). Она складывается из N_2O , образующегося в результате
использования сельскохозяйственных удобрений, обработки
почвы, сжигания топлива и биомассы, при производстве кис-
лот и нейлона в химической промышленности. Кроме того, N_2O
выделяется в ходе ирригации и из сточных вод. О совсем
новых источниках оксида азота(I) сообщает уже знакомый
нам нобелевский лауреат П. Крутцен:



приблизительно 3% от глобального источника N_2O составляет его поток с поверхности бассейнов рыбопроизводных заводов, широко распространенных в Западной Европе и Юго-Восточной Азии; еще около 0,1 Мт N_2O /год попадает в атмосферу в результате таяния вечной мерзлоты — маленький, но весьма «перспективный» в свете глобального потепления источник.

В тропосфере N_2O образуется и разрушается в реакциях с одним и тем же реагентом — возбужденным атомарным кислородом $O(^1D)$. В стратосфере же он разрушается под действием света; интенсивность этого процесса оценивается примерно в 12 Мт/год (с разбросом 9–17 Мт/год). Концентрация оксида азота(I) в атмосфере неуклонно возрастает с начала индустриального периода: если в середине XX в. она составляла 265 ppb, то к концу первого десятилетия XXI в. ее величина достигла 324 ppb.



В настоящее время, из-за отсутствия ограничений на использование N_2O , оксид азота(I) стал основным озоноразрушающим газом, сменив в этой малоизвестной роли ограниченные Монреальским протоколом ХФУ.

Многочисленные ХФУ использовались и используются в качестве хладагентов в холодильных установках (ХФУ-11, -12, -115, -22, -123, -125, -134a), распылителей в аэрозольных упаковках (ХФУ-11, -12, -22, -124, -134a), пенообразователей (ХФУ-11, -12, -114, -22, -123, -124, -141b, -142b, -152a), растворителей (ХФУ-113, -123, -141b, -142b). Особая роль у бромсо-

держащих химикатов (галоны-1211 и -1301) — они были до последнего времени незаменимы при тушении пожаров.

Чтобы получить представление о «парниковой активности» вышеперечисленных газов, приведем фрагменты таблицы значений потенциала глобального потепления (о нем упоминалось ранее).

Таблица 2. Потенциалы глобального потепления (ПГП) некоторых газов, присутствующих в воздухе
(Источник: Отчет 2007 г. Межправительственной группы экспертов по изменению климата)

Газ	Химическая формула	«Время жизни» в атмосфере (лет)	Период времени		
			20 лет	100 лет	500 лет
Метан	CH ₄	~11	67	23	6,9
Оксид азота (I)	N ₂ O	114	291	298	153
Фреон-11	CFCCl ₃	45	6700	4750	1620
Фреон-12	CF ₂ Cl ₂	100	11 000	10 800	5200
Фреон-113	CCl ₂ FCClF ₂	85	6540	6130	2700
Фреон-114	CClF ₂ CClF ₂	300	8040	10 000	8700
Фреон-115	CClF ₂ CF ₃	1700	5310	7370	10 000
Фреон-22	CHClF ₂	12	5200	1800	550
Галон-1301	CBrF ₃	65	8480	7140	2760
Галон-1211	CBrClF ₂	16	4750	1890	575
Гексафторид серы	SF ₆	3200	16 300	22 800	32 600
Фреон-14	CF ₄	50 000	5210	7390	11 200

Каждому газу соответствуют три значения потенциала глобального потепления для разных периодов времени. Это связано с тем, что газы имеют неодинаковое «время жизни», например для CO₂ и N₂O оно составляет ~100 и 114 лет, для

метана — в среднем около 11 лет, а для фреона-22 — 12 лет. Понятно, что за 20 лет молекулы метана, а также фреона-22 полностью выработают свой «ресурс», в то время как молекулы CO_2 и N_2O продолжают «развивать успех» и в последующие 80–90 лет. Таким образом, количества поглощенной, к примеру молекулой CO_2 , длинноволновой радиации за 20 и 100 лет будут заметно различаться. Поэтому, чтобы оценить вклады разных молекул в кратко-, средне- и долгосрочной перспективе, принято рассматривать значения потенциала глобального потепления, соответствующие периодам в 20, 100 и 500 лет.



Как видно из таблицы 2, потенциалы глобального потепления рукотворных ХФУ в сотни, тысячи, а иногда и десятки тысяч раз превосходят потенциал «эталонного» CO_2 . Тем не менее суммарный их вклад в усиление парникового эффекта значительно уступает вкладу углекислого газа. Объяснение этому то же, что и в случае с метаном: менее «вредных» молекул CO_2 в атмосфере в миллионы и миллиарды раз больше, чем молекул ХФУ. Если вспомнить о том, что ежегодный прирост производства, а значит в конечном итоге и выбросов отдельных ХФУ, достигал 10–15%, и концентрация ХФУ в атмосфере удваивалась каждые 6–8 лет, то настигнуть лидера во вполне обозримом будущем им помешали только ограничения Монреальского протокола.

И еще несколько слов о двух атмосферных долгожителях. Первый из них *гексафторид серы* SF_6 («электрический газ»), широко используемый в качестве изолятора и теплоносителя

в высоковольтной электронике, в электронной и металлургической промышленности, а также в качестве хладагента. Второй — *тетрафторметан* CF_4 (фреон -14) тоже применяется в микроэлектронике и иногда как низкотемпературный хладагент. Из-за химической пассивности оба имеют очень большое «время жизни», и при наличии высоких значений ПГП (см. табл. 2) в течение всего «времени жизни» (т. е. 3200 и 50 000 лет для SF_6 и CF_4 , соответственно) будут способствовать глобальному потеплению.

Джонатан Свифт однажды заметил: «Причина великих событий, как и источники великих рек, часто бывает очень мала». Казалось бы, небольшое (в сравнении с мощностью природных стихий) усиление парникового эффекта, вызванное хозяйственной деятельностью человека, тем не менее ощутимо сказывается на климате нашей планеты.

Однако пора обсудить как «распоряжается» климатическая система поступающей от Солнца радиацией.

ЧТО ИМЕЕМ, НЕ ХРАНИМ: АЛЬБЕДО

Отражается небо в лесу, как в воде...

В. С. Высоцкий

Солнце нам не в чем упрекнуть: оно регулярно, без перекуров и реплик типа «подождете, вас много, а я одно!», доставляет к верхней границе атмосферы в течение суток в среднем 343 Вт/м^2 энергии. Далее атмосфера и облака (в лучших традициях посредников) «отщипывают» свою долю за транзит. Но бережно ли сохраняется то, что все-таки дошло до «адресата» — поверхности Земли? Конечно, нет. Часть энергии, совершившей неблизкое путешествие от Солнца до Земли (149,6 миллионов километров),

сразу же получает от ворот поворот в соответствии с законами физики: чем светлее поверхность, тем лучше она отражает падающий на нее свет. Для того чтобы численно охарактеризовать это явление используют соотношение отраженной и пришедшей солнечной радиации, называемое *альбедо* (от латинского *albedo* — «белизна»). Очевидно, что оно всегда меньше 100%.

Альбедо характеризует отражательную способность поверхности любых объектов, с которыми взаимодействует излучение: суши и океана, облаков из капель и ледяных кристаллов, аэрозолей, часто состоящих из твердого ядра во влажной оболочке и пр. Для разных видов излучения альбедо неодинаково: одна и та же поверхность может, например, отражать коротковолновое излучение, но поглощать и излучать длинноволновое.



Зависит альбедо от разновидности грунта, типа и плотности растительности, вида покрытия улиц и мостовых в городах и пр.

Таблица с перечислением величин альбедо для различных типов поверхности занимает в специальных справочниках несколько страниц убористым шрифтом. Не желая обременять читателя излишними подробностями, приведем лишь ее фрагменты, позволяющие судить о пределах изменения альбедо земной поверхности.

Альбедо водной поверхности для прямой радиации зависит от того, под каким углом на нее падают солнечные лучи. Вертикальные лучи проникают в воду глубоко, и она усваивает их тепло. Наклонные лучи отражаются от воды, как от зеркала, и ее не нагревают. Поэтому альбедо водной поверхности при высоте Солнца 90° равно 2%, при высоте Солнца 20° — 78%.

Таблица 3. Альbedo (А) некоторых естественных поверхностей

Характеристика поверхности	А, %
Песок, ровная сухая поверхность коричневого цвета	19
Песок белый сухой	34–40
Глина синяя сухая	23
Глина синяя влажная	16
Темно-серая лесная почва	17
Торфяные темно-бурые поля	9
Каменистая сухая почва	12–14
Сочная густая зеленая трава	21–25
Высохшая трава	16–19
Клевер в период цветения	28
Рожь, пшеница, ячмень (цвет поверхности темно-золотистый)	22–25
Картофель	18–26
Болота плоские сфагновые	15–18
Болота лесные	12–16
Снег сухой свежавыпавший	85–90
Снег плотный сухой чистый	70–80
Снег мокрый пористый светло-серого цвета	40–45
Снег, пропитанный водой (цвет снега серый)	30
Речной лед голубовато-зеленого цвета	25–40
Морской лед молочно-голубого цвета	35
Еловые среднетаежные леса (цвет поверхности леса темно-зеленый)	12
Еловые южнетаежные леса (цвет поверхности леса темно-зеленый)	9
Сосновые среднетаежные леса, поверхность покрыта зелеными и бурыми мхами	15



Для того чтобы проиллюстрировать значимость альbedo снежного и ледяного покрова, упомянем о двух гипотетических ситуациях, рассмотренных выдающимся российским климатологом М. И. Будыко

(1920–2001). В первой из них он предположил, что вся Земля покрыта льдом и снегом и при этом отсутствует облачность. В такой ситуации, по его расчетам, температура поверхности снизилась бы на 100 °C! При реализации второй гипотетической ситуации полного отсутствия снежно-ледяного покрова в Арктике арктическая температура должна увеличиться на 40 °C!

Интересуясь количеством энергии, полученным, к примеру, пустыней с относительно однородной поверхностью, мы можем воспользоваться таблицей. Однако если необходимо оценить, сколько энергии поглощено поверхностью, например, Краснодарского края, придется прежде разбить его площадь на сектора, в каждом из которых преобладает свой тип поверхности, а затем просуммировать приток энергии по всем секторам. Несомненно, итог таких вычислений критически зависим от смены времен года, поскольку альбеда одного и того же участка Земли заметно меняется в период листопада, с появлением и сходом снежного покрова и т. д., да и приток солнечной энергии в разные сезоны неодинаков.



Между тем глобальное альбеда, а значит, и общее количество солнечной энергии, поглощаемой поверхностью земного шара, подвержены куда меньшим изменениям.

Причиной тому несколько обстоятельств. Во-первых, семь десятых поверхности Земли покрыто водой, а площадь периодически замерзающих акваторий невелика. Во-вторых, зоны, в которых «лето круглый год», или, напротив, «вечная зима»,

занимают изрядную часть суши. Ярko выраженная смена времен года имеет место только в умеренных широтах обоих полушарий (при этом вклад в изменение радиационного баланса, главным образом, вносит Северное, так как площадь суши в средних широтах Южного полушария много меньше).



Как следствие, принято считать среднегодовое глобальное альbedo земной поверхности равным 29% .

Казалось бы, такой определенности можно только порадоваться, но, увы, на каждого Мальчиша-Кибальчиша находится свой Мальчиш-Плохиш. В нашем случае эту роль исполняет облачность. Облака, встречая солнечную энергию на «подходе» к Земле, поглощают ее, отражают обратно вверх и рассеивают во всех направлениях. Оценить их альbedo очень не просто из-за обилия существующих нюансов: имеют значение плотность и химический состав облаков, их толщина и однородность, высота над уровнем Земли и влагосодержание. Добавляет трудностей и то, что облака находятся в постоянном движении как в прямом, так и в переносном (вследствие микромасштабных процессов, непрерывно меняются их структура, влагозапас и состав) смыслах. Далеко не все из перечисленного можно определить непосредственно с Земли. И снова в этой связи отметим неоценимую помощь метеоспутников, но даже они не в состоянии обеспечить сколь-нибудь полного решения этой проблемы.

Проводя аналогию со спортом, можно сравнить солнечную радиацию с бросками по хоккейным воротам, поверхность Земли — с вратарем, а облака — с защитниками. Часть бросков отражает защита, часть — вратарь. Но большинство бросков реализуются: «вратарь» парирует лишь 2–4 броска из де-

сяти. Лишь снег — «вратарь» почти «непробиваемый», «отбивающий 8–9 шайб» из каждого десятка.

Облака, особенно состоящие из жидких капель, очень интенсивно поглощают длинноволновое излучение с поверхности суши и океана и *переизлучают* его вверх и вниз. Поэтому облачные ночи всегда заметно теплее ясных: в первом случае «облачное одеяло» возвращает тепло к земле, а во втором тепло беспрепятственно уходит в космос.

При обсуждении альбедо поверхности не обойтись без упоминания еще об одном важном аспекте — *антропогенном*. Ни Солнце, ни траектории небесных тел, ни океанские глубины не подвластны человеку. Иное дело просторы поверхности родной планеты. Вырубка лесов, распашка земель, создание водохранилищ, возделывание рисовых плантаций (чеков) и т. п. — тут есть где разгуляться.



Всякий раз подобное вмешательство сопровождается изменением альбедо. Могли ли эти изменения стать «спусковым крючком» процесса глобального потепления XX века? Оценки показывают: нет, не могли. Любой эпизод, связанный с культивацией земель, имеет очень ограниченный пространственный масштаб. Он, конечно, сказывается на альбедо, а с ним и на микроклимате данной местности (и, возможно, соседних регионов), но не более того.

Значительно сложнее оценить отклик на каждый такой эпизод круговорота воды. С изменением альбедо (особенно при строительстве водохранилищ) меняется локальный режим испарения, что неизбежно сказывается на образовании облаков. Появившиеся в последние годы исследования, базирую-

щиеся на анализе спутниковых данных, показывают, что в среднем по земному шару и количество облаков, и их радиационные свойства меняются мало.



Следовательно, можно заключить, что изменения альбедо способны несколько перестроить привычное распределение притока солнечной радиации в различных географических зонах, но не отразятся на общем количестве солнечной энергии, поглощаемой системой «Земля — атмосфера».

Что же получается? Ввиду неизменности альбедо, приход энергии от Солнца к Земле остался стабильным. Но ведь на радиационный баланс системы «Земля — атмосфера» оказывают также влияние твердые и жидкие частицы, постоянно присутствующие в атмосферном воздухе...

ДВЕ СТОРОНЫ ОДНОЙ МЕДАЛИ: РОЛЬ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ФОРМИРОВАНИИ КЛИМАТА

Всякая медаль не только блестит,
но и отбрасывает тень.

У. Черчилль

Итак, список важных факторов, сказывающихся на формировании климата, еще не исчерпан. Существенное влияние на климат оказывают *атмосферные аэрозоли* — совокупность находящихся в воздухе во взвешенном состоянии твердых или жидких частиц, размер которых составляет от 0,01 до 10 мкм. Значительная их часть — это частицы, содержащие серу. Обычно они обра-

зуются во влажной атмосфере из газов, присутствующих в выбросах электростанций и металлургических заводов, сжигающих ископаемое топливо — уголь, нефть, мазут. В течение нескольких дней или недель эти аэрозоли проникают в облачные частицы и выпадают на Землю с осадками. За это время они не успевают значительно удалиться от своих источников, расположенных в промышленных и густонаселенных регионах, в основном в умеренных и высоких северных широтах. Другую часть аэрозолей составляют минеральные частицы и морские соли, попадающие в атмосферу с поверхности суши и океана.



Аэрозоли (кроме сажи) рассеивают и ослабляют потоки излучения Солнца и этим производят «антипарниковый» эффект — второй по значимости в списке климатоформирующих глобальных факторов.

Этот «антипарниковый» эффект многократно усиливается после крупных извержений вулканов. Согласно статистике, их на Земле 1343 (в том числе, подводных), время от времени они извергаются, однако мощность подавляющего большинства относительно невелика.



Правда, в Сальвадоре есть вулкан Исалько, извергающийся почти постоянно, за что получил прозвище «маяк Центральной Америки».

Крупные извержения отличаются не только большой массой выбрасываемых газов и аэрозолей, но и высотой, на которую они выбрасываются.



В то время как продукты мелких извержений остаются в тропосфере и довольно быстро ее покидают, оседая на поверхности Земли, продукты крупных извержений вулканов достигают стратосферы и задерживаются там на несколько лет, создавая «аэрозольный экран».

В состав вулканических продуктов входят, в частности, *вулканический пепел* и *газ* — диоксид серы (SO_2). Пепел отчасти поглощает коротко- и длинноволновую радиацию и способствует более интенсивному облакообразованию из-за конденсации водяных паров на поверхности мельчайших вулканических частиц, в том числе и частиц самого пепла. Диоксид серы в присутствии паров воды окисляется до серной кислоты (H_2SO_4), капельки последней образуют взвесь, которая может находиться в атмосфере очень долгое время.

«Аэрозольный экран» на время своего существования сокращает количество солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, но одновременно, с ростом концентрации парниковых газов, увеличивается и парниковый эффект. Все же действие «экрана» пересиливает конкурента, и на период его существования наблюдается некоторое снижение температуры. Увы, с разрушением «экрана» «таможня снова дает добро» усилению потока коротковолновой радиации к земной поверхности, и происходит скачок температуры.



Судить о масштабах воздействия вулканов на климат нашей планеты можно на примере филиппинского вулкана Пинатубо. Его извержение в 1991 г. — самое мощное за последние полвека — принесло атмосфере около 20 миллионов тонн диоксида серы,

а среднеглобальная температура на следующий год снизилась приблизительно на полградуса. Для сравнения: парализовавший в 2010 г. авиаперевозки над Европой исландский «триумф логопеда» Эйяфьядлайокудль «обогастил» тропосферу «лишь» 15 миллионами тонн пепла.

Тем не менее не все аэрозоли можно отнести к «борцам с глобальным потеплением». Противоположную роль играют частицы *черного углерода (сажи)* и *аэрозоли органического происхождения* (летучие органические соединения растительного происхождения, по-англ. Volatile Organic Compounds — VOC). Они не столько рассеивают, сколько поглощают солнечную радиацию, а нагреваясь, излучают к поверхности и в космос уже тепловую радиацию. Вместе с озоном в тропосфере и водяным паром в нагретом воздухе такие аэрозоли образуют короткоживущие субстанции, создающие дополнительный парниковый эффект. Появление сажевых частиц в атмосфере обусловлено работой транспорта, лесными пожарами и сжиганием органического топлива; они могут переноситься на значительные расстояния, прежде чем будут удалены из воздуха осадками.



В Арктическом секторе Евразии весной сажевые частицы образуют так называемую арктическую дымку, часто наблюдаемую на фоне низкого Солнца в отсутствие облаков. Выпадая на снег и лед, сажа заметно снижает их альбедо. Все это способствует ускорению их таяния и общему потеплению в Арктике.

Из сказанного следует, что воздействие аэрозолей на климат неодинаково. Оно зависит от их состава и местонахождения.

ния в атмосфере (в тропосфере или стратосфере) и на земной поверхности.



Но в целом это воздействие ограниченного масштаба как в пространстве, так и во времени, а потому не является решающим фактором в глобальном потеплении.

Пора подвести некоторые итоги.

«ЯБЛОКО РАЗДОРА»: ПОЛЕМИКА ВОКРУГ КЛИМАТА

Что правда по эту сторону Пиренеев — заблуждение по ту сторону.

Б. Паскаль

Доводы времени весомее доводов разума.

Т. Пейн

Итак, из всего вышесказанного вытекает, что «руководящая и направляющая» роль в глобальном потеплении XX века принадлежит самому человеку, обусловившему своей деятельностью усиление парникового эффекта (в отчете 2007 г. Межправительственной группы экспертов по изменению климата говорится, что этот факт установлен с 90%-й вероятностью). Данный вывод разделяют большинство специалистов, но далеко не все: кто-то отрицает сам факт глобального потепления, кто-то — его антропогенные корни. Дискуссии в защиту и в опровержение такой точки зрения можно посвятить отдельную книгу, но наша задача значительно скромнее: познакомить читателя с современными представлениями о климате Земли. Поэтому мы ограничимся некоторыми общими соображениями и замечаниями.

Главная причина всех разногласий, бесспорно, кроется в чрезвычайной сложности климатической системы и, как следствие, — недостаточности наших знаний о ней, особенно в области взаимодействия ее отдельных частей.

Климатология как наука строится исключительно на данных наблюдений. Даже самые длинные ряды климатических параметров (прежде всего, температуры) охватывают период в лет 150 или немногим более. Эти ряды, конечно же, слишком коротки, чтобы по ним с уверенностью судить о состоянии климата Земли за продолжительное время. В такой ситуации открываются две возможности. Либо сидеть и ждать в течение нескольких столетий, пока длина ряда станет достаточной (как говорят статистики, репрезентативной) для того, чтобы делать научно обоснованные выводы (надеясь при этом, что, несмотря на текущие изменения, климат останется «совместимым с жизнью»...). Либо, базируясь на имеющемся недостаточном материале, выдвигать гипотезы, подтверждать или опровергать их и не без ошибок и отступлений выходить на новый уровень познания, в точном соответствии с притчей о двух попавших в молоко лягушках, в которой одна, покоровшись судьбе, «опустила лапы» и пошла ко дну, а вторая отчаянно била лапками, в результате чего сбила молоко в масло и спаслась.

И сторонники, и противники глобального потепления основываются на одних и тех же рядах наблюдений. Почему? Да потому, что нет других! При этом противники глобального потепления настаивают на «ревизии» имеющихся рядов. Многократно приходилось сталкиваться с их публичным недоверием к части имеющихся данных мониторинга. Аргументация в таких случаях почти всегда одна: плохое качество измерительной аппаратуры, отсутствие должной выучки обслуживаю-

щего ее персонала, изменение условий в окрестностях метеостанций (сельскохозяйственное освоение близлежащих земель, урбанизация и пр.). Бесспорно, ошибки измерений случаются и действовавшие век и даже несколько десятилетий назад приборы уступали в точности современным. Однако отказаться от полученной с их помощью информации аналогично закрытию всех поселковых больниц на том основании, что в них нет такой, как в столице, аппаратуры и врачей уровня Л. Рошаля. И где гарантия, что через тридцать — сорок лет современные данные не будут отвергаться на том же основании? Иногда довод формулируется еще проще: «Эти данные не вызывают у меня доверия!» (помните реплику булгаковского кота Бегемота: «Мне это отделение известно! Там кому попало выдают паспорта! А я б, например, не выдал такому, как вы! Нипочем не выдал бы!»).

Столь вольное обращение с без того короткими рядами наблюдений вовсе не так безобидно, как может показаться. Легко представить, как изменится результат примера измерения скоростей ветра (см. табличку на с. 28), если выбросить замеры № 4 и № 5, посчитав их нереально высокими, или оставить лишь отрицательные значения, поскольку положительные «не вызывают доверия», и к каким взаимоисключающим выводам в этом случае мы придем!

Антропогенное воздействие, как главная причина наблюдаемого потепления, также принимается не всеми. И вот почему.

Во-первых, мощь природных стихий не сопоставима с ничтожными возможностями человечества влиять на них (упомянутое соотношение энергии, вырабатываемой человечеством за год, и приходящей от Солнца, — лишнее тому подтверждение). А раз так, трудно представить, что людские деяния стали той каплей, которая переполнила чашу «стабиль-

ного» климата, и мысли устремляются в поисках причины куда более весомой. Где взять таковую? Геологи находят ее в недрах Земли, астрономы — в космосе и т. д.

Во-вторых, наблюдаемые изменения климата — результат совместных «усилий» разнообразных и разномасштабных природных явлений, функционирования их неисчислимых положительных и отрицательных обратных связей (о существовании некоторых мы, увы, пока даже не догадываемся). Многие из них усиливают или нейтрализуют действие парникового эффекта в том или ином регионе или в тот или иной момент, но при этом доминирующий вклад в глобальное потепление остается за ним. Как следствие, нет и быть не может теории, объясняющей *абсолютно все* данные мониторинга. А потому находятся факты, необъяснимые сегодня с позиций теории антропогенного потепления климата. Это с удовольствием подмечается авторами альтернативных теорий и гипотез, хотя подобный недостаток присущ их детищам в куда большей степени. Но увлеченные идеей люди, увы, всегда субъективны.

В-третьих, существует вненаучная составляющая. Факт признания значимости антропогенного влияния на климат предполагает в качестве логического продолжения принятие адекватных контрмер. Но любые ограничения и реформы порождают массу неудобств, требуют энергичных действий и больших вложений. Куда спокойнее существовать в привычном неизменном режиме! А для этого надо подвергнуть критике основы теории, несущей угрозу тихому благополучию. Было бы желание, а исполнители найдутся. Нынешняя ситуация очень схожа с той, что предшествовала подписанию и вступлению в силу Монреальского протокола. Тогда, в свете нежелательности закрытия отлаженного производства одних ХФУ и разработки и внедрения технологий по выпуску других, была организована кампания,

ставящая под сомнение причастность ХФУ к возникновению «озоновой дыры». Сторонников «фреонной теории» тут же записали в «агенты Дюпона» («Дюпон де Немур», Du Pont de Nemours — американская химическая корпорация, обеспечивавшая своей продукцией значительную часть потребностей мировой экономики в ХФУ, оперативно перестроившаяся на выпуск «дружественных озону» ХФУ), обвинив «мировой империализм» в удушении советской холодильной промышленности и атаке на ее конкурентоспособность.



Приведенное ранее сравнение последствий истощения озонового слоя с бомбой замедленного действия в полной мере применимо и к последствиям глобального потепления. Именно отложенность «исполнения приговора» позволяет до поры до времени оппонентам антропогенной версии вальяжно защищать «суверенное право» бесконтрольного загрязнения окружающей среды (в том числе и парниковыми газами), оправдывая его неизбежной платой за цивилизацию. Однако еще Жан Жак Руссо утверждал, что «закон необходимости с ранней поры учит человека делать то, что ему не нравится, дабы предотвратить зло, которое еще больше пришлось бы ему не по вкусу».



Итак, можно заключить, что изменения климатической системы во времени и пространстве происходят при совместном действии антропогенных (т. е. возникших в результате различных аспектов человеческой деятельности) и естественных климатоформирующих факторов.

На рис. 15 цв. вклейки представлены графики изменений с широтой среднегодовых потоков излучения — солнечного, поглощенного системой «Земля — атмосфера», и длинноволнового теплового, уходящего в космос с верхней границы атмосферы, а также разность этих потоков, называемая *радиационным балансом* этой системы. Видно, что в зоне примерно 40° с. ш. — 40° ю. ш. радиационный баланс в среднем положителен, т. е. приход энергии от Солнца выше, чем ее уход с длинноволновой радиацией, а вне данной зоны среднегодовой радиационный баланс отрицателен. При этом в зонах 15° – 70° обоих полушарий радиационный баланс меняет знак с плюса летом на минус зимой, а полярные зоны выше 70° постоянно имеют отрицательный баланс.

Такая неоднородность распределения радиации порождает перенос тепла (энергии) от тропиков к полюсам (*меридиональная циркуляция*), способствующий пространственному выравниванию радиационного баланса. Этот перенос осуществляется движениями воздуха в атмосфере и воды в океанах, главным образом, — в Атлантическом и Тихом. При этом вклады атмосферы и океанов в перенос примерно одинаковы. В то же время на движущиеся массы воздуха и воды на вращающейся Земле действует сила Кориолиса, которая направляет эти массы вдоль кругов широты, образуя зональные потоки (*зональная циркуляция*) 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 (в англ. языке они имеют «говорящее» название — «торговые» (trade winds)), дующих с северо-востока на юго-запад в северном и с юго-

востока на северо-запад в южном полушариях. Действующие также в тропической зоне *муссоны*, особенно развитые над южной Азией, 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 Россби*), длина и амплитуда которых в атмосфере достигают нескольких тысяч километров, образующиеся и разрушающиеся 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 именно «географические» факторы зачастую формируют региональный и местный климат. На распределение температуры в пространстве, ее сезонные изменения и на формирование осадков 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 по склону горного хребта. Водяной пар в этой массе, поднимаясь, 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 взаимодействия всех этих естественных факторов получается наблюдаемая картина кли-

мата. Антропогенные факторы, вызывающие изменения климата, воздействуют в основном на описанный выше радиационный режим атмосферы или на режим испарения с подстилающей поверхности.

Формирующие глобальный и региональный климат множество естественных и антропогенных факторов образуют разветвленную систему их взаимодействий с петлями 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, растет доля солнечного излучения, поглощенного поверхностью; она нагревается и увеличивает температуру 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 ведут себя не одинаково при разных условиях: так, потепление нижней атмосферы, увеличение ее влагосодержания приводят к росту балла (количества) облаков. Если это плотная (слоистая) облачность, она отражает солнечную радиацию и меньшее количество ее энергии поступает на подстилающую поверхность, которая соответственно охлаждается, — имеет место отрицательная обратная связь. Однако при росте балла облаков верхнего яруса, которые пропускают солнечную радиацию почти без задержки, но хорошо поглощают и пере-

излучают вниз и вверх тепловую, длинноволновую радиацию, поток суммарного излучения к подстилающей поверхности увеличивается, она разогревается, и имеет место положительная обратная связь.

Итак, круг процессов, способных зримо повлиять на климат Земли, очерчен. Процессы эти очень разные по своей природе, масштабам и степени воздействия на климат. Чтобы каким-то образом их систематизировать, выстроив в порядке значимости, нужен универсальный критерий. Требования к такому критерию очевидны. Он должен быть способным «приводить к единому знаменателю» самые разнородные явления и процессы. В то же время отличаться простотой и наглядностью, поскольку пользоваться им предстоит не только специалистам, но и всем заинтересованным лицам: политикам, бизнесменам, экономистам, журналистам. И все это должно быть сосредоточено «в одном флаконе», то есть в одной характеристике, имеющей ясный физический смысл. За последние 20 лет на эту роль пробовался добрый десяток индексов. Ни один из них, надо признать, до конца не удовлетворяет всем вышеперечисленным условиям, хотя каждый имеет свои преимущества перед «соперниками» и бывает удобен в том или ином направлении исследований. И все же в этом конкурсе побеждает *радиационный форсинг* (от англ. *forcing* — воздействие) — чаще других цитируемый в научной периодике и, следовательно, самый популярный индекс.

Радиационный форсинг определяется как

$$\Delta F = F_{\text{возм}} - F_{\text{невозм}},$$

где F — разность потоков коротковолнового и длинноволнового излучения на уровне *тропопаузы* — границы раздела

тропосферы и стратосферы; F демонстрирует, насколько нарушен баланс между солнечной и уходящей от земной поверхности радиацией на этом уровне (*невязку*). Расчеты показывают, что F чутко реагирует на различные природные явления и катаклизмы, будь то крупные извержения вулканов или лесные пожары, усиление солнечной активности или массовый выброс в атмосферу парникового газа.

Радиационный форсинг — это разность величины F в возмущенном ($F_{\text{возм}}$) и невозмущенном ($F_{\text{невозм}}$) состояниях. Например, для случая с вулканом в качестве $F_{\text{невозм}}$ мы должны взять невязку баланса радиации в момент, предшествовавший извержению, а в качестве $F_{\text{возм}}$ — аналогичную невязку, но после того, как оно произошло. По существу радиационный форсинг представляет собой аналог частной производной в математике.

Чтобы дать представление читателю о значимости различных явлений для изменения климата, далее приведена таблица 4, в которой содержатся оценки значений радиационного форсинга, обусловленного отдельными климатоформирующими факторами, причем все они, за исключением солнечной радиации, относятся к разряду антропогенных. В последнем столбце указана суммарная оценка их совокупного действия.

Данные, представленные в таблице 4, предметно (в конкретных цифрах) подтверждают некоторые высказанные ранее положения.



А именно: превалирование углекислого газа над остальными парниковыми газами, значительный вклад атмосферных аэрозолей, а также разное по знаку влияние тропосферного и стратосферного озона на парниковый эффект.

Таблица 4. Оценки величин радиационного форсинга (Вт/м²)
 некоторых климатоформирующих факторов на 2005 г.
 (относительно «доиндустриального» периода — 1750 г.)*

Долгоживущие парниковые газы				Озон		Альbedo поверхности		Аэрозоли		Солнечная радиация	Антропогенный эффект в целом
CO ₂	CH ₄	N ₂ O	ХФУ	Стратосферный	Тропосферный	Землепользование	Сажа на снегу	Прямой эффект	Эффект альbedo облаков		
1,66	0,48	0,16	0,34	-0,05	0,35	-0,2	0,1	-0,5	-0,7	0,12	1,6

* Концентрации CO₂, CH₄, N₂O измерены (взяты) из ледовых кернов, ХФУ тогда не было (они почти все антропогенного происхождения и начали массово выпускаться в 1930-е), озон — модельный, остальное — либо косвенные, либо модельные оценки

Итак, мы уже имеем каркас здания наших знаний о явлениях и процессах, обеспечивающих современное состояние климатической системы. Здания, которому предстоят отделочные работы, а не исключено, и какая-нибудь реконструкция. Но неизменно на всех этапах, от закладки здания до «доведения его до ума», строительным материалом — «кирпичиками» — всегда являлись и будут являться многочисленные и разноплановые данные климатического мониторинга.



ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ДОМ СТРОИТСЯ ПО КИРПИЧИКУ

Мы строили, строили и наконец...

Чебурашка

ИЗМЕРЕНИЯ — ОСНОВА КЛИМАТОЛОГИИ

Климатология, как и другие связанные с ней научные дисциплины, полностью зависима 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: во-первых, чем продолжительнее ряд наблюдений, тем надежнее статистические оценки и выводы, полученные при обработке такого ряда; во-вторых, 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 как следствие, и с ростом потребности в более подробных сведениях о значениях метеорологических и климатических элементов. Сегодня поток

поступающей информации можно сравнить с бесперебойно работающим конвейером, а начиналось все так.

Первые шаги в организации мониторинга погоды в России были предприняты еще в начале XVIII столетия. В 1722 г. по указу Петра I начались систематические наблюдения за погодой на флоте (сохранились записи, сделанные самим Петром I во время его пребывания в Риге). После учреждения Петербургской академии наук эта работа была поручена ее членам. Результаты ежедневных измерений температуры воздуха в Санкт-Петербурге существуют с середины XVIII века. В это же время была создана сеть из 30–40 пунктов наблюдений в Европе, которая просуществовала до XIX века. Систематические наблюдения за погодой были особенно важны для аграрной России с ее огромной территорией и разнообразными природными условиями. Большую роль в организации магнитных и метеорологических обсерваторий на Урале и в Сибири сыграл академик А. Я. Купфер (1799–1865). На таких станциях два-три раза в сутки проводились измерения температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, количества осадков. Однако все еще не существовало научного центра, где могли бы обрабатываться результаты наблюдений за погодой в различных районах огромной империи. И он появился. В 1849 г. по указу Николая I была учреждена Главная физическая обсерватория (ныне — Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, старейшее учреждение Гидрометслужбы России) *«... для производства физических наблюдений ... и вообще для исследований России в физическом отношении»*. Любопытно, что этот документ был подписан 1 апреля (по старому стилю), что дало повод шутникам называть этот день «днем синоптика». Первым директором обсерватории стал Купфер. В соответствии с высочайшим указом, результаты измерений на станциях за несколько месяцев посылались в обсерваторию, где они проверялись и систематизировались перед последующей публикацией. Однако в первое время эти данные были весьма несовершенными: сроки наблюдений не выдерживались, среди разнокалиберных приборов не было эталонных, поэтому их проверки проводились редко. Наблюдения на станциях, как правило, вели неспециалисты — помещики, представители городской и сельской интеллигенции (учителя, врачи, фельдшеры, агрономы). Впрочем, работали они бесплатно, оплачивать же труд наблюдателей, и то частично, стали лишь в конце XIX века.

Создание полноценной сети метеорологических станций началось только в 1872 г. усилиями тогдашнего директора Главной физической

обсерватории Г. И. Вильда (1833–1902). Почти сразу заработала сеть из 73 станций. Ранее профессор Университета в Берне Вильд создал небольшую сеть станций для измерения температуры и давления воздуха в Швейцарии. Его усилиями были организованы Первый международный метеорологический конгресс в Вене в 1873 г. и Конгресс международной метеорологической организации (ММО), прошедший в 1879 г. в Риме. Вильд был избран первым президентом ММО — организации, осуществившей большую работу по стандартизации метеорологических наблюдений. ММО просуществовала до 1950 г., когда была заменена межправительственной Всемирной метеорологической организацией (ВМО, WMO). Во второй половине XIX века сеть наземных метеорологических станций заработала во всех развитых странах мира, и 1850–60 гг. считаются временем начала получения инструментальных сведений о погоде во внетропических северных широтах. А метеорологическая сеть России по охвату большой территории и качеству данных справедливо считалась одной из лучших.

Вильд был не только хорошим организатором, он лично принимал участие в создании нескольких метеорологических приборов: знаменитый «флюгер Вильда», который измерял скорость ветра по углу отклонения легкой и тяжелой пластин, подвешенных на горизонтальной оси, служил (и не только в России) вплоть до недавнего времени (рис. 17 цв. вклейки). Любопытно, что Вильд за 27 лет своего директорства и членства в Петербургской академии наук так и не освоил русский язык — большинство сотрудников обсерватории были немцы или жители Прибалтики, знавшие немецкий язык, на котором и велось делопроизводство. С властями директор общался по-французски или через своего заместителя, в этом обсерватория не была исключением среди научных учреждений Санкт-Петербурга того времени. И только после ухода Вильда в 1894 г. в обсерватории заговорили по-русски.

Таким образом, уже почти больше столетия сеть станций используется для измерения метеорологических характеристик, позднее в этих же целях стали применяться аэростаты и радиозонды, а с 1970-х гг. — и спутники, причем данные, полученные с разных спутников, достаточно плохо согласуются.

Архивы климатических элементов формируются путем сбора, систематизации, проверки (контроля) и обработки данных, полученных из вышеперечисленных источников. Эти

данные сегодня часто представляются в виде так называемых *ре-анализов*. Ре-анализ — это результат *ассимиляции* (усвоения) данных измерений какой-либо метеорологической величины, полученных в одни и те же моменты времени в местах нахождения пунктов измерений. Цель ассимиляции — создание максимально близкого к измеренному поля значений этой метеорологической величины во всех узлах регулярной *географической сетки* (т. е. узлах, отстоящих друг от друга на равное число градусов как по широте, так и по долготе). Поскольку пункты измерений (а значит, и исходные данные измерений) расположены далеко неравномерно, а в ряде регионов и вовсе отсутствуют, этот недостаток восполняют специальными расчетами с помощью трехмерных моделей общей циркуляции атмосферы. Процедура ассимиляции — комбинирование данных наблюдений с результатами модельных расчетов. В последующем полученные поля используются как в модельных исследованиях, так и в приложении к оперативным задачам сельского хозяйства, техники, строительства, транспорта, авиации и пр., чем занимается специальная наука — *прикладная климатология*.

Система приземных наблюдений на стационарных метеорологических станциях наиболее распространена и обширна. Сеть этих постоянно действующих метеорологических станций оснащена одинаковыми или почти одинаковыми приборами для измерения основных метеорологических элементов (температуры воздуха и почвы, осадков, явлений погоды, влажности воздуха, атмосферного давления, ветра) и работает по единой методике измерений.



В России на сегодняшний день насчитывается 1628 пунктов наблюдений за метеорологическими харак-

теристиками (температура, осадки, ветер, давление и т. д.). Они составляют *Государственную наблюдательную сеть*. Именно эта сеть поставляет основную часть первичной метеорологической информации, служащей основой 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. *Лучших* — это значит, что: 1) наблюдения на них ведутся достаточно давно (многие десятилетия) и эти наблюдения никогда не прерывались; 2) осуществляется полная программа наблюдений (т. е. за целым рядом метеохарактеристик, а не двумя-тремя, и много раз в сутки); 3) они расположены таким образом, что получаемые данные измерений типичны (характерны) для данной достаточно обширной окрестной территории. Наблюдения на таких станциях показательны для общей ситуации в большом районе. Реперные станции не подлежат закрытию и переносу ни при каких обстоятельствах. Большая часть российских станций (253 станции) обладает рядами наблюдений в более 50 лет, а на 44 станциях продолжительность наблюдений превышает 100 лет.

Опорная сеть — это оптимальное количество реперных станций (меньше нельзя, больше не нужно), свое для каждой местности. В результате обработки полученной на них достаточной информации появляются *климатические нормы* — выраженное в числах описание климата, характерного для данной местности (характерная температура, обычно имеющее место среднемесячное количество осадков и пр.).

Данные, полученные *глобальной сетью наблюдений за климатом*, подлежат международному обмену и размещаются в Интернете. Они используются в исследованиях глобального климата и его изменений. В глобальной сети наблюдений за климатом распределение станций по территории сравнительно равномерное, чего нельзя сказать о *всемирной метеорологической сети станций*. В последней большинство станций сосредоточено на густонаселенных территориях экономически высокоразвитых стран. В полярных, горных и океанических районах количество станций не обеспечивает возрастающие потребности метеорологической науки и практики. Поэтому существует необходимость разработки других способов получения информации из этих районов.

Кое-кто из читателей наверняка видел *метеорологические площадки* (рис. 16 цв. вклейки). В центральной ее части располагается так называемая *психрометрическая будка*, в которой на высоте двух метров находятся термометры для измерения температуры воздуха и психрометр для измерения влажности (а также самописцы — термограф и гигрограф). Над площадкой, на высоте до десяти метров, возвышается флюгер и (или) *анеморумбограф* для измерения скорости и направления ветра. Осадки собираются в ведро, защищенное от их выдувания, и измеряются *осадкомером*. Белый цилиндр, стоящий на столбике, заключает в себе самописец осадков — *плювиограф*. А на небольшом участке взрыхленной почвы в углах метеорологической площадки помещаются термометры для измерения температуры почвы.

До 1936 г. основные наблюдения проводились три раза в сутки (в 7, 13, 21 час по местному солнечному времени (времени данного часового пояса)), а в период с 1936 по 1966 г. — четыре раза в сутки (в 0, 7, 13, 19 часов). Сегодня такие на-

блюдения осуществляются восемь раз в сутки в часы, значения которых кратны трем (0, 3, 6, 9 ... часов по московскому декретному времени). Наблюдатель выходит на площадку и снимает показания термометров, фиксирует скорости и направления ветра по флюгеру; контролирует показания анеморумбографа — самописца (его показания снимаются с экрана внутри помещения метеостанции) и визуально определяет 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. Осадки измеряются реже, всего два раза в сутки.

Состояние площадки и приборов на ней, правильность наблюдений и их записи время от времени выборочно проверяются инспекторами методического отдела Главной геофизической обсерватории. Здесь же проходят проверку метеорологические приборы, а также разрабатываются методические указания (наставления гидрометеорологическим станциям и постам по производству наблюдений).

Дальнейшее совершенствование измерительной метеорологической техники идет по пути создания автоматических измерителей метеорологических элементов, объединенных в одном комплексном приборе. Такие станции уже работают во многих труднодоступных пунктах РФ без непосредственного участия человека. В развитых странах на метеостанциях и в крупных аэропортах используются автоматические приборы для измерения всего набора метеорологических элементов.

Результаты ежедневных метеорологических наблюдений на станциях кодируются и передаются во *Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных* (ВНИИГМИ — МЦД) в г. Обнинске под Москвой. Часть данных публикуется

в метеорологических ежемесячниках. Аналогичные ежемесячники и ежегодники издаются также и в других странах. В последнее время метеорологические данные мировой сети данных размещаются в Интернете.

При использовании этих материалов следует учитывать наличие различий в сроках измерений (например, где-то измерения производят один раз в три часа, а где-то ежечасно; где-то в 0, 3, 6... часов, где-то в 0, 4, 8, 12... часов местного времени, да еще с учетом сдвига времени в разных странах), единицах измерения метеоэлементов между странами. Так, атмосферное давление в одних странах измеряется в миллибарах, в других — в дюймах, температура — в градусах Цельсия или Фаренгейта и т. д. Даже долгота размещения самих станций может отсчитываться по-разному: встречаются отсчеты долготы не от Гринвича, а от Парижа и Мадрида.

В программу работ ряда метеорологических станций входят *актинометрические наблюдения* (наблюдения за лучистой энергией Солнца). В России они проводятся в настоящее время на 186 станциях. В Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова, как в Мировой центр сбора актинометрических данных, поступает информация о солнечной радиации с актинометрической сети станций всего мира.

Система аэрологических наблюдений, в задачу которой входит вертикальное зондирование атмосферы (измерения на разных высотах), включает ряд пунктов радиозондирования. 30 января 1930 г. в Павловске (под Петербургом) был запущен первый в мире радиозонд, сконструированный сотрудником Главной геофизической обсерватории П. А. Молчановым (рис. 18 цв. вклейки). Прибор достиг высоты 9 км, и его сигналы были приняты на земле. На основании аэрологических данных рассчитываются климатические характеристики на различных высотах в атмосфере, используемые в дальнейшем при анализе состояния приземного слоя воздуха и более высоких его слоев.

Аэрологическая сеть России в доперестроечный период насчитывала более 150 станций, измерения на некоторых из них производились до четырех раз в сутки. Сейчас сократилась как сама сеть, так и число проводимых суточных измерений — до одного...

Глобальная аэрологическая сеть наблюдений за климатом включает около 150 станций, сравнительно равномерно расположенных по территории Земли. В их число входит 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, главным достоинством которых являются глобальность и уникальность информации. Например, сведения о радиационных процессах на границах атмосферы могут быть получены только с помощью спутников.

В оперативной спутниковой системе наблюдений за окружающей средой используются спутники двух видов: 1) спутники, движущиеся по проходящим вблизи полюса низко расположенным (от 600 до 1500 км над Землей) орбитам; 2) геостационарные спутники, находящиеся на высоте около 36 тыс. км, вращающиеся по экваториальным орбитам. Они постоянно находятся над одним и тем же участком поверхности Земли.

Спутники первого вида над тем или иным районом находятся примерно в одно и то же время (за счет синхронизации скорости вращения спутника со скоростью вращения Земли). Размещенная на них аппаратура позволяет получать снимки достаточно большого разрешения, охватывающие на мест-

ности полосу около 1000 км; в некоторых случаях можно разглядеть даже движущуюся машину. Геостационарные спутники находятся в фиксированном положении относительно одной и той же точки на экваторе, так как на высоте их вращения орбитальная скорость спутника совпадает со скоростью вращения Земли. Эти спутники могут обеспечивать почти непрерывные наблюдения за участками земного шара, находящимися в их зоне видимости. Однако снимки с них имеют гораздо меньшее разрешение (видны только крупные особенности земной поверхности).

Со спутников ведутся телевизионные, инфракрасные, микроволновые, радарные и лазерные съемки. Они помогают получить информацию об облачности, снежном и ледяном покрове, температуре, влажности, отражательной способности почвы, компонентах радиационного баланса Земли и атмосферы, эволюции туманов, дрейфа айсбергов. Новые косвенные методы позволяют определять с помощью снимков многие производные характеристики, например осадки и ветер, вертикальное распределение температуры и влажности.

На рис. 24 изображена существовавшая в 2004 г. система метеорологических спутников Земли, состоявшая из 8 геостационарных спутников (США, России, Индии, Японии, Китая, Европейского космического агентства и полярных спутников США и России).



В РФ к настоящему времени не осталось спутниковых систем, измерения с которых можно было бы использовать для наблюдений за климатом. С этой целью работают спутники США и ЕС, но два российских геостационарных спутника готовятся к запуску.

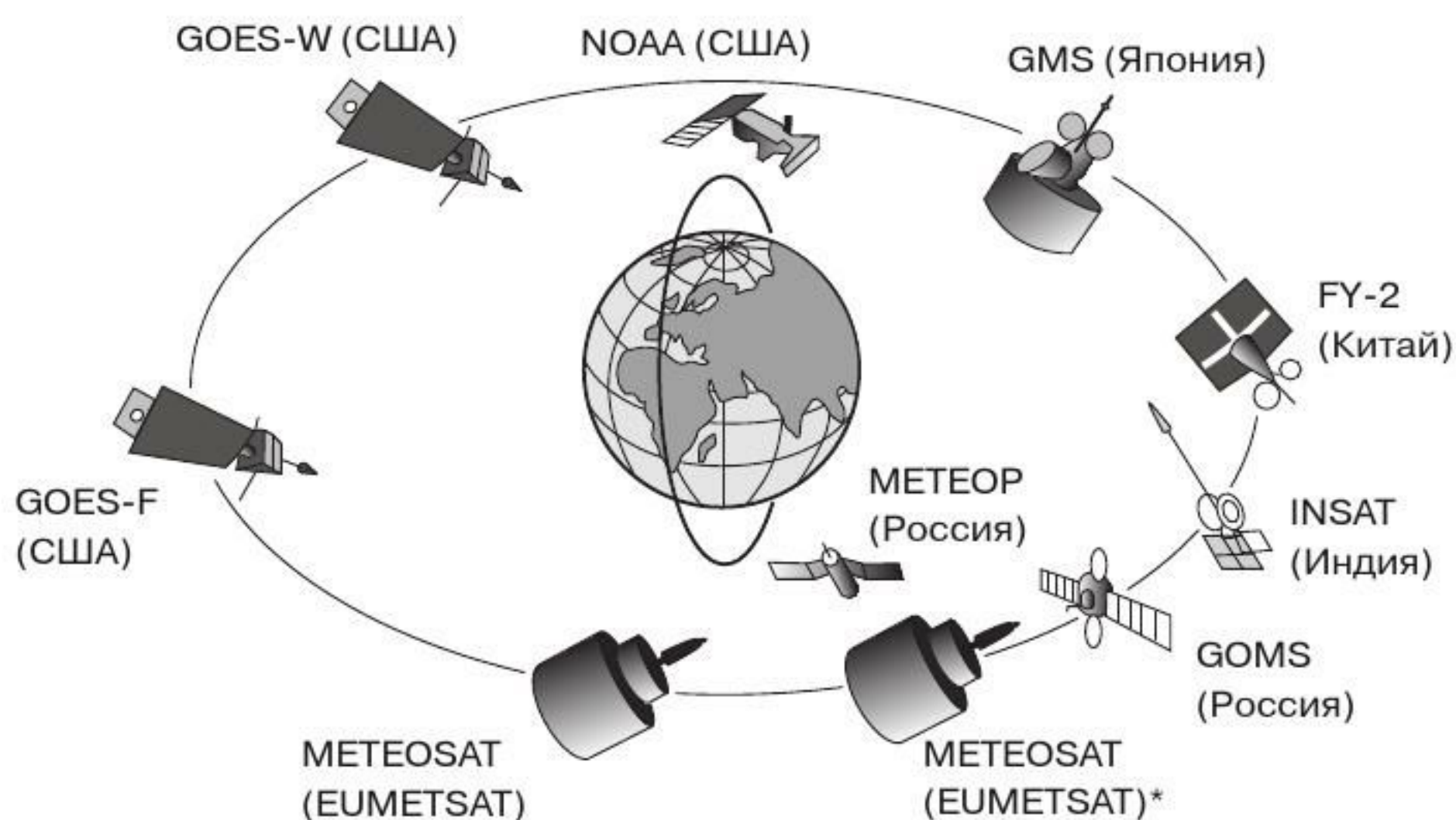


Рис. 24. Система метеорологических спутников Земли в 2004 г.

* EUMETSAT — Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников

Дополняет атмосферный мониторинг **система радиолокационных наблюдений** (наблюдений с помощью метеорологического радиолокатора), поставляющая 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. Наблюдения по полной программе проводятся 8 раз в сутки или даже чаще (при сложной метеорологической обстановке). В результате обработки и анализа первичной радиолокационной информации получают карты облачности и явлений погоды, на которых отмечаются горизонтальные размеры и вертикальная протяженность облачности, направление и скорость перемещения облачных систем, грозовые явления.

Важные сведения о состоянии нижнего слоя тропосферы поставляют также наблюдения, организуемые на различных высотных сооружениях (мачтах, вышках, башнях). Впервые

такие наблюдения были проведены в 1908 г. в Париже на Эйфелевой башне. В России одной из наиболее высоких (536 м) является Останкинская телебашня в Москве, на которой метеорологические измерения производятся на 8 уровнях высоты (от 15 до 503 м). Аналогичные наблюдения осуществляют в Обнинске (высота башни 310 м), в Хабаровске, Иркутске и Новосибирске. С помощью приборов, установленных на этих башнях, регистрируются температура, влажность воздуха, скорость и направление ветра.

В ряде стран получил распространение метод горизонтального зондирования атмосферы с помощью аэростатов (*трансзондов*), переносимых ветром на одной постоянной заданной высоте. Научная аппаратура аэростатов состоит из приборов, позволяющих измерять плотность, давление и температуру воздуха, напряженность электрического поля, содержание озона и других примесей. Важным достоинством трансзондов 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.

В дополнение к сети метеорологических и аэрологических станций, наблюдающих за атмосферой и тесно связанными с ней отдельными элементами поверхности суши и вод (осадки, температура и влажность почвы и т. д.), существуют другие науки о Земле, «ответственные» за мониторинг прочих составляющих климатической системы. В частности, изучением различных видов вод суши занимается *гидрология*. Существует сеть станций (постов), обеспечивающая гидрологические наблюдения за поверхностными (реки, каналы, озера, болота, водохранилища, оросительные системы) и подземными водами. Этой сетью руководит Государственный гидрологиче-

ский институт в Санкт-Петербурге. В настоящее время **гидрологический мониторинг** в России ведется почти на 3000 постах. Примерно 2700 из них расположены на реках, а около 300 — на озерах и водохранилищах. Реперными (опорными) являются половина этих постов, почти неизменных в последние десятилетия. В крупных гидрологических обсерваториях имеются приборы для измерения скорости испарения воды.

Метеорологические и гляциологические (ледниковые) наблюдения ведутся на полярных станциях — стационарных и подвижных (экспедиционных). Большинство из них находится в ведении Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в Санкт-Петербурге. ААНИИ ведет также исследования морей Северного Ледовитого океана с его островами и российской части побережья в Восточном полушарии. Широко известна работа станций на дрейфующих льдинах, ведущаяся в нашей стране с 1937 г. (знаменитый дрейф на станции «Северный полюс-1» четырех зимовщиков во главе с И. Д. Папаниным).

Упомянем и о наблюдениях в океане, проводимых с помощью кораблей, а также с использованием дрейфующих буев-измерителей для мониторинга состояния Мирового океана и долгосрочного прогноза погоды (международный проект ARGO, стартовавший в 2000 г.).

Для изучения климата обобщаются результаты всех видов метеорологических наблюдений. Первоначально 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 одномерные и многомерные статистические распределения у земли, в почве и на различных высотах в атмо-

сфере. Эту информацию помещают в климатические и агроклиматические справочники. Она используется для исследования климата, его изменений и проверки моделей климата. Систематические обобщения радиолокационных и спутниковых наблюдений, увы, отсутствуют, несмотря на наличие большого материала. Однако выполнен ряд научных работ по данным этих наблюдений, например построены карты облачности по миру, ледовых полей в Арктике, полей осадков и др.

Теперь о **мониторинге факторов, формирующих климат**. Наблюдения за такими факторами и их анализ приобретают сегодня особое значение, так как их состояние и изменения определяют характер и время наступления ожидаемых изменений климата атмосферы и у земной поверхности. Ранее мониторинг наиболее важных из этих 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 велись на ограниченном числе станций, их результаты редко использовались в климатических исследованиях. Время от времени проводились экспедиционные обследования материковых и горных ледников, измерения же площадей снежного покрова и морских льдов в Арктике и Антарктике начались лишь недавно.

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* ныне включает в себя станции разного «класса» — от больших обсерваторий до пунктов отбора проб приземного воздуха в специальные сосуды с последующим измерением содержания в них парниковых газов (производимым в централизованных лабораториях

и обсерваториях). На таких станциях, расположенных на разных широтах, но в основном на островах в океане и на побережьях материков, измерения производятся 2–3 раза в неделю или даже ежедневно. Их результаты часто усредняются по месячным и сезонным периодам и направляются в банки данных, а также 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 в сети наземных станций производятся с 1960–70-х гг., и уже имеются 40–50-летние ряды данных. С начала 1970-х и в 1980-е гг. начаты измерения содержания озона в *единичном столбе атмосферы* (см. *Словарь терминов*) и концентраций ряда радиационно-активных примесей почти во всей глобальной атмосфере с помощью различных дистанционных приборов, установленных на специальных спутниках. Ряды этих данных короче, чем ряды, полученные наземными станциями, обычно хуже их точность, но зато таким образом обеспечивается почти глобальный охват всей поверхности Земли, прежде всего — океанов и полярных областей.

С помощью спутников измеряются также радиационные характеристики атмосферы и подстилающей поверхности Земли, в частности альbedo, потоки коротко- и длинноволновой радиации на разных уровнях атмосферы. Особое значение имеет спутниковая информация о состоянии и изменениях таких частей климатической системы, как поверхность морей и океанов, площади морского льда, материковые и горные ледники. Ныне с помощью спутников удается осуществлять мониторинг изменения площадей и, главное, высот 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.

У читателя может возникнуть вопрос: если спутники — эдакие современные Фигаро — успевают и «здесь» и «там» собрать и передать на Землю обширную информацию о климате, причем объем этой информации лавинообразно нарастает, для чего зря растрачивать силы? Не целесообразно ли свернуть хлопотные и требующие немалых затрат программы измерений с метеозондов и самолетов, морских судов и телебашен? Да и наземные измерения сократить, оставив разве что реперные станции, раз уж так важны длинные однородные ряды наблюдений. Если спутники исправно поставляют всю необходимую информацию, то зачем дублировать ее из других источников?

Поступить таким образом было бы крайне опрометчиво. Во-первых, спутники не могут обеспечить нас абсолютно всей информацией. Как уже отмечалось, далеко не все климатические характеристики поддаются непосредственному измерению. Для их мониторинга приходится прибегать к различным уловкам, основанным на знании физических законов. А это автоматически накладывает определенные ограничения на применимость таких уловок. Например, измерения концентрации диоксида азота NO_2 (важного парникового и озonoактивного газа) производятся только при «низком» Солнце — на восходе или закате. По аналогичной причине невозможно измерить содержание озона в окрестности полюсов. Во-вторых, выход из строя спутника (а такое время от времени случается) привел бы к невозполнимой потере данных и прерыванию ряда наблюдений. Другие спутники не решают проблему замещения, поскольку, как вы помните, согласованность данных, полученных с разных спутников, далека от идеала. И, наконец, в-третьих, на спутниках существует «дрейф» приборов. Примитивный аналог такого «дрейфа» — ситуация, когда ваши часы отстают или убегают вперед. С каждым днем их показания будут все больше расходиться с истинным временем. Но если для исправления показаний часов достаточно немного передвинуть стрелки, «передвинуть стрелки» на спутниковом приборе возможно разве что в фантастических романах. С другой стороны, спутник — слишком дорогая «игрушка», чтобы забыть о ее существовании при выявлении подобного дефекта. И установить дефект, и устранить его помогают как раз наземные измерения, выполняющие функцию «эталонных» часов. Регулярное сравнение наземных

и спутниковых измерений позволяет определить момент начала их несоответствия, а далее делать необходимую поправку на систематическую ошибку спутникового прибора.

Невозможно оставить без внимания еще один вид измерений. Со времени появления в Антарктиде научных станций там (а также в Гренландии) проводится изучение проб льда (ледовых кернов), извлеченных с многометровых, а теперь уже даже километровых, глубин. Этот лед содержит пузырьки воздуха, оказавшиеся «законсервированными» еще с тех пор, когда данный пласт льда находился на поверхности и соприкасался с атмосферой. Современный анализ пузырьков и их ледового «контейнера» позволяет определить состав атмосферы того периода, концентрацию некоторых компонентов воздуха, а также его былую температуру. Но если такие измерения отличаются вполне удовлетворительной точностью, то о возрасте самого ледового керна судить по ним весьма затруднительно. Сколько раз путешествующие «в глубь веков» герои фантастических романов «промахивались» на один — два века, оказавшись не в той эпохе, в какой ожидали. Таков же удел полярников, совершающих «визит» в глубь льда, а по сути — в глубь времен, причем чем «длительнее вояж», тем труднее установить, «в какое время» они попали. Может возникнуть вопрос: зачем вообще нужны такие измерения: ценных рядов из них не составишь, какой эпохе они соответствуют, непонятно и пр. Как уже говорилось выше, *палеоизмерения* — наш единственный шанс докопаться до ответа на вопросы, связанные с эволюцией климата планеты, ее причинами и механизмами. Даже сохранившиеся хроники не содержат (и не могли содержать!) количественных характеристик былых природных явлений. Так, количественно оценивать температуру люди начали, по историческим меркам,

недавно, с 1724 г., когда была впервые введена температурная шкала Фаренгейта (уже позже появились температурные шкалы Реомюра — в 1730 г.; Цельсия — в 1742 г. и Кельвина — в 1848 г.). Так что, случись какой-либо термический катаклизм даже в Средние века, его отголоски дошли бы до нас в летописях сообщениями типа «этот год был дюже холоден».

Накопленная на сегодняшний день информация во всем ее многообразии позволяет более или менее полно судить о состоянии климата в настоящем и отчасти в прошлом. Однако, разумеется, она не может ответить на вопрос, как будет меняться климат в будущем.



Единственным инструментом, способным оценить, какие изменения климата грядут, являются климатические модели. И от качества таких оценок, а главное, выводов, сделанных на их основе, зависит направление развития мировой политики и экономики (вспомните бурную полемику, развернутую вокруг подписании Киотского протокола, ограничивающего выбросы в атмосферу парниковых газов), а также здравоохранения, комплекса природоохранных мероприятий и много другого, определяющего нашу с вами жизнь.



ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ГАДАНИЕ ПО ... НАУКЕ

■

■

Прогноз есть экстраполяция известного в неизведанное.

Л. С. Сухоруков, писатель, мастер афоризма

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТА

Задавались ли вы когда-нибудь вопросом: «Для чего существует та или иная наука, какова ее “сверхзадача”? Химия? Физика? Математика? Проведи мы такой опрос, уверены, мнения бы разделились. С климатологией в этом плане дело обстоит намного проще. Основное ее предназначение — в ответе на вопрос о климате в будущем. Обычному человеку нет дела до того, что было с климатом двадцать (сто, тысяча...) лет назад, да и климат сегодняшний (ведь его уже не изменишь!) интересен лишь через призму его грядущих изменений. Тут и извечное человеческое любопытство («что там ждет впереди?») и вполне прагматичный расчет: на предполагаемые изменения есть время адекватно отреагировать («предупрежден, значит, вооружен»).

Под решение объявленной «сверхзадачи» выстроена структура современной климатологии (да простят нас коллеги — метеорологи, гидрологи и др., это несколько не принижает значимость их труда). Всесторонние измерения дают нам представление о прошлом и настоящем климата Земли. Анализ их результатов позволяет определить и оценить причины климатических пертурбаций. А знать эти причины нужно именно

для того, чтобы правильно предсказать, как под их «патронажем» изменится климат в будущем.

Известный швейцарский физик В. Паули (1900–1958) 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 многообразии и даже просто их пересчитать вряд ли возможно. Однако впадать по этому поводу в пессимизм все же не стоит. Лишь сравнительно небольшое количество таких процессов решающим образом сказывается на глобальном климате Земли. Остальные же участвуют только в формировании климата регионального (например, падение содержания озона над Антарктидой каждой весной, разумеется, проявляется при формировании антарктического климата, но не ощутимо 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. Но 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.

Однако между словом и делом здесь дистанция огромного размера. Практически каждый из нас, вооружившись справоч-

никами и внимательно прочитав воспоминания бывалых альпинистов, может вполне квалифицированно рассказать, как надо покорять Эверест, но многие ли в состоянии подкрепить свой рассказ личным примером? В который раз уже приходится констатировать чрезвычайную сложность климатической системы.

Даже если самонадеянно предположить, что нам известны все без исключения климатообразующие механизмы и их количественный вклад в изменение климата, то итоговое его изменение не есть результат механического сложения всех упомянутых вкладов (согласно принципу Ле Шателье, итоговое изменение всегда меньше такой «механической» суммы, но вот насколько меньше?). «Собака зарыта» в огромном количестве положительных и отрицательных обратных связей, где-то усиливающих, где-то ослабляющих действие основных климатообразующих механизмов. Учесть все их хитросплетения значительно сложнее, чем, к примеру, успешно противостоять в лесу туче мошкары, вознамерившейся одновременно атаковать каждый квадратный сантиметр твоего тела. Для ревнителей абсолютно точных решений ситуация безысходная, но если удовлетвориться решениями приближенными, все складывается гораздо оптимистичнее. Для этого нужно «все-го-то» создать *модель*, правильно описывающую основные процессы и явления в их взаимодействии. Согласно словарю иностранных слов, «модель — схема, изображение или описание какого-либо предмета, явления или процесса в природе и обществе, изучаемые как их аналог».

Существуют две разновидности климатических моделей — *аналоговые* (статистические) и *детерминистские*. Аналоговые модели используют архивы данных измерений климатических элементов (температура воздуха, воды и почвы,

скорость и направление ветра, интенсивность осадков, тип и балл облачности и др.) в данной области в течение продолжительного времени. Это «черный ящик», в котором 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. Например, установив скорость увеличения приземной температуры Западной Сибири в период 1976–2010 гг. (см. прямую на рис. 2) и *предположив, что она и далее будет расти с той же скоростью*, мы легко определим ее значение в г. Омске в 2030 или 2040 г. По своей сути аналоговые модели являются диагностическими, т. е. численно отражают существующее и зафиксированное измерениями положение дел, но они мало пригодны для прогнозирования и «работают» только при сохранении связей в климатической системе региона в рассматриваемый период времени.

Приведем «гастрономическую» аналогию. Положим, вам предстоит отсутствовать пять дней. Дома остается ваш достаточно взрослый ребенок, который обожает сосиски и в среднем за обедом съедает по три штуки. Спрогнозировав расход, вы оставляете в холодильнике 15 сосисок. Если размеренный уклад жизни вашего чада сохранится — всё в порядке. А если условия хозяйствования поменяются? И отсутствие родительского контроля повлечет за собой повышенную активность, а с ней — усиление среднестатистического аппетита до размера волчьего?

Значительно более распространены *детерминистские модели*. Построение такой модели 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. Трудность

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, написав 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 такой: 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 меньшее угловое расстояние задается между параллелями и меридианами. Количество «кубиков» или, как их называют, *ячеек* характеризует *пространственное разрешение* модели. Чем больше размеры ячейки и, следовательно, меньше их общее число, тем грубее 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 и одинаковый по силе и направлению ветер. Решив таким образом сформированную систему алгебраиче-

ских уравнений, мы получим набор (для каждой ячейки свой!) взаимосогласованных значений искомых климатических величин. Совокупность этих наборов характеризует 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, исходя из 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 (увеличивая количество 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.

Многokrатно повторяя эту процедуру, можно вычислить последовательность наборов климатических величин, описывающих эволюцию состояния климатической системы. Выбор *сетки* — набора узлов, в которых нужно определить значения неизвестных (климатических элементов), — всегда компромисс между желанием сократить расстояние между узлами (тем самым улучшив точность расчетов, но значительно увеличив объем вычислений) и возможностями компьютера. Быстродействие в данном случае является определяющим фактором: скажите, кому нужен даже очень точный прогноз на завтра, если получен он будет не ранее, чем послезавтра? Не вдаваясь в подробности, заметим, что в современных глобальных климатических моделях расстояния между узлами

составляют 200–300 км по горизонтали и около одного километра по вертикали в атмосфере и 50–200 км и 200–400 м соответственно в океане.

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

Задачу компьютеру можно облегчить разными способами, начиная с упрощения исходной системы уравнений (например, исключая описания процессов, которые в рамках поставленной задачи не очень важны), оптимизируя вычислительные алгоритмы (допустим, уменьшая пространственное разрешение модели) и кончая совершенствованием компьютерной программы (учитывая особенности используемого компьютера — количество 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 человека недостаточно. Моделирование климата на современном уровне — задача, с которой способна справиться лишь группа специалистов в указанных областях. По мере развития климатической модели возникает потребность все в новых специалистах — химиках, биологах и др.

Детерминистские (физико-биохимические) модели наиболее часто сегодня используются 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*, занимающие высшую ступень в иерархии климатических моделей.

В настоящее время наиболее мощным и одновременно 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, например для анализа стоимости подобных сокращений выбросов. Необходимые для работы простых моделей параметры подбираются или из данных измерений, или из результатов расчетов по более сложным моделям общей циркуляции атмосферы и океана, ледниковых моделей и т. п.

Модели промежуточной сложности не столько уступают моделям общей циркуляции атмосферы и океана в количестве описываемых процессов, сколько превосходят их в степени упрощенности этих описаний. Модели промежуточной слож-

ности полезны в исследованиях отдельных физических процессов, их взаимодействий и обратных связей между ними, они также применяются в исследованиях *палеоклимата* (климата далеких прошлых эпох). Основным преимуществом моделей, находящихся на более низких ступенях иерархии, является их вычислительная эффективность, что позволяет проводить с простыми моделями и моделями промежуточной сложности многочисленные расчеты при различных дополнительных предположениях, а также осуществлять на их основе вычисления, охватывающие сравнительно долгие (от тысячи лет и более) сроки в истории климата Земли. Использование простых моделей и моделей промежуточной сложности в исследованиях возможных изменений климата в будущем носит вспомогательный характер.

Усовершенствование детерминистских моделей происходит традиционно — от простого к сложному. Напомним, что первые гидродинамические модели были сформулированы в СССР в 1930-е гг. Н. Е. Кочиным и в 1940-е гг. И. А. Кибелем, но для их полноценной реализации в ту пору не хватало вычислительных ресурсов. Об эволюции детерминистских моделей в последней четверти XX в. можно судить, обратившись к следующей таблице.

Таблица 5. Этапы развития климатических моделей

В моделях начали учитывать				
С середины 1970-х гг.	С середины 1980-х гг.	С начала 1990-х гг.	С конца 1990-х гг.	С начала 2000-х гг.
Атмосфера (циркуляция и метеорологические параметры)	Поверхность Земли — особенности рельефа	Океан и морской лед	Сульфатный аэрозоль	Углеродный цикл Типы растительности Химия атмосферы

Стартовав с рассмотрения состояния одной лишь атмосферы, к концу XX в. модели уже включали в себя особенности земного рельефа, учитывали углеродный цикл и различные виды аэрозолей, состояние океана и морского льда. Сегодня во многие климатические модели включены и блоки атмосферной химии. При этом развитие моделей происходит не только вширь (за счет увеличения количества блоков), но и вглубь (совершенствуется качество ранее включенных блоков). Таким образом, современные модели уже в состоянии учесть многие сложнейшие процессы и явления, происходящие в климатической системе Земли. Нелишне добавить, что развитию моделей в значительной степени способствует регулярно проводимое сравнение полученных с их помощью результатов в рамках международных программ.

Возникает закономерный вопрос: если модели уже сегодня достаточно хороши и с каждым годом становятся все лучше, откуда берется недоверие к ним?

Пожалуй, самая банальная причина заключается в неудачных прогнозах погоды, о которых мы уже упоминали. «Подливают масла в огонь» и климатологи-практики, занятые непосредственно мониторингом, обработкой и анализом данных наблюдений. Для них результаты измерений — единственно объективное отражение действительности, а построение моделей — забава «не знающих жизни» теоретиков.

Другим поводом к недоверию служат публичные ошибки. Так, к примеру, в феврале 2006 г. по инициативе Би-би-си каждый владелец персонального компьютера мог получить копию сложной модели, разработанной в Центре прогнозирования и исследования климата в Экстере, и с ее помощью самостоятельно рассчитать изменение климата Великобритании в период 1920–2080 гг. Откликнулись около 200 тыс. пользовате-

лей. Однако создатели программы забыли заложить часть необходимых для ее работы данных. А когда каких-то значений, необходимых для расчетов, не хватает, компьютер восполняет дефицит числами, не имеющими никакого отношения к реальным величинам этого параметра. При этом формально модель продолжает работать, но результаты выдает, конечно же, неверные. В упомянутой ситуации потепление климата Британии «пошло» беспрецедентно высокими темпами, и модель, «добравшись» до 2013 г., не смогла продолжать вычисления и остановилась. Свидетелями этой ошибки оказались сразу 200 тыс. человек! Безусловно, от ошибок никто не застрахован, но когда они столь растиражированы, возникает сомнение в способности создателя уверенно управлять своим детищем.

Еще одна причина кроется в неспособности существующих моделей отражать некоторые реально происходящие в климатической системе процессы. Известно, например, что все попытки модельно воспроизвести антарктическую «озоновую дыру» сразу после ее обнаружения в середине 1980-х гг. завершились неудачей. Экспресс-анализ показал, что та неудача была обусловлена неучетом в моделях гетерогенных (протекающих на поверхности аэрозольных частиц) химических реакций, играющих определяющую роль в балансе стратосферного полярного озона в весенние месяцы. Поговорка гласит: «Падая и вставая, ты растешь». Так и модели совершенствуются по мере отыскания объяснений еще вчера необъяснимым фактам.

Не способствуют популярности моделей и расхождения модельных оценок (иногда оказывающихся даже противоположными) у разных авторов. В ходе вышеупомянутых международных сравнений в десятки созданных в разных странах

моделей закладываются одни и те же входные параметры, после чего синхронно производятся заранее оговоренные расчеты (например, для определения, какие значения примут модельные неизвестные через 10 расчетных лет). В итоге построенные *на одних и тех же физических законах* модели дают неодинаковые результаты. Безусловно, это может быть следствием ошибки по недосмотру или из-за пренебрежения каким-либо природным явлением в конкретной модели. Но скорее всего корень зла заключается в различиях приближенных модельных описаний сложных («проблемных») или плохо изученных процессов.

Яркой иллюстрацией к сказанному служит «проблемная» облачность. Состояние облачности оказывает огромное влияние на климат, и потому ни одна климатическая модель не может обойтись без ее учета. В то же время формирование облачности происходит с участием химических, радиационных, динамических и многих других процессов, имеющих масштабы от микрофизического до глобального. Достаточно полно описать этот комплекс процессов со всеми их хитросплетениями не в силах ни одна современная модель. А потому создатели моделей вынуждены лишь приближенно описывать («параметризовать») результаты участия этих процессов в формировании облачности, связывая их с моделируемыми величинами. Разумеется, авторы заботятся о том, чтобы в результате работы их параметризаций полученная картина облачности максимально походила на наблюдаемую, но упомянутые упрощения неизбежно вносят в нее заметные искажения — у каждой модели свои. Увы, таких малоизученных или просто «слишком сложных» для современных моделей процессов пока еще достаточно много.

Наконец, нет уверенности в том, что связи и взаимодействия, положенные в основу модели при ее составлении, сохранятся в будущем. В основном это относится к аналоговым моделям, строящимся на данных продолжительных измерений в данном регионе. Известны случаи, когда аналоговые модели климата и прогноза его изменений даже использовали резуль-

таты исследований климата далекого прошлого для отыскания их сходства с современным состоянием и характеристиками отдельных частей климатической системы.

Такие прогнозы составлялись академиком М. И. Будыко с сотрудниками в 1960–70-х гг. для изменений климата Северного полушария по аналогам состояний климатического оптимума плейстоцена (периода примерно 6 тыс. лет до н. э.) и микулинского межледникового (125–130 тыс. лет до н. э.). Согласно палеореконструкциям, в первый из этих периодов средняя температура приземного воздуха в средних северных широтах была на 1,0–1,5 °С, а во второй — на 2,0–2,5 °С выше ее значения в середине XX в. Эти реконструкции, по мнению авторов, могли соответствовать климатическим условиям начала и середины XXI века. В развитие этого подхода были осуществлены прогнозы изменений климатического режима средних и высоких северных широт в конце XX — начале XXI в. Прогноз, сделанный с помощью палеоаналоговой и статистической моделей, предсказывавший максимальное потепление в нижней атмосфере околополюсных районов Европы и Западной Евразии зимой, не оправдался. Наблюдения последних десятилетий показали максимальное потепление на материках в средних широтах зимой (в России — западнее озера Байкал), но не около полюса. Причина такого расхождения результатов — использование в указанных моделях данных наблюдений за реальным зимним потеплением в средних широтах и на западе Евразийского сектора Арктики 1930–40-х гг. Тогда, как и в палеоклимате 6 тыс. и 125 тыс. лет до н. э., измеренная концентрация углекислого газа в атмосфере не превосходила 300–310 ppm (300–310 молекул CO₂ на миллион молекул газов воздуха). Регулярные современные измерения концентрации CO₂ дают значительно большую величину — 370–390 ppm концентрации этого ныне основного парникового газа. Так заметное неучтенное различие даже одной, но важной климатической величины может привести к неудаче прогноза. И напротив, современные детерминистские модели, учитывающие этот рост CO₂, правильно предсказали наблюдаемые в средних широтах потепление над материками зимой и летнее уменьшение осадков.

Итак, можно заключить, что пока еще не все ладно в «модельном королевстве», современные климатические модели имеют серьезные недостатки. Но если модели все же создаются, «значит это кому-нибудь нужно»?

Существование и развитие моделей неразрывно связаны с всесторонними наблюдениями за нашей климатической системой: данные измерений используются в качестве входных модельных параметров, они же служат мерилем качества работы моделей. Уникальность же моделей состоит в том, что они и *только они* (!) могут помочь: а) выявить и оценить основные механизмы формирования климата в условиях их комплексного постоянного взаимодействия; б) дать прогноз *наиболее вероятных* изменений климата в целом и отдельных его характеристик; в) проверить (не нанося какого-либо вреда окружающей среде!), какими последствиями чреваты для климата те или иные крупномасштабные человеческие акции.



Резюмируем сказанное: климатический мониторинг ответственен за поставку достоверных фактов и призван давать ответы на вопросы «что?», «где?» и «когда?», а предназначение моделирования — в истолковании этих фактов с позиции современных знаний и в ответах на вопросы «как?» и «почему?».

Остановимся на нескольких фактах, которые модели могут занести себе в актив. В 1970–80-е гг., когда основным объектом исследований была атмосфера (см. таблицу 5, с. 175), проводилось интенсивное модельное изучение формирования и поведения ее газовых составляющих. В то время основную часть общего объема поступающей информации составляли модельные результаты, поскольку возможности атмосферного мониторинга были крайне скудны. Как следствие, очень низкие, практически недоступные измерениям того времени концентрации атмосферных радикалов (гидроксила, атомарного кислорода и др.) определялись с помощью модель-

ных расчетов, правильность которых подтвердилась дальнейшими измерениями. Тогда же именно модели предсказали наличие в атмосфере хлористого нитрозила ClONO_2 , который лишь впоследствии был обнаружен в пробах воздуха.

Чуть позже, во второй половине 1980-х гг., были развернуты исследования, посвященные возможным последствиям ядерной войны. Модельные оценки (до «натурных экспериментов», подтверждающих правоту моделей, к счастью, дело не дошло) показали, что в результате массового применения ядерного оружия в климатической системе установится режим «ядерной зимы», когда резкое увеличение концентрации аэрозоля (продуктов массовых пожаров) на продолжительный срок приведет к росту оптической толщины атмосферы, значительной трансформации в ней радиационных и динамических процессов и появлению в тропиках губительных для растительности низких температур.

Упомянутые примеры интересны только узкому кругу специалистов. Другое дело — предсказания климата будущего, они затрагивают каждого человека. Для обычного человека этот интерес ограничен, как правило, сугубо практическими вопросами: какую одежду взять с собой на курорт, стоит ли планировать лыжные каникулы под Петербургом ближайшей зимой или как уменьшить риск попадания в зону участвовавших в последние годы природных катаклизмов. Но для моделиста сделанный им прогноз — это и очередной шаг в познании климата, и определенная ответственность, так как с учетом его прогноза зачастую принимаются важные хозяйственно-экономические, а то и политические решения. «Позвольте! — вправе возразить читатель. — О какой ответственности может идти речь, если моделисты не в состоянии, как было сказано выше, получить идентичные результаты даже

при проведении вычислений разными моделями с одинаковыми параметрами». Что ж, если результаты отдельно взятой модели не вызывают доверия, можно рассмотреть комплекс результатов, полученных с помощью всех моделей (а их в мире — несколько десятков), участвующих, например, в программе их сравнения. Поскольку все они созданы на одних принципах, но независимо друг от друга, то эти результаты могут представлять собой статистический ансамбль, и, проведя их обработку по всем правилам математической статистики, мы получим наиболее вероятное значение («математическое ожидание») климатического элемента, например температуры воздуха или количества осадков, а также границы его вероятных изменений («среднеквадратическое отклонение»).



Успешность такого подхода уже нашла свое подтверждение. Из-за *нелинейности* климатической системы (этим термином кратко обозначают весь комплекс сложных взаимодействий между отдельными ее компонентами) модельные расчеты 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) опять же важно использовать ансамблевый подход — повторять расчеты для одного и того же временного интервала при одном и том же внешнем воздействии, но стартуя от разных начальных условий.

В конце 1980-х — начале 1990-х гг. была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата

(МГЭИК). В ее задачу, в частности, входит координация все-сторонних усилий, направленных на изучение эволюции климата. В регулярно издаваемых отчетах МГЭИК приводятся модельные оценки вероятных изменений основных климатических элементов в обозримом будущем, полученные с использованием вышеописанного подхода. Упомянем, что при подготовке последнего, вышедшего в 2007 г. отчета, МГЭИК использовала около 20 моделей глобального климата Земли. В частности, в отчете указано, что в период 1990–2007 гг. зафиксировано увеличение среднеглобальной температуры воздуха на 0,2 °С и именно такая величина была предсказана модельными оценками.

«Ну, хорошо, один раз совпало, — усомнится читатель, — но изменения климата напрямую зависят от содержания в атмосфере парниковых газов — CO₂, метана и других. Понятно, их концентрации в моделях учитывают. Только кто может знать, сколько будет в атмосфере, скажем, того же метана через полвека — он же попадает туда и с газо- и нефтедобывающих установок, и из болот, и с рисовых полей, и даже от крупного рогатого скота... Как все это учесть?» Действительно, эволюция содержания в атмосфере парниковых газов во многом определяет изменения климата, а то, какими будут их концентрации, зависит от интенсивности и методов хозяйствования ведущих мировых держав, а также от международных соглашений, регламентирующих выбросы таких газов в атмосферу. Неопределенность в этом вопросе очень велика, поэтому экспертами МГЭИК были разработаны несколько десятков сценариев эмиссии парниковых газов — от наиболее вероятных до весьма экзотических и в соответствии с каждым из них были сделаны модельные расчеты изменения климатических элементов вплоть до конца XXI в.

Относительно недавно было высказано опасение, что парниковое потепление поверхности океана со временем (через 100–200 лет, так как океан обладает много большей инерцией, чем атмосфера) способно изменить скорость водооборота в системе глубинных течений Мирового океана, и это может привести к отклонению течения Гольфстрим от Европы. Известно, что Гольфстрим «обогревает» Западную Европу, и, случись такое отклонение, оно может серьезно отразиться на европейском климате. Однако, как показали модельные расчеты, отклонение Гольфстрима от Европы не приведет тем не менее к климатической катастрофе, поскольку к тому времени уровень глобального парникового потепления перекроет ожидаемое похолодание Западной Европы от ухода Гольфстрима. Несомненно, случай проверить этот вывод представится еще очень нескоро, но констатируем: модели — единственный инструмент, позволяющий оценивать результат сложного многофакторного взаимодействия частей климатической системы.

Еще с советских времен известен такой анекдот. «Сладкая парочка» в составе Героя Гражданской войны В. И. Чапаева (руководитель) и его ординарца П. Исаева (ассистент) — оба в белых халатах — проводит научный эксперимент. Василий Иванович берет блоху и командует: «Блоха, прыгай!», после чего обращается к помощнику: «Петька, пиши — блоха прыгнула высоко». Снова берет блоху, отрывает ей одну лапу, повторяет команду и затем констатирует: «Петька, пиши — блоха прыгнула чуть-чуть ниже». Далее процедура повторяется, но каждый раз блоха лишается еще одной лапы. Наконец, когда удалена последняя лапа, приказ «Блоха, прыгай!» остается невыполненным. И Василий Иванович, слегка подумав, заключает: «Петька, пиши — блоха оглохла!». «К чему это?» —

спросит читатель. А вот к чему. Важнейшим аспектом при работе с моделями является искусство правильно истолковывать полученные модельные результаты.

Допустим, модель успешно отработала и выдала безошибочные результаты в виде набора чисел, количество которых вполне соизмеримо с многомегабайтным объемом спутникового мониторинга. Поэтому прежде чем предстать «пред светлы очи» моделиста, этот набор чисел преобразуется в карты, графики, диаграммы. Графическое представление результатов сопровождается стандартным «сглаживанием» исходного набора, причем зачастую алгоритм этого сглаживания разработчику модели детально неизвестен. Другими словами, процедура обработки данных может «пройтись катком» по важному модельному результату и уничтожить его. Отсюда имеющийся риск (правда, небольшой) «выплеснуть с водой и младенца». Но вот перед группой моделистов — десятки карт, отражающих результаты проведенного модельного эксперимента. Каждый — физик и химик, гидролог и радиационщик, оптик и биолог — анализируют свою «зону ответственности», после чего наиболее опытный и знающий специалист — координатор — делает обобщающие выводы. Качество этих выводов целиком зависит от квалификации всех членов группы и ее «сыгранности». Как правило, усложняет ситуацию временной фактор: результаты должны быть подготовлены к определенному сроку (к крупной конференции, к заранее оговоренному моменту публикации сравнения модельных результатов и т. д.), а устранить обнаруженные «шероховатости» нет возможности, так как время, необходимое на проведение дополнительного или повторного расчета, составляет несколько месяцев.



Повторимся, интерпретация модельных результатов — архиважный момент в исследованиях. Только специалист, хорошо знающий особенности модели, в состоянии корректно установить соответствие между полученными модельными значениями и данными мониторинга.

К примеру, казалось бы, естественно напрямую сравнить результаты, полученные в модельной ячейке, с наблюдениями в ближайшей географической точке. Однако так поступать нельзя, поскольку модельное решение соответствует среднему значению *по всей модельной ячейке*. Так, 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).

Еще одной «головной болью» моделистов является неравномерность расположения метеостанций на поверхности Земли. «А какая-тут связь?» — возможно, удивится читатель. Прямая: информация, поступающая с этих метеостанций, необходима для работы моделей, но модель «привязана» к узлам регулярной сетки, не совпадающим с местоположением станций. На практике это означает, что в окрестности одного модельного узла может не оказаться ни одной станции, в то время как около другого «роится» сразу несколько. Однако значения метеопараметров должны быть присвоены каждому узлу. В первом случае не понятно, откуда такие значения брать, а во втором — какому из них отдавать предпочтение (или по какому правилу учесть все из них). Во многом ситуа-

цию спасает спутниковый мониторинг, но все же не полностью, поскольку он не охватывает измерениями *абсолютно всю* поверхность земного шара.

Для восполнения дефицита данных и получения взаимосогласованных полей метеорологических характеристик применяют разные методы, например интерполяцию на основе объективного анализа или ныне наиболее популярный ре-анализ. *Ре-анализы* представляют собой результаты модельных расчетов атмосферных полей, произведенные с учетом всего комплекса имеющихся данных наблюдений таких ключевых характеристик, как температура, влажность, атмосферное давление и др. Там, где такие данные отсутствуют, они восполняются 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 ре-анализов для разных атмосферных характеристик неодинакова, а для некоторых характеристик (например, для осадков или облачности) данные наблюдений плохо или совсем не ассимилируются, несмотря на их наличие. Вместо этого указанные характеристики рассчитываются — с погрешностями, присущими их модельным описаниям.

Однако «лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать». Рис. 19 и 20 цв. вклейки иллюстрируют возможности современных климатических моделей. На них показаны попарно модельные и наблюдаемые распределения годовых сумм осадков (рис. 19) и температуры приземного воздуха (рис. 20) по поверхности земного шара. *Модельные распределения* —

это средние величины, полученные в результате работы 19 моделей, а наблюдаемые — данные ре-анализа за период 1980–1999 гг. Конечно, теория и практика расходятся, но, согласитесь, «картинки» во всех основных деталях получаются весьма похожими и вполне подошли бы для популярной игры «Найди десять отличий».

Обнаружение расхождений между модельным и наблюдаемым климатами чаще всего не позволяет сразу же внести исправления в модель. 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 для оценки того, насколько чувствительны полученные с помощью модели результаты к изменению ее параметров. Улучшение воспроизведения моделью некоего среднего состояния, отвечающего, например, современному климату, может быть достигнуто, в частности, путем так называемой «настройки», состоящей в подборе свободных (недостаточно известных или изменяющихся в широких пределах) параметров модели в целях наилучшего соответствия как можно большего числа характеристик модельного климата наблюдаемым значениям (нелишне заметить, что улучшение воспроизведения моделью одной характеристики может сопровождаться ухудшением другой).

«Настройка» моделей традиционно является объектом критики со стороны исследователей, скептически относящихся к физико-математическому моделированию как методу исследования и предсказания климата. Однако повторимся, 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 изменений климата в будущем. 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 и предыдущих веков), можно надеяться, что полученные с помощью этой модели оценки изменений климата при тех или иных ожидаемых в будущем сценариях внешнего воздействия заслуживают доверия.

Сегодня не существует модели, лучше прочих описывающей, например, современный климат. Обычно каждая модель хорошо воспроизводит лишь часть искомых климатических величин, в то время как остальные воспроизводятся значительно хуже. Сравнительный анализ показывает, что наиболее высокую успешность, как правило, демонстрирует «средняя» (по ансамблю) модель. Это связано с тем, что систематические ошибки разных моделей (а они присущи каждой) не зависят друг от друга и при осреднении по ансамблю могут взаимно компенсироваться. Например, если две модели регулярно «завышают» температуру воздуха на 0,3 °С и 0,4 °С, а две другие ее «занижают» на 0,25 °С и 0,3 °С соответственно, то средняя ошибка ($0,3 + 0,4 - 0,25 - 0,3 = 0,15$ °С) окажется меньше, чем у любой из четырех моделей.

Разумеется, при всем огромном и далеко не исчерпанном 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 не подлежит сомнению то, что современные модели отвечают наивысшему уровню знаний, накопленных человечеством за время исследований климатической системы.

Когда-то Уинстон Черчилль говорил, что демократия несовершенна, но ничего лучше человечество пока не придумало. Аналогичное утверждение справедливо и в отношении климатических моделей: они несовершенны, но им нет альтернативы в оценках возможных изменений климата в будущем.



ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР ПРЕДПОЛОЖЕНИЙ

Здравомыслящий человек пытается, учитывая все привходящие обстоятельства, высказывать предположения и делать выводы, но вот произошло нечто непредвиденное (а все учесть немислимо), что смешало его планы, и он уже в полной растерянности, бестолковый и наивный.

Джонатан Свифт

КЛИМАТ И ЭКОНОМИКА

Чередование успехов и неудач — неотъемлемый атрибут модельных прогнозов. Так было, и так, увы, будет. Все, на что мы способны, — стараться, чтобы успехов было больше. О причинах такого положения дел шла речь в предыдущем разделе. Но только ли от качества модели зависит, оправдается прогноз или нет? Есть, по крайней мере, еще одно необходимое условие высокой успешности предсказания — хороший сценарий. Термин, ассоциирующийся прежде всего с театром и кинематографом, он уже давно перекочевал и в другие сферы человеческой деятельности. Видно, прав был У. Шекспир, поставивший знак равенства между жизнью и театром, игрой в нем. Да и сам сценарий является плодом «игры ума» его создателя — эксперта. И если реалистичный сценарий служит отличным плацдармом для удачного прогноза, то сценарные ошибки не в состоянии исправить даже самая лучшая модель. Поэтому, говоря о прогно-

зировании будущих изменений климата, так важно иметь верное представление о тенденциях развития природы и общества и точно отразить их в числах, «наполняющих» сценарий.

По сути, сценарий для прогноза грядущих изменений климата представляет собой ... предварительный прогноз поведения климатоформирующих факторов (Солнца, альбедо и пр.) в интересующий нас промежуток времени. Предсказать естественные колебания климата относительно несложно: их всесторонне изучают уже достаточно давно, и необходимый материал накоплен (речь идет только об общей картине — предвидеть, например, где, в каком году и с какой силой начнет извергаться «новый Везувий», конечно, невозможно). Но вот парадокс: куда труднее человеку предвосхитить поведение ... человека, т. е. эволюцию антропогенных факторов, в первую очередь концентрации парниковых газов. Эти концентрации, очевидно, должны зависеть от общей направленности развития человечества — развития экономического, социального, экологического. Другими словами, прежде чем прогнозировать изменения климата, надо предугадать, что «натворят» люди в обозримом будущем. И не забыть при этом об обратной связи, ведь эти человеческие деяния также зависят от изменений климата.

Появление первых подобных сценариев пришлось на конец 1980-х — начало 1990-х гг., когда климатические модели уже «выросли из коротких штанишек» и начали давать вполне пригодные для анализа результаты. Они были опубликованы в первом отчете МГЭИК (1990 г.). В последующих отчетах МГЭИК сценарии пересматривались и совершенствовались, сегодня используется третий вариант таких сценариев.

Существует около четырех десятков сценариев, из которых наиболее употребимы сценарии A1, A2, B1 и B2, обобщающие

четыре возможных варианта эволюции антропогенных выбросов.

Сценарий A1 исходит из примерно линейной экстраполяции существующей современной тенденции. Причем рассматриваются три его разновидности: A1F (преимущественного использования ископаемого углеродного топлива и большого выброса CO_2 в атмосферу), A1T (эксплуатации возобновляемых источников энергии с минимальным выбросом CO_2) и A1B (промежуточный вариант между A1F и A1T). *Сценарий A2* соответствует «пестрому миру с большим разнообразием региональных экономик и относительно слабым развитием новых технологий». Минимальные выбросы парниковых газов и сульфатных аэрозолей предполагаются в *сценарии B1* «с конвергенцией (схождением) разных социальных систем к экономике информации и сервиса и внедрением чистых «зеленых» и энергоэффективных технологий». *Сценарий B2* «описывает мир с промежуточным народонаселением и экономическим ростом, подчеркивая при этом локальные решения проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости». В каждом из сценариев были определены ожидаемые эмиссии основных парниковых газов — CO_2 , CH_4 , N_2O и SO_2 как предшественника сульфатных аэрозолей, а по ним и концентрации этих газов. То, что при этом получилось, показано на рис. 25. Для сравнения на рисунке приведен и наиболее популярный из ранее использовавшихся *сценарий IS92a*.

Эмиссии, а с ними и концентрации имеют большой разброс, причем для большинства газов максимальный и минимальный уровни значений достигаются в сценариях A1F и A1T с использованием ископаемого углеродного и возобновляемых источников энергии соответственно. Для сценариев B1 и B2 характерны замедление роста и даже падение эмиссий, особенно

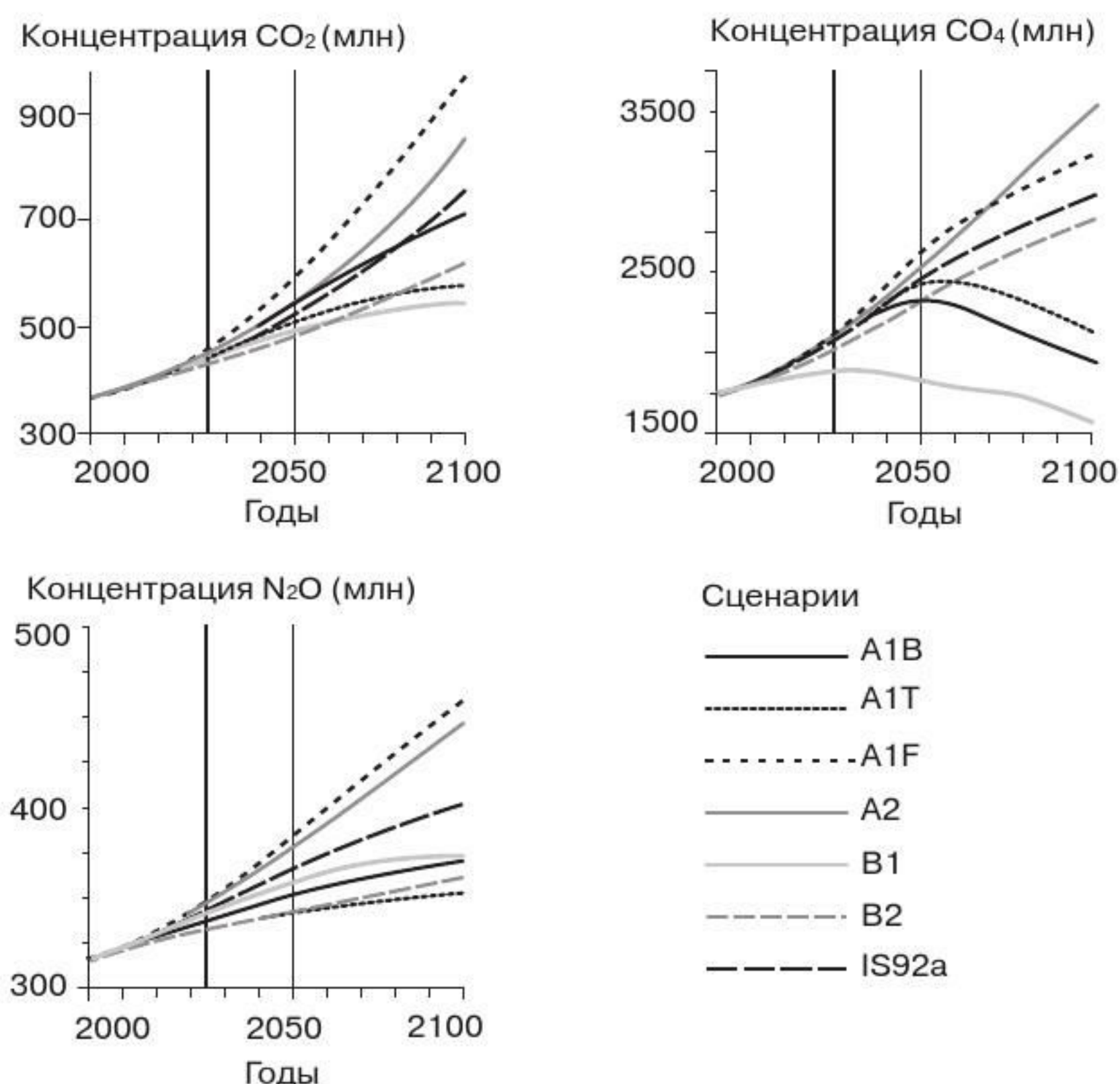


Рис. 25. Тренды концентраций основных парниковых газов, рассчитанные в соответствии с указанными сценариями

заметное для отсутствующего на рис. 25 SO₂. Концентрации углекислого газа и оксида азота(I), «время жизни» которых в атмосфере составляет 100 лет и более, растут с разной скоростью во всех сценариях вплоть до 2100 г., но при этом примерно до 2040 г. их различия от сценария к сценарию мало заметны. Куда более чувствителен к сценариям метан, время пребывания которого в атмосфере много короче — 10–12 лет.

Содержание в атмосфере другой большой группы парниковых газов — озоноразрушающих химикатов — подчинено ограничениям, накладываемым Монреальским протоколом. Что же касается самого озона, то изменения его концентрации в сценарии, как правило, не включаются и подлежат расчету

в каждом модельном прогнозе. Виной тому — отсутствие потока озона в атмосферу от наземных источников (напомним, что его образование и разрушение происходит в самой атмосфере) и короткое «время жизни».

На рисунке 21, а цв. вклейки отображена в некотором смысле итоговая характеристика каждого из шести основных сценариев — глобальный выброс всех парниковых газов в эквиваленте CO_2 . Для того чтобы унифицировать выбросы различных парниковых газов, обычно используется специфическая единица измерения — *эквивалентный выброс CO_2* . Согласно Обобщающему докладу МГЭИК (2007)¹, «эквивалентный выброс CO_2 — это объем выброса CO_2 , который вызвал бы такое же комплексное радиационное воздействие за данный период времени, как и объем выброса какого-либо долгоживущего парникового газа или смеси парниковых газов. Эквивалентный выброс CO_2 получают путем умножения объема выброса какого-либо парникового газа на его потенциал глобального потепления за данный период времени». Уже упоминавшийся потенциал глобального потепления показывает, во сколько раз молекула какого-либо парникового газа (метана, оксида азота(I) или др.) эффективнее поглощает радиацию по сравнению с молекулой CO_2 . *Пунктиром* выделена область, в пределах которой этот выброс имеет место при рассмотрении почти всех четырех десятков сценариев. Рисунок демонстрирует происходящие с течением времени изменения, при этом наиболее экологически «грязными» оказываются сценарии A1F и A2: в них к 2100 г. выбросы примерно в 3–4 раза

¹ Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый Доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Ред. Пачаури Р. К., Райзингер А. и др. МГЭИК. Женева, Швейцария, 2007.

превышают эмиссию в сценариях A1T и B1. Однако если сравнивать все сценарии (среди которых есть и весьма экзотические), то в них можно обнаружить и значительно большее превышение. Рис. 21, б цв. вклейки иллюстрирует рассчитанный с использованием группы климатических моделей отклик температуры приземного воздуха на указанное в левой части рисунка изменение эмиссии парниковых газов в течение XXI века. *Справа в столбцах* показаны наиболее вероятные приросты приземной температуры к 2100 г. для каждого из шести сценариев (*выделены в столбце более насыщенным цветом*) и разброс таких приростов, полученный разными группами моделистов (*остальные части столбцов*). К примеру, при выбросах по сценарию A1F большинство моделистов сошлись на том, что наиболее вероятно увеличение температуры на 4–4,2 °C, но какая-то из моделей показала рост лишь на 2,4 °C, а другая модель оценила этот рост в 6,4 °C. *Розовая линия* на рисунке не соответствует никакому сценарию, она представляет модельную оценку изменения приземной температуры при предположении, что атмосферные концентрации сохраняются постоянными на уровне величин 2000 г. (интересно, каким образом этого достичь на практике?). Даже при таких «щадящих» условиях имеет место небольшое (~0,2 °C в течение XXI века) увеличение приземной температуры. Это продолжение потепления «обеспечили» парниковые газы, уже накопленные в атмосфере в XX веке и постепенно из нее удаляемые.

Другой величиной, характеризующей прогнозируемые изменения климата, как вы помните, является радиационный форсинг. Его вычислением исправно сопровождаются многие модельные исследования. Когда речь идет о форсинге от прогнозируемых изменений климата, в качестве отправной точки

отсчета обычно выбирают начало так называемой «индустриальной эпохи» (середину XVIII или XIX века). Следуя этой традиции, были произведены оценки величин радиационного форсинга для вышеупомянутых сценариев. Разумеется, наличие прямой связи между значениями радиационного форсинга и сценарных концентраций парниковых газов едва ли может кого-то удивить, что и подтверждает рис. 22 цв. вклейки. Но если рост температуры хорошо понятен каждому из нас и потому не нуждается в каких-либо разъяснениях, то об увеличении радиационного форсинга так не скажешь.

С незапамятных времен бытует мнение, что все познается в сравнении. Не станем пренебрегать этой истиной. Согласно рис. 22 цв. вклейки, для максимального сценария (т. е. сценария с самым быстрым ростом эмиссий парниковых газов) среди вышеупомянутых сценариев — A1F радиационный форсинг к 2100 г. достигнет 9 Вт/м^2 . Много это или мало? Обратимся еще раз к таблице 4 (с. 148). Нетрудно видеть, что антропогенному выбросу всех парниковых газов в 2005 г. соответствовал радиационный форсинг, приблизительно равный 3 Вт/м^2 . Таким образом, при осуществлении сценария A1F радиационный форсинг превзойдет имеющийся на данный момент примерно в три раза. Аналогично, в самом «слабом» сценарии (т. е. в сценарии с самым медленным ростом эмиссий парниковых газов (опять же среди вышеупомянутых) — сценарии B1) радиационный форсинг увеличится по отношению к современному примерно на 34%.

Суровый «модельный приговор», устанавливающий рост приземной температуры на $1,8\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C/столетие}$ (см. рис. 21 цв. вклейки), пока неокончательный и «подлежащий обжалованию» (совместными интернациональными усилиями, противодействующими глобальному потеплению). Существует

мнение ряда специалистов, представляющих экономически развитые страны, что необходимо установить крайний допустимый предел (порог) увеличения среднегодовой среднеглобальной температуры приземного воздуха в размере $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно ее доиндустриального значения. Считается, что при таком пределе может сохраниться современная климатическая система Земли без искажения ее естественных и антропогенных внутренних связей. Если это так, то развитие событий ни по одному из сценариев не может нас устроить, поскольку из этих «пороговых» двух градусов $0,7\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$ уже «съедены» веком минувшим (т. е. на XXI век допустима «добавка» лишь в $1\text{--}1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Все приведенные выше оценки сделаны с помощью лучших современных трехмерных климатических моделей, впитавших в себя многие научные достижения последних лет. Однако, как мог заметить внимательный читатель, сами сценарии содержат только средние глобальные значения эмиссий парниковых газов и их концентраций. А это означает, что упомянутые эмиссии, равно как и эмиссии других атмосферных газов и аэрозолей, нужно предварительно «размазать» по поверхности земного шара (по узлам модельной сетки) с учетом рельефа, региональных особенностей промышленного и сельскохозяйственного производства, плотности населения и пр. Например, выбросы метана различны над местами нефте- и газодобычи и над морскими просторами, при наличии и отсутствии снежно-ледяного покрова над болотами в северных областях и т. д. Значительно большая неоднородность распределения имеет место для выбросов «предшественников» озона — оксидов азота и оксида углерода. Но еще хуже то, что интенсивность загрязнения атмосферы в тех или иных регионах может сильно изменяться всего за несколько деся-

тилетий. Скажите, имелись ли основания в середине XIX века полагать, что в начале XXI столетия лидерами по эмиссии парниковых газов окажутся Китай и США, а не наиболее промышленно развитые в ту пору страны Европы? Обратимся к более поздним примерам. Вернемся, допустим, в 1950-е гг. Мог ли кто-нибудь тогда предсказать массовый перенос многими крупнейшими концернами своего производства из США и Европы в Юго-Восточную Азию? Ныне же львиная доля бытовой техники, компьютеров и не только их производится именно там. Например, всемирно известная компания Reebok размещает заказы на изготовление правых кроссовок в Тайване, а левых — в Таиланде. (Кстати, догадались, почему? Чтобы не воровали!) И уж полный конфуз случился в 1990-х гг., когда при разработке положений Киотского протокола многоопытные эксперты не разглядели предпосылок для начинавшегося тогда и продолжающегося по сей день рывка китайской экономики, сопровождаемого интенсивной эмиссией парниковых газов (см. раздел «Политики — климату»).

Все эти примеры подталкивают нас к мысли об осторожности, с которой следует относиться к публикуемым прогнозам. Чрезмерная детализация не всегда и необязательно улучшает их качество. Возвращаясь к последнему примеру, констатируем: реальная сегодняшняя экологическая ситуация в Китае, конечно же, заметно отличается от ее модельной оценки, проведенной в предположении китайской эмиссии парниковых и других газов и аэрозолей на достаточно низком уровне, соответствующем началу 1990-х гг. Но в то же самое время, исходя из общих законов развития мировой экономики, можно в целом *верно* оценить темпы роста *глобального* загрязнения атмосферы (и *всей* природной среды). Скажем, «непредусмотренное» увеличение объема производимых в Китае товаров

массового потребления сопровождается одновременным сокращением (или закрытием) производства этих товаров (а значит, и выбросов парниковых газов) в других уголках нашей планеты.



Поэтому средние по земному шару модельные прогнозы, весьма вероятно, окажутся вполне адекватными реальной действительности, даже при постигшей их неудаче в отдельных регионах.

Принимая во внимание упомянутые каверзы «размазывания» источника загрязнения по узлам модельной сетки, а также относительно равномерное распределение главного парникового газа CO_2 , некоторые исследователи сосредоточились на изучении именно его поведения. Они рассмотрели условия эмиссии CO_2 , при которых через какое-то число лет в глобальной атмосфере установилась бы постоянная среднегодовая концентрация этого газа на том или ином уровне в диапазоне от 450 до 850 ppmv (попутно напомним: современная концентрация составляет 392 ppmv). В ходе их расчетов было установлено, что для достижения стабилизации содержания CO_2 в атмосфере следует полностью прекратить антропогенные выбросы углекислого газа уже в ближайшие десятилетия. Необходимость таких жестких мер следует из общих соображений и понятна без моделирования. Однако как углеродный цикл, так и атмосфера (не говоря уже обо всей климатической системе), имеют довольно большую инерцию, и модельные расчеты помогли оценить величину скорости сокращения и период времени, необходимые для достижения заданных постоянных уровней концентрации CO_2 . Причем чем раньше такое сокращение эмиссии углекислого газа будет

начато, тем менее болезненным окажется этот процесс и тем быстрее может быть достигнута цель.

В связи с этим среди обеспокоенных ситуацией ученых и политиков распространяются призывы к быстрому переходу от слов к делу. Намеченные Киотским протоколом нормы сокращения выбросов в атмосферу парниковых газов (в эквиваленте CO_2), очевидно, вовсе недостаточны, но даже они плохо выполняются многими странами. Движение «зеленых», многие экологические организации призывают «лица, принимающие решения» (от англ. *polіcymakers*) — правительства не затягивать с началом действий.

С недавних пор эти призывы нашли отражение и в подходах к составлению сценариев. Все предыдущие сценарии строились по принципу: «предположим размер эмиссии, чтобы оценить, к чему это приведет». Идеология, закладываемая в сценарии нового поколения, иная: «зададим предельно допустимую планку изменения климата, чтобы оценить, при каких условиях (эмиссиях) удастся остаться в заданных границах».



Другими словами, если прежде в рамках предположений о развитии народонаселения, экономики, экологии и т. д. выстраивались сценарии выбросов парниковых газов, то теперь социально-экономическое развитие ограничивается лимитом на такие выбросы, обеспечивающим невыход за установленную границу изменений климата.

При построении новых сценариев в качестве критерия изменений климата вновь предпочтение было отдано нашему давнему знакомцу — радиационному форсингу. Сегодня обсуждаются и уже используются *четыре базовых сценария*

нового поколения: RCP 8.5; RCP 6.0; RCP 4.5; RCP 2.6. RCP — это Representative Concentration Pathways или Характерные пути [изменения] концентраций [газов]. (В квадратных скобках указаны части названия, подразумеваемые, но не включенные в него.) Цифры указывают на ожидаемую величину радиационного форсинга (в Вт/м²) в 2100 г. от начала «индустриальной эпохи». Из этих цифр следует, что RCP 8.5 — сценарий с максимальными антропогенными выбросами, а RCP 2.6 — с минимальными. Эти эмиссионные сценарии с соответствующими изменениями радиационного форсинга являются основой для развития климатических моделей разной размерности и подробности. Кроме того, на данной основе определяются возможности дальнейшего развития народонаселения, экономики, экологии, социальной сферы.

Следует обратить внимание на то, что в старых сценариях — A1, A2, B1 и B2, даже при разных экономических и социальных предпосылках, эмиссии парниковых газов получались близкими по значениям или даже почти совпадали, хотя бы на части рассматриваемого периода XXI века. Поэтому на практике обычно используют не больше чем три сценария, из которых в двух предполагаются очень быстрый и очень медленный рост выбросов парниковых газов соответственно, а в третьем рассматривают некоторую «среднюю» скорость выбросов. При этом моделисты не обращают внимания на социально-экономические «корни» сценария.

Зато новые сценарии, в отличие от их предшественников, достаточно сильно разнятся между собой. На рис. 23 цв. вклейки показаны предельно допустимые расчетные концентрации CO₂, CH₄ и N₂O, при которых не нарушаются «форсинговые» требования новых сценариев. Для выполнения этого условия признано необходимым, чтобы величина антропоген-

ных эмиссий CO_2 для минимального сценария RCP 2.6 стала нулевой к 2070 г, а затем — и отрицательной, для сценария же RCP 4.5 — вернулась в том же 2070 г. к современному уровню (уровню 2010 г.). В целом же различия между попарно соответствующими кривыми, демонстрирующими изменения концентраций на рис. 25 и 23 цв. вклейки, все же не очень велики (в том числе и для оксида азота — отдельно оговариваем этот факт, так как может сложиться иное впечатление из-за разницы на осях в масштабах концентрации N_2O на рис. 25 и 23 цв. вклейки). В частности, соотношение концентраций для максимального и минимального сценариев на 2100 г. составляют примерно 2,0; 2,3 и 1,3 (рис. 26) и 2,3; 2,8; 1,3 (рис. 23 цв. вклейки) для CO_2 , CH_4 и N_2O соответственно. Таким образом, несмотря на разницу в «идеологии» при создании сценариев старого и нового образцов, последние являются эволюционным, но не революционным (!) продолжением первых.

Завершая разговор о современных представлениях относительно будущего развития мировой социально-экономической сферы (сценариях) и о прогнозе отклика на него климатической системы, хотелось бы сделать пару небольших замечаний.



К любому прогнозу нельзя относиться как к истине в последней инстанции. Неслучайно при публикации прогнозов изменения климата на современных общедоступных интернет-сайтах (например, на официальном сайте Британской метеорологической службы) они непременно сопровождаются словами «в рамках данного сценария» или «наиболее вероятный прогноз». Тем самым подчеркивается, что полученный результат критически зависит от заложенных в сценарий гипотез.

И еще. В наш стремительный век человек зачастую черпает информацию главным образом из броских заголовков, не давая себе труда вникнуть в детали освещаемого в газетной статье (радио- или телепередаче) вопроса, а именно в этих деталях чаще всего «собака и зарыта». Увы, чрезмерная погоня за читательским вниманием нередко приводит к несоответствию набранного аршинными буквами заголовка и смысла информации, расположенной под ним. А потому не ленитесь, пожалуйста, станьте немного «кинологом»! Этим вы застрахуете себя от вполне возможных конфузов.



ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

КЛИМАТ ДИКТУЕТ СВОИ УСЛОВИЯ

Испытание натуры трудно... однако приятно, полезно, свято. Чем больше таинства ее разум постигает... Чем далее речение наше в оной простирается, тем обильнее собирает плоды для потребностей житейских.

М. В. Ломоносов

КЛИМАТ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА

Окружающая среда (неважно, нравится нам это или нет) определяет стиль и качество нашей повседневной жизни. Трудно назвать какую-либо сферу человеческой деятельности, не подверженную ее влиянию. Да и сам человек не в состоянии избежать такого влияния: вспомним, к примеру, различия в темпераментах 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 скорее идет о степени комфортности жизни. Говоря о комфортности, мы имеем в виду только привычный уклад жизни, поскольку, увы, и сегодня люди иногда попадают в экстремальные ситуации в результате техногенных аварий или природных катаклизмов. Безусловно, такой уклад сильно отличается у людей разных национальностей, религиозных конфессий и просто различ-

ного материального достатка. Однако, несмотря на различия, у всех укладов имеется ряд общих атрибутов.

Во-первых, современный человек нуждается в крыше над головой. «Мой дом — моя крепость», — говорят англичане. И эта крепость оберегает хозяина не только от вторжения непрошенных гостей, но и от обычных 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, скоростях ветра и уровнях солнечной радиации.



Основной климатической характеристикой при этом служит температура 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 заполнений 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 ($1 \text{ ГВт} = 1 \cdot 10^9 \text{ Вт}$) в год. 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) при обеспечении их специальными панелями нагреваются от Солнца. При этом окна «следят» за Солнцем, поворачиваясь вслед за его движением по небосводу. Глубокие подвалы такого дома аккумулируют летнее тепло для зимнего обогрева, а зимний холод — для охлаждения здания летом. В таком «энергоэффективном» здании расположен Секретариат Всемирной метеорологической организации в Женеве. В Москве в качестве эксперимента подобный комплекс построен в районе Филевский парк. Он обогревается и освещается при помощи энергии Солнца и ветра. Во дворе этого комплекса есть даже солнечная установка для жарки шашлыка... В южных регионах строительство подобных домов могло бы привести к значительному энергосбережению, а потому очень выгодно для экономики этих территорий. В смерче- и сейсмоопасных районах применяются специальные строительные технологии для возведения и оборудования зданий повышенной прочности.

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 сектора экономики, зависит от климата. Солнечная радиация активно участвует во всех процессах развития животного и растительного миров. Дожди поливают как естественную растительность, так и посевы сельскохозяйственных культур. В то же время ранние заморозки могут уничтожить эти посевы. От сильного ветра происходит полегание зерновых. При переувлажнении почвы возможно вымокание растений. Влияние неблагоприятных

погодных условий на сельскохозяйственные культуры очень велико. Даже при получении своевременного прогноза природного катаклизма редко удастся предпринять что-либо для защиты посевов. Но 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 в России отмечаются 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 международном масштабах. И потому сильно зависим от развития различных секторов производства и организации перевозок. Технические изделия, функционирующие под открытым небом, например транспортные средства, многие виды строительной техники, ряд энергетических устройств и т.п., 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 потому 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 возникают авралы. 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 светофора на путях может самопроизвольно смениться на зеленый, что, естественно, создаст серьезную аварийную ситуацию.



Наверно, немногие знают, что характерные для данной местности направление и скорость ветра на пути следования определяют длину железнодорожных составов: преобладание попутного ветра на железнодорожной магистрали позволяет удлинить состав, а встречный ветер вынуждает его укоротить.

Автомобильному движению мешает, прежде всего, наличие наледи на дорогах и плохая видимость. Для ликвидации гололедицы приходится менять шины или применять различные антигололедные реагенты.

В-четвертых, необходимость обеспечения нормального развития сельскохозяйственных, промышленных и транспортных предприятий, бесперебойной работы жилищно-коммунальных служб и т. д. вызывает постоянно растущую потребность в увеличении энергетических ресурсов. Добыча ископаемого топлива, основа сегодняшнего относительного благополучия России, дает возможность обеспечивать наши (и не только наши) повседневные нужды в энергетике, однако

не секрет, что ценой этого благополучия является существенное ухудшение экологической обстановки в местах его добычи. Более того, сжигание ископаемого топлива является одним из основных источников эмиссии парниковых газов в атмосферу. А это, как уже не раз отмечалось, ведет к глобальному потеплению климата. Поэтому уже довольно давно в мире предпринимаются попытки разработки новых, экологически чистых энергоресурсов.

Предполагаемые грядущие изменения климата неодинаково скажутся на жизни людей в различных регионах Земли. Существенной особенностью нашей страны является то, 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. Возможны даже разрывы трубопроводов и разлив нефти. Так, на нефтепроводе Месояха-Норильск за один год произошло 16 разрывов трубопровода. Многие здания в районах вечной мерзлоты начинают разрушаться. В Якутске 60% зданий имеют трещины, в Амдерме же домов с трещинами 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.

Меняющийся климат отражается и на здоровье населения. Тяжелые негативные последствия имеют «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 приносит пользу. В жарких странах в кондиционерах нередко обитают болезнетвор-

ные бактерии, вредит здоровью и переход из кондиционированного помещения на открытый воздух и обратно. При наступлении жары число инфарктов и инсультов резко возрастает, обостряются заболевания сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Если к «волнам холода» человечество в значительной степени адаптировалось, 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 количества бедствий и катастроф. Для нейтрализации климатических воздействий или хотя бы уменьшения причиняемого ими ущерба экономике и вреда здоровью людей, метеорологи разработали методы так называемого *«раннего предупреждения» об опасных и стихийных метеорологических явлениях*, т. е. разработали методики прогноза большой заблаговременности, а также методы мониторинга (слежения) за нарастанием интенсивности опасных метеорологических явлений. Эти методы помогают людям спастись от погодных бедствий, т. е. действует принцип «предупрежден — значит вооружен». В США, где очень высока частота возникновения стихийных бедствий (тропические циклоны, торнадо и др.), заблаговременная осведомленность о них населения и поведенческие рекомендации 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.

Первые службы, задачей которых было прогнозирование экстремальных погодных явлений, были созданы в конце

XIX века в регионах, наиболее подверженных нашествию тропических циклонов (ураганов и тайфунов), — на восточных побережьях Северной Америки и Юго-Восточной Азии. Статистика числа ураганов, начиная с 1850 г., в первом из этих регионов приведена на рис. 26, где *точками* отмечено число ураганов, *черным* — сглаженная кривая, построенная по этим данным, *серым* — отклонение от температуры поверхности воды в восточной тропической части Атлантического океана относительно 1930 г. (там отклонение равно нулю). Как видно из рисунка, в начале XX века число ураганов невелико, однако оно заметно возрастает в 1940–1950 гг. и особенно в период глобального потепления с 1980-х гг. Очевидна взаимосвязь обеих кривых, что неудивительно: как показали наблюдения, образование тропических циклонов происходит, когда температура поверхности океана не ниже 26 °С.

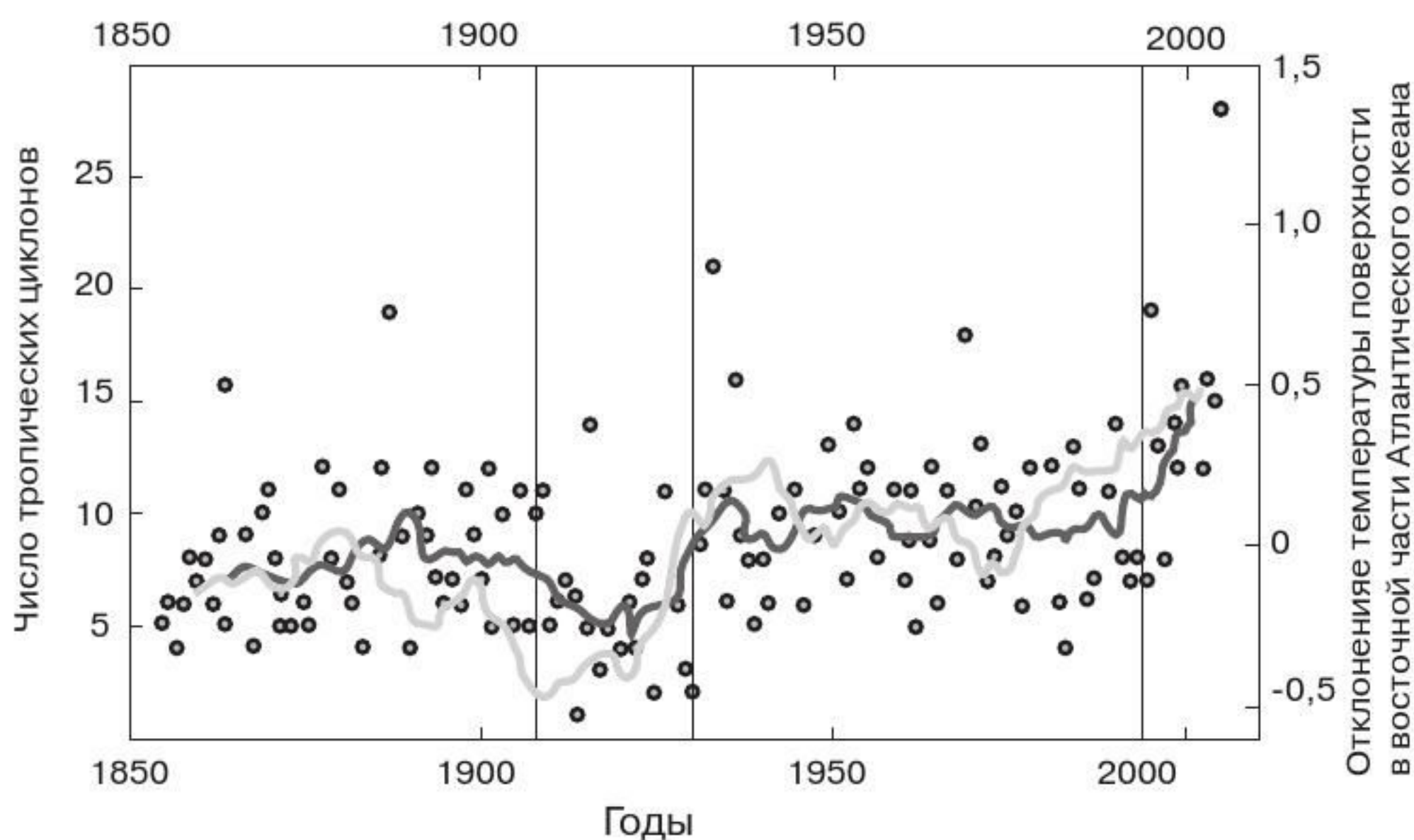


Рис. 26. Частота тропических циклонов и отклонения температуры поверхности воды в восточной части Атлантического океана в период с 1850 г. по настоящее время

На рис. 27 показан рост среднегодового количества природных катастроф в мире за последние полвека.



Налицо резкое увеличение общего числа катастроф (в 2000–2001 гг. среднегодовое число стихийных бедствий возросло в 5 раз по сравнению с 1965–1969 гг.), а с ним и увеличение нанесенного ими общего ущерба. Отметим большую долю в этом атмосферных причин: лепта землетрясений и оползней составляет лишь 20%, все остальное «обеспечивает» атмосфера посредством тропических циклонов, засух и сильных дождей.

Необходимо отметить, что принятые в XX веке меры предупреждения позволили заметно сократить число человеческих жертв (например, ураганы в Галвестоне 1900 г. и «Катарина»

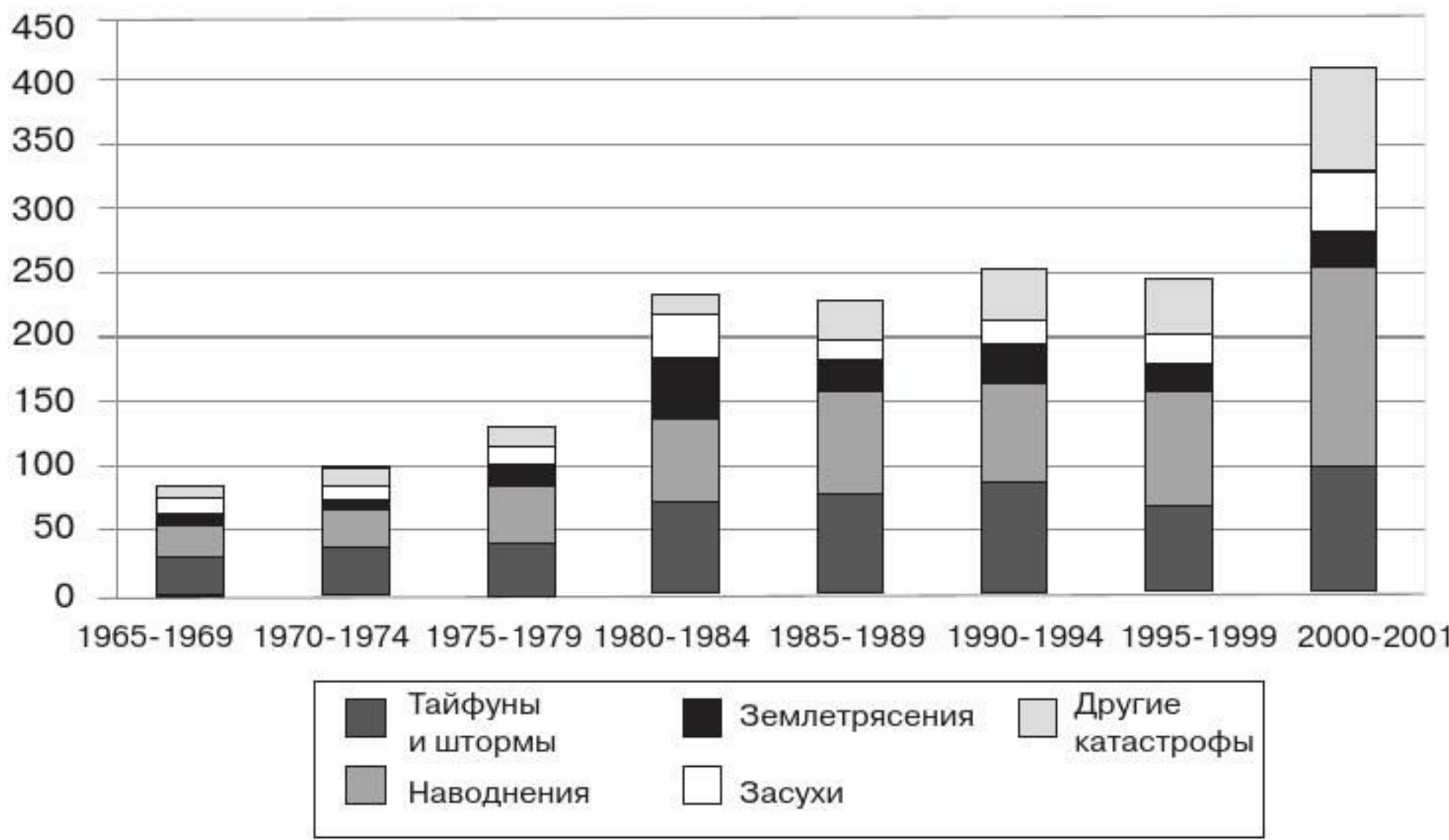


Рис. 27. Рост среднегодового количества природных катастроф в мире (по пятилетним периодам)

2005 г. унесли 8000 и 1300 человеческих жизней соответственно). В то же время материальный ущерб, напротив, стремительно нарастал от незначительного в начале XX века до огромного — более 100 млрд долларов США — в случае с вышеупомянутой «Катариной». Это связано с постоянным улучшением технического оснащения, инфраструктуры, а с ними и резким увеличением их стоимости на поражаемых ураганами территориях.



По сообщениям СМИ, 2011 г. побил все рекорды по материальному ущербу от катаклизмов, составившему около 370 млрд долларов США.

Засухи и наводнения, в отличие от ураганов, охватывают более значительные площади и затрагивают жизненные интересы несравненно большего числа людей. Ущерб от них — не меньше, да и распространены они практически по всем площадям суши, а в океане их «заменяют» шторма (бури): на них приходится каждая пятая катастрофа. Потепление климата ведет к увеличению количества осадков, прежде всего ливневых, и, следовательно, способствует наводнениям. Число таких сильных ливней и наводнений в южных регионах России в последние годы увеличилось (так же, как и в крупных городах — Москве, Ростове и др.). А памятная июльская жара 2010-го сопровождалась сильной засухой. В течение ряда лет от засух страдали и южные страны Западной Европы. По модельным прогнозам, развитие глобального потепления будет стимулировать дальнейший дефицит осадков в зонах интенсивного сельскохозяйственного производства, как раз весной и летом — в период, как говорилось в советских газетных передовицах, «борьбы за урожай».

Не обходят стороной катастрофы и восточные просторы России. Раннее таяние снега, например, в южной Сибири, приводит к образованию паводковых вод в верхней южной части больших сибирских рек при сохранении льда в их средней и верхней частях на севере. В результате происходит сильное затопление талыми водами в руслах этих рек, вынуждающее разрушать взрывами лед в их нижней части и в устьях.



Эти обстоятельства при ожидаемом росте осадков и потеплении будут еще более катастрофичны в будущем, а потому необходимы специальные меры по защите находящихся в руслах этих рек населенных пунктов от регулярного затопления. Тот же самый рост зимних осадков будет вызывать учащение сильных снежных бурь и заносов на дорогах. Таким образом, будущий климат обещает быть щедрым на погодные природные катаклизмы.

На первый взгляд, потепление климата должно стать благом для большой в целом холодной страны. Однако есть и «обратная сторона медали». Остановимся на плюсах и минусах грядущих изменений климата для России.

1. Потеплеют зимы — уменьшатся затраты на отопление домов. В то же время накатывающиеся летом горячие «волны» (подобно наблюдавшимся в 2010 г.) вынудят развивать систему кондиционирования воздуха в северных российских городах, в которых ранее нужды в ней не было. Энергозатраты на кондиционирование всегда намного (в несколько раз) превышают энергозатраты на отопление. В обычных условиях кондиционирование в помещениях работает значительно меньше времени, чем их обогрев. Установка систем кондицио-

нирования — удовольствие не из дешевых, при этом эти системы обречены на простой в течение бóльшей части года. Возможное инженерное решение данной проблемы — использование «тепловых насосов» при строительстве современных домов. В Западной Европе таким образом совмещают отопление и охлаждение жилых помещений.

2. Согласно законам физики, повышение температуры воздуха влечет за собой увеличение его влажности и влагооборота в нижней атмосфере и на подстилающей поверхности. Как следствие, усиление испарения и осадков, причем зачастую в виде сильных ливней и снегопадов, наблюдать которые уже «имели удовольствие» жители севера Европейской территории России две последние зимы. Но это «удовольствие» было бы неполным без последующих затоплений территорий, наводнений, снежных заносов, оползней и прочих «сюрпризов». А чтобы такие «житейские радости» не слишком докучали, необходимы специальные меры по укреплению берегов рек, водохранилищ, ливневых канализаций в городах и др.

3. Благодаря потеплению на полях и в садах смогут расти теплолюбивые культуры. Однако расширение ареала южных растений на север требует серьезной подготовки. В первую очередь, это касается почвы сельскохозяйственных угодий. Не обойтись и без заготовки соответствующих видов удобрений и химикатов для борьбы с вероятными нашествиями южных вредителей растений и насекомых — разносчиков болезней, прежде всего малярии. Даже перечисленное не осуществить в одночасье, а на очереди необходимость развития всей сельскохозяйственной инфраструктуры, поскольку «переселение» южных растений вызовет необходимость развития на новых местах определенных отраслей их производства и обработки. Тем более что, согласно имеющимся прогнозам,

многие южные территории станут более засушливыми, а значит, менее пригодными для выращивания на них традиционных ныне культур. Ожидается также аналогичное, впрочем, довольно медленное, продвижение на север — в тундру, в вечную мерзлоту — лесов. Выстраивание инфраструктуры в этих сложных условиях — дело очень дорогое и не очень изученное. Имеющийся современный опыт дает скорее отрицательные результаты, и потому жизненно необходимы новые научно-технические подходы к решению этой задачи.

4. В результате грядущего потепления увеличатся сроки навигации на Северном морском пути и крупных реках Сибири и севера Европейской территории России. Это обстоятельство имеет очень большое значение не только для нашей страны, но и для всего мира: изменятся направление и объемы грузопотоков между Европой и тихоокеанской Азией, а также между пунктами северного побережья Евразии и портами этих регионов. С учетом того, что транспортные расходы должны сильно сократиться и что в этом регионе находится немало месторождений углеводородов и других полезных ископаемых, радужные перспективы развития северного российского побережья сравнимы разве что с картиной будущего Васюков, нарисованной Остапом Бендером. Но в отличие от последней, данные перспективы — реальные и не слишком отдаленного будущего!

Как видим, потепление принесет как положительные, так и отрицательные изменения в нашу жизнь. И к последним следует готовиться заранее. Времени для благодушия уже нет!



ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ПОЛИТИКИ — КЛИМАТУ

Договориться, в принципе, можно всегда и со всеми. Главная трудность заключается в том, чтобы договор потом соблюсти.

Ю. Татаркин, сетевой поэт

МЕЖДУНАРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Во второй половине XX в. человечество как-то незаметно преодолело рубеж, когда объемы производимых продуктов и отходов мировой хозяйственной деятельности достигли такого уровня, что от их воздействия на окружающую среду стало невозможно отмахнуться, 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 чернобыльской аварии существенным образом 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.

Пришло время крупных международных форумов и документов вселенского масштаба. Первыми ласточками оказались *Венская конвенция 1985 г.* и не раз уже упомянутый *Монреаль-*

ский протокол 1987 г. Основной целью обоих документов была защита озонового слоя Земли, причем первый содержал лишь набор общих положений, а вся конкретика по реализации озоноохранных мер находилась во втором. Там же, если помнит читатель, отмечалось, что многие озоноразрушающие вещества являются парниковыми газами с очень высокими потенциалами глобального потепления. Это обстоятельство стало своеобразным переходным мостиком от очень важной, но частной проблемы защиты озоносферы к более общей проблеме противодействия нежелательным изменениям климата. Последующие события происходили по уже опробованной схеме: сперва, в 1992 г., в Рио-де-Жанейро была принята *Рамочная конвенция ООН об изменении климата, РКИК*, а спустя пять лет подписан *Киотский протокол*. И снова конвенция была во многом декларативным документом, не содержащим каких-либо количественных обязательств. Однако не зря говорят, что просто любить человечество в целом, гораздо труднее любить каждого человека в отдельности. Поэтому подписание обеих конвенций прошло торжественно, без сучка без задоринки. А вот ущемлявшим реальные интересы ведущих мировых экономик протоколам пришлось столкнуться с изрядным афронтом. О событиях, предшествовавших принятию Монреальского протокола, мы вскользь уже упоминали, теперь немного о другом протоколе — *Киотском*.

История, связанная с Киотским протоколом, начавшаяся в 1997 г., довольно любопытна. Именно тогда в бывшей столице Японии представители 84 стран подписали соглашение, направленное на сокращение выбросов в атмосферу парниковых газов. Заявленной целью соглашения стало обязательство промышленно развитых стран к 2012 г. уменьшить свои выбросы на 5% по сравнению с уровнем 1990 г. Естественно, самим фактом подписания 84 страны признали ключевую роль парниковых газов в наблюдаемом глобальном потеплении. Однако если у вас сложилось впечатление, что с того момента Киотский протокол начал

победное шествие по планете, то впечатление это глубоко ошибочное. Для вступления протокола в силу было необходимо выполнение двух условий, связанных с «магическим» числом 55. Во-первых, именно такое число стран-участников конвенции должны были ратифицировать Киотское соглашение. И, во-вторых, суммарная доля выбросов, приходящаяся на ратифицировавшие договор страны, должна была составлять не меньше 55% от глобального выброса в 1990 г. Заводилой в этой истории, как водится, были Соединенные Штаты, кстати, единолично настаивавшие на включении в текст протокола пункта о «торговле квотами» (подобная практика ранее уже была опробована США «для внутреннего пользования»). Согласно этому пункту, субъект (фирма, корпорация, государство), имеющий лицензию на выброс определенного количества парниковых газов, но частично или полностью не воспользовавшийся своей квотой, мог на рыночной основе продать неиспользованную часть другому субъекту, чья «кочегарка» дымила на всю катушку. Изначально предполагалось, что индустриально слаборазвитые страны смогут продавать свои квоты, скажем, тем же Соединенным Штатам, которые будут иметь запас времени для подготовки к снижению своих выбросов. Однако гладко было на бумаге...

«Выполнить и перевыполнить» удалось только первое условие: небольшие страны охотно ратифицировали мало к чему обязывавший, но ставивший их в разряд «прогрессивных» стран протокол. Для удовлетворения второго условия, вообще говоря, было достаточно, чтобы документ получил одобрение в законодательных палатах США, Евросоюза и Японии. Но в марте 2001 г. президент Д. Буш заявил, что США, чей выброс превышал тогда треть мировых выбросов, не готовы к ратификации договора. С этого момента судьба Киотского протокола оказалась в руках России, имевшей в 1990 г. 17% мирового выброса. Ожесточенная полемика о целесообразности его ратификации продолжалась в нашей стране около трех лет. Дело закончилось тем, что российская ратификация состоялась, и Киотский протокол вступил в законную силу, однако срок его действия фактически сократился вдвое. И если бы дело было только в этом. Дурные примеры, как известно, заразительны. Вслед за США, протокол не ратифицировала Австралия (она вошла в Договор значительно позже — в 2008 г.), в нем не участвуют Китай и Индия, которые, как развивающиеся страны «третьего мира», не были включены в список его участников (в этот список вошли 39 промышленно развитых стран, в том числе 12 стран с «переходной экономикой» — Россия и страны бывшего социалистического лагеря). А это не последние игроки на экономическом поле.

Действие протокола завершается, самое время проанализировать его достоинства и недостатки, поскольку не за горами обсуждение (и, надеемся, принятие) новых соглашений. Начнем с недостатков. Во-первых, моральный фактор (хоть и говорят, что морали у государства быть не может, есть только интересы). Скажите, уверены ли вы, что педантично, в любую погоду, будете выходить покурить на улицу, если ваш сосед всегда курит на общей кухне? Ведь на нашей маленькой планете мы все соседи. Во-вторых, по словам экспертов, Киотское соглашение, в отличие от Монреальского, «плохо сконструировано» и имеет неопределенные перспективы своего действия. Тонкости формулировок оставим экспертам, а что касается его результативности, то сошлемся на модельный эксперимент, показавший, что скрупулезное выполнение всеми требований Киотского протокола лишь чуть-чуть сократит темпы глобального потепления, но не «излечит» от него. В-третьих, исполнение ограничений Киотского протокола весьма затратно, и многие страны из разряда «прогрессивных» просто не в состоянии выделить необходимые средства. Например, в Африке борьба с малярией и СПИДом требует меньших вложений, дает зримые результаты и потому имеет более высокий приоритет.

Теперь поговорим о плюсах Киотского соглашения. Первое и самое главное его достижение заключается в том, что ведущие экономические державы осознали необходимость совместных согласованных действий по борьбе с нежелательными последствиями изменений климата. И хотя первый блин вышел комом, накопленный опыт ведения переговоров, несомненно, пригодится в самое ближайшее время. Во-вторых, подготовка протокола и полученные в ходе его реализации результаты стимулировали проведение всесторонних научных

исследований. В-третьих, сокращение эмиссии парниковых газов в атмосферу непосредственно отражается на количестве произведенной энергии, потребность в которой растет год от года. А это подталкивает промышленно развитые страны к поиску более чистых технологий ее производства и к сокращению затрат энергии во всех секторах экономики. К примеру, наиболее динамичная экономика Китая испытывает серьезный «энергетический» голод: тот же Шанхай (второй город страны) до последнего времени страдал от частых отключений электроэнергии, и это при том, что только в 2004 г. Китай ввел мощности, равные по объему выработке электроэнергии всей Великобританией. Поэтому Китай, впрочем, как и Индия, даже не будучи связанными Киотскими соглашениями, заинтересованы в экологических и экономических технологиях. В-четвертых, происходят определенные сдвиги в процессе вышеупомянутой торговли квотами. Долгие годы американская инициатива не находила применения: небольшие страны относились к ней прохладно, с подозрением. Однако недавно, кажется, как говаривал хорошо известный нам политик, «процесс пошел». В 2009 г. Украина продала японцам 30 млн тонн эквивалента углекислого газа (что это за эквивалент, мы рассказали на с. 195) за 585 млн долларов. Ее примеру последовали Польша и Венгрия. Даже «долго запрягающая» Россия в августе 2010 г. продала опять же японцам 290 тыс. тонн парниковых газов с Еты-Пуровского нефтяного месторождения в Ямало-Ненецком автономном округе за 3,3 млн евро. Эти 290 тыс. тонн составил обычно сжигаемый попутный газ. Выгода, заметьте, двойная — газ не только не выброшен в атмосферу, но и продан. Конечно, 3,3 млн евро — сумма смешная по сравнению с деньгами, «крутящимися» в нефтегазовом комплексе, но, по данным Счетной палаты, на сож-

жении попутного газа Россия теряет в год 1,3 млрд долларов, если оценивать топливо по внутрироссийским ценам, и 5,7 млрд, если — по европейским. А это уже солидные суммы.

Специфическое продолжение получила идея торговли квотами в Австралии. Власти этой страны ввели налог на выбросы углерода для местных предприятий. Взиматься такой налог с 1 июля 2012 г. будет в размере 23 австралийских долларов за тонну, платить его должны около 500 предприятий, наиболее сильно загрязняющих атмосферу. Фиксированная ставка налога сохранится в течение трех лет, а в 2015 г. Австралия перейдет на торговлю квотами. Тогда цена выбросов станет рыночной, хотя, как минимум, до 2018 г. ее нельзя поднимать выше максимума, установленного правительством. Размер вредных выбросов на душу населения на Зеленом континенте — один из самых высоких в мире. Это связано с широким использованием угольных электростанций и с развитой горнодобывающей промышленностью. Как следствие, эксперты ожидают оживленную торговлю квотами, которая обещает быть самой крупной за пределами Европы.

Усвоены ли уроки Киотского протокола? В какой-то степени, да. Хотя окончательные выводы правильнее делать только после заключения нового международного соглашения по климату. А вот перспективы этого весьма туманны. Переговоры по поводу такого соглашения начались еще в 2007 г. на острове Бали (Индонезия) и были продолжены в 2009 г. в Копенгагене, в 2010 г. в Канкуне (Мексика) и в 2011 г. в Дурбане (ЮАР), но «воз и ныне там». Еще по итогам встречи в Канкуне на официальном сайте Российской Федеральной Службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды появилось дословно следующее сообщение: «...Российская Федерация подтвердила, что последовательно выступает за расширение круга стран, имеющих обязательства по сокращению выбросов, и заключение единого универсального соглашения, однако считает, что принятие

обязательств во втором периоде Киотского протокола в существующем формате неэффективно с любой точки зрения — научной, экономической, политической. В этой связи Российская Федерация не берет на себя количественные обязательства в рамках второго периода обязательств Киотского протокола». И далее: «Решение об отказе принятия обязательств во втором периоде Киотского протокола разделяют Япония, Канада». В кратком пересказе с казенно-бюрократического на русский — Россия, Япония и Канада не намерены поддерживать продление действия существующих норм Киотского протокола и надеются на заключение нового, более эффективного договора¹. Надеются на это и другие страны, однако при обсуждении деталей оказывается, что у каждого «своя правда».

К обсуждению данного вопроса мы еще вернемся, а пока обратим свое внимание на то, как обстояли дела с эмиссией парниковых газов в период действия Киотского протокола. К моменту вступления протокола в силу сложилась картина, представленная в таблице 6.

Таблица 6. Глобальные антропогенные выбросы парниковых газов в период 1970–2004 гг. (в Гт эквивалента CO₂ в год)

1970	1980	1990	2000	2004
28,7	35,6	39,4	44,7	49,0

¹ В продолжение сказанного, на XVII Конференции Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Дурбане (ЮАР) в декабре 2011 г. Россия официально отказалась от участия во втором периоде обязательств Киотского протокола. Так же поступили Канада и Япония. В результате уже в 2013 г. на долю государств, «сохранивших верность» Киотским соглашениям, придется всего лишь около 15% глобального выброса парниковых газов.

Отметим резкое увеличение интенсивности выбросов парниковых газов в первые четыре года XXI в. (в среднем 2,32%/год), последовавшее за почти линейным их трендом в два предшествовавших десятилетия (в среднем 1,14%/год). Углекислый газ — основной парниковый газ, его доля в общем антропогенном выбросе таких газов составляет примерно $\frac{3}{4}$ (см. рис. 28, а). «Виновниками» же эмиссии парниковых газов являются различные секторы мировой экономики, их вклады соизмеримы, хотя наибольший приходится на энергетику (рис. 28, б).

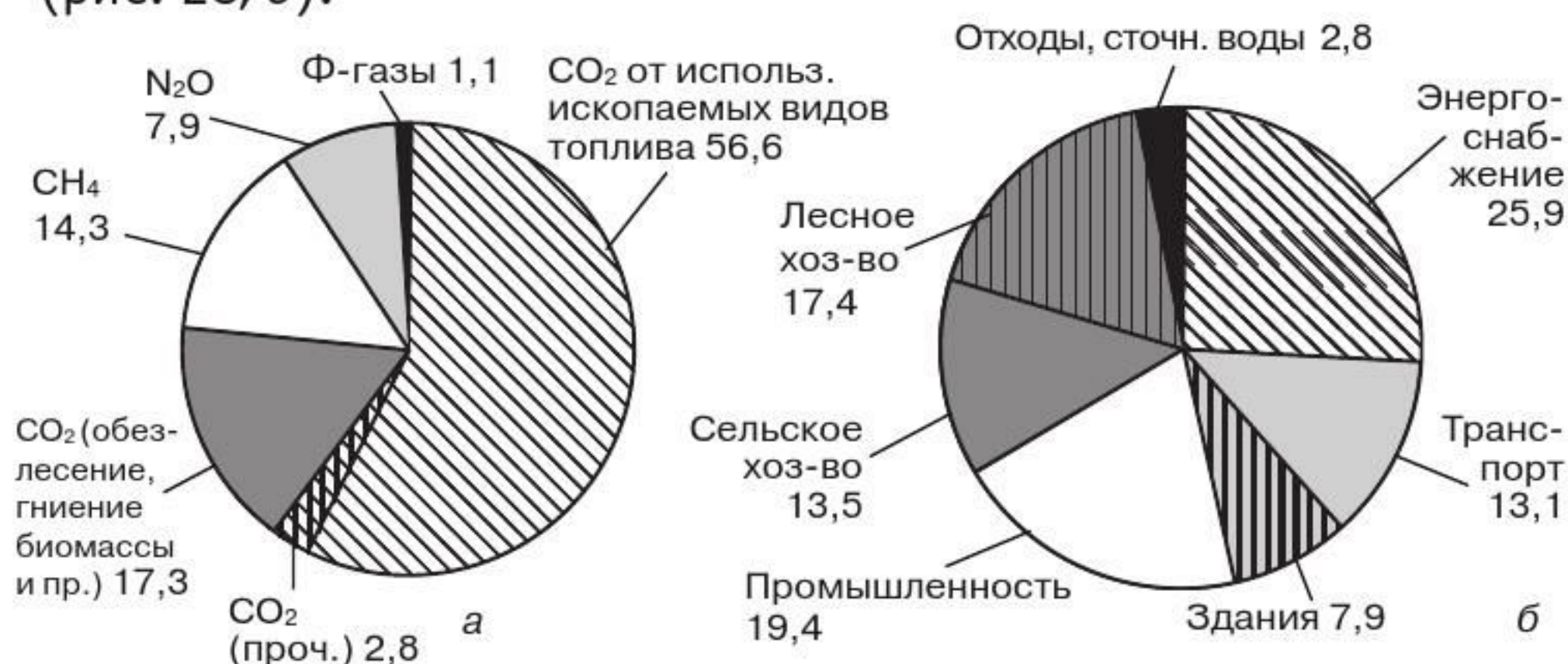


Рис. 28. Глобальные антропогенные выбросы парниковых газов (в процентах): а — доля различных антропогенных парниковых газов в суммарных выбросах в 2004 г.; б — доля различных секторов мировой экономики в суммарных выбросах антропогенных парниковых газов в 2004 г.

Не нужно обладать сколь-нибудь серьезными познаниями, чтобы понять, какие страны являются лидерами по выбросам парниковых газов в атмосферу. Конечно же, там, где максимальны объемы производства, высоки и его издержки. Рис. 29 иллюстрирует вклад крупнейших экономик в общемировой выброс парниковых газов в начале XXI в. Оговоримся, представленная диаграмма лишь качественно характеризует ситуацию, поскольку процентное соотношение в указанный период

от года к году несколько менялось, а в 2008 г. произошло по-своему знаменательное событие: Китай, обогнав по величине выбросов многолетнего лидера — США, возглавил эту малопочетную «гонку»¹.

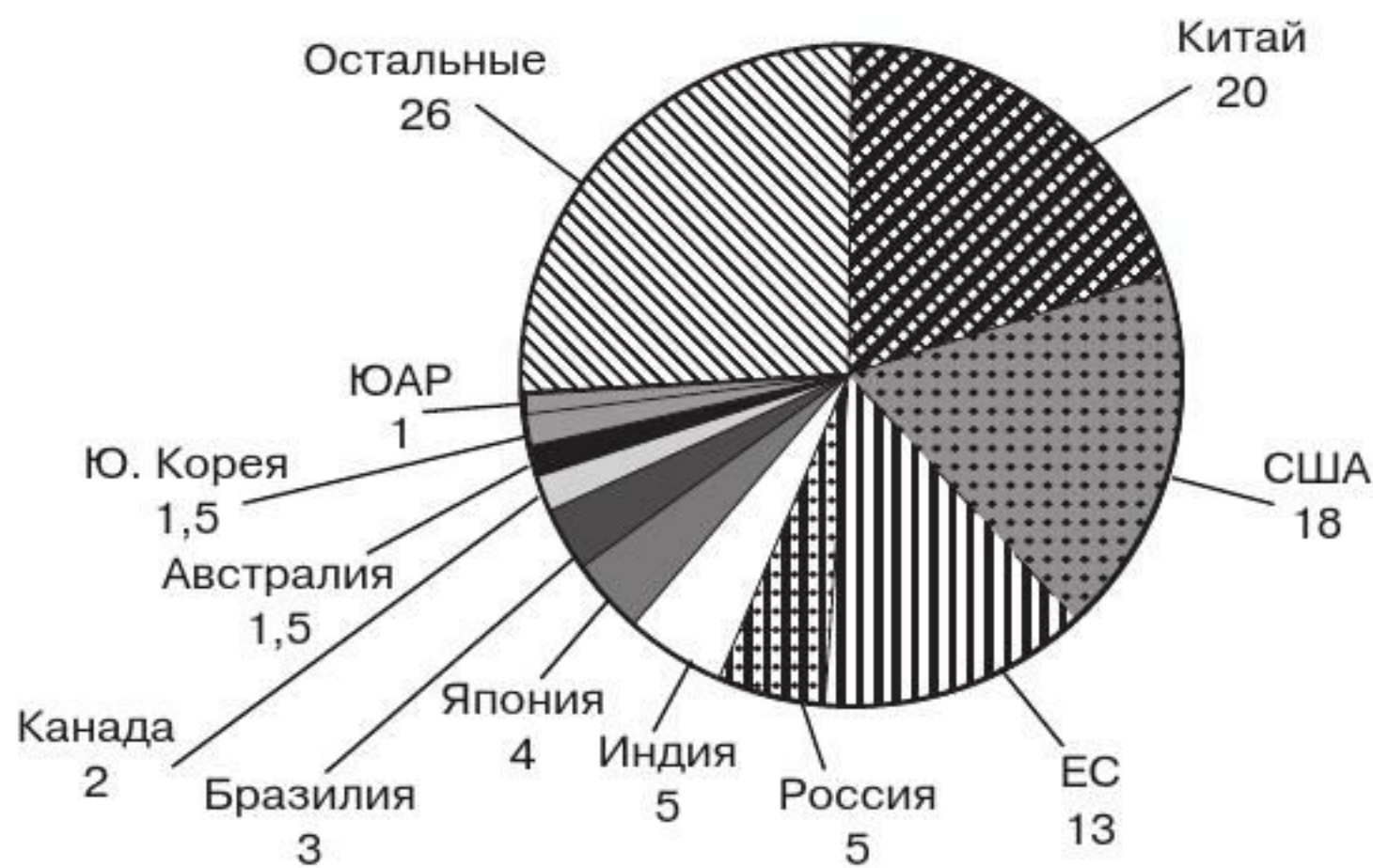


Рис. 29. Доля стран в общемировом выбросе парниковых газов (%) в первом десятилетии XXI в.



Итак, очевидно, что за приблизительно половину общемировой эмиссии парниковых газов ответственны три современных экономических гиганта — Китай, США и страны Европейского Союза, на долю десятка прочих развитых стран (в том числе России) приходится около четверти эмиссии и оставшаяся четверть отражает вклад «остального мира».

В соответствии с существующими правилами, ежегодно в секретариат Рамочной конвенции по изменению климата поступают национальные доклады об эмиссии парниковых газов. В таблице 7 представлены выборочные сведения об измене-

¹ Изменение климата. № 6 (15). Бюллетень Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2010. 19 с. (<http://meteorf.ru>.)

Таблица 7. Изменение выбросов антропогенных парниковых газов в периоды с 1990 по 2007 г. и с 1990 по 2008 г., а также величина выбросов в 2008 г. (без их учета при землепользовании и в лесном хозяйстве)

Страна	Изменение, % за период 1990–2007 гг.	Выбросы в 2008 г., млн т в экв. CO ₂	Изменение, % за период 1990–2008 гг.
Австралия	+29,3	549,5	+31,3
Великобритания	-16,9	631,7	-18,5
Германия	-22,3	958,0	-22,2
Испания	+53,8	405,7	+42,3
Италия	+6,9	541,5	+4,7
Канада	+26,8	734,4	+24,1
Россия	-34,1	2228,8	-32,9
США	+16,5	6924,5	+13,3
Украина	-52,5	427,7	-53,9
Франция	-5,5	531,8	-6,1
Япония	+7,9	1281,8	+1,0

нии выбросов в 2007 и 2008 гг. (относительно уровня 1990 г.) для стран-участников Киотского протокола, чьи выбросы превысили 400 млн т. в экв. CO₂/год (об эквиваленте CO₂ см. в разделе «Путешествие в мир предположений»). Исключение составляют США, которые, как известно, принимали участие в разработке положений Киотского протокола, но в дальнейшем его не ратифицировали. Напомним обязательства прочих упомянутых в таблице стран: изменения выбросов парниковых газов, по сравнению с выбросами 1990 г., не должны превосходить для стран ЕС и Великобритании –8%, для Канады и Японии –6%, для России и Украины 0%, для Австралии + 8%.

Достаточно даже беглого взгляда на табл. 7¹, чтобы убедиться в том, что не так много стран могут похвастаться выполнением взятых на себя обязательств. Впечатляют успехи в сокращении выбросов парниковых газов Украины и России, однако не секрет, что достигнуты они главным образом в результате сворачивания производства и разрыва экономических связей после развала СССР. Благополучны в этом отношении Германия, Великобритания, с некоторой натяжкой — Франция... Все, список исчерпан! В то же время сравнение 2-го и 4-го столбцов таблицы 7 показывает, что большинство стран (за исключением Австралии и России) сократили выбросы парниковых газов в 2008 г. относительно 2007 г. — экономический кризис, однако! Не связанные Киотскими обязательствами и обладающие известной экономической автономией Китай и Индия, напротив, наращивали эмиссию парниковых газов. Так, согласно публикации в ежегодном статистическом сборнике по мировой экономике, в 2009 г. выбросы парниковых газов в Китае увеличились на 9% и достигли 7500 млн т в эквиваленте CO₂. В 2010 г., согласно пресс-релизу Международного энергетического агентства, выбросы углекислого газа оказались рекордно высокими — 30,6 Гт, предыдущий рекорд — 29,3 Гт, был зафиксирован в 2008 г., в 2009 г. выбросы оказались меньше из-за финансового кризиса (для сравнения: в 1990 г. такой выброс был порядка 6 Гт).



Подведем краткий итог. Среди стран-участниц Киотского соглашения наметилась тенденция к уменьше-

¹ Составлена на основании данных, приведенных в: Изменение климата. № 6 (15). Бюллетень Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2010. 19 с.

нию эмиссии парниковых газов, хотя фактический график выполнения договоренностей заметно расходится с утвержденным. Два крупнейших эмитента — Китай и США — пребывают вне Киотского договора, при этом США сокращают выбросы, а Китай их интенсивно увеличивает. И главное: ограничения, заложенные в Киотский протокол (и с учетом Китая и США, и без них), недостаточны для значительного снижения темпа глобального потепления, не говоря уже о его прекращении.

Самое время строить планы на будущее. Читатели постарше наверняка помнят практиковавшееся в СССР пятилетних «планов громадье» с последующими помпезными победными реляциями. Нет СССР — закончилась эпоха пятилеток? Отнюдь, идею убить нельзя! И вот уже правительства мировых держав строят планы светлого (читай: незагрязненного) будущего для атмосферы сроком на 10 лет. Итак, согласно Бюллетеню Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (см. сноску на с. 226), предполагаемое сокращение выбросов парниковых газов к 2020 г. относительно 1990 г.: США — на -4% (-17% относительно 2005 г.), Канада — на +3% (-17% относительно 2005 г.), ЕС — от -20 до -30%, Россия — от -15 до -25%, Япония — на -25%, Австралия — от -2 до -22% (от -5 до -25% относительно 2005 г.), Новая Зеландия — от -10 до -20% (список можно продолжать). Так что же, засучим рукава и за работу? Не совсем так. В большинстве случаев реализация заявленных планов (по крайней мере, это касается верхней границы указанных интервалов) увязана с условием непрямого принятия обязательств о существенных сокращениях другими развитыми

и развивающимися странами¹. Условие, согласитесь, справедливое. Но еще небезызвестный монтер Мечников из «Двенадцати стульев» отмечал, что «согласие есть продукт при полном непротивлении сторон». Мучительное многолетнее принятие Киотского протокола, равно как и непринятие каких-либо дальнейших действий по сокращению эмиссии парниковых газов в Копенгагене (Дания, 2009 г.), Канкуне (Мексика, 2010 г.), и в Дурбане (ЮАР, 2011 г.) порождают сомнение в скорейшем отыскании устраивающего всех компромисса.

А что же Китай и Индия? Нет, они не остались в стороне, и в свою очередь планируют уменьшить *углеродоемкость ВВП* (соотношение количества выбрасываемых в атмосферу парниковых газов на единицу произведенного ВВП) на соответственно 40–45% и 20–25% к 2020 г. относительно 2005 г. Зачем понадобилась такая необычная единица отсчета? Любой мало-мальски опытный статистик подтвердит, что результат подсчета почти полностью зависит от того, *как* считать. Если вспомнить, что представляла собой экономика КНР по сравнению с экономиками развитых европейских стран и США в 1990 г., и учесть рывок, совершенный ею за два последних десятилетия, станет ясно, что сопутствующее росту экономики увеличение эмиссии парниковых газов за этот период исчисляется несколькими сотнями процентов. Признать это неприятно, однако... Например, доли современных выбросов парниковых газов Китаем и США близки — 20 и 18% (см. рис. 30),

¹ Справедливости ради, заметим, что США намереваются реализовать свою программу независимо от каких-либо внешних условий, а Канада готова повторить обязательства США. Россия, наряду с условием принятия юридически значимых обязательств по сокращению эмиссий всеми крупнейшими эмитентами, настаивает на надлежащем учете потенциала российских лесов как поглотителя углекислого газа.

но население Китая примерно в 4 раза больше. Составив пропорцию, легко убедиться, что на каждого американца приходится в 3,6 раза бóльшая масса выброшенных парниковых газов, чем на одного жителя Поднебесной. И если поставить этот факт во главу угла, то какая из стран должна объявить своей приоритетной задачей сокращение эмиссии? Правильно, США! Другой аргумент китайской стороны заключается в следующем. Изготовленные в Китае товары поставляются и продаются по всему миру. В процессе их производства происходит выброс парниковых газов. Таким образом, потребности населения, скажем, Германии или тех же США отчасти удовлетворяются китайскими товарами, а значит, эти страны «экономят» на эмиссии парниковых газов, которую им пришлось бы осуществить, производись эти товары на их территории. Следовательно, необходим перерасчет выбросов парниковых газов в пользу Китая. Аргументы аргументами, но тем не менее в Китае понимают: энергозатратность их экономики должна быть значительно снижена.

Но природе нет дела до способов подсчета и политических игр. И не важно, «китайский» ли это килограмм парниковых газов, «американский» или «европейский». Важен лишь общий объем выбросов, «размер» и здесь имеет первостепенное значение!

Обратимся теперь к реалиям нашей страны. Что думают отечественные политики о сложившейся ситуации? Ответ на этот вопрос в значительной степени был дан в декабре 2009 г., когда состоялось подписание Климатической доктрины Российской Федерации «Изменения климата и устойчивое развитие РФ», в которой изложены цель и принципы политики нашей страны в области климата, ее основные положения и пути реализации. Ниже приведен краткий перечень посту-

латов доктрины. Учитывая официальный характер документа, несмотря на некоторую «тяжеловесность» языка, стиль его изложения был сохранен. Климатическая доктрина задает стратегические ориентиры и основы формирования и осуществления действий внутри и вне страны на правовых и научных основах. Последние признаются недостаточными и нуждающимися в развитии по следующим направлениям:

- 1) оценки прошлого и современного состояния климатической системы;
- 2) оценки антропогенного влияния на нее;
- 3) прогноз будущих изменений климата и их воздействие на качество жизни населения РФ;
- 4) оценки степени уязвимости и защищенности экосистем, экономики, населения государственных институтов и инфраструктуры к изменениям климата и возможностей адаптации к ним;
- 5) оценки возможностей смягчения антропогенного воздействия на климат.

В Климатической доктрине Российской Федерации достаточно подробно изложены основные принципы политики в области климата:

- 1) глобальный характер интересов РФ в этой области;
- 2) приоритет национальных интересов;
- 3) государственная поддержка наблюдений за климатом, фундаментальных и прикладных исследований в этой и смежных областях, использования их результатов для оценки рисков и выигрышей в последствиях изменений климата;
- 4) ясность и открытость политики РФ в этой области;
- 5) признание необходимости действий внутри страны и в международных программах в условиях неопределенности как будущих изменений климата, так и их последствий;
- 6) всесторонность учета этих последствий;
- 7) предосторожность при планировании и реализации мер по защите человека, экономики и государства от неблагоприятных последствий изменений климата;
- 8) гибкость политики РФ в области климата, необходимость ее регулярной корректировки.

В основные задачи политики РФ в области климата помимо укрепления и развития ее информационной и научной основ включены разработка мер по адаптации к изменениям климата и смягчению их последствий, участие в соответствующих международных мероприятиях, причем приоритет отдается упреждающей адаптации.

В Климатической доктрине Российской Федерации отмечаются особенности страны, определяющие возможные перемены при изменении климата. К негативным переменам относятся ожидаемый рост числа и интенсивности засух в одних регионах и наводнений в других, рост пожароопасности в лесах, деградация вечной мерзлоты, нарушение экологического равновесия и рост расхода энергии на кондиционирование в летний сезон. Среди положительных — сокращение отопительного сезона, улучшение ледовой обстановки на реках и морях (прежде всего, Арктики), расширение зоны растениеводства. Достаточно высокий адаптационный потенциал страны связан с ее большой территорией, значительными водными ресурсами и небольшой численностью населения в регионах, «уязвимых» для изменения климата. Но эти преимущества превращаются в недостатки при транспортировке больших объемов энергии на значительные расстояния (холодный климат, несмотря ни на что!).

Проведение политики в области климата осуществляется федеральными органами и органами государственной власти субъектов РФ. Участвуют и органы местного самоуправления, частные организации, профессиональные и общественные организации, средства массовой информации.

При разработке и формулировании Климатической доктрины Российской Федерации были составлены проекты проблем, входящих в сферу ответственности федеральных министерств и ведомств. Комплексный

план научных исследований погоды и климата до 2020 г., одобренный научной конференцией в Москве (август 2010 г.), содержит список основных направлений исследований с указанием участвующих ведомств и международных программ. Эти направления входят в комплексы: А. Диагноз (9 направлений), Б. Прогноз (4 направления), В. Воздействия (6 направлений), Г. Адаптация и смягчение (5 направлений); α. Мониторинг (3 направления), β. Моделирование (3 направления), γ. Обслуживание потребителей (4 направления), δ. Арктика (9 направлений). Пояснения и комментарии к этому плану содержатся в недавно опубликованном сборнике Российской Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Оценка макроэкономических исследований изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу» (Москва, 2011).

Со сходными заявлениями и декларациями по проблеме изменения климата выступили многие страны в лице своих представителей разных уровней: от правительственных комитетов по охране окружающей среды (США) до групп специалистов и политиков. Но Климатическая доктрина Российской Федерации, подписанная президентом страны, наиболее весома по статусу.



Необходимо еще раз подчеркнуть, что если ранее наука о климате существовала в гидрометеорологических службах как второстепенный раздел наук об атмосфере, вспомогательный для прогнозов погоды, в условиях глобального потепления проблема изменений климата (а одновременно условий хозяйствования и жизни людей) выдвигается в разряд наиглавнейших, достигнув государственного и интернационального масштабов.

Большинство государств выступили с изложением своих позиций по данной проблеме. На этом «фоне» определяющую

роль стали играть политические аспекты климатологии. На безотлагательной необходимости соответствующих политических решений настаивают ведущие страны Европейского союза. При этом особая роль в лоббировании политических решений, обусловленных изменениями климата, принадлежит Великобритании, климатическая политика которой строится при тесном взаимодействии научного сообщества и правительства. Именно в этой стране был опубликован известный *Доклад Стерна (2006 г.)*, посвященный экономике изменений климата.

Целью доклада было — оценить, какие финансово-экономические последствия влечет за собой изменение климата. В нем исследуются экономические аспекты стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на относительно безопасном уровне, который позволил бы избежать серьезных катастроф и неоправданно высоких затрат. Руководитель коллектива авторов сэр Николас Стерн — глава государственной экономической службы и советник правительства Великобритании по экономике и развитию ¹.

Многие другие развитые страны также выражают свою озабоченность происходящими изменениями климата и согласны с необходимостью принятия мер по сокращению эмиссии парниковых газов и мер по адаптации природы и общества к происходящим и будущим изменениям климата. «Некиотские» США ведут активные исследования в области климатической проблемы и ее последствий.

Итак, благие намерения высказаны в мире почти единодушно. Однако хорошо известно, куда они могут привести... Хочется верить, что в данном случае исход будет куда как оптимистичнее.

¹ The Economics of Climate Change. The Stern Review. Nicholas Stern. Cabinet Office — HM Treasury. 2006. UK.



ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

■ ФУНДАМЕНТ БУДУЩИХ СВЕРШЕНИЙ ■

Время делает свое дело. А вы, люди?

С. Е. Лец

ЧТО МОЖНО СДЕЛАТЬ ДЛЯ БЛАГОПРИЯТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Строить планы, безусловно, несравнимо легче, чем претворять их в жизнь. К сожалению, достижения быстрого эффекта в противоборстве с глобальным потеплением ждать не приходится.



Даже при полном прекращении выбросов парниковых газов изменение климата будет продолжаться в течение нескольких веков, до тысячелетия (!) — так велика инерция системы.

Поэтому наш удел — постепенно, шаг за шагом, способствовать улучшению экологической ситуации и при этом, что психологически очень важно, видеть плоды своих усилий. Какие же пути противостояния глобальному потеплению предлагают специалисты? Выделим основные векторы движения и укажем, какая работа «будет делаться и делается уже».

Пожалуй, наиболее существенным является переход на экологически чистые возобновляемые источники энергии. Выше уже говорилось, что вклад энергетического сектора

экономики в эмиссию парниковых газов достигает одной четверти. Сегодня альтернативой сжиганию нефтепродуктов и природного газа выступают солнечные и ветряные энергоустановки (см. рис. 24 и 25 цв. вклейки).

Согласитесь, это так характерно для человеческой природы — попытаться удовлетворить свои энергетические запросы за счет «добротого дяди» — Солнца. Подобная идея витает в воздухе давно: уже в 1767 г. швейцарский ученый Г. де Соссюр построил первый в мире солнечный коллектор и использовал его для разогрева воды и пищи. Однако для реального исполнения этой мечты Солнце должно следовать лозунгу, провозглашенному В. Маяковским, — «светить всегда, светить везде». В переводе с возвышенно-поэтического языка на канцелярско-прозаический: гелиоэнергетические установки целесообразно строить там, где солнечное сияние составляет не менее 2000 часов в году, а интенсивность суммарной радиации не ниже 600–800 Вт/час. Понятно, что Шпицберген и «солнечный Магадан» сразу отпадают. Сегодня мировыми лидерами по выработке энергии солнечными электростанциями являются США, а в Европе — Испания. В Испании уже работают 9 солнечных заводов и еще 25 солнечных электростанций строится. Например, в Альмерии, над которой безоблачное небо свыше 300 дней в году, станция «Цеза-1» имеет мощность 0,5 МВт (в 2010 г. доля солнечной энергии составляла 17,7% общего количества электроэнергии, произведенной в Испании).



В целом доля гелиоэнергетики в мировой выработке энергии пока невелика (около 2,7%), а интерес к ней возникает только во время нефтяных кризисов. Нынешний же пик интереса спровоцирован недавними трагическими событиями на Фукусиме (Япо-

ния), поставившими под сомнение перспективы атомной энергетики, по крайней мере в сейсмоопасных районах.

В сложившихся условиях возник уже упоминавшийся нами план Desertec, предусматривающий строительство солнечных тепловых электростанций в пустынях Северной Африки и Ближнего Востока.



Специалисты утверждают, что для покрытия потребности в электроэнергии, не только местной, но и европейской, достаточно застроить всего 0,3% площади этих пустынь, а с площади в один квадратный километр можно за год получать 300 ГВт/час электроэнергии (потребление такого количества солнечной энергии позволит сократить выбросы CO₂ на 200 тыс. т в год).

Принцип работы солнечных тепловых электростанций заключается в следующем: вода, нагретая солнечными лучами, превращается в пар, который приводит в действие турбину, генерирующую электроэнергию. Использование в солнечных тепловых электростанциях системы зеркал позволяет сконцентрировать солнечную энергию и тем самым повысить коэффициент полезного действия установки.

Реализация плана Desertec рисует радужные перспективы не только для стран региона, но и для европейцев, надеющихся к середине столетия покрыть 60–80% своих потребностей в энергии за счет возобновляемых ее источников, в том числе на 20% — с помощью гелиоэнергетики. При этом цена одного киловатт-часа должна снизиться с сегодняшних 23–27 евро-

центов до 5. Тут, правда, нас «терзают смутные сомнения»: как известно, «голь (на эту роль идеально подходит вечно нуждающийся в средствах Минфин) на выдумки хитра», поэтому возможно появление какого-либо дополнительного налога, например на «амортизацию Солнца». Ложкой дегтя в этой бочке арабо-европейского меда является политическая нестабильность в регионе. Перебои поставок электроэнергии в Европу, возникни серьезная напряженность, могут принять такие масштабы, что не раз возникавшие в первом десятилетии XXI в. энергетические проблемы, связанные с российско-украинским газовым конфликтом, покажутся «детской шалостью», о которой даже неудобно вспоминать.

Альтернативой проекту Desertec может оказаться названный по имени эллинского бога Солнца греческий проект производства солнечной электроэнергии «Гелиос»: в соответствии с ним предполагается получать до 2,2 ГВт к 2020 г. и 10 ГВт к 2050 г. Греки рассматривают реализацию этого масштабного проекта как один из путей вывода страны из ее нынешнего тяжелого финансового положения и уже сегодня высказывают готовность экспортировать в будущем значительную часть произведенной электроэнергии в намеревающуюся отказаться от атомной энергетики Германию¹. Что ж, поживем — увидим, но, по мнению экспертов, рынок солнечных тепловых электростанций должен удвоиться уже в ближайшее десятилетие. Очевидно, что в России эксплуатация подобных установок возможна лишь в южных областях.

¹ Немцы педантично начали претворять этот план в жизнь. За первое полугодие 2012 г. 25% всей энергии было получено из возобновляемых источников. Для сравнения: годом раньше вклад возобновляемых источников в Германии составлял 21%. К 2050 г. в этой стране планируется довести долю энергии, получаемой из возобновляемых источников, до 80%.



Самым главным альтернативным источником энергии является ветер.

Ветроэнергетика развивается наиболее быстрыми темпами. Ветер, напомним, возникает из-за неравномерности нагрева Солнцем различных географических зон на Земле. Идея преобразовать кинетическую энергию ветра в другие ее формы возникла очень давно. Парус использовался с незапамятных времен для перемещения по водным поверхностям, ветряные мельницы, преобразовывавшие энергию ветра в механическую, существовали в Египте уже во II–I вв. до н.э., в Западной Европе они появились в XIII в. благодаря крестоносцам. В XVI в. на их основе начали строить городские водонасосные станции: в 1526 г. такая станция появилась в Толедо — в ту пору столице Испании, в 1582 г. — в Лондоне, в 1608 г. — в Париже. Ветряные мельницы, производящие электрическую энергию, изобретены в Дании в XIX в. Во время Второй мировой войны в Дании насчитывалось несколько десятков ветроэлектро-станций, дававших 80 млн кВт/ч электроэнергии. В 1968 г. в Австралии эксплуатировались более 250 тыс. ветроустановок. В конце 2010 г. общая мощность всех ветрогенераторов в мире достигла 196,6 ГВт, ими было произведено 430 ТВт/ч (тераватт в час, 1 тераватт = $1 \cdot 10^{12}$ Вт/час) электроэнергии, что составило 2,5% всей произведенной в мире (рис. 30).

При этом на Европу приходится 44% ветряных установок, на Азию и Северную Америку — 31% и 22% соответственно.

Развивать большую ветроэнергетику (мощностью более 1 МВт) целесообразно в районах, где средняя годовая скорость ветра больше 8 м/с и годовое число часов, когда установка

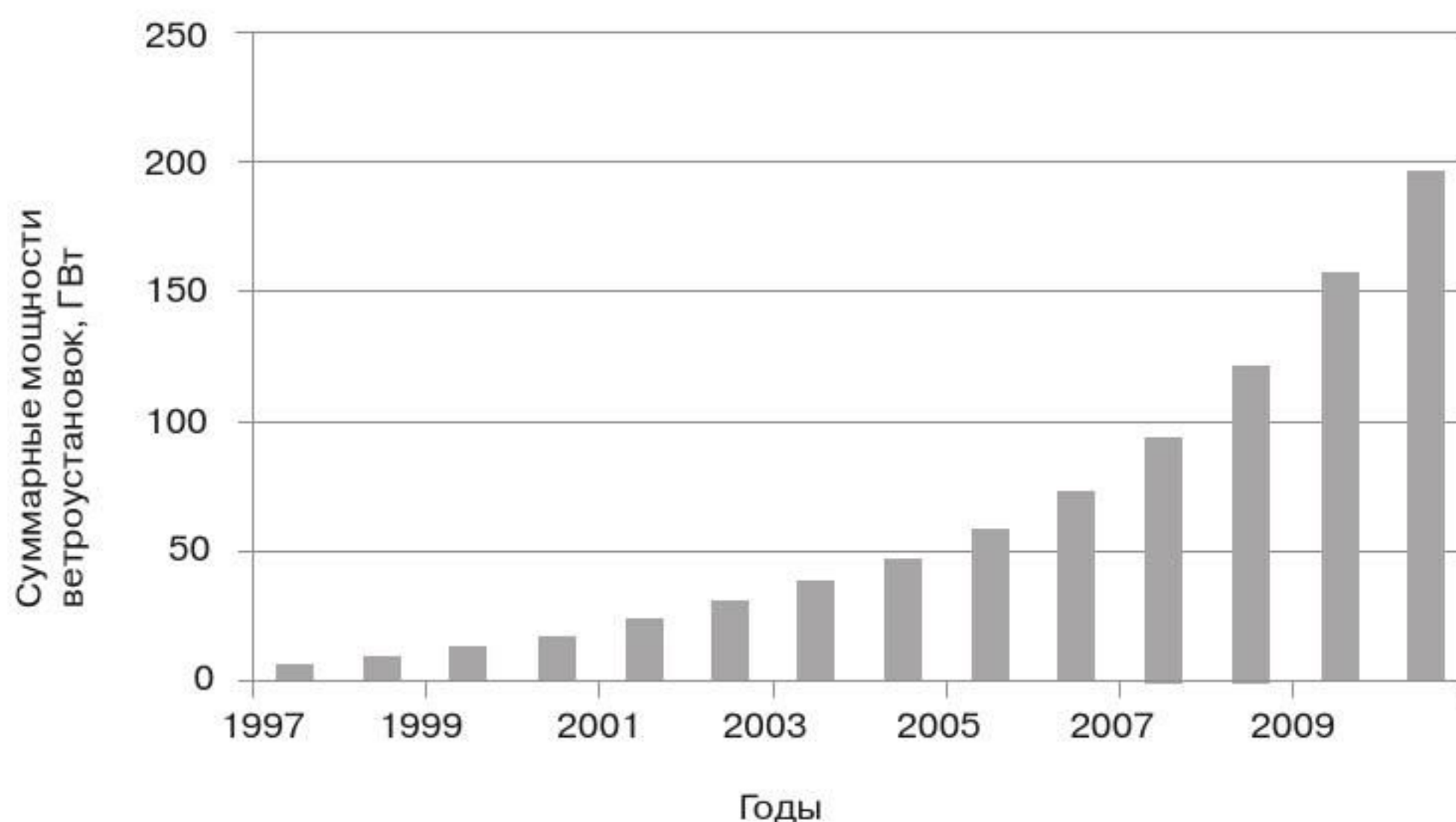


Рис. 30. Суммарные мощности ветроустановок (ГВт) в период 1997–2010 гг., по данным Международного энергетического агентства

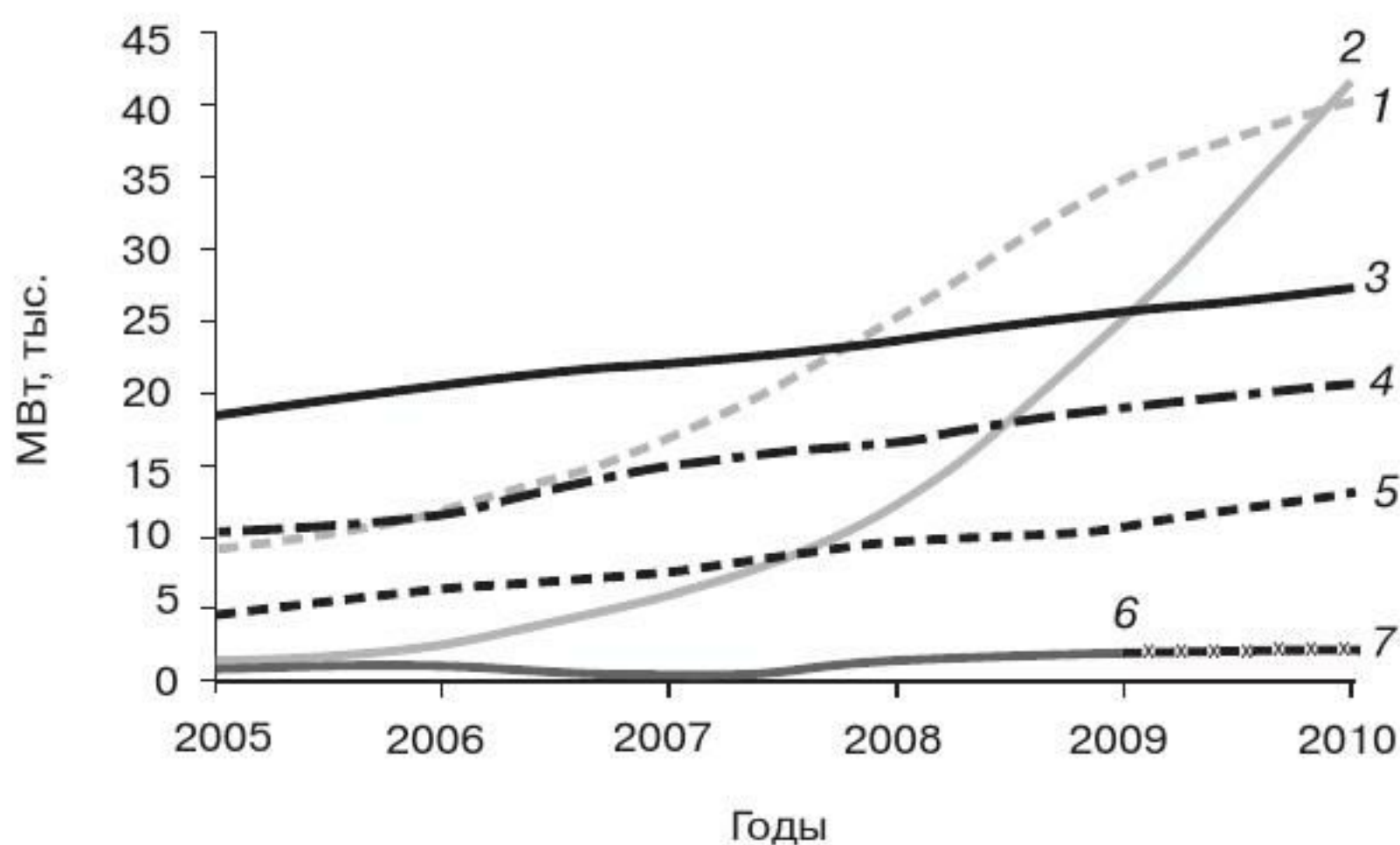


Рис. 31. Суммарные установленные мощности (в МВт — мегаваттах) по странам мира в 2005–2010 гг., согласно данным Европейской ассоциации ветроэнергетики и Совета по глобальной ветроэнергетике:
 1 — США, 2 — Китай, 3 — Германия, 4 — Испания, 5 — Индия, 6 — Япония, 7 — Австралия

может работать, превосходит 2000. Хотя ветрогенератор начинает производить электроток уже при скорости ветра 3 м/с и отключается при скоростях свыше 25 м/с. Оптимальная же скорость составляет 15 м/с, при ней достигается максимальная мощность выработки электроэнергии. В 2009 г. 82% ветрогенераторов в мире имели мощность 1,5–2,5 МВт.



Достоинства ветроэнергетики довольно очевидны: ветры дуют повсеместно и их ресурс практически неисчерпаем («ветрозапасы» в 100 раз превосходят запасы гидроэнергии всех рек Земли). Себестоимость одного киловатт-часа, генерируемого ветроустановками, ниже, чем производимого угольными электростанциями: к примеру, в США это 2,5–5 центов (в зависимости от силы ветра) и 4,5–6 центов соответственно (рис. 25 цв. вклейки).

В одной из популярных брошюр, изданных в США, помещен рисунок, на котором изображен ветродвигатель и под ним — корова. В подписи к рисунку говорится, что стоимость энергии, производимой ветроэнергетической установкой, равна стоимости молока от этой коровы.

Наличие ветров в любой точке земного шара обуславливает ненужность транспортировки произведенной электроэнергии к месту ее потребления. Это обстоятельство особенно важно для труднодоступных районов (Крайний Север, пустыни, горы), а также для небольших населенных пунктов с ограниченными (менее 100 кВт) потребностями в электроэнергии. Все, кто путешествовал по Европе, наверняка видели вдоль дорог ряды таких ветродвигателей. Энергетики говорят, что при малых скоростях ветра (3–12 м/с) наиболее эффективны ветрогенераторы с вертикальной осью вращения, к тому же

они бесшумны, имеют значительно больший срок службы и выдерживают порывы ветра до 60 м/с.

Главный недостаток ветроэнергетики заключается в непостоянстве этого самого ветра, в результате чего возникает насущная необходимость в накоплении произведенной электроэнергии. Поскольку мощность ветрового потока пропорциональна кубу его скорости, то даже небольшие ее изменения влекут за собой значительные колебания мощности (например, при увеличении скорости ветра вдвое мощность возрастает в $2^3 = 8$ раз). Вышеупомянутый недостаток ветроэнергетики заметно снижает ее привлекательность. Пока доля ветроэнергетики в общем производстве энергии невысока, такой энергоисточник является хорошим подспорьем, но когда ее процент становится высоким, возникает проблема надежности производства электроэнергии, ведь всегда существует вероятность отсутствия ветра или его слабой силы. Тем не менее в 2009 г. лепта ветроэнергетики достигала в Дании — 20%, в Португалии — 16%, в Ирландии — 14%, в Испании — 13%, в Китае — 1,3% (но согласно перспективному плану, уже к 2020 г. суммарная мощность китайских ветроустановок должна достигнуть 80–100 ГВт). Европейский союз к 2020 г. собирается нарастить мощности до 180 ГВт и довести выработку электроэнергии с помощью ветра до 500 ТВт/ч.

В России суммарная мощность ветроустановок в 2009 г. оценивалась в 17–18 МВт (при том что их технический потенциал составляет 50 ГВт/ч/год). Энергетические ветровые зоны в нашей стране расположены на побережьях Северного Ледовитого океана и омывающих территорию страны морей. Максимальная средняя скорость ветра (осень — зима) совпадает с периодом наибольшей потребности в энергии. Около трети российских ветроустановок сосредоточено на Дальнем Восто-

ке, примерно столько же — на Крайнем Севере и в Западной и Восточной Сибири. Самая крупная ветроэлектростанция России находится около поселка Куликово в Калининградской области, ее мощность составляет 5,1 МВт. В последние годы увеличение российских мощностей ветроустановок происходит за счет маломощных (1–5 кВт) индивидуальных энергосистем.

Высота современных ветроустановок составляет 50–110 м. Очень заманчиво расположить их на высотах верхней тропосферы, где характерные скорости ветра в 10–15 раз больше, чем используемые ныне приземные, однако это дело будущего. Пока же используемые установки позволяют сократить выбросы парниковых газов в атмосферу (на мощность в 1 МВт приходится уменьшение выброса на 1800 т CO₂, 9 т SO₂ и 4 т оксидов азота). Специалисты надеются, что при выполнении среднесрочных планов развития ветроэнергетики, к 2050 г. произойдет сокращение ежегодных выбросов CO₂ на 1,5 млрд т.

Электрическую и тепловую энергию получают также за счет тепловой энергии недр Земли (*геотермальная энергетика*). Однако это возможно только в вулканических регионах мира. Имеющаяся в недрах Земли на относительно небольших глубинах вода нагревается выше температуры кипения и поднимается по трещинам (или пробуренным скважинам) к земной поверхности, где используется как непосредственно для горячего водо- и теплоснабжения, так и для выработки электроэнергии. Горячие источники встречаются также и в районах, где нет вулканической активности, но в этом случае температура подземных вод заметно ниже, и потому она служит лишь источником тепла и применяется в лечебно-медицинских процедурах.

Суммарные мощности геотермальных станций в мире относительно невелики, они составляли 9,73 ГВт в 2007 г.

и 10,71 ГВт в 2010 г. Крупнейшим производителем геотермальной электроэнергии являются США, мощность их станций, расположенных в Калифорнии и Неваде, в 2010 г. достигала 3,09 ГВт (на них было произведено примерно 16 млрд киловатт-часов, что соответствует нескольким десяткам процента от общего количества выработанной в США электроэнергии). За США следуют Филиппины, Индонезия, Мексика и Италия с мощностями 1,97; 1,20; 0,96 и 0,84 ГВт соответственно. Мощность российских геотермальных станций на Камчатке, Северном Кавказе и в Краснодарском и Ставропольском краях в 2010 г. измерялась 82 МВт. Прямо скажем, немного. В то же время запас разведанных российских термальных вод оценивается приблизительно в 300 тыс. км³/сутки, а в Западной Сибири, согласно некоторым публикациям, существует подземное озеро площадью 3 млн км² с температурой воды 70–90 °С. Если же говорить о вкладе геотермальной энергетики в общее производство электроэнергии, то по этому показателю лидирует «страна гейзеров» Исландия — 30% (ее столица Рейкьявик полностью обогревается теплом термальных вод), немного уступают ей Филиппины (27%), в почтительном отдалении — Сальвадор и Коста-Рика (по 14%).

Преимущество геотермальной энергетики заключается в практической неисчерпаемости ее источника и бесперебойной подаче горячей воды вне зависимости от сезона и погодных условий. Однако геотермальные воды содержат высокие концентрации токсичных химических соединений, вследствие чего возникает проблема с утилизацией отработанной воды, поскольку ею нельзя загрязнять естественные водоемы.

В России гелио-, термо- и ветроэнергетика пока развиты чрезвычайно слабо. Их интенсивное развитие планируется только на 2030 год. А «виноваты» большие запасы нефти, газа

и угля в России. Недаром за рубежом Россию называют «спящим гигантом», полагая, что, несмотря на большие запасы углеводородного и углеродного топлива, целесообразно развитие в нашей стране альтернативной энергетики: довольно быстрая окупаемость; возможность снабжения энергией районов, удаленных от основных ее источников; экономия на транспортировке энергии (что особенно важно из-за большой территории); отсутствие выбросов загрязняющих веществ; возобновляемость энергии и т. д.

Другие направления смягчения процесса глобального потепления предложены М. Молина с соавторами¹. Они рассматривают возможность проведения нескольких так называемых «быстрых акций» (fast-actions). Предполагается, что подготовка таких акций займет 2–3 года, 10–15 лет понадобится для их реализации, результаты же скажутся спустя несколько десятилетий.



Первая из таких «быстрых акций» — расширение и ужесточение ограничений Монреальского Протокола.

Согласно Велдерсу с соавторами², в период с 1990 по 2010 г. благодаря действию Монреальского протокола в атмосферу

¹ Molina M., Zaelke D., Madhava Sarma K., Andersen S. O., Ramanathan V., Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. V. 106. No. 49. P. 20616–20621. 2009.

² Velders G. J. M., Andersen S. O., Daniel J. S., Fahey D. W., McFarland M. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. V. 104. No. 12. P. 4814–4819. 2007.

уже не было выброшено парниковых газов в размере примерно 135 млрд т в эквиваленте CO_2 (сравнить с данными таблицы 7). Проводимые в настоящее время измерения подтверждают начавшееся восстановление озонового слоя (в основном, в полярных областях). Модельные исследования показывают, что содержание озона в атмосфере вернется к своему уровню 1990 г. ближе к середине XXI в. Однако существует другая большая группа химических веществ следующего поколения — *гидрофторокарбоны*, которые не разрушают атмосферный озон, но, как и хлорфторуглероды и гидрофторхлоруглероды, относятся к парниковым газам, как правило, с очень высокими потенциалами глобального потепления (ПГП), в сотни и тысячи раз превышающими ПГП углекислого газа, равный единице (см. таблицу 2). Суммарный вклад всех этих веществ пока невелик — около 1,1% (Ф-газы на рис. 28, а). Но рост выбросов гидрофторокарбонов в атмосферу происходит очень быстро. Поэтому предлагается ускорить выведение из обращения подпадающих под ограничения Монреальского протокола гидрофторхлоруглеродов и создать стимулы для замещения гидрофторокарбонов с высокими ПГП на газы с более низкими ПГП. Такая работа уже ведется, в частности сообщается, что химические компании анонсировали отказ от использования HFC-134a (CH_2FCF_3 , его ПГП = 3300 для 20-летнего периода) в автомобильных кондиционерах и переход на хладагенты с ПГП, меньшими 5 (HFO-1234yf — $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$ или естественные гидрокарбоны) спустя лишь несколько недель после выхода Директивы специальной комиссии Европарламента в 2006 г.



Вторая «быстрая акция» связана с сокращением эмиссии сажи (black carbon), образующейся при неполном сжигании природного топлива и биомассы.

Как вы помните, сажа снижает альбедо Земли, тем самым способствуя ее дополнительному нагреву. Наиболее критично это в областях, покрытых снегом и льдом, — в полярных регионах, в Гренландии, на Гималайско-Тибетском леднике и др., так как вызывает ускорение таяния ледяного покрова. По оценкам М. Якобсона¹, глобальное потепление на 15–30% обусловлено именно эмиссией сажевых частиц. Результат от уменьшения выбросов сажи может сказаться очень быстро, поскольку время жизни сажи в атмосфере не превышает нескольких недель. Снижение эмиссии сажи при работе дизельных двигателей может дать значительный эффект.



Третья «быстрая акция» заключается в уменьшении содержания озона в тропосфере.

Как известно, озон — токсичный парниковый газ, он образуется в ходе различных фотохимических реакций, наиболее эффективно — в загрязненной атмосфере, богатой «предшественниками» (precursors) озона: монооксидом углерода CO, оксидами азота NO_x, метаном CH₄ и др. В сравнении с доиндустриальной эпохой концентрация тропосферного озона выросла приблизительно на треть, а его вклад в глобальное потепление составляет примерно пятую часть от вклада CO₂². Сокращение содержания тропосферного озона видится уже упоминавшимися Молина и его коллегами посредством совер-

¹ Jacobson M. J. Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation. Cambridge University Press. N. Y. 339 p. 2002.

² Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Ред. Пачаури Р. К., Райзингер А. и др. МГЭИК. Женева, Швейцария, 2007. 104 с.

шенствования технологий, включая использующиеся в судо-
вождении и авиации. Если бы удалось уменьшить эмиссию CO
и NO_x вдвое, вклад тропосферного озона в глобальное потеп-
ление снизился бы на 10–20%.



Наконец, четвертая «быстрая акция» ориентирована
на улучшение методов ведения лесного хозяйства
и землепользования: в результате дыхания растений
углекислый газ удаляется из атмосферы, которая
при этом обогащается кислородом.

У этой «быстрой акции» вряд ли найдутся серьезные про-
тивники. А претворение ее в жизнь не требует каких-либо
международных согласований, хотя, конечно, использование
накопленных наработок (в том числе, и зарубежных) можно
только приветствовать. Эта «акция» особенно важна для Рос-
сии, обладающей огромными лесными угодьями.

Высказанная в 2009 г. идея «быстрых акций» нашла отклик
у политиков уже в начале 2012 г., когда сначала шесть стран
(Бангладеш, Гана, Канада, Мексика, США и Швеция) создали
нацеленную на реализацию этой идеи коалицию, а затем к ней
присоединились в полном составе страны «Большой восьмер-
ки». В намерения коалиции входит поддержка глобальных,
региональных и национальных усилий, направленных на сни-
жение содержания в атмосфере «короткоживущих климатиче-
ских загрязнителей» (в оригинале — Short-Lived Climate Pol-
lutants): большой группы гидрофторуглеродов, рассеивающих
и сажесодержащих аэрозолей, тропосферного озона, а так-
же метана. Поддержку предполагается осуществлять путем
разъяснения опасности данных веществ, выдвижения новых
национальных инициатив, разработки и продвижения новых

технологий для смягчения последствий их влияния на экологию и климат планеты. Газета «Нью-Йорк таймс» назвала создание коалиции «вторым фронтом» в климатической войне, намекая на известный эпизод Второй мировой войны. Тем не менее пока инициатива коалиции выглядит скорее как импульсивный ответ на отсутствие значительного прогресса в международных переговорах по принятию нового направленного на защиту климата соглашения, чем хорошо просчитанный, подкрепленный комплексными научными разработками шаг.

Заметьте, целью всех «быстрых акций» является или снижение уровня загрязнения атмосферы (либо промышленными химикатами, либо сажей, либо «предшественниками» озона), или увеличение атмосферного стока главного парникового газа CO_2 . Совершенно иной подход исповедуется в идее *создания аэрозольного сернокислого экрана в стратосфере* («геоинжиниринг», от англ. *geoengineering*). Идея принципиальной возможности такого способа борьбы с глобальным потеплением, высказанная еще в 1970-е гг., принадлежит выдающемуся отечественному климатологу М. И. Будыко. Суть ее такова. Сернокислый аэрозоль в атмосфере, в отличие от сажи, не поглощает солнечную радиацию, а только отражает ее обратно в космос. Следовательно, его присутствие в атмосфере благоприятствует сокращению притока тепла к поверхности Земли, за которым и должно последовать похолодание. Кроме того, ввиду отсутствия поглощения солнечной радиации сернокислым аэрозолем, окружающий воздух не будет разогреваться. Заметное (порядка 1°C) похолодание, наблюдаемое примерно в течение полутора-двух лет после крупных извержений вулканов, сопровождаемых эмиссией большой массы сернокислого аэрозоля в атмосферу, подтверждает правильность

этой идеи. Эффективность такого экрана критически зависит от высоты его расположения. Дело в том, что в тропосфере сернокислый аэрозоль не может задерживаться надолго, поскольку вымывается осадками и оседает на поверхность Земли под действием силы тяжести. Зато характерное время его пребывания в стратосфере исчисляется годами. Казалось бы, все просто: помести необходимое количество сернокислого аэрозоля в стратосферу, и глобального потепления как не бывало. Но, увы, придется вспомнить и об эксклюзивном месте нахождения бесплатного сыра. Во-первых, для создания такого экрана понадобится производство огромного количества сернокислого аэрозоля (речь идет о массе порядка десятков мегатонн) и его доставка «по месту назначения». И это отнюдь не разовая акция. Модельные расчеты показывают, что необходимо постоянное поддержание существования экрана в поясах, покрывающих, как минимум, $2/3$ площади поверхности земного шара¹, что, кстати, возможно лишь при достижении соответствующего международного соглашения. Более того, приняв к исполнению создание аэрозольного экрана, мы становимся заложниками собственного решения: в дальнейшем от него уже нельзя будет отказаться, так как в этом случае, по некоторым оценкам², все вернется на круги своя, и темп глобального потепления быстро станет превосходить тот, который был до появления экрана. Во-вторых, еще из школьной программы известно, что «ничто не возникает

¹ Фролькис В. А., Кароль И. Л. Моделирование влияния параметров стратосферного аэрозольного экрана на эффективность компенсации парникового потепления глобального климата. Оптика атмосферы и океана. Т. 23. № 8. 2010. С. 710–722.

² Елисеев А. В., Мохов И. И. Эффективность предотвращения потепления климата с использованием контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу: оценки с климатической моделью ИФА РАН. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 2. 2009. С. 232–244.

из ничего и не исчезает бесследно». Рано или поздно выброшенный в стратосферу сернистый аэрозоль транзитом через тропосферу вернется к поверхности Земли. И его возвращение будет сопровождаться нарушением режима осадков, а также заметным закислением (изменением уровня pH в «кислую сторону») вод Мирового океана. Таким образом, воплощение идеи геоинжиниринга далеко не безобидно, поэтому всякий раз принятию взвешенного решения должна предшествовать всесторонняя научная экспертиза. Кроме того, создание стратосферного экрана, смягчая отчасти температурные проблемы, вовсе не решает проблему роста концентрации парниковых газов, прежде всего — CO₂, увеличение содержания которого приводит к закислению океана, нанося непоправимый урон морской биоте.

А если *изымать углекислый газ из воздуха* (и закачивать его в специально подготовленные резервуары)? Рассматривалась и такая идея. Ее претворение в жизнь — удовольствие не из дешевых. Да и его продуктивность невысока: согласно экспертным оценкам, это потребует затрат энергии, составляющих приблизительно половину энергии, получаемой атмосферой при выбросе CO₂, т. е. коэффициент полезного действия близок к 50%. Наконец, в последнее время все чаще высказывается предложение, смысл которого заключается в требовании сохранения каждой страной паритета между размерами выброшенного в атмосферу и изъятых из нее CO₂. Попросту говоря: «Напачкал — убери за собой!» Предлагаемое косвенным образом признает неэффективность применяемых ныне мер по обузданию глобального потепления. Но, с другой стороны, если это предложение станет основой будущего международного соглашения, у каждого государства появится выбор: сокращать выбросы парниковых газов путем

совершенствования технологий или развивать биологические стоки углекислого газа (в первую очередь, лесные угодья), а можно делать и то и другое. Подход в высшей степени здравый, но его простота — во многом кажущаяся. Ну, скажите, где, например, в густонаселенной и урбанизированной Европе можно выделить большие площади под лесонасаждения? Или же как богатой лесами России поддерживать их необходимый тонус (хорошо известно, что поглотителями углекислого газа являются исключительно молодые леса; старение же леса сопровождается его гниением и выделением в атмосферу того же CO_2)?

Подытоживая все вышесказанное, приходится признать, что сокращение антропогенных выбросов парниковых газов скорее всего останется основным путем борьбы с глобальным потеплением климата.



ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ЗА ВСЕ ПРИХОДИТСЯ ПЛАТИТЬ

Грандиозные вещи делаются грандиозными средствами. Одна природа делает великое даром.

А. И. Герцен

Экономика должна быть экономной.

Л. И. Брежнев, из речи на XXVI съезде КПСС

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БОРЬБЫ С ГЛОБАЛЬНЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ

Итак, рецептов борьбы с глобальным потеплением «выписано» немало. Какие-то из них применимы повсеместно (ветроэнергетика, сокращение эмиссии парниковых газов и пр.), иные — регионально, в частности гелиоэнергетика или лесопосадки (их невозможно осуществить, допустим, в пустынях или в Антарктиде). Одни предполагают относительно быстрый результат, другие — лишь в отдаленной перспективе. Однако обсуждать грядущие изменения климата и готовиться к ним сегодня приходится в условиях уже произошедших с ним перемен. Следовательно, наряду с попытками противостоять будущим нежелательным изменениям климата, необходимо принимать меры по адаптации (приспособлению) к современным климатическим реалиям. Примером таких адаптационных мер может служить широкое внедрение в последнее время систем кондиционирования воздуха в наших северных широтах. Не секрет, что и превен-

тивные, и адаптационные меры весьма затратны, а при больших финансовых вложениях сразу же всплывает вопрос об их рентабельности. Оттого-то с конца 1990-х гг. меркантильный Запад, особенно заокеанский, проявляет серьезную озабоченность соотношением «цены и качества» (в России такого рода подсчетами еще только начинают заниматься). В случае с Киотским протоколом средства, потраченные ведущими западноевропейскими государствами на его реализацию, в общем-то, не окупились, так как существенного сокращения темпов глобального потепления, на которое рассчитывали, так и не произошло. Вполне понятно, что второй раз наступить на широко распространенный садовый инвентарь они не хотят.

Однако оценки последствий влияния изменения климата на экономику сопряжены с колоссальными неопределенностями. С одной стороны, о грядущих изменениях климата мы говорим лишь как о *наиболее вероятных* (ориентируясь на их модельные прогнозы), поэтому не исключено, что в реальности они могут несколько обмануть наши ожидания. С другой стороны, подстраивание мировой экономики под уже произошедшие и предполагаемые изменения климата по-разному видится из Вашингтона, Брюсселя, Пекина или Москвы. Например, сохранение и развитие преимущественно углеводородного сектора экономики России идет в разрез с мировой тенденцией энергоэффективности и энергосбережения, ориентированной на снижение выбросов парниковых газов в атмосферу и способствующей техническому прогрессу, а также оптимальному использованию имеющихся энергетических ресурсов. Конечно, в ближайшие годы приоритет углеводородного топлива над прочими видами получения энергии вряд ли будет поколеблен, но, каким будет соотношение этих энергоисточников спустя несколько десятилетий, неизвестно. Как

следствие, разрабатываются (и регулярно корректируются) многочисленные сценарии развития мировой экономики до середины и конца XXI в., на основе которых делаются выводы о целесообразности введения тех или иных мер. Увы, вступая на зыбкую почву предположений, мы рискуем просмотреть или недоучесть те или иные важные (в данном случае — экономические) процессы (как это было, например, во второй половине 1990-х при подготовке Киотского протокола, когда Китай не рассматривался в числе серьезных игроков на экономическом поприще, но за 20 лет совершил феноменальный прорыв, став одной из ведущих мировых держав). А это заметно снижает и качество сценариев, и обоснованность сделанных на их базе заключений. Тем не менее откладывание решения проблемы «до лучших времен» чревато дополнительными затратами: хорошо известно, что «профилактика заболевания обходится дешевле его лечения». Придется смириться до некоторой степени и с туманными перспективами окупаемости финансовых вложений. Рис. 32 иллюстрирует эту мысль: на первых порах инвестиции в экологически чистые технологии значительно выше, чем в традиционные, и для живущих сегодняшним днем они совершенно непривлекательны. Однако... в одной из песен американских индейцев есть такие слова: «Мы не получили землю в наследство от предков, мы взяли ее в займы у наших детей». Если проникнуться этим смыслом, не дающие немедленной отдачи затраты обретают вполне конкретное значение. А оправдываться вложения начнут лишь с того момента, когда себестоимость чистых технологий снизится и станет меньше, чем «топливозатратных».

Обратите внимание на условность рис. 32. На нем не указаны ни сроки, когда черная и серая линии пересекутся, ни единицы измерения цены (затрат). Неопределенность

в сроках достаточно очевидна: они зависят и от текущего положения дел, и от сценария развития экономики. Что же касается цен, они тоже вносят свой вклад в увеличение неопределенности: привычная основная мировая валюта — доллар США — в последние годы не может похвастаться стабильностью (например, ущерб, нанесенный ураганом Камилла (1969 г.), оценивается в 1,42 млрд долларов в ценах 1969 г., в 9,14 и 8,5 млрд долларов в ценах 2005 и 2010 гг. соответственно). Поэтому часто затраты рассчитываются в долях мирового валового внутреннего продукта (ВВП).

Чтобы осознать масштабы финансовых вложений, необходимых для смягчения последствий потепления климата, давайте обратимся к одному, но очень важному для нашей страны примеру. Согласно модельным оценкам, подтверждаемым

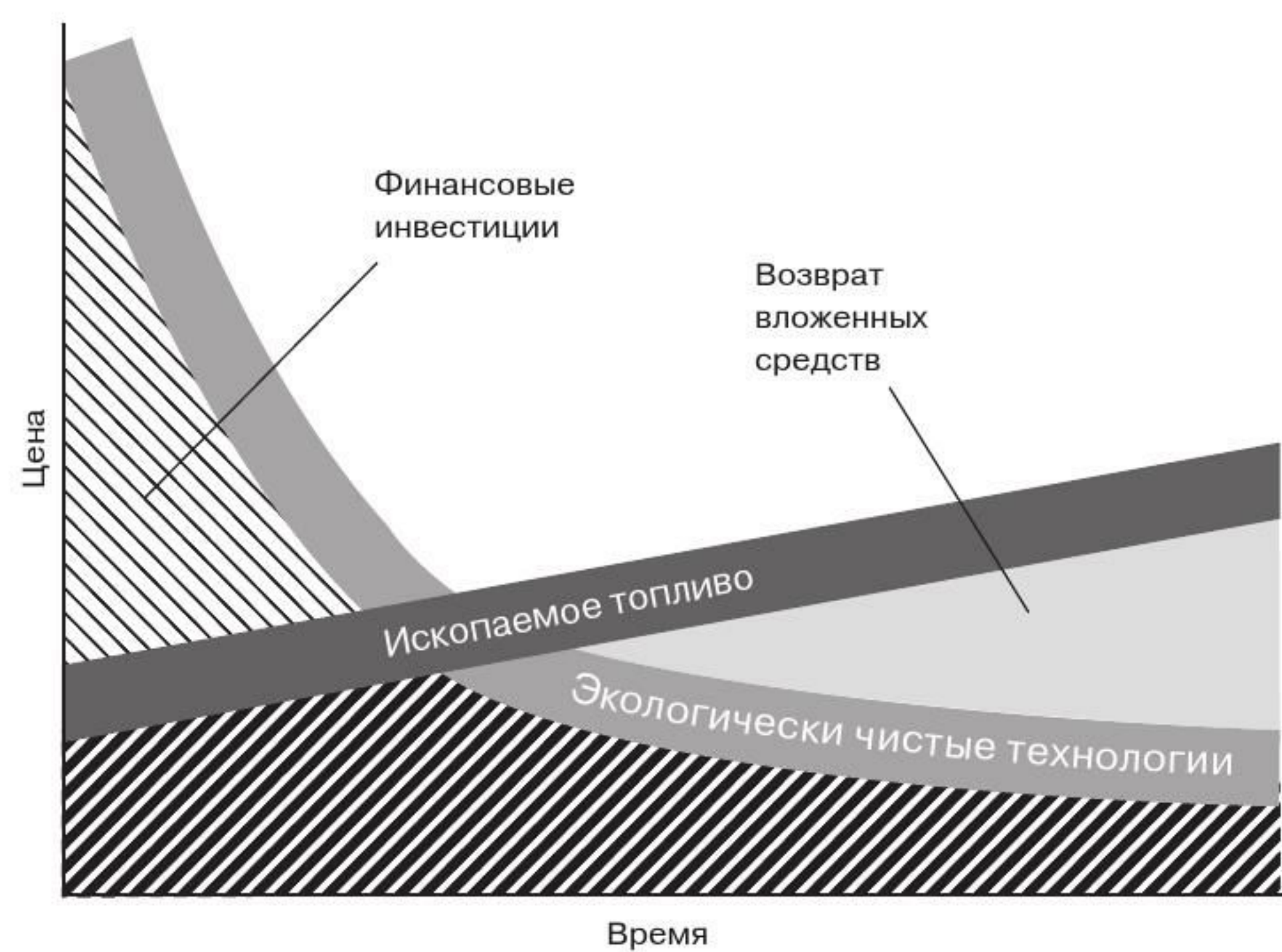


Рис. 32. Эволюции необходимых затрат при продолжении использования природного топлива и при внедрении экологически чистых технологий

данными измерений, существенные изменения климата российской Арктики уже происходят и будут продолжаться в будущем. Освобождение ото льда прибрежных вод в арктических морях Евразии, сначала в теплое полугодие, а затем и в течение всего года, делает актуальным полноценное хозяйственное освоение Северного морского пути и побережья этих морей, их природных богатств, прежде всего полезных ископаемых. Сюда же необходимо добавить перестройку всей системы хозяйствования российского Севера, развитие там новой инфраструктуры, зачастую в условиях таяния вечной мерзлоты. А это, согласитесь, не прожект создания Нью-Васюков, по масштабности это соизмеримо с достижениями великих советских строек! С учетом разницы в способах достижения цели — современных экономических против политико-принудительных — реализация плана освоения Севера может потребовать мобилизации всех имеющихся сил и средств. А окупаемости вложенных инвестиций, очевидно, придется подождать.

В свете ожидаемого роста засушливости в основных зернопроизводящих областях стран, расположенных в средних широтах Северного полушария, вероятно, произойдет вынужденное расширение таких областей на север, где нет пока ни пригодных почв, ни всей необходимой инфраструктуры. По той же причине вероятны изменения в структуре лесного хозяйства — в частности, расширение ареала теплолюбивых деревьев и кустарников. И снова необходимы капиталовложения...



Однако самые мрачные перспективы некоторые эксперты связывают с прогнозируемым дефицитом водных ресурсов в регионах низких и средних север-

ных широт с большой численностью населения, миграция которого на север чревата не только экономическими, но и военными конфликтами. В этой связи доводилось встречать такую оценку — поток экологических беженцев в Россию к 2050 г. может достигнуть 1 млрд человек.

И все же с перечисленными последствиями климатических изменений люди могут столкнуться только во второй половине нынешнего столетия (хотя начинать к ним готовиться нужно загодя). Нас же, естественно, больше интересует то, что имеет место сейчас и произойдет в обозримом будущем.



На ближайшее время общие размеры ущерба от изменений климата и затрат на адаптационные меры оцениваются от нескольких десятых до 1–3% мирового ВВП, для России эта доля несколько больше¹.

Одним из основных направлений смягчения существующего положения дел является «зеленая экономика» — разработка, производство и эксплуатация технологий и оборудования для уменьшения и контроля над выбросами парниковых газов и других загрязняющих природную среду веществ. В странах «Большой двадцатки» рост производства оборудования для «зеленой» экономики в 2004–2010 гг. оценивается в сумму от 1,1 до 7,8 млрд долларов (около 2–4% от мирового ВВП). В 2009 г. «зеленая» экономика произвела продукции и услуг на 2 трлн долларов (~2,7% мирового ВВП), из которых

¹ Порфирьев Б. Н. Изменения климата и экономика. Вестник РАН. Т. 81. № 3. 2011. С. 222–236.

516 млрд долларов (или 3,7% национального ВВП) приходится на США. Прирост инвестиций в развитие «зеленой» экономики в мире в период 2004–2010 гг. измеряется 30–48% (в кризисном 2009 г. — лишь 4%). Рост этого сектора отмечен не только в западных странах, но и в Китае, обошедшем в 2009 г. США по объему вложений в экологически чистую энергетику (34,6 млрд долларов против американских 18,6 млрд). В мире к 2020 г. можно ожидать удвоения рынка экологически чистых технологий с их вкладом в мировой ВВП порядка 6–7%, а также постоянного увеличения его удельного веса в дальнейшем.

Набирает ход торговля квотами на выбросы CO₂ (о чем уже шла речь выше): если в 2007 г. объем «мирового углеродного рынка» составлял 63 млрд долларов, то в 2009 г. — уже 144 млрд, а в 2020 г., по ожиданиям экспертов, он достигнет отметки в один триллион долларов.

Вернемся, однако, к нашей «шестой части суши»¹. Похоже, что бытующее сегодня мнение, будто экономических плюсов от глобального потепления для «холодной» России окажется больше, чем минусов, не имеет под собой достаточных оснований, а значит, сэкономить на нем едва ли удастся. Так, например, снижение расходов на отопление (а это, между прочим, предположительно в среднем 200–250 млрд рублей в год) вполне способен «съесть» ожидаемый и уже наблюдаемый рост «волн тепла», порождающий повышенный спрос на энергозатратные кондиционеры (сегодня для уменьшения температуры в доме на 1 °C требуется в несколько раз больше

¹ Если площадь СССР составляла 22,4 млн км² при общей площади суши 149 млн км² (15%, т. е. примерно $\frac{1}{6}$), то площадь России — 17,1 млн км² составляет 17,1% (тоже около $\frac{1}{6}$) от площади суши Северного полушария (100 млн км²). Это дает основание именовать Россию так же, как и распавшийся СССР...

энергии, чем для ее повышения на тот же 1 °С). Для сравнения: суммарный ущерб, нанесенный экономике знойным летом 2010 г. оценивается в 500 млрд рублей, что составляет 1,2% российского ВВП.

А вот уровень исполнения нашей страной обязательств по сокращению выбросов парниковых газов на сегодняшний день не дает поводов для беспокойства. По данным Российской гидрометеорологической службы, в 1990–2007 гг. суммарный баланс «поглощение лесами CO₂ минус его эмиссия» был равен приблизительно 72 Мт/год (что составляет около 6 млрд долларов российских субсидий мировой экономике). Выше мы отмечали, что вследствие спада российской экономики в 1990-е, наша страна существенно снизила выбросы CO₂. Российской Федерации засчитаны 33 Мт сокращений выбросов углерода в результате его поглощения лесами (122 Мт эквивалента CO₂). Поэтому на «углеродном рынке» на середину 2010 г. Россия имела квоту на выброс 100 Мт эквивалента CO₂ — около половины общемирового объема разрешений (приблизительно 3 млрд долларов в современных ценах). В это же время, по итогам первого российского конкурса, были утверждены первые 15 проектов на продажу квот на выбросы CO₂ с общей суммой 570 млн долларов. Однако деньги за парниковые газы РФ не только получает, но их приходится и отдавать. Например, российские авиакомпании, выполняющие рейсы в страны ЕС, должны оплачивать 15% совокупных выбросов парниковых газов. По оценке «Аэрофлота», уже в 2012 г. придется заплатить примерно 40 млн евро, а к 2025 г. этот платеж может возрасти до 800 млн евро. Нетрудно догадаться, как это отразится на стоимости авиабилетов.

Причина многих автомобильных аварий, согласно официальным протоколам, — неспособность водителя справиться

со скоростью. Тысячелетиями природа Земли, большинство представителей ее флоры и фауны успевали приспособиться к постоянно происходящим *медленным* изменениям климата. Но вот в последние десятилетия темп этих изменений стремительно возрос, и такая скорость оказалась биосфере Земли не под силу. Помочь ей адаптироваться к столь быстро меняющейся ситуации и помочь тем самым самому себе может только человек, во многом эту ситуацию и породивший. И он обязан это сделать: удовольствие жить если не в высококомфортном, то хотя бы в приемлемом климате того стоит. А за удовольствие, как известно, надо платить!



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наше путешествие в мир климата близится к завершению. Мы стремились хотя бы немного приоткрыть перед вами дверь в этот необъятный и такой разнообразный мир. Мир, о котором накоплено немало знаний, но в большей мере остающийся для нас неизведанным. Наши знания о климате добыты благодаря усилиям огромного количества людей, проводивших измерения в разных уголках нашей планеты, включая тундру и сельву, безбрежный океан и Антарктиду, изобретавших приборы и создававших теоретические основы климатологии. Воздадим им должное! И отметим — пришло время активно использовать имеющиеся знания.

Около 40 лет назад вышла в свет научная монография выдающегося российского климатолога М. И. Будыко с весьма символичным названием: «Климат и жизнь». Сегодня человечество подошло к той черте (и, похоже, уже переступило ее), за которой не только климат определяет жизнь человека, но и человек осязаемо влияет на климат. А это означает, что все наши действия должны соответствовать основополагающему медицинскому принципу «не навреди».

Основная стратегия нашего времени — устойчивое развитие, определяемое Всемирной комиссией по окружающей среде и развитию, как «развитие, которое удовлетворяет потребности нынешнего поколения, не подрывая возможности будущих поколений удовлетворять их соответствующие потребности». Наши оптимальные с позиции современных знаний действия в условиях меняющегося климата можно считать одним из основных факторов, определяющих устойчивое развитие. Но как в условиях конфликта личных амбиций и национальных экономических интересов отыскать этот оптимальный путь? Кажется, у итальянцев есть поговорка: «Нет попутного ветра для моряка, который не знает, куда плыть». К счастью, ведущие мировые державы, осознав надвигающуюся угрозу, выбрали вектор движения, готовы пойти на определенные самоограничения и сесть за стол переговоров. Что тем не менее не исключает попыток одних стран «загрести жар руками» других. Поэтому те, кому предстоит принимать судьбоносные решения, должны обладать всей объективной текущей информацией и надежными прогнозами на ближайшее будущее — главными аргументами при поисках международного компромисса. А весомость этих аргументов всецело зависит от качества всестороннего мониторинга и климатического моделирования. В полной ли мере это осознают сильные мира сего?

Проблеме изменения климата Земли не грозит быстрое решение. Она останется среди важнейших проблем еще на долгие годы. Грядут дальнейшие исследования, а как следствие, новые открытия и повышенное внимание прессы. Давайте вместе следить за этим увлекательным процессом. Уверены, будет интересно!



СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Астеносфера — верхний пластичный слой верхней мантии планеты (пример: астеносфера Земли). А. выделяется по понижению скоростей сейсмических волн. Выше А. залегает **литосфера** — твердая оболочка планеты. На Земле кровля А. лежит на глубинах 80–100 км (под материками) и 50–70 км (иногда менее) (под океанами). Нижняя граница земной А. — нерезкая, на глубине 250–300 км. Выделяется (по геофизическим данным) как слой пониженной скорости поперечных сейсмических волн и повышенной электропроводности.

Альбедо — доля солнечной радиации, отражаемая поверхностью или предметом, часто выражаемая в процентах. Поверхности, покрытые снегом, характеризуются высоким А.; А. почв варьируется от высокого до низкого; поверхности, покрытые растительностью, и океаны имеют низкое А. Планетарное А. Земли варьируется, главным образом, в результате изменения облачности, снежного и ледового покрова, листовой поверхности и растительного покрова.

Антициклон — область повышенного атмосферного давления с циркуляцией вокруг центра по часовой стрелке.

Антропогенный — являющийся результатом или продуктом деятельности человека.

Ассимиляция данных — процедура, в которой объединяются и обрабатываются данные из разных источников и обычно разного типа, для получения комплекта взаимосогласованных в пространстве и времени данных.

Атмосфера — газовая оболочка, окружающая Землю. Сухая А. состоит практически целиком из азота (78,1%), кислорода (20,9%) и микропримесей ряда газов, таких как аргон (0,93%), гелий (0,0005%), а также радиационно-активных парниковых газов, в том числе углекислого газа (0,035%) и озона (0,00004%). Кроме того, А. содержит водяной пар, являющийся парниковым газом, количество которого варьируется в широких пределах, но, как правило, составляет около 1% воздуха. В состав А. также входят облака и аэрозоли.

Аэрозоли — совокупность находящихся в воздухе во взвешенном состоянии твердых или жидких частиц, размер которых обычно составляет от 0,01 до 10 мкм ($1\text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6}\text{ м}$) и которые сохраняются в атмосфере минимум несколько часов. А. могут быть как естественного, так и антропогенного происхождения. Они способны воздействовать на климат несколькими путями: *непосредственно* — путем рассеивания и поглощения излучения и *косвенно* — действуя в качестве облачных ядер конденсации либо путем изменения оптических свойств и времени жизни облаков.

Биомасса — общая масса живых организмов на данной площади или в данном объеме; в мертвую Б. часто включают недавно образовавшиеся мертвые растительные остатки. Количество Б. выражается в сухом весе или через энергоемкость, т. е. содержание углерода или азота.

Биосфера (суши и морская) — часть системы Земли, включающая все экосистемы и живые организмы в атмосфере, на суше (Б. суши) или в океане (морская Б.), в том числе производное мертвое органическое вещество, например подстилку, почвенный и океанический органический материал.

Валовой внутренний продукт (ВВП) — стоимостное выражение всех товаров и услуг, произведенных в данной стране.

Вечная мерзлота — грунт (почва или порода с включениями льда и органических веществ), который сохраняет температуру 0 °С или ниже в течение минимум двух лет подряд.

Галоидоуглеводороды — органические газы, в которых атомы водорода заменены на атомы галогенов: фтора, хлора, брома и йода.

Гидроксил, гидроксильная группа — одновалентная группа ОН, входящая в молекулы многих химических соединений, например воды (HОН), щелочей (NaОН) и др.

Гидросфера — компонент климатической системы, состоящий из поверхностных и подземных вод, таких как океаны, моря, реки, пресноводные озера, подземные воды и т. д.

Доиндустриальный период — период до начала широкого распространения промышленного производства в ряде стран Европы и Северной Америки; отсчитывается от середины XIX века (в некоторых отчетах МГЭИК его отсчет ведется от середины XVIII века).

Дрейф спутниковых приборов — изменение показаний прибора во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов.

Ископаемые виды топлива — углеродосодержащие виды топлива, добываемые из месторождений ископаемых углеводородов, включая уголь, торф, нефть и природный газ.

Катализаторы — вещества, изменяющие скорость химических реакций посредством многократного промежуточного химического взаимодействия с участниками реакций и не входящие в состав конечных продуктов.

Керн льда — ледяной цилиндр, получаемый при бурении из ледника или ледового щита.

Киотский протокол — Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) был принят на Третьей сессии Конференции сторон РКИК ООН в 1997 году в Киото. Он содержит подлежащие соблюдению юридические обязательства, в дополнение к тем, которые содержатся в РКИК ООН. Страны, включенные в Приложение В к протоколу (большинство стран — членов Организации экономического сотрудничества и развития и страны с переходной экономикой), согласились сокра-

тить свои антропогенные выбросы парниковых газов (двуокиси углерода, метана, оксида азота (I), галоидоуглеводородов, и шестифтористой серы) не менее чем на 5% ниже уровней 1990 г. в течение периода действия обязательств с 2008 по 2012 г. К. п. вступил в силу 16 февраля 2005 г.

Климат — совокупность всех погодных условий, наблюдавшихся на конкретной территории за некоторый продолжительный период времени. По определению Всемирной метеорологической организации, таким «классическим» периодом считается временной промежуток продолжительностью в 30 лет. В обиходе под климатом иногда понимают «средний режим погоды», т. е. сочетание метеорологических параметров (температуры, осадков, скорости и направления ветра), наиболее часто имеющее место в данной местности.

Климатическая модель — численное описание **климатической системы** на основе физических, химических и биологических свойств ее компонентов, их взаимодействий и процессов обратной связи, причем с учетом всех или некоторых ее известных свойств. Климатическая система может быть описана с помощью моделей различной сложности, т. е. для каждого компонента или комбинации компонентов можно определить спектр или иерархию моделей, отличающихся друг от друга в таких аспектах, как число пространственных измерений, степень точности описания физических, химических и биологических процессов или уровень эмпирической параметризации. Наблюдается тенденция к усложнению моделей, включению в них интерактивных, в том числе химических и биологических связей. К. м. применяются в качестве инструмента исследования и описания климата, а также для

оперативных целей, в том числе для месячных, сезонных и межгодовых предсказаний климата.

Климатическая система — совокупность пяти элементов: **атмосферы, гидросферы, поверхности суши, криосферы, биосферы**. К. с. изменяется во времени под воздействием собственной внутренней динамики и в силу внешних воздействий, например извержений вулканов, колебаний режима солнечной радиации и антропогенных воздействий, таких как изменение состава атмосферы и изменения в землепользовании.

Климатоформирующие факторы — причины и условия образования **климата**.

Коэффициент корреляции — числовая характеристика, показывающая насколько статистическая связь между величинами близка к линейной.

Криосфера — компонент **климатической системы**, состоящий из всего снега, льда и вечной мерзлоты на поверхности суши и океана и под нею.

Ледниковые периоды — периоды похолодания **климата**, сопровождающиеся формированием континентальных ледниковых покровов, являются повторяющимися событиями в истории Земли.

Ледовый щит — пласт материкового льда, толщина которого достаточна для покрытия большей части рельефа местности. В современном мире есть только три больших Л. щ.:

один в Гренландии и два в Антарктиде — Восточный и Западный Антарктические ледовые щиты, разделенные Трансантарктическими горами. В ледниковые периоды были и другие Л. щ.

Литосфера — верхняя твердая оболочка Земли, имеющая большую прочность и переходящая без определенной резкой границы в нижележащую **астеносферу**.

Межледниковые периоды — теплые периоды между оледенениями. М. п., датируемый приблизительно от 129 000 до 116 000 лет назад, называют *последним* М. п.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) — организация, основанная в 1988 г. Всемирной метеорологической организацией и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) для оценки риска глобального изменения **климата**, вызванного техногенными факторами (действия человека). Лауреат Нобелевской премии мира 2007 г.

Мезосфера — слой **атмосферы** на высотах от 40–50 до 80–90 км. Характеризуется повышением температуры с высотой; максимум температуры (порядка 0 °С) расположен на высоте около 50 км, после чего температура начинает убывать до –70 °С или –80 °С. Такое понижение температуры связано с энергичным поглощением солнечной радиации (излучения) **озоном**. Термин принят Географическим и геофизическим союзом в 1951 г.

Газовый состав М., как и расположенных ниже атмосферных слоев, постоянен и содержит около 80% азота и 20% кислорода.

Метан (CH_4) — один из парниковых газов, выбросы которых подлежат сокращению в соответствии с **Киотским протоколом**. Основной компонент природного газа; связан со всеми видами углеводородного топлива, животноводством и сельским хозяйством.

Метеоприборы — измерительные приборы, употребляемые для определения и регистрации числовых значений **метеорологических элементов**.

Метеорологическая площадка — площадка метеорологической станции под открытым небом на открытом и типичном для окружающей местности участке для размещения установок с метеорологическими приборами. М. П. должна быть удалена от крупных препятствий и водных объектов: от невысоких отдельных препятствий — на расстояние не меньше 10-кратной высоты этих препятствий; от значительных по протяженности препятствий (группы зданий, лес) — на расстояние не менее 20-кратной их высоты. М. П. должна быть квадратной формы размером 26×26 м (или более) с направлением сторон с севера на юг и с востока на запад.

Метеорологические элементы — характеристики состояния **атмосферы** и происходящих в ней процессов.

Метеоспутники — искусственные спутники Земли, созданные для получения из космоса метеорологических данных о Земле, которые используются для прогноза **погоды**.

Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой — международный договор, разработанный

в целях защиты озонового слоя с помощью снятия с производства некоторых химических веществ, его разрушающих. Договор был подготовлен к подписанию 16 сентября 1987 г. и вступил в силу 1 января 1989 г. С тех пор протокол подвергался пересмотру семь раз: в 1990 (Лондон), 1991 (Найроби), 1992 (Копенгаген), 1993 (Бангкок), 1995 (Вена), 1997 (Монреаль) и 1999 (Пекин). В случае если страны, подписавшие протокол, будут его придерживаться и в будущем, то возможно восстановление озонового слоя к 2050 г.

Озон — атмосферный газ, молекула которого состоит из трех атомов кислорода. В тропосфере он образуется как естественным путем, так и в результате фотохимических реакций с участием газов, являющихся продуктом деятельности человека (смог). Тропосферный О. действует как **парниковый газ**. В **стратосфере** О. формируется в результате разрушения молекулярного кислорода солнечным ультрафиолетовым излучением и последующей реакции с участием молекул и атомов кислорода. Стратосферный О. защищает Землю от жесткой ультрафиолетовой радиации с длиной волны 200–320 нм и играет доминирующую роль в радиационном балансе стратосферы. Его концентрация достигает наибольшего значения в средней стратосфере.

Общее содержание озона (ОСО) — суммарное количество молекул **озона** в атмосферном столбе с площадью основания 1 см². В качестве единицы измерения ОСО используют *единицу Добсона* (1 е.Д. = $2,7 \cdot 10^{16}$ молекул озона/см²).

Оксид азота(I) (N₂O) — один из парниковых газов, выбросы которых подлежат сокращению в соответствии с **Киот-**

ским протоколом. Главным антропогенным источником O_3 а.(I) является сельское хозяйство (почва и уборка, хранение, использование навоза), но значительная доля приходится также на очистку сточных вод, сжигание ископаемых видов топлива и промышленные химические процессы. O_3 а.(I) образуется также естественным путем в результате жизнедеятельности различных почвенных и водных организмов, в частности почвенных микроорганизмов влажных тропических лесов.

pH — безразмерный показатель кислотности любого раствора. Чистая вода имеет pH равный 7, кислотные растворы — меньше 7, щелочные растворы — больше 7. Измеряется по десятичной логарифмической шкале. Таким образом, снижение pH на одну единицу соответствует десятикратному повышению кислотности.

Палеоклимат — климат в периоды, предшествующие созданию измерительных приборов, включая исторические и геологические эпохи, по которым имеются только косвенные климатические данные.

Парниковый газ — к П. г. относятся газовые составляющие **атмосферы** как естественного, так и антропогенного происхождения, которые поглощают и излучают волны определенной длины в диапазоне теплового инфракрасного излучения, испускаемого поверхностью Земли, самой атмосферой и облаками. Это свойство порождает **парниковый эффект**. Основные П. г. в атмосфере Земли — водяной пар (H_2O), **углекислый газ** (CO_2), **оксид азота (I)** (N_2O), **метан** (CH_4) и **озон** (O_3). Кроме того, в атмосфере содержится еще целый ряд П. г.

полностью антропогенного происхождения, таких как **галогенуглеводороды**, в том числе хлор- и бромсодержащие вещества, подпадающие под действие **Монреальского протокола**.

Парниковый эффект в атмосфере — нагрев внутренних слоев **атмосферы**, обусловленный прозрачностью атмосферы для основной части излучения Солнца (в оптическом диапазоне) и поглощением атмосферой и облаками основной (инфракрасной) части теплового излучения поверхности планеты, нагретой Солнцем. В атмосфере Земли излучение поглощается молекулами **водяного пара, углекислого газа, метана, озона** и др. П. э. повышает среднюю температуру планеты, смягчает различия между дневными и ночными температурами. В результате антропогенных воздействий содержание CO_2 (и других газов, поглощающих в инфракрасном диапазоне) в атмосфере Земли постепенно возрастает.

Погода — совокупность значений метеорологических элементов и атмосферных явлений, наблюдаемых в определенный момент времени в той или иной точке пространства. Понятие «П.» относится к текущему состоянию атмосферы, в противоположность понятию «**климат**», которое определяет среднее состояние атмосферы за длительный период времени. Погодные явления протекают в **тропосфере** и в **гидросфере**. Выделяют периодические и непериодические изменения П.. *Периодические изменения П.* зависят от суточного и годового вращения Земли, *непериодические* обусловлены переносом воздушных масс. Они нарушают нормальный ход метеорологических величин (температура, атмосферное давление, влажность воздуха и т. д.). Несовпадения фазы перио-

дических изменений с характером непериодических изменений приводят к наиболее резким переменам П.

Потенциал глобального потепления (ПГП) — показатель, позволяющий сравнить вклады в разогрев **атмосферы** одинаковой массой какого-либо газа (химического соединения) и молекул CO_2 . П. г. п. углекислого газа считается равным 1. Каждому газу соответствуют три значения П. г. п., соответствующие периодам в 20, 100 и 500 лет. Это связано с тем, что время пребывания газов в атмосфере сильно различается (от минут до столетий), поэтому для оценки их вкладов в кратко-, средне- и долгосрочной перспективе, используют три значения ПГП.

Радиационный форсинг — изменение чистого (нисходящий минус восходящий) потока излучения на единицу площади (выражается в Вт/м^2) на уровне **тропопаузы** в результате воздействующего на климат внешнего фактора. Р. ф. рассчитывается при фиксированных (невозмущенных) значениях всех характеристик **тропосферы**, причем после того, как **стратосферные** температуры, если они возмущены, восстановятся до радиационно-динамического равновесия. Р. ф. называется *мгновенным*, если не учитывается изменение стратосферной температуры.

Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) — конвенция, принятая 9 мая 1992 г. в Нью-Йорке и подписанная в ходе Всемирной встречи на высшем уровне «Планета Земля» в Рио-де-Жанейро в 1992 г. Ее конечная цель заключается в «стабилизации концентраций парниковых газов в атмосфере на таком

уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему». Она содержит обязательства для всех сторон конвенции. В соответствии с конвенцией, стороны, включенные в Приложение 1 (все страны, являющиеся членами Организации Экономического Сотрудничества и Развития на 1990 г., и страны с переходной экономикой), стремятся к 2000 году вернуться к тем уровням выбросов парниковых газов, не контролируемых **Монреальским протоколом**, которые существовали в 1990 году. Конвенция вступила в силу в марте 1994 г.

Солнечная активность — общее название ряда процессов, происходящих на поверхности Солнца и в его недрах. Солнце демонстрирует периоды высокой активности, проявляющейся в увеличении количества **солнечных пятен**, а также мощности излучения, магнитной активности и испускании частиц высокой энергии.

Солнечная радиация — электромагнитное излучение, испускаемое Солнцем. Его также называют *коротковолновой радиацией*. С. р. характеризуется четким диапазоном длин волн (*спектром*), обусловленным температурой поверхности Солнца.

Солнечные пятна — темные области на Солнце, температура которых ниже примерно на 1500 К, чем окружающих участков фотосферы — светящейся оболочки Солнца. Наблюдаются на диске Солнца (с помощью оптических приборов, а в случае крупных пятен — и невооруженным глазом) в виде темных пятен. С. п. являются областями выхода в фотосферу сильных магнитных полей. Количество пятен на Солнце (и свя-

занное с ним число Вольфа) — один из главных показателей солнечной магнитной активности.

Столб атмосферы единичный — столб воздуха, проходящий через всю атмосферу, имеющий площадь поперечного сечения, равную единице.

Стратосфера — атмосферный слой между **тропосферой** и **мезосферой**, от **тропопаузы** и до высоты 50–55 км.

Сценарий выбросов — описание будущего изменения режима выбросов веществ, которые потенциально являются радиационно-активными (например, парниковых газов, аэрозолей), на основе взаимосогласованного набора допущений в отношении движущих сил (например, демографического и социально-экономического развития, технического прогресса) и их ключевых взаимосвязей.

Тепловое инфракрасное излучение — излучение, испускаемое поверхностью Земли, **атмосферой** и облаками. Оно также известно под названием *земного* или *длинноволнового излучения*: его следует отличать от ближней части диапазона инфракрасного излучения, являющегося частью солнечного спектра. Т. и. и. характеризуется четко определенным диапазоном длин волн (спектром), которые имеют большую длину, чем волны красного цвета видимой части спектра.

Тренд — постепенное изменение случайной величины в течение всего рассматриваемого периода времени, полученное путем исключения короткопериодных флуктуаций.

Тропопауза — переходный слой между **тропосферой** и **стратосферой**. Высота Т. в арктических широтах — 8–10 км, в умеренных — 10–12 км, над экватором — 16–18 км.

Тропосфера — нижняя часть **атмосферы**, особенно подверженная воздействиям со стороны земной поверхности, характеризующаяся убыванием температуры с высотой (в среднем 6,5 °С/км).

Углекислый газ (CO₂) — газ естественного происхождения, а также побочный продукт сгорания ископаемых видов топлива из природных месторождений углеводородов, таких как нефть, газ и уголь, сгорания биомассы и изменений в землепользовании, а также других промышленных процессов. Он является основным **антропогенным парниковым газом**, влияющим на радиационный баланс Земли. Это — эталонный газ, по отношению к которому измеряются другие парниковые газы, поэтому его **потенциал глобального потепления** равен единице.

Фотосинтез — процесс образования органических веществ (углеводов) зелеными растениями и некоторыми бактериями из углекислого газа, содержащегося в воздухе (или бикарбоната в воде), и воды с использованием энергии солнечного света.

Фреоны — см. Галогеноуглеводороды.

Хлорфторуглероды (ХФУ) — см. Галогеноуглеводороды.

Циклон — атмосферное возмущение с пониженным давлением воздуха и с **циркуляцией** вокруг центра против часовой стрелки.

Циркуляция — круговорот, система движений с замкнутыми или частично замкнутыми линиями тока.

Эквивалентный выброс CO_2 — объем выброса CO_2 , который вызвал бы такое же комплексное радиационное воздействие за данный период времени, как и объем выброса какого-либо долгоживущего **парникового газа** или смеси парниковых газов. Э. в. CO_2 рассчитывают путем умножения объема выброса какого-либо парникового газа на его **потенциал глобального потепления** за данный период времени.

Эмиссия — выбросы газовых молекул или аэрозольных частиц в **атмосферу**.



СОДЕРЖАНИЕ

	К читателю	3
Глава первая	ГОВОРИМ «КЛИМАТ» — ПОДРАЗУМЕВАЕМ «ПОГОДА» Погода и климат: в чем разница между ними	7
Глава вторая	СИСТЕМА, БЕЗ КОТОРОЙ НАМ НЕ ЖИТЬ Климатическая система Земли.	23
Глава третья	НА ЗЕМЛЕ, В НЕБЕСАХ И НА МОРЕ Что происходит внутри климатической системы	32
	Океан	32
	Атмосфера	45
	Суша и ледовый покров	49
Глава четвертая	СОЛНЦЕ — «НАШЕ ВСЕ» Воздействие на климатическую систему Земли извне	53
Глава пятая	ЗАДАЧА СО МНОГИМИ НЕИЗВЕСТНЫМИ Что мы знаем о климате далекого прошлого?	67

Глава шестая	ЗЕМЛЯ В ЛЕДЯНОМ ПЛЕНУ Циклы Миланковича	72
Глава седьмая	ЕСЛИ НЕ СОЛНЦЕ, ТО ЧТО? Причины современных изменений климата.....	79
	Под одним «одеялом»: парниковый эффект и вызывающие его газы.....	80
	Что имеем, не храним: альбедо.....	128
	Две стороны одной медали: роль атмосферных аэрозолей в формировании климата	134
	«Яблоко раздора»: полемика вокруг климата	138
Глава восьмая	ДОМ СТРОИТСЯ ПО КИРПИЧИКУ Измерения — основа климатологии	149
Глава девятая	ГАДАНИЕ ... ПО НАУКЕ Модельные исследования климата	167
Глава десятая	ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР ПРЕДПОЛОЖЕНИЙ Климат и экономика	191
Глава одиннадцатая	КЛИМАТ ДИКТУЕТ СВОИ УСЛОВИЯ Климат в повседневной жизни человека	205
Глава двенадцатая	ПОЛИТИКИ — КЛИМАТУ Международные решения и перспективы	218

Глава тринадцатая	ФУНДАМЕНТ БУДУЩИХ СВЕРШЕНИЙ Что можно сделать для благоприятных изменений климата 236
Глава четырнадцатая	ЗА ВСЕ ПРИХОДИТСЯ ПЛАТИТЬ Экономические аспекты борьбы с глобальным потеплением..... 254
	Заключение 263
	Словарь терминов..... 265

